



Universitat Autònoma de Barcelona

Centre d'Estudis d'Història de les Ciències (CEHIC)

Descobriments experimentals de les partícules estranyes i construcció teòrica del concepte d'estranyesa (1947-1957)

Francesca Bresolí Catà

Departament de Física, Facultat de Ciències

Universitat Autònoma de Barcelona

2006

Memòria presentada com a Tesi Doctoral
del programa de doctorat d'Història de les Ciències
per a optar al grau de Doctor en Ciències Físiques

Director:

Dr. Manuel García Doncel

Índex

Pròleg	7
PART I. PRIMERES EVIDÈNCIES (1947-1950)	19
1 Els primers indicis	21
1.1 Un descobriment oficiós? (1944–1947)	22
1.1.1 École Polytechnique: primera evidència i refutació de Bethe	22
1.1.2 Més evidències a l'École Polytechnique	27
1.1.3 Els varitrons desprestigiats	29
1.2 El descobriment oficial (1947–1950)	32
1.2.1 Manchester: de les ruixades penetrants a les traces forçades	33
1.2.2 Reaccions a les traces forçades: continua l'expectativa (1947)	38
1.2.3 Bristol: millores en emulsions. Del π - μ al “ τ oficial” (1949)	42
1.2.4 Caltech: acceptació definitiva i estatus de descobriment oficial a Rochester i Butler	53
1.2.5 Supremacia de les V genèriques (1950)	57
2 Primers intents teòrics al marge de la simetria d'isospín	61
2.1 La problemàtica de les teories mesòniques i la distinció π - μ	62
2.1.1 Origen de les teories de mesons	62
2.1.2 La distinció π - μ	66
2.1.3 Les noves partícules i les velles teories	68
2.1.4 Comença la jerarquia de les interaccions	74
2.2 Hipòtesis fenomenològiques per a les propietats experimentals aparentment irreconciliables	78
2.2.1 Les propietats irreconciliables	78
2.2.2 <i>Soryushiron Kenkyu: Symposium on elementary particles at Tokyo, July 7, 1951</i>	81
2.2.3 L'origen de la hipòtesi de la producció associada	85

2.2.4	Formalització de la <i>even-odd rule</i> : poder sintètic i divulgatiu d'Abraham Pais. I	89
2.2.5	Altres hipòtesis alternatives davant les propietats irreconciliables	95
PART II. 1950–1953: TAXONOMIA DEL ZOO DE PARTÍCULES		101
3	La proliferació i sistematització experimental	103
3.1	Les partícules V	104
3.1.1	Primer intent de classificació: Manchester al Pic-du-Midi	104
3.1.2	Complexitat de la classificació: V arreu del món	115
3.2	Els mesons pesats	128
3.2.1	Bristol (1951): τ, κ, χ	128
3.2.2	Les primeres partícules S a la cambra multilàmines del MIT	134
3.2.3	Descoberta dels hiperfragments	140
3.3	El congrés de Bagnères	142
4	L'aplicació de la simetria d'isospín	163
4.1	L'experiment a Chicago: la revalorització del paper d'isospín amb el descobriment de la primera ressonància	164
4.2	Primeres assignacions d'isospín a les noves partícules	168
4.2.1	D. C. Peaslee: entre isospín i barrera de potencial	169
4.2.2	Formalització de la producció associada: poder sintètic i divulgatiu d'Abraham Pais. II	171
4.3	L'assignació correcta d'isospín	177
4.3.1	Kazuhiko Nishijima	177
4.3.2	Murray Gell-Mann	185
PART III. 1953–1957: DARRERS DESCOBRIMENTS EN RAIGS CÒSMICS I PRIMERS EN ACCELERADORS EN EL MARC DEL MODEL D'ESTRANYESA		193
5	Darrers descobriments i prediccions confirmades	195
5.1	Millores en les tècniques i els resultats	196
5.1.1	Les cambres de boira	199
5.1.2	Les emulsions	217
5.1.3	Els mesons θ i τ analitzats amb el diagrama de Dalitz	226
5.2	Que vénen els acceleradors!	234
5.2.1	El final del treball en raigs còsmics i el principi del treball en acceleradors	234

5.2.2	Per primer cop, la teoria per davant l'experiència: producció associada, K_L^0 , Σ^0 , Ξ^0	240
6	Del model a la teoria: més enllà d'isospín	247
6.1	Vers la completitud del model correcte: divulgació de les idees de M. Gell-Mann a través dels congressos	248
6.2	L'acceptació del model d'estranyesa: classificació, predicció i resolució d'enigmes	256
6.2.1	K^0 i \bar{K}^0	257
6.2.2	De l'enigma θ - τ a la violació de paritat	260
6.2.3	Prediccions de M. Gell-Mann: Σ^0 , Ξ^0 i altres possibilitats	264
6.3	Models equivalents: implantació d'estranyesa, triomf de M. Gell-Mann . . .	268
	Epíleg	279
	Conclusions	295
A	Il·lustracions	301
A.1	Esdeveniments de partícules estranyes	301
A.2	Mètodes estadístics de representació de les dades experimentals	312
A.3	Evolució de les taules de partícules	318
A.4	Preprint no publicat de M. Gell-Mann (agost 1953)	330
B	Sobre la Base de dades	333
B.1	Aspectes formals	333
B.2	Dels Congressos	337
B.2.1	Temàtiques presents en els congressos analitzats i proporció de contribucions dedicades a les noves partícules	338
B.3	De les Revistes	341
B.3.1	Les reunions de l'APS a través del <i>Physical Review</i>	342
B.3.2	La classificació de les noves partícules a través dels índexs de les revistes	351
B.4	Resultats gràfics de la Base de dades	354
B.4.1	Col·laboracions dels diferents grups	354
B.4.2	Grups que treballen en les noves partícules	363
B.4.3	Tipus d'article en revista o contribució en congrés	380
B.4.4	Tipus de fonts i detectors utilitzats	383
C	Cronologia dels descobriments	387
	Bibliografia	391

Pròleg

A mode de justificació

Aquest treball tracta del descobriment de les partícules estranyes i de la construcció d'un model teòric que les descrigui. Les partícules estranyes s'estudien en el marc de la disciplina física de les partícules elementals. A grans trets, aquesta disciplina pretén trobar l'estructura fonamental de la matèria i les lleis que la governen. Tot i que aquesta recerca persegueix la humanitat des dels seus orígens més remots, els grans avenços en el camp s'han donat al llarg del segle XX que acabem de deixar.

Com a disciplina, però, la física de les partícules elementals no es pot considerar tan antiga com el descobriment de la primera partícula elemental, l'electró, a finals del segle XIX. De fet, és en el període d'investigació que cobreix aquesta tesi que es comença a estructurar com a tal, i sovint els historiadors la defineixen com la fusió de tres camps de recerca: física nuclear, raigs còsmics i teoria quàntica de camps.¹

El terme física nuclear es pot aplicar en sentit ampli des dels experiments de dispersió de Rutherford i el seu model atòmic el 1911, i la quantificació introduïda amb el model de Bohr (1913). Però potser el moment clau per a l'expansió del camp fou l'any 1932, any del descobriment del neutró, del positró, del deuteró i de la primera desintegració nuclear per partícules accelerades artificialment. Aquest primer procés nuclear artificial ($p+Li^7 \rightarrow 2\alpha$) requeria tan sols 0.12 MeV per produir-se, però els seus artífexs, Cockroft i Walton, acceleraven els protons fins a 0.7 MeV. A finals de la dècada dels trenta, els ciclotrons els acceleren en el rang de les desenes de MeV. En aquest moment, l'estructura atòmica bàsica està definida en termes d'electrons, protons i neutrons. Pel que fa a les interaccions, amb els treballs de Dirac, a més de la predicció del positró, se senten les bases per al desenvolupament de la teoria quàntica de camps, aplicada al camp electromagnètic, i la idea de mediador de la interacció, en aquest cas el fotó. Aquesta formalització de la interacció electromagnètica, la QED, obrirà el camí per intentar fer l'equivalent amb altres interaccions. La teoria de Fermi (1934) ho intentarà amb la desintegració β , l'únic fenomen conegut en la dècada dels trenta de la interacció feble, i la teoria de Yukawa (1935) ho

¹Brown i Hoddeson (1983, 4) la defineixen textualment com “the turbulent confluence of three initially distinct bodies of research: nuclear physics, cosmic-ray studies, and quantum field theory”, i en situen el naixement en el període ampli 1930–1950.

intentarà amb la interacció nuclear, definint un mediador que es detectarà en la radiació còsmica.

Els raigs còsmics, descoberts a principis del segle XX, constituïen una radiació desconeguda i llunyana, la investigació de la qual va permetre esbrinar-ne l'origen i la composició. A mesura que els instruments d'anàlisi i les hipòtesis teòriques avançaven, es van discernir diferents components que, posteriorment, van revelar les partícules fonamentals que els constituïen. Algunes d'aquestes partícules ja eren conegudes, com els protons o els electrons, però la fenomenologia es va mostrar rica en nous elements i, així, el 1932, C. D. Anderson, hi descobrirà el positró. El 1937, el mateix Anderson junt amb S. H. Neddermeyer detectaran una nova partícula de massa intermèdia entre la de l'electró i la del protó, el mesotró. Aquest mesotró s'identificarà amb el mediador de la interacció nuclear que predeia la teoria de Yukawa (1935), i no serà fins el 1947 que es distingiran dues varietats diferents de mesotrons: muons i pions. Però el 1947 la radiació còsmica també mostrarà la presència d'un altre tipus de partícules, les partícules estranyes, objecte del nostre estudi. La presència de noves partícules anirà definint i ampliant el concepte d'interacció forta i feble, però la seva formalització en teoria quàntica de camps encara es farà esperar. En aquest moment, la QED acaba de vèncer els problemes amb els infinits a través de la renormalització i s'apareix com la teoria correcta per explicar els fenòmens que involucren l'electromagnetisme. La teoria de Fermi, formulada per explicar la desintegració β , veu com altres fenòmens com la desintegració muònica i la desintegració de les partícules estranyes es mostren amb la mateixa força, i d'alguna manera s'hauran d'incloure en una teoria genèrica que les expliqui totes. La interacció nuclear també es generalitza com a interacció forta amb els fenòmens de producció de les noves partícules estranyes. Forta i feble, però, encara triaran a trobar el mediador correcte de les respectives interaccions, i a vèncer les dificultats d'un tractament en teoria de camps que encara no té totes les eines per resultar efectiu.

Als anys quaranta naixeran també els primers acceleradors considerats "d'alta energia", que aconseguiran accelerar protons en el rang dels centenars de MeV. L'augment energètic permetrà, a finals de la dècada, la detecció de pions i muons artificials, que, a principis dels cinquanta, evolucionarà fins a la producció de feixos de pions que iniciaran una nova branca d'estudi sobre la producció i dispersió d'aquesta partícula, considerada la medidora de la força nuclear. Els cinquanta viuran una nova escalada de les energies dels acceleradors en un ordre de magnitud més i desplaçaran definitivament els raigs còsmics com a font principal de detecció de noves partícules. En aquest rang dels GeV per als protons accelerats s'observaran artificialment les partícules estranyes i, el 1955, es detectarà l'antiprotó.

Aquest breu recordatori ens serveix per adonar-nos que el descobriment de les partícules estranyes competeix en el temps amb altres fites importants del camp, com l'assentament de la QED, el descobriment dels pions i les teories sobre la força nuclear, l'escalada ener-

gètica dels acceleradors lligada a grans avenços tecnològics. . .² Tot plegat potser ha fet que el descobriment d'aquestes partícules estranyes i la concreció del model d'estranyesa que permet avançar cap al model de quarks hagi estat poc estudiat directament.

Malgrat tot, els historiadors de la física s'han ocupat abastament de la disciplina seguint diferents enfocaments. Per exemple, Mukherji (1974) o Brown i Rechenberg (1996) se centren en l'origen de les forces nuclears. D'altres, des d'una visió més sociològica, enfoquen els estudis a la pràctica científica en el si de la comunitat de científics (Kevles, 1977; Pickering, 1984), o se centren en els desenvolupaments tecnològics associats en aquesta pràctica (Galison, 1997). També trobem històries d'institucions, com el cas del CERN (Hermann *et al.*, 1987) o del Cavendish (Crowther, 1974), i importants reculls de caràcter més enciclopèdic, com Brown *et al.* (1995), Kuhn *et al.* (1967). En tots els casos, les partícules estranyes són tractades d'esquitllentes. Un altre tipus de font sobre el tema són els congressos i recopilacions que sovint reuneixen historiadors i també científics protagonistes dels esdeveniments analitzats. Aquí les partícules estranyes prenen una mica més de protagonisme, però segueixen apareixent eclipsades pel desenvolupament de la QED, per la física de pions, o pels experiments en acceleradors, entre d'altres.

Algunes de les contribucions d'aquests científics protagonistes de la història que ens ocupa ens il·lustren l'interès dels descobriments de les partícules estranyes. Val L. Fitch i Jonathan L. Rosner parlen de les partícules estranyes com “a lovely example of order emerging from chaos.”³ Bruno Rossi apunta en la seva autobiografia:

Work on the ‘new’ particles continued for several years. It helped to set the stage of a new science to which, today thousand of workers and billions of dollars are committed.”⁴

I Charles Peyrou afirma taxativament:

As I was visiting SLAC in 1976 there was the ψ and later there was the charm and everybody called that “new physics”. They were young and they were enthusiastic and they should be forgiven but to me there is only one physics. There can be new aspects of physics but nothing like “new physics”. Nevertheless, if something should ever have been called by that name (and I still would not like it) it should be the start of strange particles studies. States in modern language, here appeared for the first time a new flavour. Baryons were found which were not nucleons, not even excited ones since they decayed much too slowly. Heavy mesons were found which had all thinkable weak decays with all possible lighter particles (π , μ , e , ν). Here for the first time an entire new world, parallel but not exactly similar to the old one, was discovered without any guidance by theory.⁵

El descobriment no esperat de les partícules estranyes, doncs, ofereix a la història de la ciència un important exemple de la interacció entre experimentació i teoria, i com se'n deriva

²Aquesta competència es pot visualitzar a través dels índexs dels congressos i revistes analitzats en l'apèndix B.

³Fitch, Rosner (1995b), 655.

⁴Rossi (1990), 118.

⁵Peyrou (1982), 62.

el coneixement científic. La controvèrsia que es genera revela com s'arriba a l'adquisició d'aquest coneixement a partir d'una gran confusió inicial que afavoreix interrelació i competitivitat entre diferents grups, que treballen amb diferents tècniques, veuen diferents partícules i manifesten diferents idees prèvies. Al final, es culminarà amb la comprensió i generalització dels diferents tipus d'interaccions entre partícules elementals i amb la consecució d'un nou nivell d'elementarietat, amb la definició dels quarks. Tal i com afirma Peyrou, sembla, doncs, impossible poder entendre, a principis dels seixanta, la classificació de partícules amb el grup SU(3) i la definició dels tres quarks elementals (u, d i s) sense el paper jugat per les partícules estranyes.

Aleshores, podem dir que aquest treball tracta de les partícules estranyes i les seves interaccions, però també dels científics que les detecten, especialment *cosmicciens*, de les tensions i col·laboracions que es generen, les fonts i detectors que s'utilitzen, i les noves simetries que neixen. . .

Antecedents immediats: la distinció π - μ

Acabem d'argumentar que el descobriment de les partícules estranyes es troba immers en un context molt complex d'investigació que potser n'apantalla la importància. Les partícules estranyes es descobriran en els mateixos detectors visuals (cambres i emulsions) que la física nuclear i la física de raigs còsmics venien utilitzant. Amb incorporacions provinents de les noves generacions, els investigadors que havien iniciat aquesta recerca sobre l'origen i composició de la radiació còsmica es trobaran en el centre de les recerques dels nous elements: Leprince-Ringuet a l'École Polytechnique (EP), Blackett a Manchester, Powell a Bristol, Anderson a Caltech, Rossi al MIT, etc. També podem argumentar, doncs, una certa continuïtat, que té en la distinció dels "mesons" π i μ l'antecedent més immediat. Aquesta distinció s'aconseguirà a Bristol el mateix any que a Manchester detecten les traces forçades (1947). Uns i altres compartiran font (raigs còsmics), detectors, grups de treball i els primers intents teòrics de modelar les partícules estranyes també provindran de les teories mesòniques. Les investigacions experimentals també s'intersecaran: sovint les noves partícules apareixeran en investigacions enfocades a pions i muons, i no podem oblidar que π i μ formaran la part més abundosa dels productes de desintegració dels nous elements, i sense un bon coneixement de la seva fenomenologia difícilment es pot obtenir un coneixement clar de les partícules estranyes.⁶

El descobriment dels mesotrons, que posteriorment es diferenciaren en pions i muons, arrenca abans de la Segona Guerra Mundial, en les investigacions de la component penetrant de la radiació còsmica. El 1937, un estudi en cambra de boira del grup de Caltech fet per S.H. Neddermeyer i C.D. Anderson detectarà la presència de partícules carregades amb

⁶La tesi no tracta amb detall les investigacions de mesons π i μ , per a més informació sobre el tema vegeu: Powell, C. F., Fowler, P. H., Perkins, D. H. (1959); Anderson, C. D. (1961) "Early Work on the Positron and Muon" *Am. J. Phys.* 29: 825-30; Anderson, C. D., Anderson, H. L. (1983); Galison (1983)...

una massa intermèdia entre la dels electrons i la dels protons (de l'ordre de $200 m_e$) que, per aquesta característica, anomenaran *mesotrons*.⁷

Amb les evidències de mesotrons els intents de justificació teòrica de la seva existència portaran a la difusió a Occident de la teoria de Yukawa: “heavy electron might in fact be Yukawa’s meson.”⁸ A partir d’aquí, s’identificarà la partícula descoberta en raigs còsmics amb la predita en el marc de la teoria de Yukawa, com a mediadora de les interaccions nuclears.

Aviat, però, es va veure que una identificació aital no era tan evident com havia semblat en el moment de fer-ne la proposta. La teoria predeia que aquests mediadors havien de tenir una vida aproximadament 100 vegades més curta que l’observada en els *mesotrons* i, a la vegada, la dispersió d’aquests sobre els nucleons era dos ordres de magnitud menor que la predita teòricament. Resoldre aquestes contradiccions portarà al desenvolupament de les teories de mesons que culminaran, després de la guerra, en la teoria dels dos mesons de Sakata i Inoue (1946) i independentment de Marshak i Bethe (1947), fonamentada en clares evidències experimentals de dos “mesons” perfectament diferenciats als raigs còsmics.

L’experiment que corroborarà aquesta distinció fou el fet per Conversi, Pancini i Piccioni el 1946. Els mesons de raigs còsmics positius travessaven la matèria i preferien desintegrar-se abans de ser absorbits pels nuclis, efecte justificat per la interacció coulombiana. Però en el cas dels mesons de raigs còsmics negatius, mentre la teoria de les forces nuclears en predeia clarament l’absorció, l’experiment va mostrar que aquesta no es produïa sempre. En realitat, els raigs còsmics mostraven dos mesons diferents, el mesó de Yukawa (π), que interacciona fortament amb la matèria, es desintegrava en l’altre “mesó” (μ) poc interaccionant, com la teoria dels dos mesons va proposar.

La confirmació definitiva vindrà de la mà de C. F. Powell, que ja des del 1939 impulsa la millora de les emulsions fotogràfiques per a utilitzar-les en física nuclear. L’acord entre la indústria privada Ilford Ltd. i els físics de Bristol permetrà la fabricació de noves emulsions més sensibles. En un article a *Nature* el 1947, conclouen que les seves observacions confirmen l’existència dels dos mesons de masses diferents i en donen les primeres evidències visuals. Aquestes evidències mostren la traça d’un pió primari que es desintegra mostrant una llarga traça que correspon al muó secundari. Però, a vegades, aquest pió primari que interacciona amb la matèria nuclear es desintegra mostrant no sols el muó secundari sinó altres traces corresponents al material de les emulsions expel·lit en la desintegració, habitualment nuclis d’hidrogen. Visualment, l’aspecte és en forma d’estrella i l’anomenaran estrella σ .

Així, amb la diferenciació de π i μ en làmines fotogràfiques també es caracteritzen altres esdeveniments trobats en les emulsions a partir de l’aspecte visual. S’anomenarà mesons ρ a aquells que no produeixin secundàries, la majoria seran μ^+ i μ^- , però també hi poden

⁷Bhabha el 1939 transformarà aquest nom en el de mesó, que és el que s’imposarà.

⁸Oppenheimer i Serber en una *letter* al *Physical Review* de l’1 de juny de 1937.

haver π^+ i π^- dels quals no distingim la desintegració; els mesons σ seran els que produeixin desintegracions nuclears amb emissió de diverses partícules carregades de les quals es distingeixin les traces, s'identificaran com π^- lents. Els π^+ són els que normalment es desintegren mostrant únicament el μ^+ secundari i, en principi, no rebran cap nom especial. Aquesta percepció canviarà amb les emulsions sensibles a electrons, aleshores els ρ englobaran aquells esdeveniments que mostren una secundària i per tant, provinents de π - μ o de μ -e. Els σ seguiran essent els que produeixen estrelles, per tant π^- . Malgrat l'aparent complexitat d'aquesta terminologia, els investigadors de Bristol tenen clar que es tracta d'una simple distinció visual, que en realitat representa diferents manifestacions de dues úniques partícules π i μ .

Aquesta identificació i classificació dels mesotrons resoldrà el malestar creat amb el descobriment. El π era la partícula predita en el marc de la teoria de Yukawa i el seu descobriment en confirmarà la utilitat. D'altra banda, tot i que la interpretació de la utilitat del μ pogués presentar problemes, quedava perfectament inclòs en la teoria dels dos mesons, i d'aquesta manera es tancava el cercle. Malgrat aquest primer problema semblava resolt, els experiments en raigs còsmics van evidenciar, aquest mateix 1947, la presència de les partícules estranyes, que cap marc teòric havia predit.

Estructura de la tesi

El descobriment de les partícules estranyes implica el descobriment de tot un conjunt de noves partícules inesperades. Si pretenem datar-lo, podem parlar d'un descobriment dilatat en el temps que hem limitat, no estrictament, a la dècada 1947–1957. La data inicial l'hem pres considerant que oficialment és el 1947 que, a Manchester, es descobreixen les primeres partícules estranyes. L'any de finalització, 1957, no té tant a veure amb el descobriment com amb l'acceptació del model d'estranyesa que en permet la classificació. Però l'any 1957 també ens serveix de fita per definir l'abandonament de les investigacions en raigs còsmics a favor del treball en acceleradors: cap més partícula serà descoberta en la font natural.

Més enllà d'aquest període genèric, l'estudi del descobriment i modelització de les partícules estranyes s'ha prestat a una divisió en tres parts. Al seu torn, cada part distingeix entre el moment del descobriment experimental i el procés teòric que l'acompanya. Aquesta divisió teoria–experiment dins de cada part es fa necessària a mesura que avança la investigació, perquè l'evolució del model teòric no es pot deslligar dels nous descobriments que progressivament es van incorporant. Teoria–experiment constitueix un punt de tensió present en la investigació, però la mateixa estructura de la tesi es defineix seguint també altres fronts de tensió, més enllà de la pura cronologia. Així, podem parlar de tensió entre diferents grups d'investigació, entre diferents tècniques experimentals (cambres de boira–emulsions), entre diferents fonts de detecció (raigs còsmics–acceleradors), etc. Aquest estat que definim de tensió propiciarà i estimularà els intercanvis entre grups per millorar-ne el rendiment, per millorar les cambres i les emulsions que serviran de detectors i trobar un

llenguatge comú, per establir ponts entre teòrics i experimentals que permetin comprendre la fenomenologia dels esdeveniments i establir-ne pautes de comportament. . .

En la primera part (1947–1950) s’ha pretès analitzar com les primeres evidències assoleixen l’estatus de descobriment de noves partícules, i les dificultats per assimilar-les en el marc de la teoria de mesons existent. Els grups de l’EP, Manchester, Bristol i Caltech interaccionaran i competiran en primera línia de la investigació, a nivell de grup i també a nivell de tècnica utilitzada: cambra de boira o emulsió. Quan el 1950, Caltech reproduirà abastament les primeres partícules V trobades a Manchester el 1947, elevarà les evidències dels britànics al grau de descobriment oficial i posarà la tècnica de la cambra de boira, usada per ambdós grups, en primer pla. En aquest punt, ja es veu que els elements trobats són en certa manera reproduïbles, encara que es presentin en diversitat de formes, i comencen a observar-ne pautes de comportament comunes, una producció abundant i una relativa llarga vida, prou xocants per als coneixements teòrics de l’època, que obriran els intents de classificació per la via de les regles de selecció. Una regla de selecció haurà de justificar-ne la producció abundant en processos d’interacció entre nucleons de la radiació còsmica, alhora que n’haurà d’inhibir la desintegració que seria ràpida si es donés a través del mateix tipus d’interacció.

La segona part (1950–1953) comença amb una allau d’observacions experimentals, amb la incorporació de grups d’arreu a unes investigacions assequibles: proveir-se d’una cambra de boira o d’un bloc d’emulsions, impressionar-lo amb radiació còsmica i analitzar els resultats a la recerca de noves partícules és un procés relativament simple i econòmic. Però la multiplicitat de grups i observacions evidencia la necessitat de millorar els muntatges experimentals i de fixar uns paràmetres bàsics de classificació. Dues vies semblen anar definint-se: mesons pesats carregats (actual K^\pm) mostren preferència per impressionar les emulsions, i des de les emulsions es classificaran com τ , κ , χ ; les cambres de boira, en canvi, mostraran amb més facilitat les anomenades traces forcades o partícules V, que amagaran mesons i hiperons carregats i neutres però, de moment, permetrà classificar les neutres V_1^0 i V_2^0 (actuals $\Lambda \rightarrow p + \pi$ i $K_S^0 \rightarrow 2\pi$, respectivament). Entre ambdues tècniques naixeran els primers muntatges en cambres multilàmines, amb la pretensió de combinar el poder de parada de les emulsions amb el major volum de les cambres. D’aquesta experimentació naixeran les partícules S, que s’aturaven en l’interior de la cambra (*Stopped Particles*). La tensió provocada per l’allau de nous esdeveniments, les necessitats d’innovació i millora dels mètodes i tècniques de detecció i d’anàlisi de resultats culminarà al final d’aquesta part amb el congrés celebrat a Bagnères de Bigorre (6–12 de juliol de 1953), congrés paradigmàtic on els diferents grups exposaran el treball fet i arribaran a acords pel que fa a la nomenclatura, tècniques i metodologia. El congrés de Bagnères serà pràcticament experimental. En aquesta etapa la teoria sobre les noves partícules rebrà la influència clara de l’experimentació que es desenvoluparà en el camp d’estudi dels pions, que els acceleradors començaran a controlar i sistematitzar. El treball en pions del grup de Fermi a Chicago posarà en primera línia

el paper de la simetria d'isospín per descriure les interaccions entre partícules fortament interaccionants. Consegüentment, s'aplicarà aquesta simetria a les noves partícules, que es produeixen en interaccions nuclears similars a les reproduïdes pels acceleradors en el cas dels pions. Així, la segona etapa culminarà amb l'assignació correcta d'isospín per a les noves partícules, aconseguida per K. Nishijima i M. Gell-Mann, en funció de la necessitat que les reaccions nuclears fortes que produeixen les noves partícules conservin isospín, com s'ha demostrat pels pions, i al mateix temps n'inhibeixin la desintegració per aquesta via forta. La via de les regles de selecció iniciada en l'etapa anterior, culmina aquí amb la incorporació de la simetria que proporciona isospín.

Finalment, la tercera part (1953–1957) pretén cobrir com evoluciona l'experimentació a partir dels convenis adoptats a Bagnères. Les millores en cambres s'evidencien en la doble cambra de l'EP i la multilàmines del MIT, que ens ofereixen un cas d'estudi especial de la tensió entre grups, amb els esforços per desentrellar la confusió al voltant de les secundàries de partícules S descobertes amb aquest detector (actuals $K_{\mu 3} \rightarrow \mu + \pi^0 + \nu$, $K_{\mu 2} \rightarrow \mu + \nu$ i $K_{\pi 2} \rightarrow \pi^+ + \pi^0$). També les emulsions concentraran esforços per engrandir l'estadística disponible de resultats. En aquest mètode de detecció les tensions entre grups es concretaran positivament en una macrocol·laboració, el *G-stack*, els resultats de la qual donaran molta informació sobre els modes coneguts del mesó K carregat (τ , τ' , κ , χ , K_μ , K_β). Tota aquesta allau d'informació sobre mesons pesats tindrà un cas d'estudi especialment interessant amb l'enigma θ - τ , que evidenciarà Dalitz amb el seu diagrama i que portarà a la violació de paritat de les interaccions febles. Experimentalment, s'observa un cert apressament que té una de les seves raons claus en l'aparició dels acceleradors com a font inevitable i imprescindible de producció de les noves partícules. La tensió evident dels avesats a treballar en la font natural, davant dels múltiples avantatges d'un treball sistematitzat en acceleradors, culminarà amb l'abandonament dels raigs còsmics, a mesura que les energies dels acceleradors permetran la creació i control de feixos de noves partícules.

La teoria d'aquesta tercera etapa s'iniciarà amb la definició d'estranyesa a partir d'isospín i amb el triomf de M. Gell-Mann com a descobridor del model correcte per classificar els nous elements. Aquest triomf tindrà molt a veure amb la predicció de noves partícules encara no descobertes, però coherents amb una assignació d'isospín i estranyesa que en fan plausible l'existència i la predicció del tipus de reaccions on cal buscar-les. Aquest triomf de predicció crearà una major cohesió amb els experimentals, delerosos de detectar els nous elements i, així, reafirmar la validesa del model. Per primer cop, la teoria anirà davant de l'experiència, però seran els acceleradors qui la validaran amb el descobriment de K_L^0 , Σ^0 i Ξ^0 . Amb la implantació del model d'estranyesa s'aconsegueix estructurar l'allau de descobriments inicial, s'estableix una jerarquia de les diferents interaccions: forta, feble, electromagnètica, i, en definitiva, se senten les bases per al desenvolupament d'una teoria completa d'aquestes partícules i interaccions.

La tesi es complementa amb tres apèndixs. L'apèndix A conté un seguit d'imatges relle-

vants de l'època, la majoria de les quals són citades en el text per il·lustrar les explicacions. N'hem distingit de tres tipus: fotografies d'esdeveniments en cambres i emulsions, taules i gràfics procedents d'anàlisis de dades de l'època, i una evolució de les taules de partícules que apareixen en congressos i revistes; afegim al final d'aquest apèndix un preprint no publicat de M. Gell-Mann, molt important en l'evolució del concepte d'estranyesa. L'apèndix B recull els resultats obtinguts de la creació de dues bases de dades que contenen les aportacions a congressos i articles en revistes que tracten específicament de les noves partícules en el període considerat (1947–1957). L'apèndix C mostra dues taules que contenen les partícules estranyes de la nostra investigació, amb el nom actual, els diferents noms a l'època, mode de desintegració i proporció en la qual es dona, any de descobriment i grup que la descobreix, font i detector amb què es fa el descobriment.

Material analitzat

Les partícules estranyes *per se* no han estat especialment tractades pels historiadors de la física. Això fa que no disposem de precedents directes que ens puguin guiar a través de recerques paral·leles, amb les quals establir acords o dissentir. Bàsicament, doncs, el que podem anomenar literatura secundària la conformen les històries dels científics protagonistes, en especial, les contribucions que presenten en congressos sobre història de la física de partícules com són: Bristol (1987), Fermilab (1980), Fermilab (1985), París (1982), Sant Feliu (1983), Sekido i Elliot (1985). És en aquests congressos que els protagonistes de la història expliquen els seus records i les seves idees: Alvarez (1989), Amaldi (1988), Anderson (1983), Butler (1982), Dalitz (1982, 1989), Fitch (1989), Fretter (1982), Friedlander (1988), Gell-Mann (1982, 1983), Leprince-Ringuet (1982), Marshak (1983, 1989), Michel (1982), Pais (1989), Perkins (1988), Peyrou (1982, 1988), Pniewsky (1985, 1988), Rochester (1982, 1985, 1988a, 1988b, 1989), Rösch (1982), Steinberger (1989), Yang (1982), entre d'altres. Però en aquests congressos també intervenen historiadors que ens donen pautes més generals sobre l'època d'estudi, en particular, Brown i Hoddeson (1983) i Brown, Dresden i Hoddeson (1989). Guies generals també les hem obtingudes del mateix Brown, Pais i Pippard (1995), amb una enciclopèdica història de la física del segle XX; Brown i Rechenberg (1996), amb l'estudi de les forces nuclears; Galison (1997), amb l'anàlisi dels instruments de detecció usats en física de partícules; Pickering (1984), amb la seva construcció sociològica dels quarks, per citar-ne alguns. Les fonts secundàries s'han completat amb alguna biografia, com la de Rossi (1990); la història enciclopèdica del físic Pais (1986); alguna obra amb un caràcter més divulgatiu, com Yang (1961), Laberrigue-Frolow (1990), Kayas (1982), Kabir (1963), Gardner (1993)... Finalment, contribucions d'excepció han estat les impressions personals de Louis Michel i Richard H. Dalitz.

Pel que fa a les fonts primàries, l'estudi concret s'ha vist complicat per l'ampli espectre de descobriments, els diferents mètodes experimentals, els nombrosos grups i un període de temps força dilatat. Aquesta dificultat s'ha intentat pal·liar amb una anàlisi centrada

en els articles publicats sobre les noves partícules i els congressos de l'època que tracten sobre elles. El resultat és la base de dades que presentem i expliquem en l'apèndix B. Per analitzar els articles publicats hem partit de la bibliografia realitzada per Vitale (1960) i també de les referències obtingudes en les fonts secundàries i en els mateixos articles citats. L'anàlisi dels congressos s'ha mostrat com imprescindible en la investigació de les partícules estranyes perquè, en aquest moment, semblen prendre una rellevància major com a medi de comunicació dels resultats. Pel cas concret de les partícules estranyes hem analitzat els següents congressos, citats cronològicament: Caltech (1948), Bristol (1948), Solvay (1948), Bombay (1950), Dublín (1951), 2n Rochester (1952a), Bagnères (1953), Kyoto&Tokyo (1953), 3r Rochester (1952b), 4t Rochester (1954), Pàdua (1954), Glasgow (1954), 5è Rochester (1955), Pisa (1955), 6è Rochester (1956).

Les fonts primàries investigades es completen amb el que podríem anomenar llibres de text de l'època, com Marshak (1952) o Jackson (1958); altres manuals per a científics, com Rochester i Wilson (1952), on ensenyen a interpretar amb exemples les fotografies preses amb cambres de boira, o també, Powell *et al.* (1959), on expliquen com estudiar les partícules elementals amb emulsions fotogràfiques.

En l'apartat de literatura grisa cal fer esment d'un curs impartit per Feynman (1951) i, especialment, de la troballa, després de quatre anys de recerca, d'un *preprint* no publicat de Gell-Mann (1953a). Finalment, s'ha fet una recerca en els arxius històrics d'aquella correspondència que podia resultar d'interès per al tema. Malgrat la bona voluntat dels arxivers consultats, cal indicar que en aquest aspecte els resultats han estat força pobres. D'interès, però, és el material aconseguit que indiquem a continuació: dels arxius de Caltech, la col·lecció de cartes entre Anderson-Rochester-Leighton (1949–52), Blackett-Epstein (1948), Anderson-Blackett (1948), Feynman-Fermi (1951–2); de la biblioteca de l'École Polytechnique, l'inventari complet dels papers de Leprince-Ringuet; dels E. O. Lawrence Papers, guardats a la Universitat de Califòrnia (Berkeley), la correspondència Anderson-Blackett (1949); dels Blackett Papers, guardats a la Royal Society, la correspondència Anderson-Blackett (1949–50); de la Universitat de Bristol, correspondència vària de Powell (1947–58); dels Enrico Fermi Papers, guardats a la Universitat de Chicago, la correspondència Fermi-Cocconi (1951–4).

Agraïments

En primer lloc, agraeixo al professor Manuel G. Doncel l'oportunitat donada de treballar sota la seva direcció. Han estat molts anys de col·laboració, més estreta al principi amb els cursos de doctorat que van originar el tema de recerca i més relaxada al final, amb discussions al Centre Borja quan altres obligacions ho permetien. Agraeixo també a Gisela Mateos, Jaume Navarro i Tica Font, companys dels cursos de doctorat, les llargues tardes de discussió; i, molt especialment, a Xavier Roqué, sense l'ajut del qual no hauríem arribat al final.

El meu agraïment va també per dos físics ja desapareguts. Per Louis Michel a qui, a més del contacte directe que ens va facilitar, cal agrair la cessió al CEHIC de material d'interès, en particular, de l'original del congrés de Bagnères de Bigorre. I a Richard H. Dalitz vull agrair-li els valuosos comentaris que sols un protagonista de la història que ens ocupa podia proporcionar.

A Mary Sampson, arxivista de la Royal Society; Yannic Le Fur, de la biblioteca de l'EP; a Julia Ebrel, de la biblioteca de la Universitat de Bristol; a la família de C.F. Powell; Raymond Stokes, de la Bancroft Library a la Universitat de Califòrnia, Berkeley; Debra Levine, de la Joseph Regenstein Library a la Universitat de Chicago; Shelley Erwin, dels arxius de Caltech; i finalment a Olivia Posner, secretària de M. Gell-Mann. A tots ells he d'agrair l'ajut en la recerca dels seus arxius de material d'interès per aquesta investigació i el permís per citar-lo.

Finalment agraeixo a en Rafa el seu ajut i comprensió al llarg de tots aquests anys i a en Lluç, el seu somriure.

PART I

PRIMERES EVIDÈNCIES (1947-1950)

Capítol 1

Els primers indicis

Aquest capítol l'encapçala un fragment de “La cançó del mesó”, adaptació d'un clàssic de la literatura americana feta per físics, i les seves esposes, majoritàriament de la Universitat de Rochester. Presentada al congrés Solvay (27 setembre–2 octubre de 1948), la “cançó” accepta els indicis de noves partícules, més enllà dels mesons π i μ que s'acaben de discernir en raigs còsmics. El descobriment a Manchester de les dues primeres “traces forçades” (*forked tracks*) s'haurà produït més d'un any abans. Malgrat tot, al congrés es parla de “mesons τ ” i de “*many more mesons*”, però no de traces forçades... Iniciem l'estudi del descobriment de partícules estranyes intentant mostrar com abans dels esdeveniments singulars a Manchester del 1947 —que sovint es citen com l'inici del descobriment de partícules estranyes— ja existeix un cert pòsit de fenòmens difícils de catalogar. En la distensió que hi pot haver quan els físics fan la cançó, s'aventura la possibilitat d'un nou món de partícules per descobrir. Això no obstant, aquesta línia de pensament optimista pel que fa a l'acceptació de nous elements no és general. De fet, en aquesta primera etapa s'entreveu el pols mantingut entre favorables i reticents a acceptar la presència de nous fenòmens. Àdhuc el “descobriment oficial” a Manchester, el 1947, no serà unànimement acceptat fins la confirmació a Caltech, el 1950.

La troballa a Manchester destacarà entre les evidències per la singularitat visual de les traces en forma de V invertida. La història prèvia del grup ens guia fins al descobriment d'aquestes traces visualment peculiars: el desenvolupament de cambres controlades per comptadors per seleccionar esdeveniments, la focalització de les investigacions en les partícules de les ruixades penetrants, la incorporació d'un imant per determinar càrregues i moments... I malgrat que sovint exposicions didàctiques presenten el descobriment com una revelació, una anàlisi més detallada mostra com l'expectativa encara es manté fins el 1950. En aquests anys d'expectativa (1947–1950), altres grups faran petites aportacions, i entraran en joc les noves emulsions sensibles a electrons per detectar els nous fenòmens. Però les emulsions es resistiran a mostrar traces forçades, tot i que s'insistirà en l'evidència de noves partícules. Leprince-Ringuet farà una tasca de difusió especialment aferrissada d'aquestes evidències diferents de les traces forçades i imposarà la nomenclatura τ per descriure-les. Aquesta nomenclatura perdrà força el 1950, quan des de Caltech es confirmarà amb escreix l'existència de les traces forçades. La correspondència entre els dos grups, Manchester i Caltech, mostra com es perfila el nom de partícules V per descriure les evidències en cambres, diferenciada de les evidències en emulsions, ara considerades menys fiables. De bon principi, doncs, es fa present una certa tensió a diferents nivells: entre grups (Manchester-Caltech-EP), i entre tècniques (cambra-emulsió). Més enllà de les dificultats de detecció, s'intueix per què les noves partícules no apareixen com un gran descobriment: són mesons, es creen en les mateixes interaccions nuclears que els mesons, i com a tals s'espera que una teoria de mesons de les forces nuclears acabarà justificant-los. Però a mesura que augmentaran les evidències, la simplicitat de l'argument anterior es mostrarà insuficient.

1.1 Un descobriment oficiós? (1944–1947)

*There are mesons pi, there are mesons mu
The former ones serve as nuclear glue
There are mesons tau, or so we suspect
And many more mesons which we can't detect*

The Meson Song (Solvay Version) (1948), 382.

1.1.1 École Polytechnique: primera evidència i refutació de Bethe

El treball del grup de Leprince-Ringuet, cap visible dels *cosmicists* de l'École Polytechnique (EP), és un exemple més de com la guerra no va paraitzar completament les investigacions en la física dels raigs còsmics.¹ L'interès per la natura de la radiació còsmica havia dirigit les investigacions d'aquest grup vers la tècnica de les cambres de boira controlades per comptadors. Sobretot a partir dels resultats obtinguts per P. M. S. Blackett i G. P. S. Occhialini, amb la tècnica combinada d'ambdós detectors, que havia portat al descobriment del fenomen de les “ruixades” (*showers*), el 1933.²

A partir del 1936, any en el qual Leprince-Ringuet és nomenat professor a l'EP, els experiments del grup se centren en la determinació de l'espectre energètic de la radiació còsmica i en l'estudi de la component penetrant amb l'aplicació del mètode de Blackett i Occhialini per controlar les cambres amb comptadors. Coneguts els avantatges de detecció

¹A Hermann *et al.* (1987, 304–351), Pestre ens ofereix una revisió del context científic francès en el període 1945–55. Tot i que la seva aportació se centra en aspectes més de política científica que portaran a l'acceptació del projecte del CERN, també presenta l'estat genèric de la investigació en aquests anys. En particular, Pestre (p. 317) afirma:

In the light of the above we can conclude that the existing potential was rather low, not only in terms of manpower but also in terms of equipment, and that, taken as a whole, French output was of somewhat average quality. In the high-energy field, with the exception of Leprince-Ringuet's group, the situation was worse even when compared to that of smaller countries like Sweden or the Netherlands. Of course no meaningful comparison was possible with the United States or the United Kingdom, the latter having already commissioned, amongst other things, a 175 MeV synchro-cyclotron, and a proton synchrotron of about 1000 MeV.

Tot i que ja remarca el cas excepcional del grup de Leprince-Ringuet, el seu enfocament restringeix la recerca en el camp de les altes energies al desenvolupament posterior dels acceleradors. De fet, aquesta perspectiva pot resultar enganyosa ja que no contempla que, en aquell moment, les altes energies encara tenen la font principal en la radiació còsmica, camp en el qual l'EP desenvoluparà una investigació tan intensa com els grups de Manchester i Bristol a la Gran Bretanya, o altres laboratoris dels EUA, com Caltech. El nombre de publicacions d'aquest grup pot resultar significatiu en aquest sentit, en especial les seves contribucions en congressos (v. apèndix B, fig. B.4, p. 363).

²Les ruixades es mostraven com grups de traces que travessaven la cambra i semblaven provenir d'un mateix punt. La proposta és que es tracta de partícules que es produeixen amb la interacció de la radiació amb la matèria nuclear i, en principi, s'associa majoritàriament a electrons i positrons. A mesura que les investigacions d'aquest fenomen avancen s'arriba a distingir una component tova, que s'associarà en aquests grup de positrons i electrons i les ruixades electròniques que se'n deriven, i una component dura o penetrant, formada per partícules que travessen grans quantitats de matèria sense interaccionar; aquesta component portarà al descobriment dels mesotrons el 1937.

a gran alçada, alguns muntatges són traslladats als Alps. El 1937 s'instal·la una gran cambra de boira a l'Argentière (Alps francesos, 1000 m). En el període de guerra, el muntatge continuarà actiu i permetrà l'obtenció de nombrosos resultats en aquesta etapa difícil, continuant la recerca sobre l'espectre energètic, l'excés de partícules positives, les masses i els temps de vida dels mesotrons, etc.

Precisament amb la identificació del mesotró com la partícula que explicaria la component penetrant de la radiació còsmica s'inicia una nova fita d'investigació consistent en determinar-ne les característiques, en particular la massa, que havia de coincidir amb el mediador de les forces nuclears predit per la teoria de Yukawa. L'EP concentrarà part de la investigació a l'estudi d'aquesta massa en aquells casos on un electró atòmic del gas de la cambra sortia expel·lit per la col·lisió, suposada elàstica, amb una partícula de la radiació incident a la cambra. Les primeres mesures mostren, el 1939, la traça esperada d'un d'aquests nous mesotrons desviant un electró secundari. L'anàlisi de la dinàmica de la col·lisió permet obtenir un valor per a la massa del mesotró de $240 \pm 30 m_e$.

El mètode experimental intentava detectar electrons del gas de la cambra que havien col·lisionat amb partícules incidents de la radiació còsmica perquè, suposada la col·lisió elàstica, el problema es reduïa a aplicar conservació d'energia i moment al xoc i calcular-ne la massa de la primària. Experimentalment, a partir de la curvatura de la traça de la partícula incident i de l'electró desviat després de la col·lisió es determinava el moment de les dues partícules. Visualment també s'estimava l'angle amb què l'electró era desviat. Aleshores, un balanç d'E–p del procés permetia relacionar l'energia cinètica (T), transmesa a l'electró, amb el moment (p) de la primària incident, la seva massa (M) i la direcció d'emissió de l'electró (θ):

$$T = 2m_e c^2 \frac{p^2 c^2 \cos^2 \theta}{[m_e c^2 + (p^2 c^2 + M^2 c^4)^{1/2}]^2 - p^2 c^2 \cos^2 \theta}$$

De la relació es coneixia T, calculat a partir del moment deduït de la curvatura de l'electró per la presència del camp magnètic; p, per la curvatura de la primària per la presència del mateix camp magnètic, i θ , mesurat en la col·lisió respecte la direcció de la partícula incident. La fórmula ens donava, doncs, la massa de la primària incident M.

Amb aquest mètode s'intentava evitar la mesura de la massa de la partícula incident a través de la mesura de la ionització i l'abast, perquè suposava l'aplicació de lleis de dependència d'aquestes quantitats amb el moment i l'energia molt experimentals, i lligades a les condicions de cada experiment concret amb errors difícils de controlar.³

³La ionització específica d'una partícula que travessa la cambra de boira depèn de la seva velocitat i la

Tot i que el mètode era pensat per a la determinació de la massa dels mesotrons de raigs còsmics, el 1944, en el conjunt d'experiències realitzades a l'Argentièrre, es detectarà una primària col·lisionant, per a la qual el còmput de la massa es desviava irreconciliablement del valor esperat per a la massa del mesotró:

La formule de collision élastique donne pour le primaire, qui est positif, la masse au repos

$$\mu_0 = 990 \pm 12\% \text{ (limites extrêmes de l'erreur)}$$

La masse ainsi obtenue peut surprendre. Les indications suivantes, qui donnent des garanties de la validité de la mesure, nous ont poussés à publier ce résultat.⁴

Les garanties que els autors invoquen es presenten d'extrema importància en aquest cas particular en què s'informa d'un resultat de característiques inesperades: d'entrada, els experimentals s'asseguren que l'electró desviat és clarament secundari, mercès a una visió estereoscòpica de l'esdeveniment; a més, el conjunt de l'experiment els permet suposar que no hi poden haver errors extrems en els càlculs i que les col·lisions es poden suposar el·làstiques ja que si es prenen altres exemples de col·lisió amb un electró, en el curs de la mateixa experiència, s'infereix que el mètode és vàlid per a la determinació de la massa de la primària, ja sigui de caràcter "mesotrònic", protònic, o inesperat, com l'exemple discutit; finalment, malgrat els possibles errors generats, el valor de la massa calculat es troba suficientment allunyat de valors de massa "mesotrònica" ($\sim 250 m_e$) o protònica ($\sim 1800 m_e$) com perquè qualsevol intent d'identificació amb les partícules conegudes suposi forçar molt el càlcul d'errors. Posteriorment a la publicació dels primers resultats, els autors insisteixen sobre aquest punt:

Le 12 pour 100 n'est pas l'erreur moyenne, mais correspond aux limites extrêmes d'un encadrement sévère des mesures ainsi que nous l'avons toujours fait antérieurement; cette masse est quadruple de celle du mésoton normal: une particule ayant la moitié de la masse du proton entrerait d'ailleurs aussi dans l'intervalle de nos mesures.⁵

Leprince-Ringuet presentarà els resultats als EUA ja acabada la guerra, el setembre de 1946, en una reunió de l'*American Physical Society* (APS). En realitat, però, l'esdeveniment no va aixecar massa interès. Com diu Pais, "I do not think that paper, the first presented in the United States related to the new particles, made a particularly strong impression at that time."⁶ No obstant això, la impressió fou suficient com per incitar la necessitat d'una

seva càrrega amb una llei: $I=Z^2f(\beta)$; si es combinen les mesures obtingudes d'aquesta funció amb la curvatura per la presència del camp magnètic que depèn del moment: $C=300\frac{eH}{pc}$, es pot determinar la massa de la partícula en qüestió. Una altra possibilitat és determinar l'abast de la partícula, que també és funció del moment: $\frac{R}{m} = \frac{1}{Z^2}F(\frac{p}{m})$ i si es combina aquesta mesura amb la ionització o amb la curvatura també es pot determinar la massa. En les relacions anteriors, Z és la càrrega de la partícula, β la seva velocitat, H el camp magnètic, p el moment, R l'abast i m la massa de la partícula.

⁴Leprince-Ringuet, Lhéritier (1944), 618 (v. apèndix A, fig. A.1).

⁵Leprince-Ringuet, Lhéritier (1946), 68.

⁶Pais (1989), 349.

justificació de la mà de H. A. Bethe. Bethe, s'aferrarà al còmput d'errors per tal d'ajustar el valor de la massa del grup de l'EP al valor de la massa del protó.

El 1946, Bethe posarà de manifest que l'existència de la dispersió coulombiana múltiple dels mesons, causada pels àtoms del gas de la cambra que travessen, era un paràmetre no menyspreable en els càlculs de la massa a partir de les traces que deixaven.⁷ En el seu estudi demostrarà que per sota d'una velocitat crítica ($\sim \beta \leq 0.1$) la contribució a la curvatura de la traça és produïda per la dispersió coulombiana, cosa que invalida qualsevol càlcul de massa pel mètode del càlcul de la curvatura en el camp magnètic. Fins i tot a velocitats relativistes, la dispersió introdueix un error del 10% en la mesura de $H\rho$ (camp magnètic pel radi de curvatura).⁸ Per tant, per a partícules prou lentes els efectes de la dispersió coulombiana presents en la traça podien resultar més grans que la pròpia curvatura produïda pel camp magnètic. De manera més general, la funció que definia aquesta dependència de la curvatura amb la dispersió coulombiana feia que l'efecte fos especialment cert no sols per a partícules lentes sinó també per a camps magnètics per sota dels 1000 G o per a gasos en la cambra de nombre atòmic alt, com l'argó.

L'argument desenvolupat per Bethe sobre la dispersió coulombiana li servirà per homogeneïtzar suposats exemples de mesotrons que es desviaven perillosament del valor de massa suposat correcta. La seva conclusió serà que “*all published meson tracks are compatible with a unique mass of about 200 electron masses.*”⁹

Però d'entre els casos amb què s'enfronta el de més difícil inclusió en un valor conegut de massa és segurament el proporcionat per la col·lisió elàstica de Leprince-Ringuet i Lhéritier del 1944. No obstant això, malgrat la impossibilitat d'assignar-li una massa compatible amb la del mesó, Bethe mostra com un tractament “adequat” del càlcul d'errors permet estirar el valor d'aquesta massa fins a poder-la considerar protònica. En tot cas, el to amb el qual l'article tracta aquest exemple difereix de la seguretat que mostra a l'exposar

⁷En línies generals, quan una partícula carregada passa a través d'un medi material, la seva direcció de moviment canvia contínuament, resultat de les petites desviacions causades per la dispersió coulombiana pels nuclis atòmics que troba en la seva trajectòria. La desviació angular mitja per unitat de longitud, $\bar{\alpha}$, d'una partícula de càrrega Ze , està relacionada amb el producte pv , on p és el moment i v la velocitat de la partícula, com:

$$\bar{\alpha} \propto \frac{Z}{pv}$$

Quan les partícules arriben al final del seu abast en les emulsions, la dispersió coulombiana és més pronunciada perquè disminueix la seva velocitat. Comparant la dispersió en les traces de dues partícules del mateix abast, es pot estimar la raó que hi ha entre les seves masses:

$$\frac{\bar{\alpha}_1}{\bar{\alpha}_2} \equiv \frac{m_2 v_2^2}{m_1 v_1^2}$$

⁸Les condicions anteriors les calcula Bethe per a diferents gasos que omplen la cambra, un camp magnètic d'uns 1000 G i una longitud de traça d'uns 20 cm. Cal notar que per a traces de menor longitud les mesures de massa encara són menys fiables.

⁹Bethe (1946), 821.

l'homogeneïtzació dels altres esdeveniments problemàtics:

It is true that we had to assume all errors on the same side. However, the error in the radius of curvature of the electron was only 2.1 times the probable error due to multiple scattering. It is also true that a proton of a momentum of 580 MeV should ionize about twice as strongly as a particle at the minimum of the ionization curve, and the observed track appears not to have an ionization significantly above the minimum. But it is generally admitted that estimates of ionization without droplet counting are qualitative and often incorrect.

Even though considerable stretching of the probable errors was necessary, we still believe that this particle is most likely a proton. It seems to us that an entirely new particle could only be established by much more than one event and by measurements of much smaller probable error.¹⁰

Cal, doncs, acabar invocant la singularitat de l'esdeveniment —sols es coneix un exemple amb un valor de massa tan peculiar— per justificar que no podem parlar d'una nova partícula.

Amb el seu intent, Bethe reflecteix l'actitud d'una línia d'investigació majoritària reticent a acceptar l'existència de nous elements gratuïtament. En les conclusions a l'article, aquesta línia es fa del tot evident:

It is obviously very easy to explain each new experiment by a new assumption, and this was done in the last few years in the case of the meson mass: It is much more difficult to explain all experiments by a minimum of assumptions, which was the way in which physics has progressed in the past.¹¹

Per tant, mentre l'evidència experimental no sigui concloent, la via més raonable és intentar explicar els fenòmens que es desvien de la massa esperada per al mesotró no com a nous fenòmens, sinó com a desviacions relacionades amb imprecisions experimentals. En aquest moment, la problemàtica precisió en el càlcul de les masses de les partícules de raigs còsmics és un argument de reforç d'aquesta via d'argumentació, ja que dona un marge d'inseguretat suficient com per unificar tots els valors de massa trobats fins al moment. Es tracta, doncs, de defensar la hipòtesi més econòmica: mentre les evidències no siguin concloents és millor reduir tots els resultats en un de sol que no començar a definir una rastellera de noves partícules.

El cas concret de Leprince-Lhéritier pateix d'una doble singularitat que en dificulta l'acceptació. És singular pel que fa al valor de massa calculat perquè suposaria acceptar un nou valor de massa, únic fins el moment. Però també és singular pel que fa al mètode de detecció —la col·lisió el·làstica— que pateix de l'inconvenient de la poca freqüència amb què apareixen aquests fenòmens de dispersió d'un electró per una primària en el gas de la cambra, cosa que el fa poc estès entre d'altres grups com a mètode d'anàlisi de masses dels mesotrons de raigs còsmics. El mètode de la *collision élastique*, que s'havia fet habitual

¹⁰Ibid., 828.

¹¹Bethe (1946), 829.

en el laboratori de Leprince-Ringuet, no era mètode preferent fora dels seus límits. Si bé, com ja hem notat, es tracta d'un mètode més directe del càlcul de la massa, la dificultat residia en visualitzar aquest tipus de fenòmens, i fer-ho en les condicions necessàries perquè permetessin el còmput de la massa.¹² Per tant, en l'esdeveniment de l'EP conflueixen factors múltiples, com la singularitat de l'experiment i de la metodologia experimental, així com una manca de predicció teòrica, que fan la crítica de Bethe més raonable que la pròpia evidència.

De fet, l'argument de la singularitat també retardarà l'acceptació dels esdeveniments de Rochester i Butler del 1947, i fins la confirmació definitiva el 1950 no s'assimilarà la descoberta. Això no obstant, el 1947 l'acceptació de nous elements es veurà de manera molt diferent a com el marc teoricoexperimental els veu un any abans, a causa de la distinció π - μ que obliga a acceptar no sols un mesotró sinó dues espècies. La singularitat visual (en V invertida) de les partícules de Manchester també serà intrínsecament diferent.

Malgrat tot, abans del descobriment de Rochester i Butler sorgiran noves evidències singulars que tindran poca difusió. En conjunt, es va creant un pòsit que repercutirà en un canvi d'actitud davant la possible existència de més elements nous.

1.1.2 Més evidències a l'École Polytechnique

Un any després de l'anunci públic de l'esdeveniment de Leprince-Ringuet i Lhéritier a l'*Académie des Sciences*, aquests, ara junt amb R. Richard-Foy, presenten quatre nous

¹²La perspectiva històrica tampoc sembla aclarir definitivament la natura de l'esdeveniment. Des de la visió del científic, Charles Peyrou (1988, 152-3), membre actiu de la recerca en raigs còsmics en l'època del descobriment de les noves partícules, es mostra crític tant amb l'esdeveniment del seu laboratori com amb la crítica de Bethe:

I am supposed to be an expert on what happened in LePrince-Ringuet's laboratory. I must say that I never believed the criticism of Bethe. It was before the first $K \rightarrow 3\pi \tau$ discovery so he wanted to doubt about mesons of mass 1000 so he made a critique of all evidence. His article ends about LePrince-L'Héritier's event that with quite a lot of stretching of errors you can make it a proton. It says no more than that. Since there are K-particles in the chamber, you cannot say that this event is a phoney. On the other hand I examined the conditions of that picture, and there cannot possibly be a K-particle in the chamber. There is no producer, there is a single particle. So I always write on that picture that it is an unlikely event, in the sense that if it is a proton it is an unlikely knock-on and if it is a K-particle it shouldn't have been there!

G. D. Rochester (1988b, 152-3), descobridor oficial el 1947, invoca el pes de la crítica de Bethe per limitar la creença en el descobriment:

I always mention this as a possible charged K, but it was very severely examined and criticised by Bethe who thought that there was a few % probability of this being a proton with a knock-on.

Més recentment, els historiadors Brown i Rechenberg (1996, 293) mostren l'esdeveniment de Leprince-Lhéritier i la crítica de Bethe a tall d'exemple de com no sempre teoria i experiment, conjuntament, triomfen en obtenir i interpretar un resultat de raigs còsmics. La seva postura sembla, doncs, més optimista pel que fa a la veracitat de l'esdeveniment:

However, notwithstanding this criticism, a new particle of the mass observed by Leprince-Ringuet and Lhéritier was soon afterwards confirmed by the Manchester cloud chamber group in England.

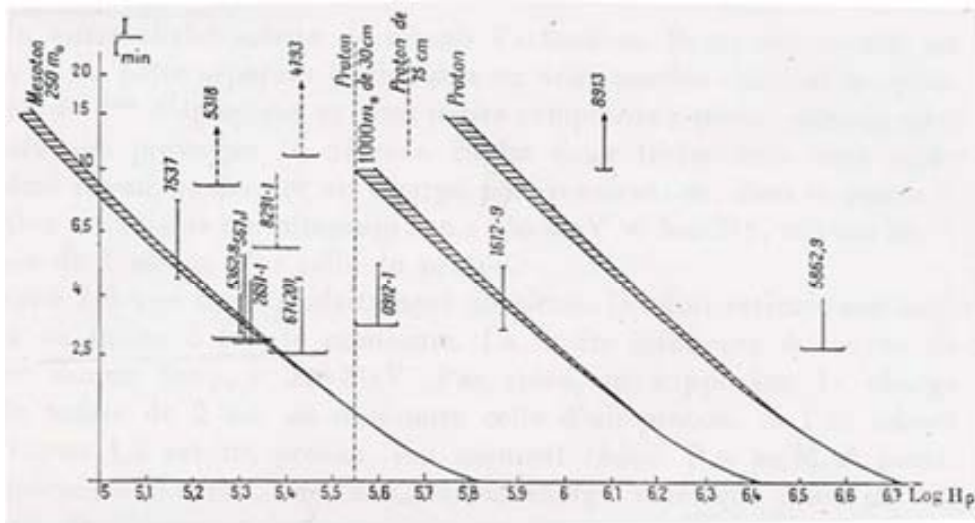


Figura 1.1: Corbes d'ionització en funció del producte del camp magnètic per la curvatura per a partícules “mesotòniques”, protòniques i de $1000 m_e$. Classificació dels esdeveniments trobats en l'experiment.

resultats de difícil explicació. És clar com el precedent, trobat un any abans, provoca un canvi d'enfocament respecte quines traces han de ser objecte d'anàlisi:

[...] nous laissons de côté les trajectoires de nature protonique et nous examinons quelques autres clichés pour lesquels la mesure du rayon de courbure, jointe à l'estimation de l'ionisation, fournit des résultats intéressants.¹³

Ara ja no es tracta de col·lisions amb electrons del gas de la cambra, sinó que pretenen estimar la massa dels casos “interessants” a partir de la curvatura per la presència del camp magnètic i de la ionització. Els autors tabulen els resultats trobats que poden expressar-se com funcions de la ionització i del producte de la curvatura pel valor del camp magnètic. D'aquestes funcions es detecten els valors de massa compatibles o bé amb un mesotró de $\simeq 250 m_e$ o bé amb la massa protònica.

Dels resultats trobats, però, quatre s'escapen d'una o altra catalogació (1612-9, 4793, 8291-1, 5318 en la figura 1.1). En el primer cas, es pot seguir en la gràfica que si fos un “mesotó”, amb la curvatura observada la seva ionització hauria de ser mínima, cosa que no passa, i si fos un protó, la ionització hauria de ser vuit cops més elevada que l'observada. Igualment, en els altres tres casos, la ionització és massa elevada com per considerar-los mesotons compatibles amb el valor de la curvatura i, d'altra banda, no poden considerar-se protons perquè en aquest cas el radi de curvatura hauria de ser molt més gran.

La conclusió dels autors és que:

L'ensemble de ces quatre trajectoires semble ne pouvoir s'interpréter *ni par des méso-*
tons, ni par des protons: une particule intermédiaire entre proton et mésoton expli-

¹³Leprince-Ringuet, Lhéritier, Richard-Foy (1945), 465.

querait bien l'aspect de ces trajectoires. Ces résultats sont à rapprocher de celui obtenu par collision publié par deux d'entre nous.¹⁴

Però aquests exemples tampoc trobaran ressó en la comunitat física. En tot cas, malgrat la insistència dels autors en el valor incompatible amb la massa del mesotró o del protó a partir de la ionització anòmala trobada, no presenten un tractament acurat dels errors ni tan sols donen una estimació numèrica diferenciada d'aquesta massa intermèdia. De fet, en el moment en què apareixen els exemples anteriors hi ha una gran incertesa pel que fa a la fiabilitat dels mètodes aplicats per determinar la massa de les partícules de raigs còsmics. Per exemple, el 1946, N. N. Das Gupta i S. K. Ghosh, en un recull sobre la cambra de boira, emfatitzen la problemàtica manca de precisió de la metodologia experimental:

The methods have mainly been applied to determine the mass of the newly discovered mesotron and it is found that the values of the mass deduced by these different methods are not very consistent. This may be caused by the inaccuracies inherent in the experimental methods [...]¹⁵

A l'època, el reconeixement dels exemples trobats a l'EP quedarà poc més que restringit als *cosmicists* de l'*Académie des Sciences*, tan sols l'exemple del 1944 serà lleugerament més conegut. Paral·lelament als treballs sobre nous elements de l'EP, un grup de físics soviètics, que també treballa en raigs còsmics, proposa l'existència de tot un espectre de noves masses de partícules de raigs còsmics. Els seus experiments, però, més aviat introduiran recel sobre l'existència de noves partícules que no pas ajudaran a la seva difusió.

1.1.3 Els varitrans desprestigiats

El 1946, A. I. Alichanian, A. I. Alichanow i A. Weissenberg realitzen una investigació sobre la composició de la radiació còsmica al Caucas (3250 m) utilitzant comptadors. La idea és avaluar la massa de les partícules de raigs còsmics que travessen l'aparell, a partir de la curvatura que experimenten en presència d'un camp magnètic, que els dona el moment, i del seu abast, que és també funció del moment.

Els resultats són sorprenents. Els autors soviètics es vanen de la detecció de tot un espectre de masses que s'associaria a l'existència d'un nombre indeterminat de diferents noves partícules. La varietat de masses els porta a proposar el nom conjunt de varitrans (*varytrons*), dels quals:

Up to the present we have detected mesons with the following masses: 110, 140, 200, 250, 300, 350, 450, 550, 680, 850, 1,000, 1,300, 2,500, 3,800, 8,000 and approximately 25,000.¹⁶

¹⁴Ibíd., 466.

¹⁵Das Gupta, Ghosh (1946), 263.

¹⁶Alichanian, Alichanow (1949), 761.

Les conclusions a què arriben es publicaran en rus el desembre de 1946 i en anglès el gener de l'any següent. Però tampoc tindran un ressó internacional immediat. Per exemple, C. F. Powell afirmarà “I first learned of the results of the experiments referred to by Prof. Alichanow and his colleagues in conversations with Dr. A. Rogozinski during a visit to Paris in May 1948.”¹⁷

Des d'Occident, Powell mostrava el desconeixement inicial de les observacions. El 1949, Brode, des de Berkeley, criticarà que els físics soviètics no havien donat una estimació de l'error en la determinació de la massa i que, amb les característiques de l'experiment, “The probable errors indicated in these observations are so large that, except for the presence of positive particles of mass $1800 m_e$ (presumably protons), the existence of other masses heavier than the normal mesons is not verified.”¹⁸ Finalment, el 1953, la crítica de l'EP semblarà sentenciar la qüestió:

*En conclusion nous nous rallions entièrement à l'opinion de Vernov, Dobrotin et Zatzepin: Alichanov et Alichanian n'ont pas découvert de particules de masse intermédiaire. De telles particules existent; ils les ont prévues comme Democrite avait prévu les atomes; mais ils n'en avaient pas établi l'existence. Et il faut regretter que la loyauté de certaines rectifications essentielles soit ternie par l'humour avec lequel ils déclarent en conclusion que “le phénomène reste constant” et que “le problème difficile avait été résolu d'une façon entièrement satisfaisante”.*¹⁹

En el millor dels casos, doncs, els exemples de suposats varitrons hauran propiciat una mentalitat oberta envers la possible existència de partícules diferents dels mesotrons de $\simeq 200$ MeV.

De fet, els resultats ja havien estat desprestigiats durament el 1951 des de la mateixa Unió Soviètica, on criticaran obertament la manca de rigurositat en el tractament de les observacions. Vernov, Dobrotin i Zatzepin, membres de l'Acadèmia de Ciències, mostren com la majoria de les trajectòries considerades varitròniques eren causades per efectes paràsits: electrons parant-se per radiació en les làmines del muntatge experimental que simulaven trajectòries de gran moment parant-se per ionització, dispersió de les partícules en els pols de l'imant i dels comptadors que falsejaven les mesures de curvatura... Especialment, els

¹⁷Powell (1949), 761–2. Segons ell, la principal causa del desconeixement d'aquest treball és la manca de comunicació existent amb la Unió Soviètica:

I had hoped that Prof. Alichanow would be able to accept an invitation which we had extended to him to attend the Bristol Symposium on Cosmic Rays in September 1948, and thus to have the benefit of personal discussions with him. These anticipations were not realized, however, and I therefore hope that the explanation given above makes it clear that the failure of my colleagues and I to make any earlier comment on these experiments was not due to any ill-will on our part —or of any desire to ignore the results of our Soviet colleagues— but was a consequence of the difficulties of communication and intercourse between us which exist at the present time.

C. F. Powell, fent gala de la seva vessant diplomàtica, continua explicant que, per remeiar aquesta manca de comunicació, seria aconsellable la realització de congressos internacionals.; així com facilitar la traducció d'articles russos d'interès per a la seva difusió internacional.

¹⁸Brode (1949), 471.

¹⁹Daudin (1953), 420.

crítics noten la importància dels errors en el càlcul de la massa introduïts per les parades nuclears dels mesons π i dels protons que, en ésser absorbits per nuclis abans de parar-se, simulaven partícules de massa superior aturades únicament per efecte de la ionització.

La tècnica utilitzada també pot contribuir a menystenir els fenòmens. Els casos de suposats varitrons s'infereixen de càlculs obtinguts a partir de muntatges amb comptadors. Possiblement la tècnica de la cambra de boira hauria estat més agraïda, en el sentit de proporcionar l'evidència visual sobre fotografies que es poden reinterpretar i manipular per inferir-ne mesures.²⁰

Però fins i tot amb la tècnica visual de la cambra de boira, les evidències són massa singulars. En el primer exemple trobat per l'EP el 1944, la massa es calculava en base a una col·lisió el·làstica, esdeveniment ja de per si poc habitual i tècnica de mesura poc estesa. En els casos on el mètode de mesura era més estès, a partir de l'estimació de la curvatura i la ionització, o l'abast, impera encara la manca de resolució experimental que repercutia en imprecisions en els càlculs de les masses. Aquestes imprecisions no permeten ésser concloents respecte la possible existència de noves partícules i, és més, tendeixen a jugar en la seva contra en el sentit de sentenciar que, davant el dubte per la singularitat de l'esdeveniment o per la manca de precisió en la mesura, val més respectar el mínim de suposicions, i per tant, limitar els esdeveniments a aquells que cal esperar.

Aquí és on entraria en joc el poder de la predicció teòrica. Fins el 1947, tot i que amb penes i treballs, la via teòrica argumentativa predominant intentava identificar el mesotró de raigs còsmics amb el mediador de la interacció nuclear predit per la teoria de Yukawa. Així, teoria i experiment subsistien recolzant-se mútuament sense necessitat d'introduir nous elements addicionals. El 1947, aquest lligam teóricoexperimental pateix una reorganització. Finalment, les millores instrumentals permetran concloure que les anomalies entre dades experimentals i previsió teòrica s'expliquen admetent l'existència de dos “mesons” diferents. La clau serà l'observació final de la cadena de desintegració: un mesó més pesat, el π , es desintegra en un altre que correspon a les traces de mesotrons poc interaccionants amb la matèria de la cambra. Però el que sembla la solució del problema d'ajustar les observacions experimentals a una teoria que les predigui resulta ser també la visió clara de l'existència d'un nou element feblement interaccionant que, en principi, no era esperat ni resultava, a priori, de cap utilitat. Per tant, l'argument majoritari de “cap nou element que no vingui predit” perdia força davant la nova situació.

²⁰Galison (1997, 67) parla del poder dels mètodes de detecció visual:

This “almost seeing” that made the cloud chamber an extension of our sense of sight is what I mean by the homomorphic form of evidence that becomes characteristic of the image tradition. With this palpable tracks, there appears to be no need for the “inference” of statistics characteristic of the logic tradition—one is (nominally) simply extending sight.

Al llarg de tota l'època de descobriment de les noves partícules, els instruments de detecció visual —cambres de boira, emulsions, cambres de bombolles— dominaran les investigacions i reservaran un espai ínim als instruments lògics. Les estadístiques mostren aquesta realitat (v. apèndix B, p. 384).

Però, tot i la força d'aquesta via argumentativa que fins el 1947 no acabarà acceptant dos “mesons” diferenciats de raigs còsmics, una via paral·lela més minoritària és present ja en el panorama experimental,²¹ la imprecisió en la mesura de les masses ja permet entreveure la polèmica abans d'aquest moment crucial. En el congrés celebrat a Cambridge (22–27 de juliol de 1946), J. G. Wilson posa de manifest aquesta incertesa:

A crucial topic concerning fundamental particles today is that of existence, particularly with reference to the meson group. Are mesons of a unique mass? Are there several types of mesons differing in mass? Or, is a continuous distribution of masses possible? These are questions for which the theoretician is not able to offer much assistance, and so they must primarily be the concern of the experimental physicist.²²

Cal notar que en aquest congrés, Leprince-Ringuet torna a presentar l'evidència del 1944, tot i que confessa que “this photograph is in favour of, but is not sufficient to confirm, the existence of a heavy meson”.²³ Notem també que, igualment hi són presents P. M. S. Blackett i L. Jánossy de Manchester i que, per tant, coneixen l'existència de l'esdeveniment de Leprince-Lhéritier.

L'any següent, des de Manchester, Rochester i Butler proposaran haver trobat un nou tipus de partícula elemental en la visualització en cambra de boira de dos esdeveniments amb una traça singular. En aquest moment, la diferenciació π - μ és el centre de l'atenció experimental. El possible espectre de masses del grup dels mesons, al qual J. G. Wilson feia referència, rebrà una tercera aportació, aquest cop d'un mesó més pesat que el π acabat de discernir, i del qual, Leprince-Ringuet i Lhéritier n'havien ja parlat.

1.2 El descobriment oficial (1947–1950)

While one outstanding puzzle was being solved, new ones were being born: The first cloud chamber photographs of V particles, later to be known as examples of the strange particles, were being taken by G. D. Rochester and C. C. Butler at the University of Manchester, England.

Brown, Hoddeson (1983), 20.

²¹I també en el teòric, amb els intents de conciliar les discrepàncies entre els mesons observats i els predits per la teoria de Yukawa (v. sec. 2.1, p. 62).

²²Wilson (1946), 73.

²³Leprince-Ringuet (1946), 46.

1.2.1 Manchester: de les ruixades penetrants a les traces forçades

La investigació en raigs còsmics s'inicia a Manchester de la mà de P. M. S. Blackett, quan el 1937 pren possessió de la càtedra Langworthy de Física, cedida per Sir Lawrence Bragg, que passa a ocupar la direcció del Cavendish després de la mort de Rutherford.²⁴

De la mà de Rutherford, al Cavendish Blackett s'havia iniciat en la tècnica de la cambra de boira aplicada a la desintegració de nuclis per l'impacte de partícules α provinents de fonts radioactives. Aquestes investigacions portaran al coneixement detallat dels processos típics de transformació nuclear, abans fins i tot del descobriment del neutró, el 1932, i de la desintegració de nuclis per fonts artificials provinents dels Cockcroft-Walton, que sistematitzarà aquesta línia de recerca.²⁵

La seva trobada amb la radiació còsmica serà posterior. A partir del treball de Skobeltzyn a Leningrad, Kunze a Kiel i Anderson a Pasadena, que havien aplicat la tècnica de la cambra a les traces de raigs còsmics, Blackett comença a perseguir aquesta línia de recerca la tardor del 1931. Aquest mateix any, B. Rossi des de Florència envia G. Occhialini al Cavendish per aprendre la tècnica de la cambra de boira del propi Blackett, i posteriorment difondre aquesta tècnica a Itàlia, on encara era desconeguda.²⁶ L'associació serà extremament profitosa. La combinació de la tècnica de coincidència amb comptadors, de la qual Occhialini era especialista, amb la tècnica de la cambra de boira, dominada per Blackett, evidenciarà la importància de la detecció de traces controlades per comptadors.

²⁴Un cicle es tancava. El 1919, Bragg havia succeït Rutherford a Manchester que, a la vegada, marxava a Cambridge. El mateix any Blackett, un jove oficial de la marina acabada la Primera Guerra Mundial, era enviat a Cambridge on iniciava la investigació en cambres de Wilson. Llevat d'una valuosa escapada a Göttingen (1924-5), Blackett romandrà al Cavendish fins el 1933, quan decideix traslladar-se a Londres, al Birbeck College, amb l'esperança d'aconseguir millors condicions per als seus treballs experimentals, després de l'èxit de les investigacions amb G. Occhialini. Amb la mort de Rutherford, el 1937, Bragg torna al Cavendish i Blackett a Manchester. Blackett però, ja no succeirà Bragg en la direcció del Cavendish. Sota el lideratge de Bragg, el Cavendish substituirà la física nuclear com a línia principal d'investigació. L'especialització de Blackett en la física de raigs còsmics farà que acabi la carrera a Londres, a l'*Imperial College of Science and Technology*, on es desplaçarà el 1953 [v. Blackett (1948) i Crowther (1974)].

²⁵De l'anàlisi de les traces en la cambra de boira es determinava la massa del nucli format després de la col·lisió i la presència certa del protó secundari ejectat. Les anàlisis de la cambra van permetre, doncs, revelar la primera transmutació de nitrogen en un isòtop d'oxigen:



Aquestes investigacions mostraven a Blackett, i a la resta de la comunitat, el poder del mètode de la cambra de Wilson per sobre de la tècnica de centelleig original.

²⁶Aquest és un exemple de la importància de la comunicació de coneixements tècnics per als desenvolupaments del camp. Com Rossi (1990, 24) explica:

At that time, among European physicists, Blackett was regarded as the scientist most experienced in the technology and use of cloud chambers. On the other hand, Occhialini, working in Arcetri, had become familiar with the new coincidence technique, a technique virtually unknown in England. Thinking that Occhialini, in England, could provide as well as receive valuable technological information, I wrote to Blackett and with him, planned for Occhialini to spend some time working in his laboratory. And so, in 1931, Occhialini departed for Cambridge.

D'aquesta manera s'assegurava la utilitat del material obtingut en no deixar l'expansió de la cambra totalment a l'atzar. Ara, els comptadors, situats en principi sobre i sota de la cambra, en disparaven el funcionament quan detectaven el pas de la radiació còsmica.

La tardor de 1932, Blackett i Occhialini treballaven plegats al Cavendish i havien aconseguit acumular més de 700 negatius on apareixien grups de traces associades corresponents a més d'una vintena de partícules. L'anàlisi d'aquestes evidències detectades en cambra de boira suposarà el descobriment de les ruixades. Amb la nova tècnica ratificaran també el descobriment del positró i evidenciaran la producció de parells electró-positró.

L'estada al *Birbeck College* de Londres, i la fama aconseguida pels seus treballs en cambra de boira, facilitarà a Blackett la possibilitat d'incorporar, en les seves investigacions, especialistes en raigs còsmics provinents d'arreu. És així com, un cop assentat a Manchester, Blackett construirà al seu voltant un grup ferm de recerca en raigs còsmics.

De la mà de Blackett, L. Jánossy arribarà a Manchester el 1938. Jánossy era un físic húngar refugiat, que havia treballat amb Köllhorster, J. G. Wilson i B. Rossi, i que per tant estava familiaritzat tant amb la tècnica de la cambra de boira com amb la tècnica dels comptadors, aplicades a la radiació còsmica. Després de fugir d'Itàlia i haver passat per Copenhagen amb N. Bohr, Jánossy s'aturarà a Manchester. Aquí es trobaven ja G. D. Rochester i B. Lovell, aquest últim més conegut per les seves aportacions a la investigació del radar.

Malgrat que el grup de raigs còsmics de Manchester es forma tardanament respecte altres universitats, com per exemple l'EP, la preparació dels seus components en aquest camp i el lideratge de Blackett faran que, a finals de 1938, ja tinguin ben establert un programa de recerca. Aleshores, s'esdevé la Segona Guerra Mundial.

Igual com hem vist que passava amb l'EP, tot i el desmembrament del grup, Manchester tampoc va paraitzar completament la recerca activa en raigs còsmics en el temps que durà la guerra. Malgrat que "the British members were sent to man a secret Radar Station on the east coast",²⁷ Rochester i Jánossy van continuar a la universitat, impartint classes per tal de mantenir l'educació universitària, i van combinar aquesta tasca amb la de defensa civil. Durant les estones de lleure continuaran les investigacions iniciades per Jánossy el 1939, sobre la natura de la component penetrant dels raigs còsmics.

La idea originària era aïllar les interaccions d'alta energia, en les quals se suposava que es creaven els mesotrons i, així, estudiar-los en el moment de la creació. Per tal de seleccionar sols aquestes interaccions d'alta energia, a principis dels 40 dissenyen un muntatge amb cinc línies de comptadors. Els comptadors sols es disparaven quan les partícules detectades travessaven els 50 cm de plom que recobrien el muntatge i, d'aquesta manera, sols es computaven les interaccions nucleòniques més energètiques, eliminant el fons de ruixades electròniques que desviarien l'atenció de l'objectiu de l'experiment. Els resultats van

²⁷Rochester (1982), 169.

mostrar l'existència no menyspreable de ruixades amb aquest alt poder penetrant. De fet, la seva tria no sols hauria detectat les partícules penetrants mesotròniques conegudes en aquell moment (actuals muons), sinó que, en menor proporció, una “ruixada penetrant” (*penetrating shower*) amagava interaccions d'alta energia que contenien nucleons, pions, muons, electrons i fotons.²⁸

Per a Jánossy, però, la descoberta de les ruixades penetrants suposava la possibilitat d'estudiar les propietats i els mecanismes de creació de les partícules penetrants que contenien. Aquí és on, de nou, la cambra de boira entrarà en joc, sota la responsabilitat de Rochester, Broadbent i McCusker, presents a Manchester durant la guerra. La visualització de les traces en la cambra podia donar més informació directa sobre aquestes partícules, si es prenia el muntatge de comptadors que detectava les ruixades penetrants com a disparador de la cambra. A partir del 1941, la vella cambra de boira de Blackett, sense camp magnètic, va proporcionar múltiples fotografies corresponents a ruixades penetrants.²⁹

Al final de la guerra, Blackett va decidir abandonar la recerca directa en raigs còsmics i concentrar l'atenció en altres temes, com el geomagnetisme i el paleomagnetisme. A nivell organitzatiu, però, seguirà dirigint els grups de treball que es constituïran a Manchester. Impressionat pels resultats obtinguts sobre les ruixades penetrants durant el temps de guerra, va reimpulsar aquestes investigacions amb la cessió del millor equipament disponible a Manchester: la seva cambra de boira magnètica.³⁰ La introducció d'un camp magnètic semblava el pas lògic següent per tal de poder determinar els moments i les càrregues de les partícules.³¹ Transformar la vella cambra i fer-la específicament adequada per al treball en ruixades penetrants serà la tasca assignada, principalment, a C. C. Butler i G. D. Rochester:³²

The new chamber was 9 cm in depth and 30 cm in diameter and was placed in close contact with one pole of the magnet. Accross the chamber was a lead plate 3 cm in thickness to help identify mesotrons. Illumination was provided by Siemens Flash Tubes and stereoscopic photographs were taken through one pole of the magnet using a fast fine-grained film. The clearing field was always switched off before photography and many precautions were taken to keep the chamber clean and to avoid temperature gradients in the gas.³³

²⁸L'energia d'aquests experiments no serà perfectament definida, però es trobarà en la regió dels GeV. La presència de partícules estranyes estava condicionada a energies entre 5–15 GeV. Els muons que arriben a nivell del mar tenen una energia mitja de 4 GeV.

²⁹Les interaccions nuclears altament energètiques es produïen en el plom situat sobre la cambra. Aquestes interaccions creaven partícules V que podien visualitzar-se en la cambra i desintegrar-s'hi (v. per exemple, apèndix A, fig. A.3). Aquesta mena de fotografies confirmarà més endavant que les noves partícules es creaven en col·lisions nuclears d'alta energia.

³⁰La mateixa cambra i imant portats des del *Birbeck College*, a Londres, el 1938. El gran electroimant l'havia construït Blackett mateix el 1935, per als treballs en cambres controlades per comptadors.

³¹En les investigacions de temps de guerra, l'ús d'electroimants no havia estat possible, bàsicament per la poca disponibilitat del corrent elèctric que necessitaven per funcionar.

³²Jánossy marxarà a Dublín.

³³Rochester (1988a), 125.

Mitjançant dos muntatges de comptadors Geiger diferents, que es disparaven sols quan ruixades penetrants eren creades en el plom damunt la cambra, i de camps magnètics entre 3500 G i 7200 G, proporcionats pel vell imant que Blackett ja havia usat a Cambridge en els seus experiments amb Occhialini, es van escometre diferents experiències. Segons Rochester els objectius de les mateixes eren:

The basic philosophy behind the experiment was the same, firstly to find out if mesotrons were created in high energy interactions and, secondly, to investigate ‘peculiar’ events.³⁴

Concentrar l’atenció en aquests esdeveniments “peculiaris” portarà a la selecció de dues fotografies, pel fet de contenir dues “traces forçades” (*forked tracks*) inclassificables.³⁵

La primera de les fotografies, presa el 15 d’octubre de 1946, es va interpretar com la desintegració d’una partícula neutra amb una massa entre $700 m_e$ i $1600 m_e$ en dues secundàries que, probablement, tenien la mateixa massa. La segona fotografia, presa el 23 de maig de 1947, representava la desintegració d’una partícula carregada de massa entre $980 m_e$ i la massa del protó. En aquest cas, les secundàries eren una partícula penetrant, de la mateixa càrrega que la primària, i una neutra suposada, que lògicament no deixava traça.³⁶

En primer lloc, la preocupació principal era justificar que realment els processos mostrats representaven desintegracions. Calia, doncs, eliminar la possibilitat d’una coincidència accidental entre dues traces de partícules no relacionades. Les fotografies estereoscòpiques mostraven com, en el vèrtex, les traces apareixien del tot copuntuals. També calia pensar que es podia tractar de la col·lisió d’una primària carregada amb un nucli del gas de la cambra, o d’una primària neutra col·lionant amb un nucli i produint dos mesons secundaris. D’entrada, aquest tipus d’esdeveniment hauria d’haver mostrat una traça addicional corresponent a la reculada del nucli. A més, si s’hagués tractat de xocs, s’haurien d’haver observat esdeveniments similars en una proporció més gran produint-se en la làmina de plom que travessava la cambra. En conclusió, es tractava de desintegracions.

En segon lloc, calia mostrar com els càlculs de massa de les primàries que es desintegraven no deixaven marge a una possible confusió amb valors de massa de partícules conegudes. Igual com en l’exemple de Leprince-Ringuet i Lhéritier (1944), el mètode de càlcul tenia l’avantatge de ser molt directe. La visualització d’una desintegració permetia el càlcul de la massa primària amb l’aplicació simplement de la conservació d’energia-moment, i de suposar un valor per a les masses de les secundàries:

$$\sqrt{M^2 c^4 + P^2 c^2} = \sqrt{m_1^2 c^4 + p_1^2 c^2} + \sqrt{m_2^2 c^4 + p_2^2 c^2}$$

³⁴Ibíd.

³⁵V. apèndix A, fig. A.2.

³⁶Nombroses fotografies seran preses del 1946 al 1948. Sempre que era possible, es mesurava la massa pel mètode d’ionització-moment. La ionització s’estimava visualment comparant amb les traces d’electrons en les mateixes fotografies, el moment es detectava per curvatura en el camp magnètic.

Es pot computar un límit inferior per al valor d'aquesta massa, M , si se suposa que les masses en repòs de les secundàries són petites comparades amb el seu moment:

$$M_{\min}c^2 = c\sqrt{(p_1 + p_2)^2 - P^2}$$

La massa mínima així trobada és de $M_{\min}=(770\pm 200)m_e$, per a la primària neutra, i de $M_{\min}=(980\pm 150)m_e$, per a la primària carregada.

Però la massa es pot recalculer assumint un mode de desintegració específic. A més, tenint en compte el cas en què les dues secundàries són d'igual massa (m_0), i que la força es simètrica, l'equació es pot reduir a:

$$\frac{M}{m} = \frac{2m_0}{m} \left(1 + \frac{p^2 c^2}{m_0^2 c^4} \sin^2 \theta\right)^{1/2},$$

on m és la massa de l'electró i θ l'angle entre les dues traces secundàries. Amb aquestes regles, els autors computen els resultats assumint diferents valors per a les masses de les secundàries:

Photograph	Assumed secondary particle m_0/m	Momentum of observed secondary particle (eV/c)	Incident particle M/m
1	0	$3.5 \times 10^8 \pm 1.0 \times 10^8$	770 ± 200
	200	"	870 ± 200
	400	"	1110 ± 150
	1837	"	3750 ± 50
2	0	$7.7 \times 10^8 \pm 1.0 \times 10^8$	980 ± 150
	200	"	1080 ± 100
	400	"	1280 ± 100
	1837	"	3820 ± 50

I si s'avalua el moment i la ionització de les traces, les possibilitats de massa es poden veure encara més limitades.

En el cas de la primària neutra, la igualtat aparent en la ionització de les traces de les secundàries amb les traces d'electrons ràpids i mesons que apareixen en la mateixa fotografia es pot suposar que $\beta \geq 0.7$, que junt amb el moment mesurat, a partir de la curvatura, mostra que la secundària positiva no pot ésser un protó (la ionització hauria de ser quatre cops major que l'observada), aleshores s'ha de tractar d'un pió o d'un muó.³⁷

En el segon cas, l'esdeveniment principal és una ruixada penetrant amb com a mínim quatre partícules penetrants. La primària és massa curta com per portar a una mesura del moment acurada, però es pot estimar en 600 MeV/c. La secundària visible, positiva com

³⁷La primera referència visual, per tant, fou el fet que la poca ionització deixada per les branques de la V en descartaven la possibilitat que es tractés de protons. Probablement, es tractava d'un $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ produït en una interacció en el plom.

la primària, és probablement un muó, perquè travessa el plom central de la cambra sense interaccionar.³⁸

1.2.2 Reaccions a les traces forcades: continua l'expectativa (1947)

Històricament els exemples de Rochester i Butler s'han descrit com “truly startling events”,³⁹ o dient que, “ce ne fut pas seulement l'émotion, mais l'excitation générale”.⁴⁰ Fins i tot, G. D. Rochester, rememorant la descoberta, sembla recordar l'excitació de Blackett:

Blackett's contribution, apart from training us in the technique of counter control and giving us the use of his large magnet, was of vital importance in that he took a keen personal interest in this work, insisting on seeing every event of interest. Indeed, I recall that when shown the first V^0 event he said immediately that he had never seen anything like it before and was convinced it was entirely new. Moreover, he took the data and worked in parallel with us, trying out various decay schemes.⁴¹

En realitat però, i malgrat aquest entusiasme inicial de Blackett, la projecció immediata de la troballa és discutible. Com ja ho ha apreciat A. Pais:

In later years a discovery like Rochester and Butler's, however preliminary the data, would at once have caused excited corridor talk and would have set telephones ringing across continents. In 1948, I must have heard of the Manchester pictures but do not recall their causing a stir or immediate awareness of a new era being upon us in respect to the structure of matter.⁴²

Aquesta manca d'entusiasme, davant la revelació del que se suposa un descobriment únic, s'associa a un sentiment d'expectativa, anàlogament a la reacció davant l'evidència de Leprince-Lhéritier del 1944. Ara, de nou, es presenta un fenomen singular: dues traces forcades que, tot i els esforços del grup de Manchester, no es repeteixen en l'experiència. No en va, la publicació dels resultats de Manchester es farà a *Nature* el desembre del 1947, més d'un any després de la trobada del primer exemple (15-10-1946) i més de sis mesos després de detectar-ne el segon (23-5-1947).

De fet, en el mateix article de Rochester i Butler es fan ressó de possibles evidències prèvies de les noves traces forcades. En concret, a més del cas Leprince-Lhéritier (1944), citen un cas de Jánossy, Rochester i Broadbent (1945) i un altre de Daudin (1944). Les fotografies apareixen publicades en aquests articles i es pot reconèixer la presència de les suposades traces forcades, però naturalment el text no les reconeix ni en fa una valoració en termes de noves partícules, llevat del cas ja estudiat de Leprince-Lhéritier.⁴³

³⁸Per tant, es tractava probablement de la desintegració $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$.

³⁹Brown, Rechenberg (1996), 295.

⁴⁰Kayas (1982), 154.

⁴¹Rochester (1989), 61.

⁴²Pais (1986), 511-2.

⁴³V. apèndix A, fig. A.5.

En aquest període que transcorre entre la detecció i la publicació, des de Manchester s'intenta captar les opinions de la comunitat. L'expectativa marca aquestes primeres reaccions dels físics, tot i que: “[...] all of whom were at least sympathetic to the idea of 1000 mass unstable particles thought it was clear that there was an air of caution also.”⁴⁴

D'entre ells, els més entusiastes resultaran antics col·laboradors del grup. L. Jánossy, ja des de Dublín, sense dubtar-ne en cap moment, realitzarà mesures addicionals de les traces per acotar els errors considerats. B. Rossi, també antic col·laborador ocasional el 1938, i ara des del MIT, convindrà que “that it would be quite difficult to explain the two pictures otherwise”.⁴⁵

També des de Dublín, W. Heitler es mostrarà especialment confiat pel que fa a la proliferació de noves partícules, nogensmenys caldrà esperar com evoluciona el camp experimental.⁴⁶

John Wheeler, des del *Palmer Laboratory* de Princeton, on del 1945 al 1949 planificarà i propulsarà la investigació en raigs còsmics, serà el més reticent a acceptar les evidències.⁴⁷

Per contra, Heisenberg serà dels més entusiastes i de mentalitat més oberta pel que fa a la possibilitat de nous elements. No obstant això, la seva percepció de les noves partícules com realment noves i independents és molt particular:

As I wrote before, from theoretical reasons I like these new elementary particles and I feel that one finally will find an almost unlimited number of elementary particles, just in the same way as the hydrogen atom has got an unlimited number of stationary states.⁴⁸

Sembla evident, doncs, el sentiment d'expectativa que envolta el descobriment. Pauli escriurà a Rabi:

Moreover you will soon read in ‘Nature’ a publication by Rochester and Butler (two people from Blackett’s laboratory in Manchester) claiming evidence for new kinds of

⁴⁴Rochester (1988a), 127.

⁴⁵Rossi a Rochester, 28-11-1947 (Georges Rochester Collection).

⁴⁶Després d'agrair el manuscrit de l'article i les fotografies, Heitler expressa entusiasme pel que fa a les evidències experimentals de nous elements i, com a teòric, una certa cautela pel que fa a intents prematurs de teorització, remarquant que és en el camp de l'experimentació que han de continuar els passos:

Your evidence is quite convincing and clear and I have therefore no comment to make. And as the theoretical side I do not wish to make any comments yet. I feel it somewhat futile to speculate at the present shape about the genealogy of all the many particles that have been discovered now (most of which have only been observed once.). Evidently, the field is for the experiment now to find out all the particles that exist and the modes of decay they undergo.

Heitler a Rochester, 23-11-1947 (Georges Rochester Collection). Serà a Dublín on per primer cop es presentaran les noves partícules fora de Manchester, en la xerrada que donarà Rochester el 3 de desembre de 1947 a l'*Institute for Advanced Studies*. La publicació a *Nature* sortirà el 20 de desembre del mateix any.

⁴⁷Un cop més, en opinió de Rochester (1988a, 127), Wheeler no capta la importància de les traces forçades:

Wheeler was the only critic, raising the question of some form of neutron reaction on nitrogen or oxygen. Clearly he had not realised the importance of the non-appearance of recoils of any kind.

⁴⁸Heisenberg a Blackett, 9-12-1947 (Blackett Archive, Royal Society, London).

mesons, which however, is based on two photographs only. So I am waiting for an amplification of this results.

For a theoretician, I believe, it is wise to wait at the present moment with any meson theory. It is likely that many new kinds of mesons will be found in the nearer future (and some of them may even be true).⁴⁹

D'aquestes cites es pot desprendre com la manca d'entusiasme també es pot entendre per l'associació prematura dels nous fenòmens amb els fenòmens mesònics que centraven l'atenció de la física de raigs còsmics. En aquest sentit, no representarien ni un trencament ni una gran descoberta —com els podem entendre en vista a les posteriors evolucions del camp— sinó més aviat com la continuació de les investigacions en aquest quadre dels mesons que encara no és perfectament entès.⁵⁰ No en va, aquestes evidències sorgeixen en les investigacions dirigides a explicar la composició mesotrònica d'aquesta radiació i, per tant, dels mateixos instruments, la mateixa metodologia experimental per calcular-ne les propietats —en particular la massa—, i ràpidament, dels intents de justificar-los en el marc de la mateixa teoria mesònica.⁵¹

Aquesta associació dels nous fenòmens amb els fenòmens mesònics en estudi es fa palès també en la nomenclatura que s'utilitza per descriure'ls. De fet, les primeres reaccions veuran les noves partícules simplement com *heavy mesons*. Nomenclatura que es conservarà i s'anirà restringint, davant posteriors evidències, als modes de desintegració del mesó K. El reduït coneixement de les propietats d'aquestes noves partícules, de les quals inicialment sols se'n té una estimació de la massa, contribueix a veure-les simplement com casos més pesats d'aquests mesons de raigs còsmics, dels quals s'acaba de discernir dos exemplars: π i μ .

Exemplificant aquesta actitud es troba la resposta de Powell al descobriment de Manchester. Així, aprofitarà per notar que el balanç energètic de la desintegració π - μ , que el seu grup a Bristol acaba d'evidenciar, sembla requerir l'existència d'una nova partícula neutra de massa $\sim 130 m_e$ que podria relacionar-se amb els nous descobriments.⁵² De fet, la carta

⁴⁹Pauli a Rabi, 15-1-1948, a Pauli (1993, 500).

⁵⁰Realment, passarà molt de temps entre aquest descobriment i la inclusió final en un quadre teòric que en validi la utilitat. En paraules de Perkins (1988, 189):

The 2 V-events (in retrospect one was $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, the other was a $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ event) presented a real puzzle; we could not know at that time that from a handful of such V-events, a new quark degree of freedom (strangeness) was to emerge, to give us the u, d, s quarks of Gell-Mann and Ne'eman in 1964; or that we would have to await until 1974-77 to discover two new quark flavours, c and b.

⁵¹V. sec. 2.1, p. 62. La influència de les recerques en pions i muons estarà contínuament present en tota l'etapa de descobriment de les partícules estranyes.

⁵²El "neutretto" de Powell respon a la partícula que teòricament venia predita en la teoria dels dos mesons concebuda per Sakata i Inoue (1946) i Marshak i Bethe (1947), segons les quals:

mesó de Yukawa \rightarrow mesó de raigs còsmics + mesó neutre

"Neutretto" també era un dels noms que originalment s'aplicava al mediador neutre de la interacció nuclear, per tant, al π^0 . Aquesta possibilitat, apareix experimentalment com a conseqüència de mesures del

també mostra els inicis de la tensió entre ambdues tècniques (cambra de boira-emulsions nuclears) com a instruments de detecció de les partícules en raigs còsmics:

Powell was very glad that they have now emulsions, which are very sensitive for electrons. He can detect already now electrons with 300 Kilovolt and hopes to reduce further this lower limit of electron energy. So the emulsions may become a serious competition to the cloud-chambers.⁵³

El mateix tractament que Rochester i Butler donen a les seves evidències ens permet dubtar que els veiessin com fenòmens que trenquessin amb aquesta tradició de la física mesònica. De fet, per als autors, “They represent a type of process with which we are already familiar in the decay of the meson into an electron and an assumed neutrino, and the presumed decay of the heavy meson recently discovered by Lattes, Occhialini and Powell.”⁵⁴

La seva cautela inicial respecte les traces forçades es fa encara més evident en la minsa ressonància que tindran en els congressos immediatament posteriors.⁵⁵

quocient de masses $\frac{m_\pi}{m_\mu}$ massa grans, que permetien un marge major en el balanç energètic de la reacció de desintegració ($\pi \rightarrow \mu + \nu$) que per tant, es podia entendre com la massa de la partícula neutra involucrada en la desintegració. Cal entendre la dificultat experimental en el càlcul d’aquestes masses. En l’article on es fa evident la desintegració, i per tant l’existència de dos mesons de raigs còsmics diferenciats, el *modus operandi* del grup de Bristol consistia a comparar la densitat de grans per a ambdós tipus de traces. Comparant l’abast de les traces significatives a les quals les densitats de grans tenen el mateix valor es pot donar directament un valor per $\frac{m_\pi}{m_\mu}$. En aquesta primera estimació obtenen $\frac{m_\pi}{m_\mu}=2$. En el congrés Solvay de l’any següent (27 setembre–2 octubre de 1948) (p.111) el valor de la massa d’aquesta partícula neutra ja apareixerà reduïda:

A π -particle, of mass $310 m_e$, decays spontaneously with the emission of a μ -particle of mass $\sim 200 m_e$, and a neutron meson of mass $\sim 80 m_e$.

Però en aquest mateix congrés, L. Rosenfeld (p.181) encara veurà en aquesta partícula la companya neutra del muó de raigs còsmics:

We may now regard as firmly established the existence of mesons of three different masses, with a genetic relation between them. The π -mesons, of mass $M_\pi \approx 300 m$ [$300 m_e$], decay within about 10^{-8} sec. into a pair consisting of a charged μ -meson of mass $M_\mu \approx 200 m$ [$200 m_e$] and a neutral (μ_0 -meson) of mass $0 \leq M_{\mu_0} < 90 m$ [$90 m_e$].

Aquest neutretto, tan aviat atribuït al π^0 com a un suposat μ^0 semblarà perdre pes amb el descobriment del $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ el 1950, i amb l’ajust del balanç de massa en la cadena de desintegració $\pi \rightarrow \mu + \nu$, $\mu \rightarrow e + \bar{\nu} + \nu$.

⁵³Pauli a Rabi, 15-1-1948, a Pauli (1993, 500).

⁵⁴Rochester, Butler (1947), 855.

⁵⁵És interessant notar els records de Dalitz (e-mail 11-10-99) quan l’autora li demana sobre la transcendència dels esdeveniments de Rochester i Butler:

Yes, I was at Bristol for the academic year 1948-49. I think that you should keep in mind that there was very little cosmic radiation (CR) research going on during the war years (a notable exception was the work of Conversi, Pancini and Piccioni, who worked secretly in Rome), so conditions then were rather special. When the war ended, we all made a fresh start, the search for the nuclear-force (NF) meson of Yukawa having the first priority. The pion was established by the end of 1947, and shown to decay to the muon, which was shown not to be a NF meson. However, many physicists wondered whether there might be other NF mesons of greater mass than that of the pion.

The first candidates for heavier mesons were the Rochester-Butler (R&B) V^+ and V^0 events, discovered in a program of CR research aimed at understanding its nature and origins, using a cloud chamber with a strong magnetic field at ground level in Manchester. At the time, these events were accepted only as candidate events by CR physicists but it was noted that one (or perhaps) both could fitted

En la conferència de Pocono (30 de març–1 d'abril de 1948), ben coneguda per les aportacions fetes a la QED, B. Rossi, encarregat de la discussió sobre raigs còsmics, no fa cap menció de les noves partícules. Al congrés de Caltech (21–23 de juny de 1948) la menció de Rochester és mínima. Genèricament, Rochester exposarà els resultats dels estudis sobre les ruixades penetrants i tímidament, en un peu de fotografia on explica quatre negatius, apareix la primera traça forçada positiva, que descriurà dient:

[...] is an example of a locally-produced penetrating shower consisting of several penetrating particles, two identifiable protons, and a small number of electrons. The interpretation of the deflection in track (4) [desintegració V^+] has been discussed by Rochester & Butler (Nature 160, 855, 1947).⁵⁶

Això no obstant, històricament sembla que els esdeveniments trobats a Manchester s'han convertit en el punt de partida per al descobriment de les partícules estranyes. Sovint també, s'ha caracteritzat els anys següents com “the years of frustration”.⁵⁷ Tot i que aquest és un apel·latiu que s'ajusta perfectament a l'activitat del grup de Manchester pel que fa a la confirmació de les traces forcades, la seva generalització al conjunt de l'activitat en el nou camp és un excés. Noves evidències apareixeran ràpidament en cambra de boira, però també en les noves emulsions més sensibles. La confusió, però, romandrà fins a principis dels 50.

1.2.3 Bristol: millores en emulsions. Del π - μ al “ τ oficial” (1949)

Malgrat que després de les dues traces forcades trobades a Manchester s'iniciarà una etapa infèrtil per aquest grup, n'hi haurà d'altres que trobaran indicis de nous elements en aquest període, com l'EP, la Universitat de Rochester o el grup de Bristol. Els exemples que trobaran seran de tractament encara difícil i catalogació confusa, però no se'n podrà obviar la presència i portaran associada una producció teòrica que intentarà explicar-los.⁵⁸ D'afegit, aquests exemples menys coneguts i dispersats per diferents laboratoris trobaran un punt comú en una nomenclatura diferenciada, més enllà de la percepció visual de les traces

for a V-mass value of about 500 MeV. The V^0 was found in Oct.'46, the V^+ in May'47, so that they were rare events. These events were not a great shock, just a signal that perhaps this field of research looked likely to be fruitful.

The physics community as a whole ignored this tentative result. The nuclear physicists were all fully occupied with the study of the pion and its laboratory production. They believed that mesons which were so heavy and so rare would have little importance for the properties of nuclei, their goal. Also the CR physicists were few in number.

⁵⁶Rochester (1948), 24. Sobre aquesta intervenció, Rochester explicarà a Pais (1986, 512):

‘It is true that there is meagre reference in the printed version... I did, however, say more about the V-particles in my talk and I spoke privately with a number of the participants, notably, Anderson, Brode, and Rossi’.

⁵⁷Rochester (1989), 62.

⁵⁸Per als primers intents teòrics d'explicar els nous elements v. sec. 2.1, p. 62.

forçades de Rochester i Butler. Aquest apartat intenta donar una visió general d'aquests experiments poc reconeguts històricament i lligar-los amb el desenvolupament d'una nomenclatura que els sobreviurà: la τ , que més endavant desencadenarà l'ús més general de lletres gregues per definir diferents tipus d'esdeveniments de noves partícules, en especial associats a la tècnica de les emulsions.

Precisament pel que fa a la tècnica de detecció, fins aquest moment del descobriment de les traces forçades la cambra de boira ha estat l'element de detecció únic. A partir d'ara, però, les emulsions fotogràfiques començaran també a dir la seva. Cal recordar que les emulsions fotogràfiques acaben de mostrar el seu poder en la distinció π - μ . La difusió internacional d'aquesta consecució del grup de Bristol, sobretot a partir dels treballs de C. F. Powell i G. P. S. Occhialini, farà que altres grups s'interessin per la tècnica que ha permès esclarir el problema dels “mesons” de raigs còsmics (π i μ).

L'École Polytechnique. En primer lloc, l'EP, que mantindrà la tradició en cambra de boira com a línia d'investigació principal, desdoblarà el grup de recerca en raigs còsmics per ocupar-se, també, dels fenòmens que les emulsions podien mostrar. Leprince-Ringuet presidirà ambdues línies d'investigació.

El 24 de maig del 1948, aquest grup presenta a l'*Académie des Sciences* l'anàlisi d'una estrella σ , trobada en plaques Ilford exposades a 4300 m,⁵⁹ que sembla tenir l'origen en una altra estrella creada per una partícula, la traça de la qual, comparant el seu abast amb el recompte de grans, dona un punt que no sembla poder incloure's en la corba produïda per un protó o per un pió, sinó que correspondria a una corba de massa intermèdia.

L'argument és doblement suportat per un balanç energètic de l'estrella creada per aquesta suposada partícula intermèdia. L'estrella ha de donar lloc al mesó σ i el balanç és compatible amb la desaparició d'una partícula de massa superior a $800 m_e$.

La interpretació, però, és cautelosa i fortament supeditada a l'existència dels altres indicis:

Mais nous tenons à préciser notre pensée: une photo unique ne fournit pas une preuve décisive, mais seulement une indication favorable. Il s'agit d'un événement rare et difficile à observer. Il se peut que d'autres physiciens rencontrent un ou plusieurs phénomènes en rapport avec celui que nous présentons: c'est par la conjonction d'un petit nombre de telles observations qu'une certitude pourra s'établir.⁶⁰

Leprince-Ringuet, en nom del grup, torna a presentar les seves observacions al *Symposium on Cosmic Rays* (21-23 de juny de 1948) celebrat a Caltech.⁶¹ L'autor comença

⁵⁹Recordem que una estrella σ era la manera de designar la percepció visual de la desintegració dels π^- produïda per la seva interacció amb la matèria nuclear que l'envolta en les emulsions. Aquesta desintegració es produeix en partícules carregades que visualment semblen una estrella.

⁶⁰Leprince-Ringuet *et al.* (1948), 1897.

⁶¹Recordem com G. D. Rochester també exposarà els resultats genèrics en ruixades penetrants del grup de Manchester en aquest congrés de Caltech i la reduïda menció de les traces forçades. Cap més resultat

presentant les evidències prèvies, que per a ell són el seu exemple del 1944, junt amb Lhéritier,⁶² i les traces forcades de Rochester i Butler del 1947. Una idea interessant es fa present en l'exposició: el problema de les diferents característiques de les traces que priva de sumar les evidències per assegurar la realitat dels nous esdeveniments:

It appears probable that this particle is the same as that mentioned in (A) [evidències prèvies], except that its manifestation is different, since in the present case it produces a nuclear disintegration, while in the previous cases observations were made during the motion of the particle or at the moment of its disintegration in flight.⁶³

Però la producció d'estrelles en aquest cas afavoreix els càlculs sobre les traces, mercès al coneixement de les secundàries que involucren, igual com en les desintegracions en vol de Rochester i Butler (1947).

experimental sobre nous elements és discutit en aquest simposi. Sembla clar, doncs, que el descobriment dels nous elements no es va caracteritzar per un impacte immediat i que Leprince-Ringuet emfatitza molt més la difusió dels resultats en els nous elements que no pas els descobridors oficials, Rochester i Butler. Això no obstant, en el recull històric de París (1982), Rochester (p. 173) presenta el simposi de Caltech com un moment clau en el reconeixement dels nous elements:

All the leading cosmic ray specialists were there and the V-particle work in particular received good publicity. As a result many cosmic ray physicists, notably C. D. Anderson, switched their cloud chambers to ps [*penetrating showers*] work.

De fet, en realitat el líder de la conferència, R. Oppenheimer, mostrarà la seva impressió pel treball realitzat, principalment, a l'EP. En les *Concluding Remarks* del simposi (p. 181) dirà:

What we have heard here, the arguments about the nature of the incoming cosmic radiation, the arguments about the origin of the incoming cosmic radiation, made a very deep impression; and so too the new evidence as to the kinds of particles which are found, evidence on which the theoretical physicists has learned to be properly humble. Apart from arguments which are almost arguments of consistency, and which make us hesitate to believe that those mesons that are easily produced by nuclei are hard for nuclei to capture, there are of course no *a priori* views at the moment about what the things may be. I think it hard to disbelieve Le Prince Ringuet's evidence for a very heavy meson.

El 1948, doncs, el tímid reconeixement de les noves partícules deu molt a la tasca de difusió de Leprince-Ringuet. Veurem com la investigació del grup de Caltech el 1950 transformarà, a posteriori i totalment, aquesta percepció. El fet s'agreuja perquè aquesta captura del mesó pesat de l'EP serà desmentida més endavant. Friedlander (1988, 99) ens ho explica:

One of the fascinating double-stars which travelled the labs of Europe came out of Leprince-Ringuet's lab; it was published in two or three places, of a double star connected to a highly ionising track which was claimed at one stage to be a K^- ejected from one star and going to the next. For many years this was thought to be the explanation. However, I think in late 1952 or 1953 Beppo Occhialini brought this particular square centimeter of valuable information to Bristol so that we could look at it. It was Beppo's idea to re-soak the emulsion and swell it up whereupon the track and the star separated and weren't connected. The published report says that they were; it looked that way but you needed great resolution in depth to be sure.

⁶²Per reforçar aquesta suposada evidència, Leprince-Ringuet (1949, 42) ha de començar desprestigiant la crítica de Bethe (1946):

The uncertainty in M caused by scattering has been analyzed by H. Bethe, who concludes that the lower limit of the mass cannot be less than $600 m_0$, while the upper limit could reach the proton mass if all the probable errors are doubled and added together with the same sign. This, however, has a probability of less than 1 percent, so that the incident particle is probably not a proton.

⁶³Leprince-Ringuet (1949), 43.

Quan les mesures depenen exclusivament de la informació deduïda de la traça per ella mateixa, apareix més clara la problemàtica de la sensibilitat de la tècnica usada. En aquest cas concret, per exemple, Leprince-Ringuet posa de manifest un d'aquests problemes tècnics, el *fading* (esvaïment):

We may then ask if, among the isolated mesons observed in photographic emulsions, there are very heavy mesons which we call τ -mesons. This question cannot be answered at present because our plates are usually exposed over a period of several weeks, thus causing fading among the tracks with the result that we get from the grain counts a mass spectrum almost continuous between $200 m_0$ [$200 m_e$] and the proton mass. We are therefore unable to detect with certainty the τ -mesons which come to rest in the emulsion without giving rise to nuclear phenomena.⁶⁴

El fenomen de l'esvaïment es relaciona amb la incertesa del temps de formació d'una traça en el període d'exposició, que no permet assumir que una mateixa densitat de grans significa igual ionització específica. Una exposició curta, permet reduir els efectes d'aquest fenomen. En exposicions més llargues la incertesa sempre és present.

Les làmines fotogràfiques de l'experiment de Leprince-Ringuet corresponien al tipus Ilford C2, per a les quals l'esvaïment no era menyspreable. Això no obstant, aquesta limitació, com altres referents a la sensibilitat de les emulsions, es reduirà notablement amb les emulsions sensibles a electrons: la Kodak NT4 del 1948 i la Ilford G5 del 1949.⁶⁵

A més d'aquesta evidenciació dels problemes tècnics per a la resolució de l'existència de les noves partícules, la cita anterior és rellevant perquè per primer cop s'utilitza el nom τ per descriure els exemples existents de massa major que el pió i menor que el protó, cosa que els confereix un caràcter específic més independent de la fenomenologia de l'experiment, i indica un intent d'unificar les evidències. La nomenclatura τ , doncs, sembla que l'aplica per primer cop Leprince-Ringuet en aquest *simposium* a Caltech. Uns mesos després, en el simposi celebrat a Bristol (setembre 1948) el nom ja s'aplica englobant diferents evidències conegudes fins el moment, entre les quals una nova aportació des dels EUA, del grup de la Universitat de Rochester, a Nova York:⁶⁶

⁶⁴Ibíd.

⁶⁵En el problema concret de l'esvaïment, jugarà un paper essencial Cesar M. G. Lattes. Occhialini havia conegut Lattes al Brasil i el convidarà a unir-se al grup de Powell a Bristol, on arribarà el 1946. Lattes es va adonar que si s'afegia bor a les làmines disminuïa l'esvaïment. Amb aquesta millora, Bristol detectarà, el 1947, els primers exemples de desintegració π - μ i per tant en permetrà la diferenciació. Lattes, immediatament exportarà les noves Ilford desenvolupades a Bristol al sincrociclotró de Berkeley, on serà el primer en detectar pions artificials junt a E. Gardner. La publicació oficial està datada el 12 de març de 1948. Cal remarcar que el sincrociclotró havia estat posat en funcionament el novembre de 1946 amb 330 MeV d'energia abastable, suficient per detectar pions. Però aquesta detecció no es produïa a causa de les dificultats amb les velles emulsions.

⁶⁶Per la mateixa època, també al congrés Solvay (27 setembre–2 octubre de 1948) Powell (p.118) parla genèricament de τ com:

The grain counting curves showed a well defined group between that of the π mesons and that of the protons. The mean value of the mass of this group is about 800 electron masses, and they are referred to provisionally as τ particles.

At least three types of charged mesons are known at present, and ‘meson’ here indicates any particle with mass different from that of an electron or nucleon. These are:

- 1 the μ -meson of mass $200 \pm 20 m_e$
- 2 the π -meson of mass $286 \pm 15 m_e$ and
- 3 one or possibly several particles with masses between 700 and 1,000 m_e .

The last of these is perhaps not yet quite certain. The evidence rests mostly on individual events. LEPRINCE-RINGUET found a particle giving rise to a head-on electron. [...] ROCHESTER and BUTLER found a particle decaying spontaneously in flight into a lighter particle. [...] Then LEPRINCE-RINGUET found in an emulsion a particle with mass distinctly less than that of a proton and higher than that of a μ -meson (from grain density and scattering). [...] PETERS and BRADT found numerous tracks in the high atmosphere which, according to grain density and range, seem to have a mass between 700 and 1,000 m_e .

Each of these items of evidence is rather convincing, especially the second and third, but as long as there is only one example for each event we cannot be quite sure about the existence of these particles. For the purpose of this report we call the last type the τ -meson, the names ρ - and σ -meson being already allocated.⁶⁷

La Universitat de Rochester. Les evidències de Bradt i Peters, representants del grup de raigs còsmics de la Universitat de Rochester, seran trobades en làmines fotogràfiques Ilford C2, carregades amb bor per disminuir l’esvaïment, exposades durant quatre hores a una alçada de 90000 peus. En aquest cas, les característiques singulars dels esdeveniments seran l’allargada de les traces ($>1000 \mu$) i el fet que no donin secundàries observables al final del seu abast. Aleshores, el valor aproximat de la massa ($\sim 800 m_e$) s’inferirà del recompte de grans de les traces senzilles, amb les dificultats de resolució que això comporta.

De fet, el propi Peters es mostra reservat respecte les conclusions adduint que, tot i que l’esvaïment no pot ésser una causa d’error important a l’hora de l’exposició, sí que es pot haver incrementat com a conseqüència de grans canvis en la temperatura. A més, pot haver existit una preexposició de les làmines durant el transport per avió des de Bristol, on havien estat preparades.

Però en aquests esdeveniments de Bradt i Peters sobtarà una altra característica. La comparació en la densitat de grans mostra com les traces dels suposats mesons τ s’originen en explosions nuclears. A la vegada, “by analogy with the ejected π particles we should expect them to have a strong interaction with nuclei.”⁶⁸ Però les llargues traces que creuen el total de l’emulsió mostren que la partícula ha de viure més de 10^{-11} s, ja que aquest és l’ordre de magnitud del temps que triga una partícula en travessar-la. Per tant, es comença

Cal notar també que Powell presenta com evidències d’aquest grup les proporcionades per Leprince-Ringuet i Rochester. Ambdues sota la denominació τ i al mateix grau d’evidència.

⁶⁷Heitler (1949a), 120.

⁶⁸Powell (1948), 118.

a observar una certa incoherència pel que fa a la creació i la desintegració dels nous elements, tot i que aquesta incoherència encara és atribuïble a dificultats experimentals:

We cannot therefore set an upper limit to the life-time from these considerations, apart from the fact that the interaction of a τ meson with a nucleus may not produce a disintegration observable in the conditions of the experiments.⁶⁹

Malgrat les imprecisions, els esdeveniments del grup de la universitat de Rochester han estat trobats mercès a les noves emulsions desenvolupades al laboratori de C. F. Powell a Bristol.

Bristol. Powell havia estat alumne de doctorat de C. T. R. Wilson al Cavendish. El 1927 arriba a Bristol i, el 1935, el seu grup comença a construir un accelerador Cockroft-Walton. Inicialment, la formació a Cambridge el porta a usar una cambra de boira per estudiar les interaccions de les partícules produïdes. Però W. Heitler, aleshores teòric a Bristol, crida la seva atenció sobre el treball fet a Viena en emulsions per M. Blau i H. Wambacher. A finals dels 30, i en menys mesura durant la Segona Guerra Mundial, Powell aplica les emulsions als raigs còsmics i també als acceleradors de Bristol i Liverpool.

L'impuls després de la guerra vindrà del govern a l'encoratjar la recerca nuclear i propulsar el desenvolupament d'acceleradors, d'una banda, i d'emulsions millors per l'altra. Blackett, a partir del 1945, esdevé el president d'un comitè científic influent que tenia entre les seves competències l'estudi de la recerca nuclear independentment del servei de defensa. L'amistat amb Occhialini, que ara es trobava per mediació del propi Blackett en el reconegut grup de Powell, probablement va influir en la consideració de les millores de les emulsions nuclears que aquest comitè va impulsar a través de donacions. A Bristol, Powell organitzarà un poderós grup de recerca en aquest àmbit de les emulsions.⁷⁰

Un dels objectius principals era l'augment de la sensibilitat, entesa com la capacitat de gravar partícules carregades relativistes, és a dir, obtenir emulsions sensibles a ionització mínima, o com sovint es coneixien, emulsions sensibles a electrons.⁷¹

⁶⁹Ibíd.

⁷⁰O'Ceallaigh (1982, 188) formarà part d'aquest grup i ens en dona una visió significativa:

I may conclude, perhaps by giving some personal impressions of the Bristol Group as a whole. It was made up of people of many nationalities from five continents, all with different cultural and educational backgrounds. Inevitably, a small group of the more able people dominated the scene, the weaker members being helped and sustained by the stronger. I was struck by the fact that the background of classical physics of many people left something to be desired. Not many of us had an adequate mathematical or theoretical background.

⁷¹A mitjan 1946, la casa Ilford presentarà noves emulsions a ran del treball promogut pel *Emulsion Panel*. Ilford presentarà una nova emulsió en quatre mides dels grans (A, B, C, D, on la mida va disminuint) i amb tres sensibilitats diferents que van en augment (1, 2, 3). El 1948, la casa Kodak presentarà la NT4, emulsió que ja permetrà gravar traces de partícules relativistes i, tot seguit, la casa Ilford contraatacarà amb la nova Ilford G5, sensible també a partícules relativistes. No obstant això, l'arribada de la Ilford G5, la primera emulsió sensible a electrons de la casa Ilford, trenca la relació entre sensibilitat i mida dels

El suport governamental va ajudar, doncs, al desenvolupament d'aquestes emulsions sensibles a electrons, en concret, les Ilford C2 i Kodak NT2, a partir del suggeriment fet a les cases Ilford i Kodak per part d'Occhialini i Powell. De resultes, Lattes, Muirhead, Occhialini i Powell (1947), des de Bristol, van diferenciar els dos mesons de raigs còsmics, posant en primera línia la recerca amb emulsions nuclears. Per a la visualització dels electrons secundaris produïts en la desintegració del μ caldrà esperar la Kodak NT4 del 1948.

Precisament en aquests experiments del grup de Powell realitzats al Jungfraujoeh (Alps suïssos, 4158 m), en què es detectarà la desintegració muònica, s'observarà també una nova evidència de mesó “of mass $\sim 1,000 m_e$ ”, i més important encara, “observations on their mode of decay”.⁷²

De nou, el cas és únic i sorprenent, pel nombre de secundàries presents i pel llarg abast que mostra la primària, més de 3000 μ . Aquesta primària, després d'arribar suposadament al final del seu abast (per l'augment de la densitat de grans) es desintegra en tres secundàries.⁷³

L'article mostra com, d'entrada, les millores en la tècnica experimental —revelatge uniforme de les làmines⁷⁴ i minimització de l'esvaïment— permeten més precisió en el recompte dels grans de les traces i per tant en les mesures de massa que d'ell s'inferiran.

Però una altra característica dóna també fiabilitat al fenomen detectat: la possibilitat de calcular la massa a través de diferents mètodes i veure que els resultats són compatibles i de fet requereixen una nova partícula.

En primer lloc, la massa de la primària es pot estimar a través de la mesura directa sobre la traça del recompte de grans en funció de l'abast, que porta a $m_k = 1080 \pm 160 m_e$.

grans. El problema era que a menor mida dels grans, major sensibilitat però condicionada a la disposició de microscopis més potents per analitzar les traces. Així, per exemple, el químic francocanadenc Demmers, que treballarà en noves emulsions al marge de les empreses a la Universitat de Montreal, va aconseguir emulsions de sensibilitat major que qualsevol de les Ilford i amb mida dels grans de 0.08 μm . La Ilford G5, tindrà una mida dels grans relativament gran 0.3 μm , comparable a la sèrie A, que permetia una revisió amb microscopis poc potents dels esdeveniments, al contrari que la de Demmers. Però la disminució de la mida dels grans permetia mesures de la densitat dels grans més acurades, i consegüentment, de la ionització específica que ens permet avaluar la massa. Amb la de Demmers, es podia comptabilitzar 15 grans cada 100 μ pel cas d'una partícula d'ionització mínima, mentre que el màxim que es podia comptabilitzar era de ~ 900 grans en la mateixa longitud, per tant, una relació de 1/60. La Ilford G5, per contra, comptabilitzava un mínim de 20 grans per 100 μ i un màxim de tan sols 120, per tant, una relació 1/6.

⁷²Extret del subtítol de l'article, Brown *et al.* (1949b), 82.

⁷³Vegeu fig. A.4, apèndix A.

⁷⁴El problema del revelatge uniforme venia del fet que, en aquest procés, el revelador penetrava molt lentament i això dificultava un revelatge homogeni del gruix de les emulsions. El límit es trobava en 50 μ , que aproximadament corresponia al gruix mínim necessari per detectar la desintegració π - μ . Dilworth, Occhialini i Payne, el 1948 a Bristol, van observar que a major temperatura el revelador actuava més ràpidament. Aleshores van aplicar aquest revelador a baixa temperatura (4° C) per impregnar homogeniament, i quan tota l'emulsió estava homogeniament impregnada s'escalfava per afavorir la reacció que en provocava el revelatge, ara uniforme. Un bany fred ràpid aturava de nou aquest procés homogeniament. El mètode es podia aplicar a emulsions de gruix fins a 600–1000 μ , cosa que va permetre el desenvolupament d'emulsions més gruixudes, que, per tant, podien detectar amb més probabilitat primàries i secundàries desintegrant-se en l'emulsió o arribant al final del seu abast.

En segon lloc, a través d'una mesura de la dispersió coulombiana s'arriba a un valor de la massa de $m_k=1800\pm 400 m_e$, però es considera més fiable el primer càlcul per les incerteses en aquest darrer mètode.

Finalment, i més compatible amb el primer valor trobat, la massa es pot recalcular partint del coneixement dels elements que intervenen en la desintegració, considerant que la desintegració “is to be interpreted in terms of particles of which the existence is already established”.⁷⁵ En aquest cas, la fotografia mostra una secundària lenta (molt ionitzant) que en un punt crea una estrella de captura σ , per tant és un π^- . Les altres dues, més ràpides, surten de l'emulsió i no són compatibles amb electrons sinó pions o muons. Per tant, es poden combinar les suposicions que aquestes secundàries representaran o bé π ($m_k=985 m_e$), o bé μ ($m_k=869 m_e$), amb les mesures de dispersió o recompte de grans, i veure quins casos són més favorables a l'evidència experimental:

We may sum up this evidence, and that provided by the mass determinations by grain-counting, by saying that there is some support for the view that the three product-particles are π -mesons; but that the alternative possibilities of one π - and two μ -, or two π - and one μ -meson cannot be excluded.⁷⁶

En aquest exemple es manifesta la importància en la millora de la tècnica experimental, que es tradueix en una confiança respecte les mesures de la massa primària inesperada. També la importància que el fenomen observat es pugui interpretar com una desintegració, que junt amb el millor coneixement dels “mesons” de raigs còsmics diferenciats, i creguts ésser possibles secundàries, permetran inferir la massa de la primària. Genèricament, s'ha de destacar la importància de les observacions precedents que recolzen la possibilitat de la interpretació d'aquesta. En aquest sentit, els autors dediquen el darrer punt de l'article a establir la “Relation of the Present Results to Other Observations”, on citen, en igualtat de condicions i per aquests ordre, Leprince-Ringuet, Rochester i Butler, i, Bradt i Peters. Finalment, l'esdeveniment ens mostra la importància dels *golden events* ja que la desintegració del mesó K en tres secundàries deixa una petja molt característica que va permetre descobrir-la amb un sol exemple i amb relativa facilitat, tenint en compte que sols un 5.6% dels mesons carregats K es desintegren per aquesta via.⁷⁷

El grup de Powell bateja la traça primària amb el nom de κ , tot i que aquest exemple passarà a la història com el primer mesó τ , nom que, com hem vist, utilitzava Leprince-Ringuet per caracteritzar la seva evidència en emulsions fotogràfiques i que neix en el simposi de Caltech (21–23 de juny de 1948).⁷⁸

⁷⁵Brown *et al.* (1949b), 86.

⁷⁶Ibíd.

⁷⁷Vegeu apèndix C, p. 388.

⁷⁸L'associació de la nomenclatura τ al grup de Bristol no és estranya. De fet, probablement sorgeix com la successió natural als noms que ja s'havien establert des de Bristol, Lattes *et al.* (1947), per designar els tipus de mesons coneguts: π , μ ... I recordem que la nomenclatura en lletres gregues minúscules també l'apliquen per catalogar la fenomenologia dels esdeveniments observats: els mesons σ i els ρ (v. pròleg, p. 11). Sembla,

L'observació de Bristol serà rellevant per assentar l'existència del “mesó τ ” que, com hem vist, durant l'any 1948 passarà a designar genèricament totes les evidències prèvies; i prendrà encara més força amb aquesta observació del 1949 que mostra un mode de desintegració tan característic, sobretot per la visualització evident de les traces de les secundàries. La problemàtica, però, girarà entorn de si s'està parlant de la mateixa partícula o si cada esdeveniment representa un nou mesó diferent, donada la seva singularitat manifesta en les fotografies.

De fet, fins i tot el mateix grup de Manchester adoptarà el nom τ per explicar indicis trobats el 1949 en la seva cambra que continua funcionant a Manchester sota la tutela de C. C. Butler, W. G. V. Rosser i K. H. Barker. En l'anàlisi de partícules penetrants detectades a les ruixades penetrants troben tres exemples que no es poden identificar amb protons o pions. En aquest cas, però, no hi ha secundàries que facilitin el càlcul de masses de les primàries; i els càlculs inferits de les mesures del moment i la ionització sols permeten una estimació tosca dels valors de les masses entre 700 i 1100 m_e . Remarquem com la nomenclatura τ s'ha imposat i com es tendeix a unificar els esdeveniments en un sol nou tipus de mesó, definit a l'engròs per tenir una massa intermèdia entre la del pió i la del protó:

Rochester i Butler (1947) observed two events each of which was interpreted as the spontaneous decay of a τ -meson in the gas. No further example of this phenomenon has been found although more than 100 penetrating particles have been observed to traverse the chamber. Other evidence for τ -mesons has been obtained by Powell and his colleagues (Brown, Camerini *et al.* 1949), Leprince-Ringuet and Lh eritier (1946), and Alicanyan and his colleagues (1948).⁷⁹

Per entendre aquesta influència de la nomenclatura originada a Bristol cal notar que aquest període coincideix amb una activitat fervent en emulsions per determinar les característiques de π i μ . De nou, els “mesotrons” que les emulsions estan abocades a distingir i estudiar influeixen en els descobriments de noves partícules; la nomenclatura també serà símptoma d'aquesta influència.

Muntatge de cambres de boira de Berkeley. Malgrat la supremacia que semblen mostrar les emulsions, les cambres de boira també intervindran en la determinació de les propietats dels mesons. A Berkeley, el 1945 W. B. Fretter sobreposar  dues cambres de boira per determinar la massa dels mesotrons. El 1949, encara amb la idea d'obtenir millor mesures d'aquesta massa, J. G. Retallack i R. B. Brode construiran un nou muntatge amb dues cambres de boira. La cambra superior, situada en un camp magnètic de 4750 G, servia per mesurar la curvatura de les partícules penetrants que la travessaven. La cambra inferior

doncs, que Leprince-Ringuet té molt present aquesta nomenclatura a l'hora d'etiquetar la seva troballa, també en emulsions, del que sembla un nou mesó, encara més pesat que el π .

⁷⁹Butler, Rosser, Barker (1950), 161.

contenia 15 làmines de plom amb la intenció d'arribar a aturar aquestes partícules en el seu interior i poder tenir així un nombre major de partícules amb l'abast ben definit. La raó per la qual es pretén conèixer amb precisió curvatura i abast és per poder fer ús d'aquestes dues magnituds per estimar el valor de la massa de la partícula que ha deixat la traça. Aquest mètode era més acurat que els que involucraven l'estimació visual de la ionització.⁸⁰

Dels resultats obtinguts, 37 són consistents amb un valor per a la massa del mesotró de $215 \pm 4 m_e$. Sis dels resultats, però, són difícilment ajustables amb aquest valor. En les conclusions mostren el dilema entre la manca de resolució de les tècniques experimentals i l'especulació sobre l'existència de nous elements:

The existence of six observations that are not consistent with the other observations may indicate that the probable errors assigned to the individual observations are too small, or that the mass of the mesotron as observed at sea level is not unique. [...] The existence of mesotrons with lighter and heavier masses has been suggested by the observations of Hughes, Leprince-Ringuet, and Alichanian, Alichanow, and Weissenberg. Adequate evidence for the existence of these particles will require the accumulation of more data.⁸¹

Darrers exemples en emulsions. Una de les dificultats bàsiques de les cambres de boira era la baixa probabilitat de visualitzar partícules penetrants que es paressin en l'interior de la cambra. Per aconseguir esdeveniments parats, les emulsions fotogràfiques eren molt més efectives. Wagner i Cooper (1949) presentaran un article amb el nom de “The τ -Meson” en el qual donen la mesura de la massa de tres partícules compatible amb el valor $725 \pm 40 m_e$. L'experiència es realitza amb velles Ilford C2, exposades a la radiació còsmica de gran alçada, i fan notar que “high mass resolution has been achieved by minimizing the fading of the latent image and confining the observations to a single plate.”⁸² Els tres esdeveniments arriben al final del seu abast en l'emulsió, cosa que permet la mesura total de la traça. Mercès a aquest abast i al recompte de grans de l'emulsió s'infereix el valor de la massa. Però aquest valor resulta molt diferent i problemàtic si es calcula a partir de mesures de dispersió ($1500 \pm 1000 m_e$), tot i que els autors menyspreen aquesta mesura perquè aplicada als protons, mesons π i mesons μ , presents en l'experiència, tampoc donen resultats compatibles amb els valors coneguts. Malgrat que de nou l'article tampoc és conclouent, es va introduint la idea de la realitat del fenomen i de la unificació d'esdeveniments amb la denominació τ :

They give no indication of more than one particle of mass between that of the π -meson and the proton. It is suggested that the rarity and instability of the τ -meson may not be as great as previously indicated.⁸³

⁸⁰ Els muntatges de doble cambra seran molt importants en l'última etapa de detecció de les noves partícules en raigs còsmics, per tant posposem l'anàlisi fins aquell moment (v. sec. 5.1.1, p. 199).

⁸¹ Retallack, Brode (1949), 1721.

⁸² Wagner, Cooper (1949), 449.

⁸³ *Ibíd.*, 450.

A finals de 1949, Forster, que treballa a Los Angeles, mostra una nova evidència d'una partícula que entra a l'emulsió i provoca una desintegració nuclear. De l'estimació molt aproximada de les partícules que surten de l'estrella d'aquesta desintegració nuclear s'infereix que la massa de la primària que l'ha creada no pot ésser menor de 700 o 800 m_e . Els autors veuen en aquest cas un exemple similar a l'estrella de Leprince-Ringuet del 1949.

A principis de 1950, el coneixement del nou mesó pesat τ es beneficia de dues noves aportacions, aquest cop provinents de l'*Imperial College*.⁸⁴ Des de Londres, J. B. Harding presenta dos exemples de desintegració d'una primària en tres secundàries. Les traces d'aquestes secundàries són clarament coplanars, cosa que ens porta a pensar que es tracta de la desintegració d'una primària que ha arribat al repòs en l'emulsió. De la representació de la corba abast-densitat de grans, l'explicació més factible serà veure les secundàries com a pions, dels quals es pot inferir una massa per a la primària $\sim 1000 m_e$. Això no obstant, aquesta interpretació ve condicionada des del principi pel fet de tractar-se d'exemples similars visualment al trobat a Bristol un any abans, ja que les imprecisions experimentals no permeten ésser taxatius. En el primer dels casos, el recompte de grans no és molt fiable per l'efecte de l'esvaïment a causa d'un llarg període d'exposició de l'emulsió:

If we assume K represents the track of a τ -meson, the grain density measurements would now show that the latent image fading is by no means negligible and hence energies that we infer for particles a, b and c (assumed now to be π -mesons) cannot be very accurate.⁸⁵

En el segon cas, "Slight distortion, and the shortness of the tracks, makes a detailed study of this event impossible."⁸⁶ Malgrat aquestes imprecisions, la força de la forma visual característica de l'esdeveniment li confereix una certa seguretat addicional que permet als autors de l'article afirmar:

Since this event is explained in exactly the same way as was the event of Brown *et al.* (1949), the existence of τ -mesons would seem to be truly confirmed and as such should be duly considered in any meson theory of nuclear forces. From the theoretical point of view, the range of nuclear forces might well correspond to an admixture of π - and τ -mesons.⁸⁷

Veiem doncs com, amb més o menys fiabilitat, el mesó τ és present a principis dels 50, i fins i tot les primeres especulacions teòriques giren al voltant de les observacions generalitzades amb aquesta denominació.⁸⁸ Això no obstant, aquest 1950, des de Caltech, el panorama experimental es modificarà substancialment, i s'arribarà a l'acceptació final dels nous elements, amb l'adquisició d'una nova nomenclatura per definir-los i amb l'inici d'estudis teòrics específics dels nous elements, ja desvinculats dels "mesotrons".

⁸⁴De nou, els exemples són trobats en emulsions exposades al Jungfrauoch, igual com l'exemple de Bristol del 1949.

⁸⁵Harding (1950), 408.

⁸⁶Ibíd., 409.

⁸⁷Ibíd., 408.

⁸⁸V. sec. 2.1, p. 62.

1.2.4 Caltech: acceptació definitiva i estatus de descobriment oficial a Rochester i Butler

Des de Caltech, C. D. Anderson farà una nova contribució fonamental a l'estudi de la composició dels raigs còsmics en ratificar, amb escreix, l'existència de les traces forçades descobertes dos anys abans.

La trajectòria de C. D. Anderson, lligada en origen a la de R. A. Millikan amb qui inicia les investigacions en raigs còsmics el 1930,⁸⁹ ha estat objecte d'estudi històric, en especial abans dels quaranta, pel paper fonamental en la determinació de l'existència de dos nous elements: el positró i el mesotró.⁹⁰ La seva investigació principal es realitza tota en el mateix laboratori, Caltech, on es doctora el 1930, és becari del 1930 al 1933, any en què el fan professor ajudant, i el 1939 acaba sent professor de física. Fins i tot els anys de la guerra, en concret del 1941 al 1945, la seva col·laboració es fa des del propi Caltech.⁹¹ Després de la guerra, les seves investigacions continuen en raigs còsmics i en cambra de boira. El 1946, Anderson endegarà noves investigacions que clarament trauran profit de les relacions que havia establert amb les autoritats militars: reconeguda la importància de les observacions a gran alçada, el seu grup farà funcionar la cambra de boira a l'interior d'un B-29 que aconseguia arribar fins a 12 km d'alçada.⁹²

The B-29 was stripped of all armaments at the factory and modified for operation at extreme altitudes. It was equipped with optional electric generators on the engines capable of providing 750 A at 28 V, giving a magnetic field strength in the cloud chamber of 7,500 G.⁹³

La idea original era simplement investigar la natura de la radiació còsmica a aquestes alçades, però les notícies de Manchester giraran la investigació cap a la recerca més concreta de detecció de traces forçades. De fet, Anderson reconeix l'errada comesa en no copsar la importància del treball en ruixades penetrants:

⁸⁹Si afegim en aquestes dues generacions de físics l'estudiant d'Anderson, D. Glaser, completarem tres generacions de científics amb recerca en raigs còsmics que fan de Caltech un laboratori especial.

⁹⁰Sobre la relació d'Anderson amb aquests descobriments vegeu, per exemple: Anderson, C. D. (1961) "Early Work on the Positron and Muon" *Am. J. Phys.* 29: 825–30; Anderson, C. D. i Anderson, H. L. (1983) "Unraveling the particle content of cosmic rays", a Fermilab (1980): 131–54; Galison (1983); De Maria, M. i Russo, A. (1985) "The Discovery of the Positron", *Riv. Stor. Sci.* 2: 237–86; Roqué, X. (1997).

⁹¹El mateix Anderson (1983, 150) explica:

During the war years, I worked on the artillery rocket research and development project based at Caltech. This program, the brainchild of Charles C. Lauritsen, under his leadership and with the able assistance of William A. Fowler and Thomas Lauritsen, grew into a large and successful operation and made a substantial contribution to the war effort. My own part in the program was the responsibility for adapting the firing of various types of Caltech rockets from suitable army and navy aircraft.

⁹²L'argument que les col·laboracions entre científics i militars, com aquest cas d'Anderson, són conseqüència de la guerra i dels projectes del radar i de la bomba atòmica és explotat per Galison (1997, cap. 3). Galison es proposa analitzar l'impacte de la ciència en temps de guerra sobre els mètodes habituals de la física i sobre la capacitat de recerca concreta dels físics.

⁹³Ibíd.

At this point I cannot resist saying that although the B-29 flights were successful and gave considerable new information on the cosmic radiation, they could have accomplished much more. Now, of course, I am speaking of hindsight. Many of the engineering problems associated with the B-29 flights were formidable, and, unfortunately, they received much of our attention. Had we forgotten the B-29 and spent a week in the nearby High Sierra arguing only about cosmic rays and physics, we might have done better. All the clues were present and were published, one of the most important being the experiments by Lajos Jánossy, in which he used counter arrays separated by various thicknesses of lead chosen to select nuclear collisions of high energy.

Such a week, solely devoted to physics, might have given us a proper goal, that is, to study the nucleonic component of cosmic rays. The modification required in the B-29 equipment would have been very minor and would have taken no more than an hour or so to do. We needed only to have added a small block of lead about 20 cm thick and an additional counter and required triple rather than double coincidences. This would have selected nuclear events, and undoubtedly would have given us hundreds of examples of the new unstable particles, heavy mesons and hyperons, subsequently discovered by Georges D. Rochester and Clifford C. Butler. The relative intensity of high-energy nuclear events in the cosmic rays at 30,000 ft as compared with sea level must be in the vicinity of several hundred to one. In any case, this is an example of a superb piece of experimental equipment not used to maximum advantage.⁹⁴

És així com es veu en la necessitat d'adequar la seva cambra, condicionant un muntatge de comptadors Geiger, detector de partícules penetrants, per tal que funcionés com a disparador. Dues línies de comptadors se situaven al damunt de la cambra i una a sota. El disparador requeria tres partícules en la línia superior, dues en la segona i una en la inferior. A sobre la línia superior es trobaven els 20 cm de plom, entre la primera i la segona s'hi trobaven 6 cm més.

De resultes d'aquesta modificació del muntatge experimental, i de la seva aplicació a grans alçades, el grup d'Anderson aconseguirà la verificació definitiva de l'existència de les noves partícules. Concretament, l'experiment s'enfoca a visualitzar casos semblants a les traces forçades trobades a Manchester, per a les quals s'havia preparat el sistema de detecció.

Serà a partir d'aquesta repetició abundant del fenomen concret de les traces forçades que l'existència dels nous elements quedarà definitivament establerta. La verificació de Caltech, doncs, servirà per considerar els exemples de Rochester i Butler (1947) com les primeres evidències de noves partícules, les quals ells acaben de confirmar.

A finals del 1949, en una carta dirigida a Blackett, Anderson recomana el seu estudiant acabat de doctorar E. Cowan per a una estada a Manchester, comenta alguns resultats sobre desintegracions de "mesons μ " en electrons i, "de passada" l'informa de la repetició reiterada del fenomen de les traces forçades:⁹⁵

⁹⁴Anderson (1983), 151.

⁹⁵Una certa competència és patent entre ambdós grups dedicats a l'estudi de la radiació còsmica en cambra de boira. Com Butler (1982, 178) fa notar:

Carl Anderson at the California Institute of Technology had long been a rival of Blackett's and his

And now for one or two other matters. For the past several months we have been triggering the falling cloud chamber with a counter system which is sensitive to penetrating showers. These data have not been analyzed at all completely as yet, and the ever-present difficulty of making curvature measurements which are at all accurate is, of course, still with us. Rochester and Butler may be glad to hear that we have about 30 cases of forked tracks similar to those they described in their article in *Nature* about two years ago, and so far as we can see now their interpretation of these events as caused by new unstable particles seems to be borne out in our experiments. When we have some quantitative data I shall send them to you. I am wondering if any more cases of forked tracks have shown up in your experiments. [...] Cosmic rays have certainly come far since the old days; I wish we could meet sometime and talk.⁹⁶

La resposta de Blackett no es fa esperar. Centrant-se primer en el cas d'E. Cowan, a qui finalment denegaran la beca, continua amb el problema de la confirmació i mostra la frustració del seu grup:

Rochester, Butler and I are extremely pleased to hear you have succeeded in confirming the existence of some peculiar forked tracks of the general type that they found a year or two ago. We have been getting rather worried at not finding any more. Rochester and Butler have taken a lot more photographs with the same chamber and have obtained many more beautiful photographs of penetrating showers, but without finding another case. We sent a small cloud chamber to the Jungfrauoch with the hope of getting some more, but found none. I myself was fairly convinced of the reality of the phenomena, though naturally other possible interpretations were not inconceivable. I believe our failure to get more may have been due to not using sufficient thickness of lead absorber over the chamber. I will be extremely interested to hear with what arrangement you managed to get 30 forked tracks.⁹⁷

Malgrat el convenciment personal de Blackett, es fa palès encara una certa cautela sobre la possibilitat que els fenòmens no siguin realment tan nous. La manca de confirmació del propi grup de Manchester ha afectat la confiança en el descobriment. A més, les fotografies de Caltech resulten de força mala qualitat, cosa que fa l'evidència menys evident. Des de la notificació de la troballa d'Anderson a Blackett fins el moment de la publicació al *Physical Review* dels resultats de Caltech passaran de l'ordre de sis mesos. De fet, Anderson mai publicarà les fotografies per la mala qualitat a causa de la distorsió en el gas de la cambra. En una carta a Blackett, Anderson notarà:

The track distortions are large in many cases, and thus it has not been possible to assign momentum values to many of the particles. Where we feel the curvatures are significant I have indicated numerical values of MeV/c.⁹⁸

La carta continua presentant 6 exemples de partícules V i per a les quals sols indica “valors numèrics” en MeV/c per a 4 traces del total de 12 que conformen les 6 partícules

group had a small portable magnet and cloud chamber which they were using at a variety of locations, at sea-level, at a mountain station and in a large aeroplane.

⁹⁶ Anderson a Blackett, 28–11–1949 (Blackett Archive, Royal Society, London).

⁹⁷ Blackett a Anderson, 5–12–1949 (Blackett Archive, Royal Society, London).

⁹⁸ Anderson a Blackett, 10–8–1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

V. En un únic cas estima el valor del moment per a les dues traces d'una mateixa V. Lògicament, la manca de mesures acurades en els moments repercuteix en la difícil obtenció de masses.⁹⁹

Per tant, el factor essencial que porta a una primera valoració dels resultats, com corresponents a exemples de noves partícules, és la peculiaritat visual de la traça, condicionada a una mesura posterior de la massa. El grup d'Anderson no dubta sobre el tipus de fenomen que està observant per la seva singularitat, però una publicació dels resultats ha de contenir mesures significatives que en retardaran la difusió.¹⁰⁰

L'expectació se segueix mantenint fins a aquesta anàlisi definitiva, que es presentarà com una impressionant estadística de 34 casos. Precisament l'elevat nombre d'exemples permetrà ja no tan sols una descripció dels fenòmens sinó un primer intent de classificació. Així, el grup de Caltech distingirà entre 30 esdeveniments que anomenarà del primer tipus (primària neutra donant dues secundàries carregades) i 4 esdeveniments del segon tipus (primària carregada produint una secundària carregada i presumiblement una secundària neutra).¹⁰¹ La majoria d'esdeveniments (24 neutres i 4 carregats) s'observen a *White Mountain* (Califòrnia, 3200 m), aprofitant l'avantatge de la major estadística a gran alçada, i els 6 casos neutres restants s'observen a Pasadena mateix (Califòrnia, 220 m).

Cal notar que en 15 dels exemples del primer tipus (primària neutra) sembla força clar que aquesta primària s'origina en una desintegració nuclear, amb el pla de les traces secundàries coplanar amb la posició de l'impacte nuclear. Aquestes evidències reforcen la creença que les noves partícules es creen en col·lisions entre nucleons, anàlogament a com ho fan els mesons π , per interacció nuclear (forta).

Cal notar també que mercès a l'estadística considerable d'esdeveniments neutres es pot

⁹⁹ Alguns dels negatius trobats a Caltech en aquest primer experiment de noves partícules es publicaran, el 1952, en el "manual" sobre l'aplicació de la tècnica de la cambra de boira en raigs còsmics (v. apèndix A, fig. A.6). És interessant notar l'objectiu principal de la publicació d'aquest llibre de Rochester i Wilson (1952), que en paraules de Blackett en el prefaci: "is to facilitate the acquiring of these two essential skills, that of interpretation and that of recognition and attainment of high technical quality."

¹⁰⁰ El 18 de gener de 1950, Anderson escriu a Rochester mostrant encara un cert pessimisme pel que fa a l'anàlisi dels resultats trobats:

I wish I could tell you something additional about the forked tracks, but we really do not know much about the phenomena. Because of gas motions, I do not believe our curvature measurements are significant in more than about one case and then only on one component of the fork. Thus we are trying to work with angles, estimated ionization, etc., and so far we have not been able to come to any definite conclusions as to the identity of the particles. It may be that when these data are at hand and all taken together that something can be said.

Anderson a Rochester, 18-1-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London). Tampoc des de Manchester la resposta de Rochester sembla massa entusiasta pel que fa a les noves partícules:

We were very interested in your further remarks about forked tracks but we are still uncertain just what these can mean. We will look forward to hearing more about them when you have had more time to consider them in detail. I have passed on the diagram of the selection arrangement to Blackett. I personally was very interested to notice that it is a typical penetrating shower arrangement.

Rochester a Anderson, 25-1-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

¹⁰¹ No exclouen, però, la possible presència de més secundàries neutres.

aventurar un valor mitjà per a la vida de les noves partícules que dona $(3\pm 2)\times 10^{-10}$ s. El còmput es realitza a partir de la distribució dels punts de desintegració al llarg de les línies de vol de les primàries neutres, si es té en compte la variació possible de la longitud de la trajectòria atenent a la geometria cilíndrica de la cambra i el factor de dilatació relativístic.

Malgrat tot, els problemes de distorsió porten a una manca de mesures acurades de massa presents en l'article que es compensa amb suposicions sobre la possible natura de les secundàries. Així, pel que fa als esdeveniments del primer tipus, les secundàries poden ésser dos pions, un π i un μ , o un protó i un mesó (π o μ).¹⁰² Però no arriben a donar cap valor per a la massa de la primària. És més, no descarten la possibilitat que existeixin diferents valors de massa per a aquesta primària “such as might be imagined to correspond to different ‘excited states’ of a neutron”,¹⁰³ mostrant així el coneixement d'aquesta possible explicació teòrica que s'està discutint per explicar els nous esdeveniments.¹⁰⁴

A partir d'aquest moment, el grup de Caltech jugarà un paper preferencial en la detecció de les noves partícules, i tornarà la tècnica de la cambra de boira a primera línia.¹⁰⁵ No en va, en el 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), Fretter presentarà els resultats obtinguts per Leighton amb “the famous cloud chamber of Anderson that discovers all the new particles”.¹⁰⁶ De rebot, els resultats a Caltech elevaran les evidències de Manchester a primers indicis acabats de confirmar, en tant que casos visualment anàlegs de traces forçades o desintegracions de primàries desconegudes en secundàries classificables.

1.2.5 Supremacia de les V genèriques (1950)

A partir de l'elevada estadística de noves partícules inestables, trobades en raigs còsmics pel grup d'Anderson a Caltech, molts experiments s'enfocaran específicament a visualitzar aquesta mena de desintegracions tan característiques.

A Manchester, però, continuarà la frustració fins l'any següent. Aquest grup, en especial després del *Symposium on Cosmic Rays* (21–23 de juny de 1948) celebrat a Caltech, començarà a discutir perquè només havien detectat dos exemples de traces forçades, i arribaran a identificar algunes causes possibles: les làmines de plom on es produeixen potser es trobaven massa lluny de la cambra de boira, la cambra era massa petita, la proporció de nucleons d'alta energia era massa baixa a Manchester per a una detecció eficient... La solució vindrà d'emprendre noves recerques assajant modificacions dels vells experiments.¹⁰⁷

L'estadística de Caltech modificarà, doncs, el panorama experimental, però també el

¹⁰²Un possible caràcter electrònic de les secundàries és descartat ja que en cap cas apareixen col·lisions radiatives, ni tan sols quan les secundàries penetren la làmina de plom central a la cambra.

¹⁰³Seriff *et al.* (1950), 291.

¹⁰⁴Vegeu cap. 2, sec. 2.1, p. 62.

¹⁰⁵L'anàlisi del *Phys. Rev.* (p. 373–374) mostra aquest augment d'investigacions en cambra de boira a partir del 1950.

¹⁰⁶Fretter (1952a), 56.

¹⁰⁷Vegeu cap. 3, sec. 3.1.1, p. 104.

teòric¹⁰⁸ i l'instrumental, i passarà a centrar l'atenció en els esdeveniments concrets de traces forçades.¹⁰⁹

A partir d'aquests esdeveniments del grup d'Anderson s'observa una inversió en la rellevància dels fenòmens coneguts. El mesó τ , que com hem vist fins i tot Manchester accepta i caracteritza els seus exemples com a tals, passarà a definir el conjunt d'esdeveniments poc coneguts i problemàtics fins el moment, mentre que les traces forçades passaran al primer pla d'interès com el fenomen millor determinat.

En la dialèctica mantinguda per correu entre Blackett i Anderson, referida a la nomenclatura que cal donar als nous esdeveniments, es constata aquest sentiment i la tensió entre els dos instruments de detecció cambra de boira-emulsió fotogràfica:

I am not too happy about the present Greek-letter-prefix scheme for designating π and μ mesons. The Greek letters introduce inconveniences in typing, etc. But particularly do I dislike the term τ -meson because I have felt that so much of the evidence presented to prove its existence is of a poor quality. It may, of course, be possible that τ -mesons exist, but I think it would be unwise to confuse the forked-track experiments, which are rather clean-cut, with the confusion which now surrounds the τ -meson.¹¹⁰

Per tant, el treball en cambra de Caltech també propicia un cert distanciament entre les evidències trobades en cambres i les evidències en emulsions. Les seves característiques visuals ajudaran a separar encara més ambdós tipus de fenòmens:

[...] it is most striking that you have not found any process in which the charged particle decays giving more than one secondary charged particle. This result of yours suggests that the particles observed by Bristol and Imperial College of the decay of heavy mesons into three light mesons cannot refer to the same particles as you and we find. It seems to me that the type of process found in emulsions must either be one to still another heavy particle or conceivably is not a pure decay but, with the type of disintegration taking place, may in some way be influenced, say, by the fields of neighbouring atoms.¹¹¹

¹⁰⁸Des de la perspectiva teòrica, la visió dels nous elements també es reforma en aquest moment. A partir d'ara, l'atenció es concentrarà en el que sembla una producció inesperadament abundant dels nous elements i una vida llarga i es començarà a apartar l'anàlisi detallat dels esdeveniments puntuals en teoria de mesons. Podem dir que es comencen a distanciar les noves partícules d'aquestes teories de mesons que caracteritzaven els mesons π i μ . Els nous fenòmens hauran esdevingut prou abundants i singulars en ells mateixos com per haver de tractar-los independentment dels "vells mesons" (v. sec. 2.2, p. 78).

¹⁰⁹Aquest canvi d'enfocament serà essencial per obtenir nous descobriments. De fet, les traces forçades ja apareixen amb anterioritat entre les fotografies de ruixades penetrants, però no se n'havia copsat la importància concreta. Com Pais (1986, 512) explica:

Years later I raised this issue with Wilson Powell, a cosmic ray expert, asking him in particular why V-particles had not been discovered earlier as well they might have. He promised an answer by the following day. When next we met he had with him a handful of cloud chamber pictures he had taken in the thirties, each one showing either a fork or a kink. He told me that some time in the early fifties he had convinced himself that these were V-particles, adding with a smile that, because of the great interest in showers in the thirties, experimentalists would load their cloud chambers with many metal plates in order to obtain high particle multiplicities and would pay little attention to individual tracks.

¹¹⁰Anderson a Blackett, 13-6-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

¹¹¹Blackett a Anderson, 21-4-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

Així, el paper de les emulsions es veurà temporalment disminuït pel que fa als nous elements, i se les associarà amb aquesta confusió del mesó τ . La cambra de boira, en canvi, apareixerà com l'instrument que permet aquesta estadística elevada obtinguda a Caltech que finalment haurà demostrat l'existència de les noves partícules.

En el pla experimental, doncs, els esdeveniments de Caltech tenen un doble efecte. D'una banda, corroboren l'existència de les noves partícules inestables en raigs còsmics, però de l'altra desacrediten les evidències anteriors i les redueixen a la percepció visual de les traces forçades. Blackett i Anderson preferiran mantenir una distància prudencial d'aquest *background* poc clar. Conseqüentment, aquests dos mateixos artífexs dels descobriments adoptaran la tasca de desenvolupar una nomenclatura paral·lela per a diferenciar-los. Durant aquest 1950, Blackett i Anderson mantenen una discussió contínua sobre la necessitat d'una nomenclatura diferenciadora. Anderson deixa la responsabilitat a Blackett com a descobridor oficial:

We feel that the new particles are entirely a Manchester discovery, and therefore that the very difficult problem of naming the particles is not our responsibility.¹¹²

Però per tal d'evitar la confusió amb els esdeveniments en emulsions, que genèricament s'han designat amb el nom τ , prefereixen no usar les lletres gregues minúscules. Blackett respondrà:

I am thinking of writing to Niels Bohr about the question of names for these particles and to get his advice. I entirely agree with you that the disadvantage of linking the clear cut cloud chamber particles giving forked tracks with the possible particles producing some of the other less certain data. I do not particularly like the Greek letter prefix scheme but feel it is probably necessary to accept it for the time being. It has the advantage of allowing one to give letters to particles on a phenomenological basis as Bristol originally did. Later on the particles can receive proper names when their theoretical relation is better understood. I feel we definitely want a name for the particles that your group and my group find in a cloud chamber, and these should be distinct from those producing the three particle decay in emulsions and the hypothetical particle producing the abnormal non-decaying tracks which Butler finds.¹¹³

Poc després, Blackett proposa la solució de la nomenclatura “V”. Denominació que es mantindrà anys a venir i que substituirà a les, fins ara, traces forçades:

We have been discussing here the question of nomenclature and I would like to ask your views about the following suggestion. This is that we should call the special type of track that you and we have observed *v*-tracks and the particle or particles which make them *v*-particles. The advantage of this seems to be that the letter *v* is reasonably unallocated and that the name has strong mnemonic value as, in fact, the tracks are *v* shaped.

If all the particles do not have the same mass we can provisionally designate them as *v1*, *v2*, *v3*, etc. If you are right and some of the particles have more than protonic mass, there is an advantage, as your point out, in not calling them mesons.¹¹⁴

¹¹²Anderson a Blackett, 13–6–1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

¹¹³Blackett a Anderson, 27–6–1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

¹¹⁴Blackett a Anderson, 12–7–1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

Amb prestesa, Anderson respondrà:

We have discussed your suggestion that the forked tracks be called *v*-tracks, and the particle or particles producing them be called *v*-particles. This suggestion seems as good as any.

It seems to me, however, that it might be convenient to use two different letters to designate, respectively, the uncharged and charged unstable particles. It is quite likely that there will be other important differences in their properties, and thus we can avoid the use of the prefixes, uncharged and charged.¹¹⁵

La nomenclatura, doncs, es basarà molt en la fenomenologia dels nous esdeveniments i es veurà lligada a aquesta tradició de cambra de boira ja que intentarà representar la forma visual de les desintegracions en vol dels nous elements. Cal entendre que aquests tipus d'esdeveniments seran més escadussers en la tècnica de les emulsions —que deixaven la detecció dels fenòmens a l'atzar i que tenien més dificultats per gravar les secundàries relativistes— com a mínim fins que les noves emulsions sensibles a ionització mínima no s'imposin i s'aconsegueixen blocs més gruixuts d'emulsions que puguin detectar l'esdeveniment sencer abans que s'escapi de la làmina.

De moment, però, aquesta dialèctica entre els dos caps, Anderson-Blackett, aconseguirà l'efecte desitjat: a partir d'aquí, els esdeveniments de Rochester i Butler s'aniran entenent com el descobriment oficial de les noves partícules inestables en raigs còsmics, les partícules V.

¹¹⁵Anderson a Blackett, 18-7-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

Capítol 2

Primers intents teòrics al marge de la simetria d'isospín

El descobriment de les partícules estranyes es produeix en l'àmbit d'investigació dels mesotrons de raigs còsmics (muons i pions). No és d'estranyar, doncs, que comparteixin amb aquests mesotrons no sols el bagatge experimental, sinó també les hipòtesis teòriques en el marc de les teories mesòniques de les forces nuclears. El món de les teories mesòniques, però, resulta extremadament complex. L'origen es pot prendre en Heisenberg (1932) i l'inici del tractament mecanicoquàntic del nucli; en aquest principi apareix també el formalisme d'isospín i les hipòtesis de simetria i d'independència de càrrega, bàsics en els desenvolupaments posteriors de la física de pions i de les noves partícules. A partir d'aquí es desenvoluparan teories fenomenològiques per descriure les forces nuclears ajustant potencials, la teoria de Fermi (1933) de la desintegració β , que també s'intentarà aplicar a la interacció nuclear, i, en especial, la difusió de la teoria de Yukawa a Occident, amb el descobriment dels mesotrons (1937). La necessitat d'ajustar les dades experimentals dels mesotrons amb les característiques del mediador de la força nuclear perseguirà les formulacions teòriques. Les dificultats bàsiques giraran al voltant de la massa, la vida i la raó entre desintegracions i captures, massa elevada per al mediador de la interacció nuclear. La solució vindrà de la distinció π - μ (1947). Pel camí, però, les teories mesòniques hauran desenvolupat idees com les isòbares nucleòniques i els mesons mesclats, que s'intentaran extrapolar a les noves partícules (estranyes). L'abandonament d'aquestes idees serà simptomàtic de la creixent independència del nou camp, junt amb els primers intents de modelitzar les partícules estranyes per elles mateixes.

Aquests primers intents centren l'atenció de la segona meitat del capítol. Els nous esdeveniments mostren dues característiques bàsiques: llargues traces indiquen una vida relativament llarga ($\sim 10^{-10}$ s), difícil de conciliar amb la producció en col·lisions nucleòniques i desintegrades en pions, ambdues representatives d'interaccions nuclears que porten una vida associada de l'ordre de 10^{-22} s. Els primers intents teòrics per explicar aquestes propietats aparentment irreconciliables es produiran, curiosament, al Japó, molt lluny del focus de descobriment, i es concretaran en un simposi realitzat a Tokyo (7 de juliol de 1951). D'entre les explicacions que s'hi proposaran destacarà la idea de la producció en parelles de les noves partícules i l'intent d'explicar conjuntament mesons pesats (els τ genèrics de l'època i algunes V) i la $V^0 \rightarrow N + \pi$, amb caràcter nucleònic. La producció en parelles esdevindrà la hipòtesi més efectiva i transcendirà aquesta primera etapa de teorització. A Occident, el treball de Pais explotarà la idea i s'iniciarà també la noció de famílies de partícules associades a diferents interaccions fonamentals. Altres hipòtesis alternatives que s'aniran abandonant conviuran amb aquesta idea de producció associada: la partícula pare, les isòbares nucleòniques i altres regles de selecció genèriques.

2.1 La problemàtica de les teories mesòniques i la distinció π - μ

The balance of such a review is rather embarrassing: none of the theories worked out so far proves to be entirely satisfactory.

Wentzel (1947), 1.

2.1.1 Origen de les teories de mesons

El 1946, W. Pauli publica un petit llibre, basat en el cicle de conferències que havia donat la tardor de 1944 al MIT, on revisa l'estat de les teories mesòniques de les forces nuclears sense arribar a fer quelcom que es pugui catalogar com a llibre de text, "to preserve the informal character of the lectures and to emphasize the very provisional state of the problems in question, to which new experiments may in the future make important contributions."¹

La provisionalitat a què es refereix Pauli il·lustra les dificultats per obtenir una descripció completa de les forces nuclears. Brown i Rechenberg en situen els intents de descripció, que es materialitzaran en diferents teories mesòniques, entre el descobriment del neutró (1932) i el descobriment del pió neutre (1950).²

Fent cas de la periodització de Brown i Rechenberg, podem dir que a partir del descobriment del neutró (1932), Heisenberg iniciarà el tractament mecanicoquàntic del nucli. En un primer moment, mantindrà electrons en el seu interior, perquè, entre d'altres coses, era difícil desfer-se de la imatge de la desintegració β , en la qual protons i neutrons semblaven intercanviar-se electrons. La solució de Heisenberg serà entendre els neutrons com partícules compostes dels elementals protons i electrons. Això no obstant, es feia difícil tractar un compost com el neutró mecanicoquànticament i s'introdueix un potencial fenomenològic de curt abast per descriure la força n-p; força d'altra banda entesa com d'intercanvi de càrrega en analogia amb la força molecular entre l'ió H^+ i l'àtom d'hidrogen. Aquesta força d'intercanvi serà la principal per explicar l'estabilitat de l'estructura nuclear ja que, per Heisenberg, la força p-p serà simplement coulombiana i la força n-n molt feble, descrita també per un potencial de curt abast.

D'afegit, Heisenberg introduirà des del primer moment el spin isotòpic (isospín) de manera que protó i neutró seran tractats com dos estats de la mateixa partícula, genèricament,

¹Pauli (1946), Preface.

²Brown, Rechenberg (1996), Preface. La problemàtica de les teories mesòniques és un tema molt complex que, sortosament, ha estat tractat, entre d'altres, per Mukherji (1974), Brink (1965), Stuewer (1979), Cassidy (1981), Galison (1983) i Brown i Rechenberg (1996).

el nucleó. Tenim, doncs, dues idees importants: la introducció de potencials ordinaris i d'intercanvi per explicar la interacció nuclear, i l'aparició del formalisme d'isospín.

A conseqüència de la primera idea, d'introduir un potencial fenomenològic per explicar la força n-p, apareixeran diferents models que intentaran descriure la interacció entre les partícules nuclears a través de diferents potencials: d'intercanvi de càrrega, però també de possible intercanvi de spin. Seran les anomenades teories fenomenològiques de descripció de la interacció nuclear (Heisenberg, Wigner, Majorana. . .). Les teories pretendran ajustar aquests potencials que representin les forces nuclears p-p, p-n, n-n conforme als coneixements experimentals, com les energies de lligam en el deuteró (${}^2_1\text{H}$) i partícules α (${}^4_2\text{He}$), o les dispersions p-p i n-p.

Pel que fa als diferents tipus d'interaccions, Heisenberg pensava que les forces nuclears de curt abast n-n i p-p no podien ser gaire diferents (actual simetria de càrrega) perquè els nuclis mostraven un nombre molt similar de protons i neutrons.³ Però més enllà de la hipòtesi teòrica de la simetria de càrrega, els experiments de dispersió protó-protó —en especial els de Tuve, Heydenberg i Hafstad el 1936 a Washington— també van afavorir la hipòtesi de la igualtat entre forces n-p i p-p. Breit, Condon i Present (1936) foren els encarregats de formalitzar aquests resultats de dispersió proposant que es podien explicar si es consideraven iguals les interaccions n-p i n-n, llevat de la interacció coulombiana. La proposta anterior, presa conjuntament amb la hipòtesi de la simetria de càrrega, portarà a la creença en la independència de càrrega de les interaccions nuclears; és a dir, llevat de l'electromagnetisme, la força entre partícules nuclears qualssevol és la mateixa.

Aquesta hipòtesi ens permet connectar amb la segona idea de la formulació de Heisenberg: el formalisme d'isospín. Malgrat que per Heisenberg l'isospín sols servia per entendre protó i neutró com una mateixa partícula nucleònica, la independència de càrrega significarà que les forces nuclears seran invariants per rotacions en l'espai d'isospín, la qual cosa prediurà l'existència de multiplets isobàrics: estats amb els mateixos nombres quàntics en els nuclis isobàrics. Experimentalment, però, serà difícil detectar aquests nuclis isobàrics

³En principi, la igualtat de les forces p-p i n-n, llevat de la coulombiana, es mantindrà com una hipòtesi agradable, amb prediccions testejaes experimentalment. Les primeres proves s'aconseguiran amb l'anàlisi dels "nuclis mirall", que són nuclis amb igual nombra màsic però que varien el nombre atòmic en una unitat, és a dir, canvien un protó per un neutró, com per exemple, ${}^7_3\text{Li}$ - ${}^7_4\text{Be}$ o ${}^{11}_5\text{B}$ - ${}^{11}_6\text{C}$. En aquests nuclis es tractava de mesurar la diferència d'energia de lligam d'un amb l'altre, diferència que, segons la hipòtesi, s'havia de poder atribuir únicament a la repulsió electrostàtica entre els protons. Les investigacions sobre nuclis mirall es realitzaven bombardejant els nuclis adequats amb deuterons (de ~ 1 MeV d'energia) i observant les energies dels positrons que resultaven en la conversió dels protons nuclears en neutrons —transformant així un nucli amb Z protons i Z-1 neutrons en un nucli mirall amb Z-1 protons i Z neutrons. Les energies d'aquests positrons servien per determinar les diferències entre les energies de lligam dels parells de nuclis mirall. Aquestes diferències, si s'assumia simetria de càrrega, sols podien explicar-se per la repulsió coulombiana entre els protons, que, comparant-se amb el valor teòric esperat per aquesta repulsió coulombiana, es corresponia perfectament. Però aquests experiments no resultaran positius fins els anys quaranta, tot i que Bethe, el 1937, determinarà la diferència d'energies de lligam entre ${}^3_1\text{H}$ (pnn) i ${}^3_2\text{He}$ (ppn) utilitzant simetria de càrrega i mostrarà que la diferència amb el valor experimental es pot justificar en base únicament a la força coulombiana entre els protons de l' ${}^3_2\text{He}$.

que confirmarien la independència de càrrega. De fet, la clau de la importància de la independència de càrrega de les interaccions nuclears no es descobrirà fins a principis dels anys 50, quan s'investiguen les regles de selecció que aquesta simetria comporta per a diferents reaccions. Però aquest punt serà tractat més endavant, perquè serà clau per a l'aplicació d'isospín a les noves partícules que són objecte del nostre estudi.⁴

Tornant enrera en el temps, a finals de 1933, Fermi formularà la teoria sobre la desintegració β . A més de l'èxit que suposarà la formalització en teoria quàntica de camps de la primera interacció feble coneguda,⁵ la teoria de Fermi donarà la manera d'eliminar els electrons nuclears, suposant que són creats junt al neutrí quan són emesos pels nuclis. Sembla inevitable que Heisenberg intentés adaptar la teoria de Fermi a les interaccions nuclears, ja que els nuclis estaven formats per nucleons, les mateixes partícules que s'intercanviaven parells $e-\nu$ en la desintegració β . S'inicia així els intents de modelar el nucli amb el que es coneix com teoria del camp de Fermi, que ocuparà les investigacions teòriques de les forces nuclears fins l'arribada a Occident, el 1937, de la teoria de Yukawa.⁶

La teoria de Yukawa s'arribarà a difondre a Occident mercès al descobriment en raigs còsmics dels mesotró (1937), que s'identificarà amb el mediador de les interaccions nuclears postulat per la teoria. Els mesotrons eren partícules de massa intermèdia, entre la del protó i la de l'electró, detectats en raigs còsmics, i permetien entendre la component penetrant de la radiació còsmica.

El pas següent serà intentar explicar formalment les propietats que es deduïen del comportament experimental d'aquests mesotrons. Però, aviat, les dificultats d'identificar el mediador teòric amb la partícula descoberta iniciaran múltiples variants de la teoria enfocades a ajustar-la als resultats experimentals. Ara sabem que en realitat els mesotrons de raigs còsmics eren majoritàriament muons —fermions feblement interaccionants amb una vida dos ordres de magnitud major que el mitjancer de la teoria de Yukawa—, però en aquell moment, 1937, el descobriment va servir per posar en primer terme un nou tipus de teories que treballaven amb un mediador de la interacció nuclear diferent dels parells $e-\nu$ del camp de Fermi.

Breument, Yukawa construeix la seva teoria buscant un mediador per a les forces nuclears en analogia amb el mediador del camp electromagnètic, el fotó. La genialitat de la

⁴Vegeu cap. 4, sec. 4.1, p. 164.

⁵Fermi proposarà que parells electró-neutrí són creats en la transformació d'un neutró en protó, en analogia a com els fotons són creats i absorbits en les interaccions electromagnètiques entre partícules carregades. La creació d'aquests parells $e-\nu$ es descriu amb operadors de creació i anihilació, és a dir, amb segona quantització. D'afegit, l'hamiltoniana de la interacció es construeix en analogia amb QED: el potencial vector responsable de l'emissió i absorció de fotons correspon a una expressió bilinear del camp quantitzat de l'electró i del corresponent al neutrí.

⁶Cal notar la dificultat que suposarà tractar la interacció nuclear amb l'acoblament feble que es deduirà de la teoria de Fermi, a més de les divergències que faran acte de presència com en QED, que encara esdevindran més intractables davant d'una constant d'acoblament més gran que la unitat que invalidarà el tractament pertorbatiu.

teoria ve d'adonar-se que un mitjancer de massa nul·la, com és el fotó, reflecteix l'abast infinit de la força coulombiana; mentre que el mitjancer de la força nuclear ha de tenir una massa entre la de l'electró i la del protó, per al qual dedueix "a value 2×10^2 times as large as the electron mass."⁷

Però els paràmetres teòrics esperats no s'ajustaran ràpidament a les dades experimentals disponibles. D'entrada, el càlcul de la massa del mesotró de raigs còsmics fluctuarà força per les dificultats en les mesures experimentals, tot i que es mantindrà al voltant de $200 m_e$, valor esperat teòricament. No obstant això, les dades dels experiments de dispersió semblaran mostrar que la massa del mediador de les interaccions fortes hauria de tenir un valor més elevat que el teòric.⁸ Pel que fa a la vida del mediador, la seva estimació experimental no serà tan flexible com pel cas de la massa. Aviat els experiments van mostrar que el mesotró de raigs còsmics semblava viure unes cent vegades més que el mediador teòric de les interaccions nuclears.⁹ Les dificultats també apareixeran en intentar explicar la proporció de mesotrons que es desintegren en els experiments enfront dels que són capturats pels nuclis de la matèria de les cambres de boira.¹⁰

D'afegit en aquestes dades particulars a la nova partícula descoberta, altres característiques experimentals requeriran una explicació teòrica convincent, com l'energia de lligam i el moment quadrupolar del deuteró, les seccions eficaces de dispersió p-p i n-p, etc. I, més enllà dels enigmes experimentals, la mateixa teoria entrarà en una etapa d'autoanàlisi: la teoria de mesons presentarà divergències pròpies de la formulació en teoria quàntica de camps pertorbativa que resultaran més intractables que a l'anàloga QED, les esperances de mostrar una teoria unificada de la interacció nuclear i la desintegració β s'aniran esvaint, la teoria haurà de reflectir la independència de càrrega de la interacció nuclear que originalment no contemplava, la formulació d'una teoria de camps amb diferents possibilitats de spin per als mediadors $(0, \frac{1}{2}, 1) \dots$

Tot plegat portarà a una etapa complicada de formulacions i reformulacions que s'engloben sota el nom de teories mesòniques. Algunes de les idees que apareixeran en aquesta època seran recuperades breument amb el descobriment de les partícules estranyes.¹¹ Però en el moment dels nous descobriments ja s'haurà arribat a una concreció definitiva del garbuix originat amb les teories mesòniques, mercès a la distinció experimental dels "mesons"

⁷Yukawa (1935), 53.

⁸De fet les dades que permeten una estimació d'aquesta massa són les de dispersió p-p que, el 1939, prediuran una massa per al mediador neutre de $326 m_e$ (Mukherji 1974, 48).

⁹Recordem que els mesotrons de raigs còsmics corresponien a l'actual leptó μ , amb una vida $2.2 \cdot 10^{-6}$ s, mentre que el suposat mediador de la interacció forta, l'encara no descobert mesó π , presenta una vida de $2.6 \cdot 10^{-8}$ s.

¹⁰Veurem en la sec. 2.1.2 que aquesta característica dels mesotrons serà el detonant per a la distinció experimental final entre π i μ , el 1947. De moment, recordem que la secció eficaz d'interacció esperada per a una interacció forta és $\sim 10^{-26}$ cm², mentre que per a una interacció feble la secció eficaz d'interacció és molt menor, $\sim 10^{-39}$ cm².

¹¹Cosa que tractarem en la secció 2.1.3.

π i μ , el 1947, i a la consegüent acceptació de la teoria dels dos mesons, formulada independentment per Sakata i Inoue (1946) i per Marshak i Bethe (1947).

2.1.2 La distinció π - μ

D'entre les dificultats per identificar el mitjancer de la teoria de les forces nuclears amb el mesotró de raigs còsmics destaca la manca d'interacció nuclear que mostrava la partícula experimental. Clarament, el mitjancer de la interacció nuclear havia de mostrar-se molt propens a ser capturat pels nuclis i produir vistoses desintegracions nuclears en les cambres, però, en canvi, la seva tendència experimental era a travessar la matèria de l'interior del detector i, en el millor dels casos, aturar-s'hi i desintegrar-s'hi. De fet, recordem que el seu descobriment venia de reconèixer-lo com el component principal de les ruixades penetrants, que, com el seu nom indica, travessaven grans distàncies sense interaccionar. Aquesta característica, doncs, crearà grans problemes per compaginar-ho amb la forta interacció esperada per al mediador de la interacció nuclear.

El 1940, Tomonaga i Araki analitzaran la probabilitat que un mesó d'una determinada energia sigui capturat abans de parar-se en el material del detector. Després de fer una petita taula, per a diferents energies del mesó incident i per a diferents materials, arribaran a la següent conclusió:

One sees from the table that this probability is, notwithstanding the Coulomb attraction, very small for slow negative mesons, and still less for positives. Consequently the capture in almost all cases does not take place before mesons come to rest.¹²

Segons els seus càlculs, els efectes del camp coulombià farien esperar un comportament diferent amb la matèria per als mesons de diferent signe. Per als mesons positius la probabilitat de captura era molt petita, suposadament per la repulsió coulombiana de la càrrega positiva dels nuclis que els feia vagar en el material fins a desintegrar-se. Per als negatius, en canvi, la mateixa atracció coulombiana els hauria de permetre apropar-se als nuclis i ser absorbits; en aquest cas, la probabilitat de captura havia de ser molt major que la probabilitat de desintegrar-se espontàniament, amb independència del material circundant, cosa que tampoc no era evident dels resultats experimentals:

Since the probability for negative mesons being captured is seen always to be larger than the probability of disintegration, which is of the order of 10^6 sec.^{-1} , the negative mesons will be much more likely captured by nuclei than disintegrate spontaneously, not only in dense materials but also in gases.¹³

Des de la teoria, alguns intents s'enfocaran a disminuir la secció eficaç de dispersió esperada per a les interaccions nuclears. Però jugar amb diferents possibilitats per al spin del mitjancer o variar-ne la massa dins dels límits de la incertesa experimental no seran

¹²Tomonaga, Araki (1940), 91.

¹³Ibíd.

suficients per explicar la diferència entre la interacció feble del mesotró (leptó μ) i la forta interacció esperada per al mediador teòric (mesó π).

Durant la guerra, les propostes teòriques sobre la interacció nuclear a través de camps mesònics no cessaran, i, amb més dificultats, es mantindran algunes investigacions experimentals sobre els mesotrons. De fet, la solució al problema de la poca interacció dels mesotrons de raigs còsmics serà fruit del treball conjunt de M. Conversi, E. Pancini i O. Piccioni que, des del 1944, treballaran d'amagat a la Itàlia ocupada.

L'experiment de Conversi, Pancini i Piccioni mostrava com l'absorció nuclear esperada per als mesons negatius no es dona sempre. De fet, tots els mesons positius es desintegren abans de ser absorbits, cosa que es justificava pel domini de la repulsió coulombiana amb els nuclis de la cambra. Per als negatius la situació era més complicada: els mesons de raigs còsmics que topaven contra ferro es comportaven com la teoria de Tomonaga i Araki predeia, però “the results with carbon as absorber turn out to be quite inconsistent with Tomonaga and Araki's prediction”.¹⁴ En carboni, material amb nombre atòmic menor, la proporció experimental de mesons negatius que eren absorbits en lloc de desintegrar-se era molt menor que la proporció esperada per Tomonaga i Araki. Resumint, la interacció dels mesons negatius amb la matèria de la cambra de boira es mostrava de manera molt més feble del que la predicció teòrica preveia per al mediador de les interaccions fortes, cosa que el feia un candidat materialment impossible com a responsable de les forces nuclears.¹⁵

L'article de Conversi, Pancini i Piccioni, publicat l'1 de febrer de 1947, és tema de discussió a la paradigmàtica *Shelter Island Conference* (2–4 de juny de 1947). En una de les sessions, Marshak proposa que en realitat els resultats es poden explicar suposant que existeixen dos tipus de mesons a la natura amb masses diferents:

The heavy meson is produced with large cross section in the upper atmosphere and is responsible for nuclear forces, whereas the light meson is a decay product of the heavy meson and is the meson normally observed to interact weakly with matter at sea level.¹⁶

Però el 24 de maig ja s'havia publicat l'article del grup d'emulsions de Bristol on mostren les primeres evidències visuals clares de la desintegració π - μ . Tot i que en l'article no es parla clarament de dos mesons diferents en raigs còsmics, en diferencien de primaris i de secundaris:

It is convenient to apply the term “meson” to any particle with a mass intermediate between that of a proton and an electron. In continuing our experiments we have found evidence of mesons which, at the end of their range, produce secondary mesons.¹⁷

¹⁴Conversi, Pancini, Piccioni (1947), 209.

¹⁵La vida per als mesotrons de raigs còsmics que els mateixos autors calculen és de $(2.30 \pm 0.15) \cdot 10^{-6}$ s. Resultats similars són obtinguts per B. Rossi, ja treballant als EEUU, després de ser expulsat d'Itàlia.

¹⁶Marshak (1983), 381.

¹⁷Lattes et al. (1947), 694.

Pel mes de setembre del mateix 1947, Marshak i Bethe publiquen formalment la hipòtesi dels dos mesons i es donarà a conèixer que S. Sakata i T. Inoue havien fet una proposta similar l'any anterior.

La formulació d'aquesta teoria dels dos mesons serà entesa per la comunitat com la solució al problema de comprensió d'una teoria mesònica, que durant molts anys havia rebut múltiples formulacions, però cap de definitiva, en última instància a causa de la confusió entre el comportament teòric del mediador de la interacció forta i el comportament del “mesotró de raigs còsmics”, que en realitat interacciona feblement.

2.1.3 Les noves partícules i les velles teories

En l'apartat anterior hem vist la solució al problema de les múltiples teories mesòniques, però no hem entrat en les característiques que en definiran les diferents formulacions. Malgrat que no és la intenció del treball entrar en la complexitat d'aquestes formulacions, cal que en perfilen certes característiques que faran que, amb el descobriment de les noves partícules (partícules estranyes), se n'intenti justificar l'existència amb les velles teories.¹⁸

A partir del 1936 s'anirà perfilant la hipòtesi de la independència de càrrega per a les interaccions nuclears (igualtat de les forces entre partícules nuclears qualssevol, llevat de l'electromagnetisme). Una de les preocupacions que tindran les teories de mesons serà com incloure aquesta independència en el formalisme teòric.

Els resultats experimentals aniran mostrant que la interacció p-p és ben diferent de la simple repulsió electrostàtica considerada per Heisenberg i per Yukawa originalment. És més, no sols no es pot tractar de simple repulsió coulombiana, sinó que es tracta d'una força atractiva igual a la força p-n. E. P. Wigner proposarà, el 1937, que isospín serà la manera matemàtica més natural per descriure aquesta independència de càrrega. Tot plegat, però, comportarà un problema afegit que marcarà una línia de debat present en els desenvolupaments de les diferents teories mesòniques: la inclusió o no del mediador neutre en els intents d'explicar les interaccions entre nucleons. A favor, l'evidència experimental de la independència de càrrega: si Yukawa havia definit el mediador per a la interacció p-n, i ara es determina que aquesta interacció és del mateix ordre que les interaccions p-p i n-n, un mediador que no transporti càrrega (neutre) haurà d'explicar aquestes dues interaccions. En contra, la dificultat d'introduir una nova partícula que experimentalment no mostra evidències, ja que els “mesotrons” (actuals μ^\pm) sols es mostren carregats.¹⁹ Encetada la

¹⁸A través de les bases de dades es pot notar com ja en els primers anys analitzats (1946-1950) apareixen contribucions teòriques puntuals sobre les noves partícules. Aquestes contribucions precoces són especulacions sobre les possibles evidències poc definides dels primers moments. Destaquem que en aquesta primera etapa el major nombre de contribucions es farà en el *Prog. Theo. Phys.*, confirmant el treball que desenvolupen els grups japonesos (v. apèndix B, p. 378-379).

¹⁹La justificació per a la manca d'evidència experimental del mesotró neutre vindrà de la mà de S. Sakata i Y. Tanikawa el 1940. Per a ells, la desintegració en dos fotons del mediador neutre justificaria una vida de $\sim 10^{-16}$ s, per tant, 10 ordres de magnitud menor que la vida del mesotró observat ($\sim 10^{-6}$ s). La curta

polèmica, se seguiran diferents propostes amb i sense mediador neutre.²⁰

A part de les modificacions lligades a la independència de càrrega, abans de la distinció π - μ també existeix la preocupació teòrica per reconciliar la secció eficaç de dispersió, predita per a la interacció entre mesons i nucleons, amb la dispersió observada per als mesotrons de raigs còsmics, dos ordres de magnitud menor que la primera.

Potser una de les propostes més curioses per conciliar ambdues seccions eficaces és la realitzada per Bhabha el 1940. Segons ell, augmentar la càrrega o el spin de les partícules podria repercutir en una disminució de la secció eficaç teòrica i ajustar-la millor al valor experimental trobat. Així, existiran a la natura partícules amb càrrega múltiple de la càrrega fonamental e , que representaran estats excitats amb masses en repós més altes que els nucleons ordinaris. També Heitler proposarà una teoria similar, però considerant el spin com la quantitat a augmentar. En aquest cas, Heitler suposa que el spin dels nucleons pot tenir estats excitats ($\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$...) que causen també augment de la càrrega i, consegüentment, disminueixen la secció eficaç de dispersió teòrica. Bhabha anomenarà aquestes partícules isòbares nucleòniques i aconsellarà buscar-les en les explosions nuclears dels raigs còsmics. Amb l'aparició de la teoria anomenada de l'acoblament fort, les isòbares apareixeran de manera natural.²¹

La idea reapareixerà el 1946, quan Heitler analitzarà les seccions eficaces de dispersió

vida i la desintegració en dos fotons neutres no directament visualitzables, però sí a través de parells e^+e^- , el farien difícil de detectar en cambres i emulsions.

²⁰La terminologia utilitzada serà: “teories de mesons carregats”, “teories del mesó neutre” o “teories simètriques” (que admeten els dos tipus de mediadors). Com hem vist, Yukawa (1935) no considera un mediador per a la força p-p perquè per a ell aquesta interacció és coulombiana. Per tant, la seva teoria primitiva no es veu amb la necessitat d'introduir un mitjancer neutre. El 1938, H. Fröhlich, W. Heitler i N. Kemmer, rebutjant la independència de càrrega experimental, seran reticents a acceptar un mitjancer neutre i preferiran treballar en segon ordre de l'expansió pertorbativa, perquè és en aquestes dobles transicions on la teoria de mesons carregats troba la interacció p-p. Kemmer es convencerà de la forta atracció de la força p-p en els experiments de dispersió i acceptarà la igualtat amb les forces p-n i n-n. Així es desmarcarà del trio construït una teoria simètrica (mesons carregats i neutre) per justificar independència de càrrega. També el mateix any, 1938, Yukawa apostarà per les teories simètriques i acceptarà un mediador neutre en la seva teoria.

²¹Vegeu Brown, Rechenberg (1996), 260–6.

De bon principi, la formulació d'una teoria per a les interaccions nuclears apareix lligada a l'analogia amb l'electrodinàmica quàntica (QED), que estableix la quantització del camp electromagnètic, sobretot a partir del treball de Dirac del 1927. Amb la introducció de les equacions de la QED, s'introdueix també a la física de partícules el tractament aproximatiu per a donar-ne solucions, a través d'una expansió pertorbativa en potències de la constant d'acoblament adimensional $\frac{e^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$. La necessitat d'un tractament pertorbatiu portarà greus problemes a QED que semblaran solucionar-se a finals dels 40 amb el programa de renormalització.

Les teories de mesons, construïdes ja en origen en analogia amb QED amb els mesons com a mediadors semblantment als fotons com a mediadors del camp electromagnètic, també hauran de fonamentar els seus càlculs en aquest tractament pertorbatiu. Però per a les forces nuclears la renormalització no serà tan profitosa. Mentre que per a la QED, la petitesa de la constant d'acoblament de la interacció permetia contribucions d'ordres successius convergents, el valor corresponent per a la constant d'acoblament de la interacció nuclear feia dubtar de la validesa de qualsevol càlcul pertorbatiu. Ja en les primeres idees de Yukawa (1935, 52), la constant d'acoblament que defineix la interacció, i que s'ajusta d'acord amb els resultats experimentals, ha de ser “a few times of the elementary charge e ”, per tant més gran que la unitat. En la dècada dels 40, segons ens explica Pais (1986, 482):

dels estats possibles per a un sistema pió-nucleó, basant-se en la independència de càrrega de les interaccions nuclears i, més en concret, en les propietats de conservació d'isospín per a aquestes reaccions a causa de la independència de càrrega. Estudis posteriors, en especial de Brueckner (1952), portaran a la predicció del primer estat ressonant de spin i isospín $\frac{3}{2}$ com el principal en la dispersió de pions per protons. Quan Brueckner farà aquesta afirmació al·ludirà a les prediccions d'aquestes isòbares en el model d'acoblament fort de la teoria de mesons:

We shall make the assumption that these predictions of the strong coupling theory for the isobar energies are correct and show in the next section that satisfactory agreement with experiment can be obtained.²²

I tot seguit deduirà la presència d'un estat ressonant o estat isobàric del nucleó de la variació de la secció eficaç de dispersió dels mesons π^\pm en hidrogen.²³

Però abans que els experiments en acceleradors portin a la determinació de la resonància anterior, la idea de les isòbares nucleòniques reapareixerà breument com un intent de justificar el descobriment de les primeres partícules estranyes. En concret, les primeres traces forçades trobades a Manchester i Caltech ja mostraran la desintegració $V^0 \rightarrow p + \pi^-$, desintegració que Bhabha immediatament associarà a les primeres evidències possibles de les seves isòbares hipotètiques del 1940. Així, si bé en tractar-se d'una partícula neutra no s'observa com un estat de càrrega múltiple de la càrrega fonamental, sí que es pot entendre com una isòbara neutrònica, o estat excitat del neutró amb una massa en repós més alta que la del neutró ordinari. Però el problema que presenta aquesta associació és el relatiu a la llarga vida de la nova partícula experimental. R. E. Marshak, en el primer "llibre de text" on apareixen les noves partícules (estranyes) ho explica:

It is tempting to regard this neutral particle [$V^0 \rightarrow p + \pi^-$, o actual Λ] as a metastable isobaric state of the neutron and to look to strong coupling meson theory for an elucidation of the properties of such a state[...]. This at first sight satisfactory result for the pseudoscalar theory is quickly vitiated by the fact that the same theory predicts an extremely short lifetime for the metastable state, a lifetime 10^{13} times shorter than the observed lifetime.²⁴

Estimates in the 1940s gave

$$\frac{g^2}{\hbar c} \text{ roughly equals } 15$$

(In 1949 Bethe quoted a value of 40.)

La teoria de l'acoblament fort intenta solventar les dificultats posades pel tractament pertorbatiu en termes de $\frac{g^2}{\hbar c}$. Per predir la forta interacció nuclear, la constant d'acoblament no es pot fer molt petita. Aleshores comença a ser clar que el tractament pertorbatiu en potències de $\frac{g^2}{\hbar c}$ no donarà resultats convergents. La solució proposada per la teoria de l'acoblament fort, que inicia Wentzel el 1940, serà canviar les potències de g per potències de $1/g$ en la sèrie pertorbativa.

²²Brueckner (1952), 109.

²³Vegeu cap. 4, sec. 4.1, p. 164.

²⁴Marshak (1952), 359.

Les dificultats faran que la proposta d'explicació de les noves partícules es quedi en una simple hipòtesi.

També els exemples primitius de mesons pesats que no mostren desintegració, genèricament anomenats τ per Leprince-Ringuet el 1948,²⁵ semblaran trobar la raó de ser en el marc de les velles teories mesòniques. En aquest cas seran les “teories de mesons mesclats” (*mixed meson theories*) les que semblaran poder incloure els nous esdeveniments com a prediccions d'aquestes teories.

Les teories de mesons mesclats neixen a principis dels 40 amb la finalitat principal d'explicar la diferència entre la vida del mesó teòric i la del mesotró de raigs còsmics, alhora que intenten tractar les divergències pròpies de les teories mesòniques.²⁶

La primera formulació es deu a C. Møller i L. Rosenfeld, el 1939, que consideren dos camps mesònics: un vector i un pseudoescalar. El primer es desintegra ràpidament en $e^- + \nu$ i, per tant, serveix per explicar la desintegració β i la component tova de la radiació còsmica. El pseudoescalar s'identifica amb els mesotrons de raigs còsmics i, per tant, se sap que es desintegra lentament (10^{-6} s) i que explica la component dura d'aquests raigs còsmics. Tenim, doncs, dos camps de partícules involucrats en el camp nuclear, considerats amb igual força d'interacció amb els nucleons, diferent spin però igual massa²⁷ i els tres possibles estats de càrrega. Amb la mescla d'aquests camps, que per separat donaven el mateix valor per a la força tensorial però de signes oposats, i una tria adequada de les constants de la interacció, aconseguixen cancel·lar aquesta força tensorial que portava a la divergència. Però així eliminen també el moment quadrupolar, que experimentalment donava diferent de zero.

Això no obstant, la idea es pot reformular per aconseguir que aquest valor no sigui nul, i això és el que farà Schwinger el 1942 quan, a diferència de Møller i Rosenfeld, considera els dos camps de les partícules de diferent massa, el mesó vector més pesat que el pseudoescalar. La diferència de masses explicaria també la desintegració ràpida del mesó vector que, per aquesta causa, no seria observable. A més, donaria el signe correcte del moment quadrupolar, encara que falla a l'ajustar el valor amb l'experimental.

²⁵Vegeu cap. 1, sec. 1.2.3, p. 42.

²⁶Des del principi les característiques de spin i paritat dels mesons també seran paràmetres força variables al llarg de la història de les teories mesòniques. En la teoria original de Yukawa del 1935, el mediador es pot representar per una funció d'ona escalar, sense descartar la possibilitat que es pugui descriure a través d'una funció vectorial, tot i que no la considera perquè, fins el moment, no es coneix cap cas de spin 1 amb massa finita (l'únic exemple és el fotó que no és massiu). L'any següent, A. Proca mostrarà com un camp vectorial també pot descriure partícules de massa finita. El 1938, Kemmer provarà les quatre possibilitats per a una teoria de camps mesònica: escalar, pseudoescalar, vector i pseudovector. En l'article conjunt de H. Fröhlich, W. Heitler i N. Kemmer del 1938 utilitzaran el mesó vector. La complicació definitiva vindrà de les divergències que apareixeran en la component tensorial de la força nuclear, que explica teòricament el moment quadrupolar, i que inclou una dependència en $1/r^3$ que a petites distàncies és fortament divergent. Amb aquest problema en ment, el 1939, Bethe notarà que l'única solució és una teoria del mesó neutre amb spin 1, amb un *cut-off* que faci constant la component tensorial a partir d'un cert radi crític. Però els partidaris de les teories dels mesons mesclats preferiran ajustar la mescla per cancel·lar la singularitat $1/r^3$.

²⁷La massa coneguda experimentalment per al mesotró de raigs còsmics.

Però les teories de mesons mesclats perdran importància quan “The use of the rigorous relativistic form of the interaction between nucleons and the meson field and the taking into account of the recoil energy of the nucleons in the intermediate states does not improve the situation because even in all ‘mixed’ theories singularities of the type r_{AB}^{-2} and r_{AB}^{-3} reappear.”²⁸ Malgrat tot, s’haurà fet un pas important relatiu a la possibilitat d’acceptar més d’un mediador de la interacció nuclear.

Quan el 1947 es produeixi el fet clau de la distinció experimental π - μ i l’acceptació de les teories dels dos mesons, igual com havia passat amb la idea de les isòbares nucleòniques, la idea de les teories dels mesons mesclats perdrà la raó de ser. Però de nou s’hi pensa amb l’aparició de les partícules subjecte de la nostra tesi.

Quan els primers exemples de noves partícules (partícules estranyes) semblen comportar-se de manera similar als recentment diferenciats mesons π , per la massa que els converteix en “mesons pesats”, per l’aparent forta interacció nuclear i, més endavant, per mostrar pions entre els productes de la seva desintegració, es renova la possibilitat que la teoria de mesons mesclats pugui explicar l’aparició d’aquests elements. Per exemple, Heitler, en el simposi sobre raigs còsmics realitzat a Caltech el juny de 1948, proposa:

From the theoretical point of view it can be said that the range of nuclear forces corresponds probably to the mass of the π -meson with admixture of heavier mesons not excluded. To give qualitatively the correct nuclear forces, vector and pseudoscalar mesons have been considered. To minimize the difficulty of the $1/r^3$ singularity, a mixture of pseudoscalar and vector mesons (Møller-Rosenfeld) with unequal masses (Schwinger), the vector meson being heavier, has often been favored, although the arguments for this mixture are not very strong. It is not impossible that the π - and τ -mesons just constitute some such mixture.²⁹

Una mica més tard, Yukawa també deixarà caure la idea basant-se en el comportament experimental del mesó τ (K^+):

[...] The fact that the τ -meson can originate a nuclear disruption similar to that originated by the π -meson seems to be in favour of the theory of mixed meson fields [...] which assumes the coexistence of mesons with integer spin and different masses, both strongly coupled with nucleons [...] Although we are convinced now that the mixed theory is of no use in removing the divergence, we are not yet sure whether it is necessary to introduce two or more meson fields for other reasons.³⁰

A principis del 1950, la desintegració en tres pions secundaris de l’actual mesó K , reconegut a l’època com a τ per l’exemple trobat a Bristol el 1949, apareixerà de nou en els experiments d’emulsió de l’*Imperial College* i el convertirà en la nova partícula millor coneguda per la seva característica desintegració en tres secundàries de traça visible.³¹

²⁸Pauli (1946), 10.

²⁹Heitler (1949b), 114.

³⁰Yukawa (1949), 474.

³¹Vegeu cap. 1, sec. 1.2.3, p. 42.

Aleshores, la idea d'inclusió com a part de les interaccions nuclears al mateix nivell que el pió, farà interessant pensar en les teories dels mesons mesclats:

[...] Since this event is explained in exactly the same way as was the event of Brown *et al.* (1949), the existence of τ -mesons would seem to be truly confirmed and as such should be duly considered in any meson theory of nuclear forces. From the theoretical point of view, the range of nuclear forces might well correspond to an admixture of π - and τ -mesons.³²

Però, igual com havia passat en el cas de les isòbares nucleòniques i la $V^0 \rightarrow p + \pi^-$, no quallarà una teoria de mesons mesclats aplicats a les noves partícules. Hi haurà una raó bàsica perquè aquesta teoria no prosperi, la formulació mecanicoquàntica de la interacció nuclear no haurà aconseguit vèncer totes les dificultats malgrat l'acceptació de la teoria dels dos mesons. El problema de les divergències perseguirà aquestes formulacions que mostraran com no té sentit intentar una expansió perturbativa per a la força nuclear. A principis dels 50, doncs, començarà a entreveure's la necessitat de trobar altres vies per enfrontar-se en aquesta interacció. En paraules de Pais:

The Maxwell-Yukawa analogy breaks down. The least one could say is that perturbation theory in powers of $g^2/\hbar c$ made no sense. The best one could hope for was to save the theory by using non-perturbative methods which, however, have not been found to this day.

Thus began a quarter-century of uncertainty about the dynamics of strong interactions. That question is still not fully resolved today, yet we now have excellent reasons for believing that the Yukawa meson fields are not as fundamental as the electromagnetic field, [...]³³

També en la dècada dels 50, els nous descobriments es poden utilitzar com un argument afegit en pro de la decadència de la teoria mesònica. Hem vist com els primers exemples descoberts s'intenten incorporar a través de la idea d'isòbara nucleònica, o a través de la idea de mescla. Però quan es produeix l'explosió experimental de nous casos, la classificació en un únic tipus de partícules es farà inviable i, lògicament, es farà inviable la inclusió de totes com a mediadores o com a prediccions de les teories mesòniques.

De resultes d'aquesta explosió experimental s'inicia una etapa on la preocupació primera serà la classificació i sistematització dels nous elements, amb la necessitat de determinar certes pautes de comportament comunes, o simetries, que a la llarga en permetin preveure el comportament amb una teoria que les descrigui. Veurem com isospín serà la simetria que conduirà a la via correcta.³⁴ Abans, però, s'haurà de fer evident una d'aquestes pautes de comportament comunes: les noves partícules semblen produir-se abundantment en interaccions nuclears (fortes) i, en canvi, la seva desintegració es produeix de manera relativament lenta (feblement). Abans que es pugui associar aquest comportament a la simetria correcta,

³²Harding (1950), 409.

³³Pais (1986), 483.

³⁴Vegeu cap. 4, p. 164.

múltiples hipòtesis basades en aquesta fenomenologia, i sense les pretensions pròpies d'una teoria mesònica, intentaran explicar aquest comportament.

2.1.4 Comença la jerarquia de les interaccions

Més enllà de les teories mesòniques i de la breu relació que tindran amb les noves partícules, l'època que ens ocupa marca també l'inici d'un relat més genèric com és el de la distinció de les diferents interaccions.

L'exposició precedent de les teories mesòniques, que pretendran explicar la força nuclear, té un punt de partida en el descobriment del neutró l'any 1932. Però fins i tot amb anterioritat, a principis dels anys 20, quan l'estructura nuclear no estava definida, els experiments de dispersió de partícules α ja van mostrar que era difícil explicar els resultats suposant únicament l'existència de la força coulombiana.³⁵ Però aquesta constatació no portarà automàticament a diferenciar la interacció forta. De fet, hi haurà un intent implícit d'explicar totes les interaccions entre partícules fonamentals conegudes a través d'una única teoria. Això comportarà que, des de l'origen, la interacció nuclear vindrà lligada a la desintegració β , i ambdues es formularan en analogia amb QED. Fermi pensarà en parells electró-neutrí com a mitjancers en la desintegració β , en analogia al fotó com a mediador de la interacció electromagnètica. En intentar explicar el nucli, Heisenberg es basarà en aquesta teoria de Fermi. Per Heisenberg, però, la interacció p-n serà un simple potencial d'intercanvi atractiu com el que es genera en l' H_2^+ per l'intercanvi d'un electró entre dos protons; la interacció p-p serà simplement coulombiana i la interacció n-n també la descriurà un potencial d'intercanvi a determinar fenomenològicament. En aquell moment, 1932, el coneixement real de la força nuclear, a través dels experiments, és encara força limitat: no es coneix l'energia de lligam del deuteró ni una anàlisi de la dispersió p-n.

També Yukawa pensarà en l'analogia amb QED quan construeixi la teoria de mesons, però una diferència substancial és present en la seva formulació. Malgrat que pretén explicar conjuntament desintegració β i interacció nuclear ja té clar que cal separar un tipus de reacció de l'altre. La seva idea és que la transició entre neutró i protó no sempre es produeix amb l'emissió dels parells $e-\nu$, sinó que a vegades es fa a través d'una altra partícula més pesada, que s'identificarà amb el mesotró de raigs còsmics. Allò que ens interessa d'aquesta idea és la necessitat d'introduir un camp diferenciat del propi de la interacció β , perquè cal distingir la intensitat de la força nuclear de la intensitat de la desintegració β :

Recently Fermi treated the problem of β -disintegration on the hypothesis of "neutrino".

³⁵Segons Pais (1986, 239–40), el naixement de les interaccions fortes es pot trobar en la declaració de Chadwick i Bieler el 1921 com a conclusió d'un experiment de dispersió α -hidrogen que realitzen a Cambridge:

The present experiments do not seem to throw any light on the nature of the law of variation of the forces at the seat of an electric charge, but merely show that the forces are of very great intensity. . . It is our task to find some field of force which will reproduce these effects.

According to this theory, the neutron and the proton can interact by emitting and absorbing a pair of neutrino and electron. Unfortunately the interaction energy calculated on such assumption is much too small to account for the binding energies of neutrons and protons in the nucleus.³⁶

A mitjan dels anys trenta, el coneixement experimental d'aquestes energies de lligam de protons i neutrons que cita Yukawa, i en general de la força nuclear, queda reflectit en l'article de Bethe i Bacher del 1936. Segons l'article, els experiments de dispersió p-p mostren com la força entre ells ha de ser atractiva, de curt abast i, evidentment, més forta que la coulombiana. Però els autors també expressen un sentiment que dificulta la distinció clara de les diferents interaccions quan ataquen el problema de la interacció nuclear a través del camp de Fermi:

This highly unsatisfactory result is, of course, due to the extremely small value of the constant g which governs the beta-emission. However, the general idea of a connection between beta-emission and nuclear forces is so attractive that one would be very reluctant to give it up.³⁷

La idea present en l'article de Bethe i Bacher es pot considerar com la predominant fins a la distinció dels dos mesons de raigs còsmics i l'acceptació de la teoria dels dos mesons de Sakata i Inoue (1946) i de Marshak i Bethe (1947). A partir d'aleshores, amb la distinció π - μ , l'evidència de dues forces diferents lligades a cadascuna d'aquestes partícules anirà forjant la distinció entre força forta i força feble. Per exemple, en el congrés Solvay (27 setembre–2 octubre de 1948), Powell descriurà aquesta diferència de forces utilitzant ja els termes fort i feble:

The π -particle can be produced in processes which lead to the explosive disintegration of nuclei; and when brought to the end of their range in photographic emulsions they are captured by atoms, and produce disintegrations of both light and heavy nuclei. Their modes of creation and extinction are therefore consistent with the view that they have a strong interaction with nucleons. On the other hand, the μ -mesons are produced directly, either rarely, or not at all; and, when brought to rest in silver bromide, they never, or only rarely, produce nuclear disintegration observable in the conditions of our experiment. The observed behaviour of the μ -mesons is therefore consistent with the view that they have a very weak interaction with nucleons.³⁸

Aquesta distinció entre una interacció forta i una interacció feble eliminarà la idea de connectar la teoria de les forces nuclears amb la teoria de la desintegració β , però alhora reforçarà la connexió d'aquesta desintegració β amb la desintegració muònica:

The simple relation of Yukawa between the β decay and the decay of the meson can no longer be maintained.

However, the lifetimes of a β decay and of a decay of the μ meson seem to be given by couplings of the same order.³⁹

³⁶Yukawa (1935), 48.

³⁷Bethe, Bacher (1936), 203.

³⁸Powell (1948), 111.

³⁹Serber (1948), 108.

Són les primeres intuïcions d'una interacció feble unificada que portarà a una interacció universal de Fermi.⁴⁰

Pel que fa a la interacció forta, la distinció proporcionada per la teoria dels dos mesons no solventarà els problemes de tractar la interacció nuclear amb una teoria quàntica de camps relativista que permeti una aproximació pertorbativa acceptable. A principis dels cinquanta, una aproximació més fenomenològica al problema anirà definint altres vies de tractament alternatiu, alimentades per un grau alt d'experimentació en raigs còsmics i acceleradors que treballaran amb els primers feixos de pions i sistematitzaran el treball sobre la seva interacció amb els nucleons.

El descobriment de les noves partícules (partícules estranyes) contribuirà definitivament a la distinció entre interacció forta i feble. De bon principi, el comportament de les noves partícules mostrarà una clara asimetria respecte els seus processos de producció i els seus processos de desintegració. Però ara aquesta asimetria serà difícilment associable a la distinció entre dues partícules, com havia passat en el recent cas π - μ .⁴¹ El 1948, Oppenheimer noterà:

Apart from arguments which are almost arguments of consistency, and which make us hesitate to believe that those mesons that are easily produced by nuclei are hard for nuclei to capture, there are of course no a priori views at the moment about what the things may be. I think it hard to disbelieve Leprince-Ringuet's evidence for a very heavy meson. [...] A natural view has seemed to be that we were dealing with unstable neutral mesons, the existence of which might give a sort of isotopic symmetry to nuclear forces. But, for instance, the Leprince-Ringuet mesons, if they were also strongly coupled to nuclear matter, would likewise be expected to disintegrate into gamma-rays; perhaps the one picture we have seen indicates a lifetime rather long to fit this supposition.⁴²

Així, les noves partícules semblen crear-se en interaccions nuclears fortes i, alhora, un cop creades, semblen mostrar poca interacció amb aquests mateixos nuclis. La llarga vida que el mesó pesat de Leprince-Ringuet sembla mostrar no es pot justificar en base a una interacció forta amb els nucleons, ni tampoc en base a una interacció electromagnètica. Aquest serà el preludi de l'anunci de les propietats irreconciliables de les noves partícules. Però la complexitat existent en els nous fenòmens dificultarà l'associació immediata amb la interacció forta en els processos de producció i amb la interacció feble en els processos de desintegració. No obstant això, enmig de la complexitat aquestes idees es van entrellucant. El mateix Oppenheimer, el 1952, exposa:

All of these objects [partícules estranyes] seem to be produced at fairly high energies with reasonable probability. So in these nuclear collisions, some reasonably strong

⁴⁰El mateix 1948, G. Puppi sintetitzarà aquesta idea en un triangle on visualitzarà les interaccions entre els quatre fermions coneguts: protó, neutró, electró i muó. La idea s'ampliarà una dècada més tard amb l'afegit dels barions estranys, que es desintegren feblement (v. l'epíleg, p. 290).

⁴¹La idea d'una partícula "extra", diferent de l'observada experimentalment, serà proposada breument com una hipòtesi per explicar aquesta asimetria (v. sec. 2.2.5, p. 95).

⁴²Oppenheimer (1949), 181.

interactions must be involved.⁴³

I similarment, el mateix 1952, Pais relaciona la seva desintegració amb una interacció feble:

We would have not been surprised if these new heavy particles had been found to undergo something closely related to β decay [...].⁴⁴

L'any següent, el mateix Pais relacionarà la seva *even-odd rule* i la seva teoria de la paritat ω , que prediuen la producció associada dels nous elements, amb la distinció entre ambdues interaccions:

It may be mentioned that a previous phenomenological classification in “even” (strong) and “odd” (weak) interactions just corresponds to a distinction between those interactions which conserve ω -parity and those which do not.⁴⁵

Conjuntament a la distinció de les diferents interaccions, s'anirà desenvolupant també la idea de les diferents famílies de partícules. Serà el mateix Pais qui donarà el nom de barió,⁴⁶ i en una discussió amb Casimir s'entreveu com es van definint els diferents conjunts:

CASIMIR: Am I right in saying that you classify all so called elementary particles in the three families: the nucleon family, the π -family, and the electron-family containing besides the electron, the neutrino and the μ mesons?

PAIS: I would indeed consider such an ordering as a first stage of a program aiming at a fuller comprehension of the various particles and fields. But I do not at all believe that this would be the end of the story.⁴⁷

A mesura que la complexitat en els nous esdeveniments s'anirà sistematitzant i s'anirà construint el model teòric d'estranyesa, s'establirà una jerarquia de les diferents interaccions. Però aquest serà ja en el final de la nostra recerca, quan les noves partícules contribuiran en les interaccions elementals al mateix nivell que les velles partícules.

⁴³Oppenheimer (1952b), 85.

⁴⁴Pais (1952a), 90.

⁴⁵Pais (1953a), 885.

⁴⁶Vegeu cap. 4, sec. 4.2.2, p. 175.

⁴⁷Ibíd., 887.

2.2 Hipòtesis fenomenològiques per a les propietats experimentals aparentment irreconciliables

My question arises from the following facts: strongly coupled τ meson, strongly coupled π meson, stable or almost stable τ meson.

Oppenheimer a Solvay (1948), 373.

Oppenheimer: [...] I would say that we don't understand them at all.

Bhabha: What we understand is exceedingly small.

Solvay (1948), 375.

Recent discovery by English and American observers of the V-shaped tracks in the cloud chamber photographs has given rise to much discussions among nuclear physicists because of their highly enigmatical characters.

Aizu i Kinoshita (1951), 630.

2.2.1 Les propietats irreconciliables

Els primers exemples de noves partícules inestables en raigs còsmics apareixen com esdeveniments, més o menys aïllats, rescatats com a curiositats de la varietat d'interaccions produïdes en les ruixades penetrants. Aquestes ruixades es formaven per les interaccions altament energètiques de les partícules que contenien: nucleons, pions, muons, electrons i fotons. Les noves partícules també s'hi trobaven, tot i que fins que el grup de Caltech, amb C. D. Anderson al capdavant, no analitza els resultats de les seves ruixades penetrants, obtinguts a Pasadena (230m) i White Mountain (3200m), no es farà evident que, en realitat, aquests nous esdeveniments no són tan aïllats com en principi semblava.⁴⁸

The conclusion that the phenomena actually represent decay processes follows from arguments similar to those previously given by Rochester and Butler. The larger number of events observed in these experiments greatly strengthens these arguments, and thus establishes more firmly the existence of the new unstable particles.⁴⁹

⁴⁸Vegeu cap. 3, p. 104.

⁴⁹Seriff *et al.* (1950), 290.

Els autors, a més de destacar-ne la producció abundant, mostren que existeix una gran asimetria entre el nombre de partícules trobades neutres (30) i carregades (4), i donen una estimació de la vida mitja de $(3 \pm 2) \cdot 10^{-10}$ s.

Pel març de 1951, el grup de Manchester publicarà nous resultats, obtinguts amb la seva cambra al Pic-du-Midi.⁵⁰ L'article és novedós en el sentit que presenta una estadística on relaciona les partícules V amb el conjunt de partícules penetrants que incideixen en l'experiment:

	Sea-level (using 3.4 cm lead plate)	Pic-du-Midi (using 2.2 cm lead plate)	Pic-du-Midi (no lead plate)
Duration of experiment	2 years	4 months	2 months
No. of penetrating showers	164	600	-
No. of penetrating particles	240	1500	-
No. of neutral V-tracks	1	22	14
No. of charged V-tracks	1	4	3

L'estadística, a més de confirmar la importància de realitzar les observacions a gran alçada, confirma també la asimetria entre la quantitat de noves partícules neutres i carregades. L'anàlisi de les neutres porta a un nou descobriment: algunes d'aquestes primàries es desintegren en protons secundaris, per tant, molt més massives que els τ , fins ara classificats com mesons pesats. Una explicació teòrica satisfactòria les haurà de tenir en compte i les haurà de diferenciar de les anteriors.

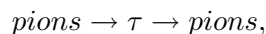
Genèricament quedarà clar que el nombre de nous esdeveniments no es pot considerar menyspreable, respecte de la resta de partícules còsmiques. Aquí comença el problema: l'estadística mostra que les noves partícules es produeixen en una proporció $\geq 1\%$ del total de partícules produïdes a partir de les interaccions nuclears primàries. Aquest valor no pot més que considerar-se una producció sorprenentment abundant respecte la lentitud, que mostren aquestes partícules, per a desintegrar-se (les llargues traces per a les primàries que s'evidencien en els negatius no permeten una estimació de la vida menor de $\sim 10^{-10}$ s).⁵¹

Amb aquest panorama experimental, amb renovada confiança envers l'existència de les noves partícules i les primeres estimacions estadístiques de les seves propietats, els teòrics es replantegen també com enfocar les seves investigacions. Si bé els articles experimentals que hem citat no plantegen obertament cap tipus de problemàtica, ràpidament inciten la curiositat al voltant d'aquestes propietats. Les noves partícules ja no hi ha dubtes que

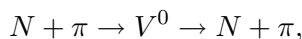
⁵⁰Armenteros *et al.* (1951), 501.

⁵¹Modernament, veiem un procés feble per a la desintegració. Si la seva producció s'hagués de donar en la proporció esperada per a aquest tipus de procés feble, la raó trobada no podria ser mai $\geq 1\%$, sinó que es diferenciaria en un factor de 10^{-13} , que és el típic entre la interacció forta i feble.

constitueixen un component no menyspreable de les partícules contingudes en les ruixades penetrants. En aquest moment, els components d'aquestes ruixades penetrants estan en augment, ja no es tracta sols dels mesotrons (muons) presents en els primers estudis sobre ruixades de Jánossy a principis dels 40, sinó que s'hi van descobrir nucleons, pions, muons, electrons, fotons... i les noves partícules. Però el que ja és clar a l'època de Jánossy, encara que per evidències indirectes, és que les primàries, causants d'aquestes interaccions que arriben a nivell del mar, són principalment protons. A finals dels 40, les emulsions fotogràfiques en proporcionen ja evidències directes, no sols de protons primaris, sinó també partícules α i nuclis pesats altament energètics. Per tant, el mecanisme de producció de les noves partícules serà del mateix tipus que la producció piònica: serà el producte de les interaccions entre nucleons, o bé entre nucleons i pions suficientment energètics. Es tracta, doncs, d'una interacció del mateix tipus que les interaccions nuclears que la teoria mesònica portava ja anys estudiant i que, com hem vist, encara arrossega problemes. Un problema similar al presentat pels mesotrons de raigs còsmics es planteja ara amb les noves partícules. Sembla clar que les noves partícules es produeixen abundantment en interaccions de força comparable a les interaccions π -N i, per tant, mostrant una secció eficaç de dispersió comparable a la ja coneguda per a aquests pions. Malgrat això, si el més raonable era esperar simetria en les reaccions, per exemple:



pel cas del mesó pesat més conegut, o bé,



la suposada simetria comportaria una desintegració (a la dreta de les reaccions) tan ràpida com el temps típic de producció (10^{-23} s) (a l'esquerra de les reaccions). La realitat experimental, però, frustra aquesta simetria, ja que mostra una vida per a aquestes partícules molt més llarga (10^{-10} s).⁵²

En vista de la asimetria que es mostra a través d'aquestes propietats aparentment irreconciliables, la primera especulació lògica era pensar que la solució vindria, com en el cas dels mesotrons de raigs còsmics, de suposar l'existència d'una partícula pare que es feia difícil de detectar, igual com el pió havia estat difícil de discernir com a pare del muó i havia portat llum al problema de la teoria mesònica. El plantejament d'aquesta alternativa, i d'altres

⁵²El kaó, igual com el pió és produït per interacció forta. A diferència del pió, hauria de ser capaç de desintegrar-se via aquesta interacció forta. El pió no pot desintegrar-se fortament perquè és l'element menys massiu subjecte a la interacció forta (contextualitzant a l'època). Però el kaó hauria de desintegrar-se fortament produint pions, en 10^{-23} s. En realitat el kaó viu de l'ordre de 10^{-8} s, 10^{15} cops més del que seria d'esperar. Alguna cosa semblava impedir la força forta en la desintegració de kaons i hiperons. Anys a venir, aquestes característiques difícils de justificar sembla que seran les responsables de la denominació de partícules estranyes a les noves partícules.

més o menys infructuoses, no es farà esperar. Paradoxalment, però, aquests plantejaments es realitzaran molt lluny dels principals centres de producció experimental. La comunitat de físics japonesos, hereus del “club del mesó”,⁵³ serà la primera en destil·lar les propietats irreconciliables, a partir de l'estadística experimental disponible, i traduir-les en possibles explicacions teòriques.

2.2.2 *Soryushiron Kenkyu: Symposium on elementary particles at Tokyo, July 7, 1951*

A principis dels 50, unes pèssimes condicions envolten la societat japonesa, que intenta refer-se de les seqüeles de la 2a Guerra Mundial. Però dins d'aquesta societat, la comunitat de físics, tot i les lògiques influències externes de la postguerra, sembla funcionar amb una dinàmica pròpia. Malgrat en el camp experimental la recessió econòmica havia suposat un gran desfassatge respecte les consecucions occidentals, l'aspecte teòric es trobava en un dels moments de més empena. L'èxit de les formulacions teòriques japoneses era ja indiscutible per als propis japonesos, però també per als occidentals, cosa que feia augmentar la seva confiança, en tant que contribuents indiscutibles a una física moderna eminentment occidental. Yukawa, amb la teoria de les interaccions nuclears dels anys trenta, havia donat el primer crit d'alerta envers els desenvolupaments realitzats a Orient. Una dècada més tard, la renormalització covariant de QED de Tomonaga serà la confirmació definitiva del poder teòric dels japonesos. Malgrat, doncs, les difícils condicions, l'ànim de la comunitat física japonesa els fa sobresortir amb una producció teòrica abundant que es concreta en la proposta de noves idees.

D'altra banda, l'aïllament al qual havia estat sotmesa aquesta comunitat comença també a esvaïr-se. Les contribucions americanes i europees comencen a arribar més puntualment, i a trobar-se de manera més assequible les principals revistes. Aquest trànsit comença a funcionar de les dues bandes, el *Progress of Theoretical Physics* —la revista fundada per Yukawa el 1946 on publiquen sobretot els japonesos però en llengua anglesa— comença també a ser present en els centres occidentals.⁵⁴

El final de l'aïllament també es comença a fer palès en l'augment dels viatges dels científics. Alguns importants físics occidentals havien visitat el Japó ja en la preguerra, però la mobilitat dels físics japonesos era molt restringida, i nul·la durant la guerra. En el temps d'ocupació, les potències aliades aproven alguns desplaçaments de físics japonesos, convidats per universitats americanes. La col·laboració amb els EUA continuarà després

⁵³El “club del mesó” fou idea de H. Yukawa i S. Tomonaga i promovia trobades regulars sobre teoria de mesons en l'època de la 2a Guerra Mundial, en concret del 1941 al 1944.

⁵⁴Recordem també que precisament a través del *Prog. Theo. Phys.* es pot notar que la producció teòrica sobre noves partícules en aquesta primera etapa és bàsicament japonesa (v. apèndix B, p. 378–379).

de l'ocupació a través de les *Fulbright Scholars*. El 1951, el govern japonès comença ell mateix un programa de mobilitat.⁵⁵ Així és com Tomonaga anirà convidat el 1949–50 a l'*Institute for Advanced Study* de Princeton i Satio Hayakawa treballarà al MIT del 1950 al 1952. També Yoichiro Nambu i Toichiro Kinoshita aniran a Princeton el 1952 i acabaran quedant-se als EUA.

Sols amb l'existència d'aquesta comunicació entre Orient i Occident s'explica com el 1951, en el *Symposium on elementary particles at Tokyo* (7 de juliol de 1951), diferents físics japonesos mostren el coneixement experimental de les noves partícules que arriba d'Occident i, fent ús de la seva tradició teòrica, concreten els primers intents seriosos d'explicar les propietats experimentals aparentment irreconciliables dels nous elements.⁵⁶

Malgrat les col·laboracions presentades introdueixen idees vàries, mostren el tret comú d'exposar en primer lloc les característiques experimentals conegudes:

Recently Butler et al. presented further evidences concerning the nature of the so-called *V*-particles which had been observed by Rochester and Butler and by Anderson and collaborators. According to these authors: i) The *V*-particles are found among penetrating showers with a rate of the order of 1%; ii) Their decay life is estimated to be about 10^{-10} sec; iii) There are two kinds of them, charged and neutral, the latter being about 5 to 10 times more abundant than the former, presumably due to their difference in lives.⁵⁷

Of the various properties of the *V*-particles which are known to us, the most remarkable seems to be their large yield and long life, two apparently contradicting properties of the basis of simple detailed balance consideration. They suggest that the production and decay are not inverse processes and/or some kind of selection rules (in a very general sense) are at work in the decay reaction.⁵⁸

Recent discovery by English and American observers of the *V*-shaped tracks in the cloud chamber photographs has given rise to much discussions among nuclear physicists because of their highly enigmatical characters. Especially the obvious inconsistency between the rather large frequency of production (a few per cents of pion production) and the exceedingly long life-time (10^{-10} sec.) of this event has made it difficult to understand in a sensible manner.⁵⁹

⁵⁵Per a més informació sobre la situació de la comunitat física japonesa es pot consultar Fermilab (1985), 536–48; París (1982), 335–40.

⁵⁶El significat de les paraules japoneses *Soryushiron Kenkyu* que donen nom a la secció ens l'explica Konuma a Fermilab (1989, 541): “The Japanese word *soryushiron* means the theory of elementary particles (and is taken to include nuclear theory) [...] (*kenkyu* means research).”

L'anàlisi d'aquest simposi es pot fer mercès a la publicació en forma de *letters* al *Prog. Theor. Phys.*, de les discussions allí mantingudes, notablement: Nambu, Nishijima, Yamaguchi (1951a i b); Aizu, Kinoshita (1951); Miyazawa (1951); Ōneda (1951).

⁵⁷Nambu, Nishijima, Yamaguchi (1951a), 615.

⁵⁸Nambu, Nishijima, Yamaguchi (1951b), 619.

⁵⁹Aizu, Kinoshita (1951), 630.

Després d'aquesta presentació de la informació experimental, que és força similar en totes les col·laboracions, els articles es comencen a diferenciar en presentar les idees teòriques que aquesta informació els suggereix.

Els primers en presentar aportació al congrés per a la seva publicació al *Progress of Theoretical Physics* són Nambu, Nishijima i Yamaguchi de la Universitat d'Osaka que “wrote up in an encyclopedic manner all possible explanations”⁶⁰. Amb aquest tractament l'article permet entendre quines eren les opcions que semblaven entreveure's de la informació experimental. La preocupació més evident era com resoldre teòricament l'aparent contradicció existent entre producció abundant i vida llarga. La primera idea que apareix és pensar en una analogia amb el recent cas dels dos “mesons” discernits dels raigs còsmics.

L'assumpció d'aquesta hipòtesi, des dels més primitius intents d'explicació, no ens ha d'estranyar. Quasi paral·lelament a les primeres dades de confirmació del descobriment del pió, diferenciat del mesotró de raigs còsmics μ , apareixen els primers casos de mesons més pesats τ i de partícules V. L'explicació teòrica dels dos mesons, exitosa en la distinció π - μ , potser també és vàlida d'alguna manera per als nous elements:

The above mentioned contradiction between production and decay may be lifted if we postulate, as was just the case in the $\pi - \mu$ decay, that the observed V (though not necessarily including τ) are decay products of some unknown particles with sufficiently short life and strong nuclear interaction.⁶¹

En el cas dels pions, malgrat ésser els esperats mitjancers de les interaccions nuclears, mostraven una vida també prou llarga com per deixar traces en cambres i emulsions. La desintegració lenta del pió, però, era justificable com a progenitor d'una partícula, el muó, que interaccionava feblement amb la matèria. Per això, la llarga vida de les noves partícules, que semblaven crear-se en interaccions entre partícules fortament interaccionants (interaccions nuclears), es podria justificar proposant que les que realment interaccionaven fortament eren unes suposades progenitores seves, anàlogues als pions però de molt curta vida, produïdes directament en esdeveniments nuclears, que es desintegrarien instantàniament en les V observades.

Però aquesta hipòtesi presentava dificultats serioses: d'entrada suposava la predicció de més noves partícules no detectades. També es feia difícil justificar aquells esdeveniments on les secundàries reconegudes eren pions, com el cas de la τ de la cita anterior, perquè aleshores era difícil entendre la raó de l'existència de la mateixa τ , si la suposada progenitora interaccionava fortament i també ho feien els seus productes de desintegració. En realitat el procés hauria de produir-se directament de la partícula pare als pions secundaris, sense passar pels nous elements. És per aquesta raó que Nambu, Nishijima i Yamaguchi, en la cita anterior, semblen proposar l'exclusió del cas τ en la seva hipòtesi, i veuen la seva

⁶⁰Gell-Mann (1982), 397.

⁶¹Nambu, Nishijima i Yamaguchi (1951a), 616.

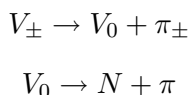
aplicació més factible en els casos V on les secundàries encara poden ser muons, feblement interaccionants.

Tampoc Aizu i Kinoshita semblen trobar en aquesta hipòtesi la solució adequada:

Since the circumstance has some resemblance with the case of the two meson theory where mesons interact with matter very weakly though produced with large cross section, one may be led to suppose that at least two unknown particles participate in this phenomenon some of them being daughters of the others. Although such an approach might be a right one, it is so complicated and full of arbitrariness that it seems to be more reasonable for the moment to circumvent this possibility.⁶²

Si bé el plantejament inicial d'aquesta hipòtesi sembla inevitable donada la semblança amb els recents descobriments dels dos mesons de raigs còsmics, la presència en aquest cas de les partícules pare és molt més difícil de justificar.⁶³

Una altra opció possible que surt en aquests articles és la dels estats isobàrics. Aquesta idea sembla tenir l'avantatge de no haver d'introduir les V com a noves partícules, sinó com a estructures compostes de les partícules ja conegudes. És així com es plantegen les reaccions:



El primer cas es fonamenta en una primera intuïció experimental del grup de Manchester, l'anàlisi complet de l'esdeveniment no serà conegut fins l'any següent, 1952.⁶⁴ Malgrat la limitació de l'observació, l'esquema teòric és posat ràpidament en evidència perquè pot afavorir precisament aquesta idea d'isòbara nucleònica. Les V_{\pm} i les V_0 fan transicions als estats nucleònics més baixos a través de l'emissió de radiació mesònica. A més de l'avantatge d'explicar les noves partícules sense haver-les d'introduir com a tals, sinó com a compostos de les velles, aquesta hipòtesi ve recolzada també per una teoria de camps mesònica que prediu aquests estats.⁶⁵

Malauradament, la hipòtesi té altres punts en contra. D'entrada, dona explicació a un dels tipus de noves partícules: les V que semblen desintegrar-se en nucleons secundaris. Però no és un model genèric que pugui explicar també l'existència de mesons pesats, com el τ . D'altra banda, tot i que la teoria mesònica d'acoblament fort prediu l'existència d'aquestes isòbares, també en prediu una vida 10^{13} ordres de magnitud menor que la que es desprèn de la mesura de traces de les observacions experimentals. L'explicació d'aquesta vida experimental demandarà d'una hipòtesi addicional si es vol conservar aquesta idea d'isòbara

⁶²Aizu, Kinoshita (1951), 630.

⁶³Més informació sobre desenvolupaments posteriors d'aquesta proposta es pot trobar en aquest capítol, sec. 2.2.5, p. 95.

⁶⁴Vegeu cap. 3, sec. 3.1.1, p. 104. Aquesta anàlisi portarà a reconèixer el descobriment de l'hiperó $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$.

⁶⁵Vegeu sec. 2.1.3, p. 68.

nucleònica per explicar els nous esdeveniments. És per això que es pensa en l'existència d'una barrera de potencial, cosa que suposarà "Take advantage of large internal angular momenta for V , which make the decay highly forbidden."⁶⁶ Però una de les pretensions dels teòrics serà precisament trobar un model que englobi tant els mesons pesats com les V que semblen desintegrar-se en nucleons secundaris. Aquest model d'isòbara es mostra, doncs, coix per abastar tots els esdeveniments.

També Miyazawa, de la Universitat de Tokyo, refusa la idea d'isòbares nucleòniques per explicar els nous esdeveniments:

A tempting interpretation to assume a V as an excited isobaric state of a nucleon, as appeared in the strong coupling meson theory, must be rejected, because an isobar decays too fast to be reconciled with experiments, by emitting a π -meson or a γ . π or γ emission can only be excluded if the excited state has an integral spin, which scheme will be discussed in the following.⁶⁷

Però no renuncia a la idea de compost dels nous elements que veurem com el portarà a introduir la noció de producció en parelles. Aquesta noció serà present, amb més o menys força, en totes les contribucions al *Symposium on elementary particles at Tokyo* (7 de juliol de 1951).

2.2.3 L'origen de la hipòtesi de la producció associada

La hipòtesi de la producció associada⁶⁸ pren ràpidament força perquè fenomenològicament es pot entendre involucrant un simple balanç energètic. La idea és que, per explicar la gran diferència entre proporció de producció i de desintegració, es pot suposar que la producció es fa en parelles per col·lisions nucleòniques o de fotoproducció:

$$N + N \rightarrow V + V$$

o,

$$\gamma + N \rightarrow V + \tau,$$

respectivament, que n'explicarien l'abundància. Però, a l'hora de desintegrar-se, la presència d'una segona nova partícula (V o τ) a la producció faria que no hi hagués prou energia per tornar al sistema de nucleons inestables (per exemple, $m_V < m_N + m_\tau$) a través de les reaccions simètriques:

$$V \rightarrow N + N + \bar{V}$$

o,

$$V \rightarrow \gamma + N + \bar{\tau},$$

⁶⁶Nambu, Nishijima, Yamaguchi (1951b), 620.

⁶⁷Miyazawa (1951), 632.

⁶⁸El nom de producció associada per descriure la producció en parelles de les noves partícules es deu a M. G. K. Menon, segons cita Gell-Mann (1956b, 853).

Un segon punt de força d'aquesta hipòtesi ve de la fàcil justificació que pot tenir la presència de partícula i antipartícula en la descripció de les interaccions possibles en teoria de camps. Aquest joc, entre fenomenologia i descripció de la interacció en teoria de camps, el realitza intel·ligentment Miyazawa.

Per Miyazawa, les V més pesades que el nucleó seran compostos bosònics, el spin enter dels quals inhibiria qualsevol tipus de desintegració en $N + \pi$ o en $N + \gamma$, que no conservarien el moment angular. En realitat, la desintegració d'aquests compostos, que ell anomena V_h (*V heavier*), seria un procés complex que no es pot entendre sense introduir un procés de producció en parelles. Miyazawa assumeix que les V experimentals menys pesades que els nucleons són fermions que es desintegren en $\pi + \mu$, i les anomena V_l (*V lighter*). Aleshores, en la col·lisió entre nucleons altament energètics, s'emet un anti- V_l en un estat lliure i un V_l en un estat lligat, interacció entre fermions que es pot descriure amb matrius de Dirac com:

$$\eta \bar{\psi}_N O \psi_N \cdot \psi_{V_l} O \psi_{V_l}$$

Notem que la producció en parelles surt des del mateix moment que es considera la V_l amb caràcter fermiònic ja que, si es pretén construir la interacció d'aquesta V_l amb els nucleons, la invariància Lorentz de la interacció lagrangiana així construïda imposa obligatòriament l'aparició doble del camp fermiònic representant a aquestes V_l .

Es tracta, doncs, d'una producció en parelles, encara que “[...] since most of the V -particles escape without being observed, only one of the pair is likely to appear in a cloud chamber photograph.”⁶⁹ Però fins al moment el seu model no ha justificat la presència de les V més pesades que el nucleó. Per justificar l'existència d'aquestes V_h les considera compostos d'un nucleó amb el V_l que hi ha quedat atrapat formant un estat lligat. La desintegració d'aquest V_h es fa a través de la desintegració virtual del V_l lligat en $\pi + \mu$, però sense tenir prou energia com perquè ambdues secundàries quedin en un estat lliure. El π és absorbit pel nucleó i queden el nucleó i el muó com a productes de la desintegració del V_h , compatibles amb les observacions experimentals. Resumint:

$$V_l \rightarrow \pi + \mu$$

$$V_h = (N + V_l) \rightarrow N + \pi + \mu \rightarrow N + \mu$$

Per tant, a partir del refús de la idea d'isòbares nucleòniques, Miyazawa introdueix dues idees importants: la idea de producció en parelles per a les V més lleugeres que els nucleons, per ell V_l , i la idea de compost per explicar les V més pesades que els nucleons, per ell V_h . Aquestes primeres intuïcions d'una producció en parelles permeten justificar una interacció entre nucleons i mesons pesats, suposats fermions per Miyazawa, a través de matrius de Dirac i una constant d'acoblament deduïble de l'experimentació per tal que l'energia de

⁶⁹Miyazawa (1951), 632.

l·ligam de l'estat lligat que es formaria (V_l+N) fos igual a la diferència de massa $m_N+m_{V_l}-m_{V_h}\sim 500m_e$. També la presència d'un dels parells V_l en el compost V_h permet justificar la desintegració lenta d'aquestes V_h , assumint que la desintegració prové en realitat de la V_l en $\pi+\mu$.

Un dels problemes que presenta el model és l'assumpció que una secundària de la V_l és un muó, suposició factible si es vol imposar que V_l és fermiònica, però, fins el moment, no provada experimentalment.

We have tentatively assumed that one of the secondaries is a μ -meson. There is yet no evidence that it is the case. If it is experimentally established that both secondary particles have strong nuclear interaction and cannot be μ -meson, the above model must be altered in that V_l 's are bosons, coupled to nucleons in pairs like (1) $[\bar{\eta}\psi_N O\psi_N \cdot \psi_{V_l} O\psi_{V_l}]$, and decays into two π 's. Then a V_h decays into a nucleon and a π .⁷⁰

Però malgrat en aquesta conclusió sembla presentar ambdós casos —considerant sols pions secundaris o considerant pions i muons— com igualment extrapolables, en realitat el fet de restringir-se a les evidències experimentals —al cas d'únicament pions secundaris— dificulta molt l'acceptació de l'esquema de Miyazawa. En aquest cas, l'acoblament de bosons amb nucleons no té sentit a través de les matrius de Dirac com ell proposa.

Si bé en perspectiva el model de Miyazawa pot semblar absolutament incorrecte, alguns dels trets que involucra el fan històricament interessant. Així, apareix una primitiva producció associada i una utilització, també pionera, de la inhibició de la desintegració, via forta o electromagnètica, a través de considerar una desintegració de V_l en $\pi+\mu$ amb una constant d'acoblament ajustable a partir de la vida experimental d'aquests mesons pesats. Per primera vegada, també, aquestes col·laboracions japoneses intenten explicar, amb una mateixa teoria, ambdós tipus de noves partícules experimentalment ben diferenciades: els mesons pesats —genèricament coneguts en aquest moment com τ — i la $V^0 \rightarrow N + \pi$ —amb un clar caràcter nucleònic.

En aquesta línia es mostra també el treball d'Ôneda, de la Universitat de Kanazawa. Les seves aspiracions són clares:

Here we propose a theory which connects the new unstable particles with τ -mesons. These theories should overcome the contradiction between fairly long lifetimes and notable abundance of their production.⁷¹

Recordem que fins aquest moment s'anomena mesons τ als exemples de mesons pesats,⁷² però ja el 1950 les partícules V , a partir del treball a Caltech i Manchester, comencen a aparèixer com altres casos de noves partícules. Experimentalment, les noves V es mostraran com mesons pesats i partícules més pesades que el nucleó (hiperons), però per a Ôneda i

⁷⁰Miyazawa (1951), 633.

⁷¹Ôneda (1951), 633.

⁷²Vegeu cap. 1, sec. 1.2.3, p. 42.

d'altres en aquest primer moment les V s'associen únicament amb aquelles partícules que entre les seves secundàries mostren protons. Des del punt de vista teòric es tracta, doncs, de relacionar mesons pesats τ amb hiperons V i els nucleons que semblen produir uns i altres. Per aquest fi, Ôneda assumeix les següents interaccions.

La interacció V -nucleó- τ :

$$G_V(\bar{\psi}\tau_V O_V\psi, U^*), \quad (1)$$

la interacció nucleó- τ :

$$g_\tau(\bar{\psi}\tau_N O_\tau\psi, U^*), \quad (2)$$

i la interacció nucleó- π :

$$g_\pi(\bar{\psi}\tau_N O_\pi\psi, \varphi^*), \quad (3)$$

on τ_V i τ_N són matrius de spin isotòpic que acoblen V i nucleons, i nucleons entre ells, respectivament. U i φ representen la funció d'ona dels mesons τ i π , i O_V , O_τ , O_π són les matrius de Dirac. Cal notar que la tercera interacció considerada és la interacció fonamental coneguda de la força forta; g_π està, doncs, determinada. I notem, també, que en analogia amb aquesta interacció, s'han construït les altres dues: τ , com a mesó pesat, presentarà una interacció amb els nucleons perfectament anàloga a la del pió; i a la vegada, al pensar en la V com un nucleó pesat, ens porta a considerar la primera de les interaccions, que es pot entendre com dos nucleons, un més pesat que l'altre, interaccionant amb el mesó pesat.

A través d'aquestes interaccions elementals, l'autor pretén veure com seran les reaccions on τ i V es produeixen conjuntament, els casos possibles seran els de la figura 2.1.

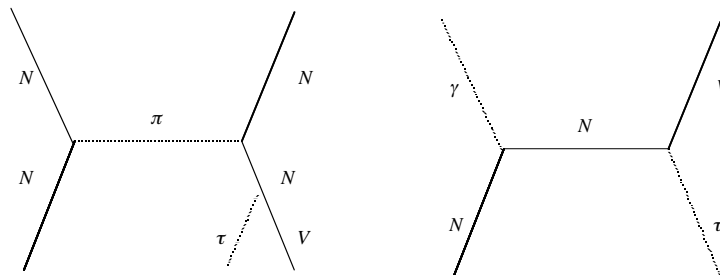


Figura 2.1: Diagrames de Feynman de les possibles reaccions de producció associada τ - V .

Com la informació experimental ens permet saber que la producció de V i τ es dona en $\geq 1\%$ de la producció de pions, podem estimar que $G_V \geq 0.01 g_\pi$, i d'aquí, inferim que la primera reacció serà més efectiva que la segona, en produir les noves partícules. El punt interessant de la seva teoria és precisament que, mentre la producció es pot fer associada si se suposa aquesta interacció, la desintegració no es pot donar via la mateixa interacció, simplement per un balanç de masses:

Because $m_V < m_N + m_\tau$, $V \rightarrow N + \tau$ cannot occur by (1).⁷³

De nou, doncs, apareix la idea de producció en parelles de les noves partícules, i aquest tipus de producció sorgeix de manera natural en considerar un tractament en teoria quàntica de camps dels nous elements. En paraules de Nambu, Nishijima i Yamaguchi:

[...] in general, we may say that the elementary particle theories are liable to predict pairwise production which remains to be confirmed by experiment, while the structural theories tend to suffer from high probabilities of radiative decay.

La hipòtesi de la producció associada no pren més força precisament per aquesta manca de confirmació experimental, ans el contrari:

But the pairwise production which they predict does not seem to be favored by experiments, if not yet rejected.

En aquest moment, la conclusió és pensar que múltiples opcions d'explicació encara són factibles, i per tant:

It will be premature and useless to demand anything more definite from what we know at present about the V particles.⁷⁴

Malgrat, però, aquesta manca de confirmació experimental, la hipòtesi de la producció associada tot just acaba de formular-se. Serà Abraham Pais qui la formalitzarà, n'explotarà el seu poder predictiu i, d'aquesta manera, aconseguirà un paper privilegiat d'entre la resta d'hipòtesis que també s'han apuntat ja en aquest *Symposium on elementary particles at Tokyo* (7 de juliol de 1951). Quan Pais pensi per primer cop en la producció associada manifestarà la influència del treball fet pels grups japonesos.

No obstant això, la resta d'hipòtesis possibles per explicar els nous elements es mantindran també, amb més o menys força, en el panorama teòric. La seva evolució i rebuig posterior marcarà el camí més fenomenològic, basat en regles de selecció que satisfacin les condicions experimentals dels nous elements i que iniciaran el camí cap a la modelització a través de la simetria d'isospín.⁷⁵

2.2.4 Formalització de la *even-odd rule*: poder sintètic i divulgatiu d'Abraham Pais. I.

Abraham Pais, holandès de naixement i de formació universitària, es doctora el 1941, quan el país acaba de ser ocupat pels alemanys. Durant l'ocupació, Pais treballava i “lived in hiding [...], in my room in an attic in Amsterdam.”⁷⁶ Poc després d'alliberada Holanda

⁷³Ôneda (1951), 634.

⁷⁴Nambu, Nishijima, Yamaguchi (1951b), 620–1.

⁷⁵L'evolució posterior de les hipòtesis primitives de les isòbares o la partícula pare les tractem en la sec. 2.2.5, p. 95.

⁷⁶Pais (1986), 448.

(maig de 1945), aconseguí una beca per anar a Copenhaguen i Princeton. Al *Bohr's Institute* treballa amb el mateix Niels Bohr, i també amb Christian Møller, amb aquest últim en el problema d'una teoria que produís l'espectre de partícules elementals.

Pel setembre de 1946, Pais arriba als EUA. En la primera setmana a Nova York, el seu compatriota i antic professor Hendrik Kramers li fa conèixer Robert Oppenheimer qui, a principis de 1947, esdevindrà director de l'*Institute for Advanced Study* de Princeton. Com ell mateix diu, "I have written elsewhere about my meetings with Oppenheimer during the next few months which led to my long-term association with the Institute for Advanced Study in Princeton."⁷⁷ Així, Pais entrarà amb bon peu a la comunitat física americana.

A partir de 1951, l'evidència de les peculiars propietats de les noves partícules, els seus treballs previs en el camp de la teoria mesònica i en l'espectre de les partícules elementals, i el coneixement d'algunes d'aquestes hipòtesis que, d'altra banda, no l'acaben de convèncer, el porten a dissenyar el seu model:

Some time early in 1951 it was suggested that a steep potential barrier between nucleon and pion might suppress Λ -decay, a low energy process, without inhibiting Λ -production, a high(er) energy process, as would be the case if the Λ had a spin of, say, $13/2$. I did not much care for that idea. As indicated earlier I had the vague notion that the Λ should be related to the nucleon as the muon is to the electron. If so, one should seek a solution in which 'the heavy fermion [Λ] is as elementary as the nucleon'. Thus I began to look for a model in which 'the emphasis will be... on the role of selection rules', rules which had to be of a new kind.

Being familiar with the difficulties of pion physics, I knew that perturbation theory would be of no use.⁷⁸

Les seves idees, però, no es presenten com un sistema acabat des de la primera formulació del 1951. En un primer moment, el seu "model de producció en parelles" presenta unes diferències clares amb el resultat final com serà coneguda la seva "teoria de la producció associada".

Un punt d'inflexió clar en aquesta evolució serà el tret característic que marcarà la modelització teòrica de les noves partícules, tret que conduirà cap a la via correcta i que genèricament usarem també com a línia divisòria entre etapes de formulació teòrica en el treball: la inclusió del spin isotòpic. Pais, doncs, començarà amb un model de producció en parelles que més endavant reformarà per tal d'incloure l'isospín dels nous elements.

Centrant-nos en la primera etapa, sense isospín, aquesta es presenta com una formulació molt intuïtiva. La idea original sembla concebuda independentment dels treballs dels japonesos:

I lectured on my ideas in the autumn of 1951 at the Institute for Advanced Study, and again at the second Rochester conference.

⁷⁷Ibíd., 447.

⁷⁸Ibíd., 518.

Later I learned that several Japanese colleagues had been considering a series of options which included the idea of a strong interaction selection rule.⁷⁹

Però la concreció de les seves primeres concepcions guarda un cert aire del treball d'aquests japonesos: per la confiança posada en les regles de selecció, el detallisme a l'hora d'explicitar la teoria que presenta, i sobretot, per la quantitat de treball que aquests grups havien fet i que ja no calia repetir:

The present work also contains many elements that already appear in an extensive survey of V -particle models and that have recently been published in the *Progress of Theoretical Physics*; especially, some of the interactions originally considered by Nambu and co-workers and by Ôneda also occur here.⁸⁰

No obstant això, al mateix temps ja s'observa una evolució teòrica respecte el tractament fet per aquests grups. Pais aconsegueix abstrure's cap a una modelització que obvii els detalls de la teoria de camps i que posi èmfasi en el caràcter selectiu de les lleis de conservació conegudes: conservació d'energia, moment, moment angular i paritat, a més d'algunes consideracions addicionals molt establertes com a principis, com és el cas de la invariància gauge.

El triomf final del seu model sobre els anteriors ve donat per la concreció en una simple regla de selecció, la *even-odd rule*, a partir de la qual surt automàticament la producció en parelles. Quan Pais presenta aquesta regla i el gruix de la seva teoria al 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), és Oppenheimer qui demana atenció cap al nou model.

Oppenheimer, que presideix la sessió dedicada als nous esdeveniments, comença introduint les possibilitats conegudes i descartant-les una per una. Segons la seva opinió, “So it seems better to pursue the more likely alternative of the heavy brother hypothesis which Pais will now proceed to do.”⁸¹ L'expectativa així aixecada i la presència en la sessió de múltiples representants experimentals, que acaben de presentar les seves dades, junt com hem dit, amb el poder sintètic del seu model, farà que la teoria de Pais avantatgi altres opcions. Un dels seus trets la farà també clarament atractiva: serà una teoria contrastable. Els experimentals, independentment o no de la comprensió del model teòric involucrat, el podran intentar confirmar o desmentir. És així com el seu treball tindrà, també, el poder de mobilitzar els físics experimentals i apressar-los a recolzar o rebutjar la proposta. Però malgrat el possible entusiasme inicial aquesta detecció no serà una tasca fàcil.

⁷⁹Ibíd.

⁸⁰Pais (1952b), 664.

⁸¹Oppenheimer (1952b), 87. La hipòtesi del “heavy brother” o “heavy mate” consisteix en pensar que en els processos de producció les noves partícules sempre anirien acompanyades per una segona partícula nova que no deixaria que hi hagués prou energia perquè la primera es desintegrés ràpidament pel procés invers corresponent. Aquesta hipòtesi està molt relacionada amb la introducció de la producció en parelles com a regla de selecció per entendre la producció abundant i la desintegració lenta i en aquest sentit ha estat tractada a la sec. 2.2.3.

La contribució de Pais al 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952) és presentada sota el títol “*An Ordering Principle for a Megalomorphian Zoology*”, del qual ell no n'és responsable.⁸²

De fet, aquest títol, que denota una certa confusió general sobre els nous elements, d'altra banda força normal vista la complexitat experimental del moment, contrasta amb la presentació de famílies de partícules molt ben definides, que tot seguit presenta Pais.

La idea genèrica és establir un criteri que dissociï la producció d'aquestes partícules pesades de la seva desintegració i, per això, assigna a les partícules conegudes fins al moment el que ell anomena un “nombre de massa”.⁸³ El nombre de massa representarà simplement el subíndex 0, 1, 2 que acompanyarà al símbol N corresponent als nucleons i al símbol π corresponent als pions. Així, els estats menys massius seran les “velles” partícules i els correspondrà el subíndex menor: protó i neutró (N_0) i els mesons π ($\pi_0 = \pi^+$, π^0 , π^-). Els següents estats de massa inclouran les V més pesades que els nucleons (N_1) i els mesons pesats (π_1). La classificació proposada no és gratuïta. Permet lligar “velles” i “noves” partícules segons diferents estats de massa. També permet distingir-ne dues classes diferenciades segons siguin bosons (pions i mesons pesats) o fermions (nucleons i V més massives que els nucleons). I finalment permet etiquetar les partícules convenientment per a proposar la seva regla de selecció, i així lligar la massa amb la possibilitat o no d'ocurrència d'unes reaccions determinades.

El caràcter més fenomenològic d'aquesta regla de selecció es mostra immediatament, quan expressa que: “We begin by introducing the Yukawa interaction [...]”, però segueix, “but avoid all details specifying the coupling.” A partir d'aquesta interacció elemental de Yukawa, que es pot escriure seguint la nomenclatura de la taula com $N_0 N_0 \pi_0$, Pais suggereix la forma genèrica de les interaccions a considerar com $N_i N_j \pi_k$; amb i, j, k els nombres de massa que prenen el valor 0 o 1 segons la classificació proposada. I tot seguit, “A selection rule is now introduced which does not follow from present theories, but which is not in contradiction with known facts.”⁸⁴ La regla de selecció ens diu que una interacció sols pot

⁸²Segons el propi Pais (1986, 518) explica:

I am not responsible for the term ‘megalomorphs’ in the title of that talk. That was an invention of Oppenheimer, made because ‘Fermi had become bored with the name “elementary particles”.’

Marshak (1989, 654) afegeix a la preocupació de Fermi que:

Throughout Rochester II, the new particles were referred to as “megalomorphs” because they had so much structure [...].

Un dels problemes associats als descobriments de noves partícules serà l'acceptació de la seva elementarietat o la definició de quines són les partícules elementals i quina és l'estructura interna d'aquelles que suposadament no ho són. Aquest debat paral·lel serà un continu en la història de la física de partícules que estarà lligat amb la possibilitat d'una descripció en teoria quàntica de camps dels nous elements, sense sentit si no es tracta de partícules elementals. El model de quarks i gluons i la descripció de la cromodinàmica quàntica es pot considerar com el final d'aquesta polèmica pel que fa a les interaccions fortes.

⁸³Vegeu apèndix A, fig. A.34.

⁸⁴Pais (1952a), 87. Aquest nombre de massa modelitza un sistema de famílies que impacta per la

ésser forta si:

$$N_i N_j \pi_k \quad i + j + k \equiv \text{even}$$

Llei que, lògicament, compleix la interacció de Yukawa ja explicitada $-N_0 N_0 \pi_0$ que dóna validesa a l'argument. Però s'infereix, també, que l'han de verificar les combinacions de partícules interaccionants $N_1 N_1 \pi_0$ i $N_1 N_0 \pi_1$. Fixem-nos que ambdues combinacions suposen que les noves partícules es produeixen per parelles $-(N_1, N_1)$ o (N_1, π_1) i, com ens diu la premissa, ho fan fortament.

D'altra banda, ha d'existir una llei paral·lela per al mecanisme de desintegració, perquè en cas contrari la llei anterior ens asseguraria l'estabilitat de les noves partícules. Per exemple, $N_1 \rightarrow N_0 + \pi_0$ no es podria donar mai perquè no conserva el valor parell per a la suma dels índexos. Però com coneixem experimentalment que les noves partícules no són estables sinó que acaben desintegrant-se, i ho fan feblement pel temps de vida que presenten, cal definir com anirà aquest mecanisme de desintegració. La definició de Pais és:

$$N_i N_j \pi_k \quad i + j + k \equiv \text{odd}$$

que inclou les possibilitats següents: $N_1 N_0 \pi_0$, $N_0 N_0 \pi_1$ i $N_1 N_1 \pi_1$. El primer cas correspondria a la desintegració coneguda de la V_1^0 en $p + \pi^-$, que experimentalment se sap que es tracta d'una desintegració feble. Per tant, s'assumeix que la resta de reaccions que verifiquin aquesta regla de selecció seran febles.⁸⁵

Aquesta és l'essència del que tothom coneixerà com *even-odd rule* de Pais, o la primera concreció de la idea de la producció associada. Es tracta d'una idea atractiva pel que

presciència que sembla tenir Pais en formular-lo. D'altra banda, aquesta idea de classificació en famílies no se li ocorre, a Pais, com el resultat del descobriment de les noves partícules, sinó que recupera una vella idea treballada a Copenhagen uns anys abans, junt a Møller, sobre una teoria que produïa un espectre de partícules elementals. Segons el propi Pais (1986, 449–50):

We considered a de Sitter world, a five-dimensional spherical shell with finite thickness and with periodic boundary conditions in the fifth direction. All known particles were ground states of a spectral series (called towers these days). One such ground state was the proton-neutron for which Møller had invented (1941) the collective name "nucleon"; likewise for the meson and the electron-neutrino. The latter and their higher mass states needed also a collective name, we thought, for which we proposed "lepton".

Més endavant, el 1947, amb la diferenciació del π i el μ de raigs còsmics, Pais (1986, 511) torna a pensar en aquesta idea de famílies:

In late September 1947, on the way home by slow freighter, there was ample time to reflect on Powell's report about π -mesons and μ -mesons which I had just heard in Copenhagen. Was the muon telling us that there was a lepton spectrum, that the electron is some sort of ground state, that mass is quantized, as Møller and I had speculated the year before? Perhaps. The pursuit of these preconceived but not necessarily relevant notions raised the question, however, why there was no sign of mass states built on the pion or on the nucleon as respective ground states, as our little model had suggested.

La resposta a aquesta qüestió la troba Pais en les noves partícules i l'esquema que presenta al 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952) és el fruit d'aquestes primitives idees.

⁸⁵El primer cas també representaria la desintegració $V_1^0 \rightarrow n + \pi^0 (\rightarrow n + 2\gamma)$ i altres possibilitats, com el cas de V carregades, més pesades que el nucleó, que de moment no han estat observades experimentalment. La regla de selecció, però, no justifica la desintegració feble dels mesons pesats en pions ni en muons o electrons i les observacions experimentals d'aquestes desintegracions s'han d'explicar fora del model.

acabem de mencionar, però també perquè presenta lligams amb les velles idees:

[...] this theory is on the one hand an extension of the old rule that the number of nucleons is conserved and on the other hand a generalization of where you would expect to find weak couplings other than in β decay.⁸⁶

Abans d'acabar-se aquest mateix mes de gener en què té lloc el congrés, Pais reescriu la contribució i l'envia per publicar al *Physical Review*. En aquest article explicita encara més les restriccions a les reaccions esperables després del seu model. També, explicita clarament la divisió en famílies de les partícules elementals conegudes, posant èmfasi en dues de les seves característiques: spin i massa. Pel que fa al spin, Pais sembla no tenir cap dubte que treballa amb dos grups diferenciats de partícules. D'una banda, un grup de fermions, els representants menys massius dels quals són els nucleons, però, amb uns nous fermions més pesats que aquests nucleons, com són les $V \rightarrow N + \pi$. I de l'altra, un grup de bosons, que comprèn els pions coneguts com mediadors de la interacció nuclear, més uns nous mesons encara més pesats que aquests pions, com són els τ , κ , etc. Per tant, a partir del model de Pais les partícules queden classificades per dues característiques fonamentals: el spin i la massa. La combinació d'ambdues característiques permet entendre una primera distinció del que més endavant s'anomenaran barions i mesons —per Pais fermions amb nombre de massa 0 o 1 i bosons amb nombre de massa 0 o 1. Però també tindrem una primera intuïció del que més endavant distingirem com partícules ordinàries —per Pais fermions amb nombre de massa 0 (nucleons) i bosons amb nombre de massa 1 (pions)— i partícules estranyes —per Pais fermions amb nombre de massa 1 ($V \rightarrow N + \pi$) i bosons amb nombre de massa 1 (τ , κ , ...).

En acabat, l'article intenta donar la imatge d'un model provisional i accentua que l'avenç, en aquest moment, es troba en mans dels experimentals que tenen la tasca difícil de confirmar o refutar la hipòtesi de la producció associada, a més d'augmentar el nombre de nous descobriments que, de ben segur, revelaran el caràcter provisional de la seva classificació:

The search for ordering principles at this moment may indeed ultimately have to be likened to a chemist's attempt to build up the periodic system if he were given only a dozen odd elements. The author would, therefore, like to stress that this work should be considered as representing a general point of view according to which one may attempt

⁸⁶Ibíd., 90. Pais fa referència en aquesta cita a la conservació del nombre de nucleons i la generalitza perquè inclogui també les noves partícules V més pesades que el nucleó. Encara que no explícitament, s'està formulant la conservació del nombre bariònic, conservació que fins la resolució definitiva del model d'estranyesa no quedarà plenament establerta per a les velles i noves partícules. Malgrat es tracta d'una llei difícil de veure's explicitada en la literatura, sembla ésser present i assumida per la majoria dels físics. Com Pais (1952b, 664) diu: la conservació del nombre de nucleons és "itself an *ad hoc* assumption needed for guaranteeing sufficient stability of matter". En el mateix paràgraf, Pais ens dóna la important indicació que la generalització d'aquesta llei per incloure les noves partícules és apuntada per Oppenheimer al 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952).

to codify the present information, rather than as an inflexible proposal for a particular set of interactions.⁸⁷

Tal i com Pais prediu, el seu model, que certament sembla avançat al moment en què es presenta per la introducció de famílies de partícules, resultarà incomplet. A més, la producció en parelles trigarà encara força temps a acceptar-se definitivament per les dificultats experimentals que comportarà la seva visualització. I, finalment, caldrà reservar un paper important en la classificació dels nous elements al seu spin isotòpic que, a partir del 1952,⁸⁸ prendrà una rellevància tal que qualsevol intent, en la direcció que es proposa Pais, haurà de passar forçosament per tenir en compte aquesta simetria.

2.2.5 Altres hipòtesis alternatives davant les propietats irreconciliables

Ja ens ha vagat de parlar de la influència d'Oppenheimer sobre el model de Pais. Quan Oppenheimer vol cridar-ne l'atenció a l'audiència en el 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), comença introduint les hipòtesis teòriques que s'han plantejat fins el moment per explicar les noves partícules:

Three alternative explanations have been proposed which may be schematized as (1) the live parent, (2) the heavy brother, and (3) selection rules. The first turned out to be the correct explanation of the μ -meson. This was the conjecture of Marshak and Bethe that there was a step after production in which the strongly interacting particle could turn into something else that did not interact strongly with nuclear matter. This explanation does not, however, work out well for the V -particles. [...] The second explanation assumes that a heavy mate is associated in the production of any of these unstable particles, and there is therefore not enough energy to return through this state to the unstable nucleon system. The formal classification of this scheme is left to Pais. It is true that there is little experimental evidence for the production of pairs of these particles, but the detection efficiency is not great. [...] The third alternative of selection rules was discussed very thoroughly in Tokyo last summer.⁸⁹

Quan Pais tot seguit exposa la *even-odd rule* estarà plantejant de manera natural una formulació comuna entre la segona i la tercera hipòtesis alternatives que cita Oppenheimer. Segons Oppenheimer, una segona hipòtesi correspon al *heavy mate*, la presència del qual en els processos de producció inhibiria energèticament la desintegració ràpida pel procés invers. D'altra banda, una tercera hipòtesi englobaria les regles de selecció que permetrien i inhibirien certs processos. Amb Pais, la regla de selecció seria precisament la *even-odd rule*, que experimentalment es concreta en la producció en parelles dels nous elements, és a dir, amb la presència sempre exigida d'un *heavy mate* en els processos de producció.

Oppenheimer també apunta com la via de les regles de selecció ha estat discutida curosament a Tokyo. En aquest grup, Oppenheimer contempla també els primers intents

⁸⁷Pais (1952b), 672.

⁸⁸Amb els experiments del grup de Chicago amb Fermi al capdavant, veurem com isospín es revela com un bon nombre quàntic per caracteritzar les interaccions fortes (v. cap. 4, sec. 4.1, p. 164).

⁸⁹Oppenheimer (1952b), 85–6.

d'entendre el mesó τ a través de les *mixed meson theories* o la proposta de les isòbares nucleòniques que sorgeix també en el marc de la teoria quàntica de camps de les interaccions mesòniques.⁹⁰ Però ja a Tokyo es comença a fer evident la transició cap a models més fenomenològics que obviïn els detalls de la dinàmica de la interacció a través d'una descripció en teoria quàntica de camps i se centrin en lleis més manejables i fàcilment contrastables experimentalment.

EL “LIVE PARENT”

La hipòtesi del “live parent” o de la partícula mare és el resultat d'una analogia simple amb el cas també recent de la distinció π - μ . Des del principi, el caràcter mesònic dels primers descobriments anomenats τ fa que es vegi en ells una relació estreta amb les teories mesòniques del moment i que s'arribi a considerar com un mesó més, diferenciat del π únicament per la massa.

Tot i que les estadístiques que assenten les propietats dels nous elements i els imprimeixen el caràcter d'irreconciliables no apareixen fins a mitjan del 1950, ja des d'un primer moment, el comportament que mostren amb la matèria que travessen, presenta trets diferencials. Les noves partícules es produeixen en interaccions nuclears, anàlogament a com semblen crear-se els mesons de raigs còsmics. Un cop creades, però, semblen mostrar una interacció més aviat feble amb la matèria de les cambres i emulsions on es detecten les seves traces. També els mesotrons de raigs còsmics havien mostrat de bon principi aquesta capacitat de travessar matèria sense interaccionar, per la qual cosa s'havien definit com la component penetrant de la radiació còsmica. En el cas d'aquests mesotrons, entendre'ls com mediadors de la interacció nuclear, alhora que feblement interaccionants amb aquesta matèria nuclear, va passar per distingir l'existència de dues partícules diferents: el pió, mitjaner de la interacció nuclear, i per tant fortament interaccionant, era el pare del muó, feblement interaccionant i capaç de mostrar llargues traces en els detectors visuals.

En analogia, doncs, els nous mesons pesats, que també mostren llargues traces en l'interior de cambres i emulsions, cosa que fa pensar en la seva poca interacció amb la matèria circundant a més de definir-los una llarga vida, es poden entendre com els fills d'una partícula pare, no detectada experimentalment, que seria la que es produiria abundantment en les interaccions nuclears fortes, igual com el pió. La denominació de partícula pare, referida al pió, tindrà sentit a partir de la detecció experimental de la cadena de desintegració $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$. De moment, però, l'assignació d'una partícula pare als mesons pesats no és més que una hipòtesi teòrica per a la qual no s'ha visualitzat encara la traça d'aquesta progenitora.

Els grups japonesos presents al *Symposium on elementary particles at Tokyo* (7 de juliol

⁹⁰Recordeu aquest capítol, sec. 2.1.3, p. 68.

de 1951) plantegen i refusen aquesta opció “full of arbitrariness”.⁹¹ La referència més directa que s’hi pot trobar és:

Assume some unknown parents which, directly produced in nuclear events, decay instantly into the observed V 's (analogy of π and μ mesons).⁹²

Encara que, també allà, es presenten les primeres crítiques, fonamentades en la manca d’evidència experimental:

The introduction of a short-lived parent V 's as in the above second model, seems to be an unnecessary complication unless some definite evidence on the existence of such particle is presented.⁹³

El model, però, es fa insostenible internament, independentment de l’evidència experimental, com així ho mostra Oppenheimer, després de plantejar-lo com a opció:

Let the hypothetical parent of the K , τ , V , or v particle be called x and be strongly coupled to nucleons. If the decay of x into the lighter particles were extremely rapid, these particles could recreate x virtually, and since it is strongly coupled through nucleons to still lighter particles, it would decay preferentially to these, and the heavy V particles would not in fact be produced. If, on the other hand, the decay of x into the V particles were very slow, then x itself through its interaction with nucleons could again decay into still lighter particles than the V 's. That is, since n must go to x in something of the order of 10^{-23} seconds, x must go to V with a lifetime capable of competing with this as otherwise x would return to n [...]. The argument does not invalidate the $\pi \rightarrow \mu$ case, because here it is impossible for the reverse reaction to occur simply on energetic grounds.⁹⁴

La idea és que les x es troben fortament acoblades als nucleons a través d’interaccions com: $N+N \rightarrow x+N$, i posteriorment es desintegren produint V : $x \rightarrow V$. Aquesta desintegració de x ha de ser via una interacció forta, perquè si no x es desintegraria abans ràpidament en nucleons a través de la primera interacció: $x \rightarrow N+N+\bar{N} \rightarrow N+\pi$ (o γ). Però si aquesta desintegració de x en V és realment via interacció forta, aleshores V es desintegraria ràpidament en x i x faria el mateix en nucleons. Per tant, V s’acabaria desintegrant ràpidament a través d’aquesta dos passos: $V \rightarrow x + \dots \rightarrow N+\pi$ (o γ), cosa que experimentalment no és certa, perquè precisament la desintegració de V és lenta.

Malgrat la idea sembla així descartada, trobarem algunes combinacions posteriors de la mateixa, amb altres trets característics de la nova teoria. Per exemple, a principis de 1953, Nishijima l’explotarà per tal d’explicar la manca de suport experimental de la producció en parelles.⁹⁵

⁹¹Aizu, Kinoshita (1951), 630.

⁹²Nambú, Nishijima, Yamaguchi (1951b), 620.

⁹³Ibíd.

⁹⁴Oppenheimer (1952b), 86.

⁹⁵Vegeu cap. 4, sec. 4.3.1, p. 177.

LES ISÒBARES NUCLEÒNIQUES

La idea de les isòbares nucleòniques és la concreció primitiva del conjunt de proposicions, que ja a l'època, es coneixen amb el nom d'hipòtesis estructurals. La característica general que distingeix aquestes hipòtesis de la resta és el fet de suposar que les noves partícules no són elementals, sinó que es formen en compostos a partir de les “velles partícules”.

La introducció de les isòbares per explicar els nous esdeveniments data de les primeres especulacions amb la $V^0 \rightarrow N + \pi$. El fet de venir recolzada per una “teoria de mesons ortodoxa”⁹⁶ farà que la hipòtesi sigui seriosament discutida, i que es vegi com un pont possible, entre la teoria ja coneguda i les noves observacions experimentals. És més, com Marshak fa notar, aquesta hipòtesi surt espontàniament en la formulació de la teoria mesònica que considera el pió pseudoescalar, cas que experimentalment sembla el més favorable per al pió:

Here, one meets with what at first appears to be a pleasant surprise in that the scalar strong coupling theory does not predict the existence of metastable isobaric states, whereas the pseudoescalar strong coupling theory does and it is known that the π meson is a pseudoescalar particle.

Però des del principi també, l'aplicació d'aquesta teoria presenta un problema difícil d'obviar, el temps de vida que aquest model prediu per a les noves partícules correspon al típic d'un procés d'interacció forta, lògic d'altra banda si es pretén que sigui la teoria que expliqui la producció de pions a partir de nucleons:

This at first sight satisfactory result for the pseudoescalar theory is quickly vitiated by the fact that the same theory predicts an extremely short lifetime for the metaestable state, a lifetime 10^{13} times shorter than the observed lifetime.⁹⁷

Arran d'una discussió entre W. Fowler, E. Fermi i R. Feynman, s'intentarà concretar la manera d'arranjar aquest problema de la curta vida predita per a les V fetes de nucleons i pions. El 7 de juny de 1951, Feynman afegeix una nota a la transcripció de les xerrades que estava donant a Caltech sobre física d'altres energies on presenta que, després d'una conversa amb Fowler i Fermi:

It is possible that a potential barrier of some kind prevents the decay by requiring penetration (Fowler) [...] The barrier could be centrifugal (Fermi) in which case the angular momentum of the V is 5 or 6.⁹⁸

La proposta concreta pretén suposar que la $V^0 \rightarrow N + \pi$ és un compost virtual de pió i nucleó amb un alt moment angular que crea una barrera centrífuga.

En el procés de producció, un pió suficientment energètic pot sobrepassar la barrera centrífuga, radiar energia, i establir-se en l'estat virtual de llarga vida que és la V^0 . Al mateix temps, però, la barrera centrífuga creada per l'alt moment angular retardarà la

⁹⁶Vegeu aquest capítol, sec. 2.1.3, p. 68.

⁹⁷Marshak (1952), 359. Malgrat però les dificultats, les hipòtesis estructurals tenen l'avantatge de no haver de suposar l'existència de noves partícules. Per aquells rebecs a acceptar el nombre creixent de partícules elementals, aquesta via els semblarà la més atractiva. Quan el 1949, Fermi i Yang presenten el seu article: “*Are Mesons Elementary Particles?*”, article de reflexió sobre si totes les partícules són realment elementals, estan afavorint indirectament aquestes hipòtesis estructurals i, per tant, la idea d'isòbara nucleònica.

⁹⁸Feynman (1951), 76.

dissociació de V^0 en $N + \pi$ un temps suficientment llarg com per explicar la llarga vida de l'estructura formada.⁹⁹

Els grups japonesos que intervenen al *Symposium on elementary particles at Tokyo* (7 de juliol de 1951) hem vist com mostren el coneixement d'aquestes propostes occidentals i les inclouen en les seves reflexions amb més o menys acceptació. La idea de barrera de potencial ajudarà a mantenir viva durant més temps la hipòtesi de les isòbares nucleòniques. Però aquesta hipòtesi presenta altres limitacions, algunes ja explicitades a Tokyo. Primer, en el marc de la teoria que prediu aquestes isòbares nucleòniques, es prediu també l'existència d'altres partícules amb càrrega múltiple de la fonamental, i com diu Marshak:

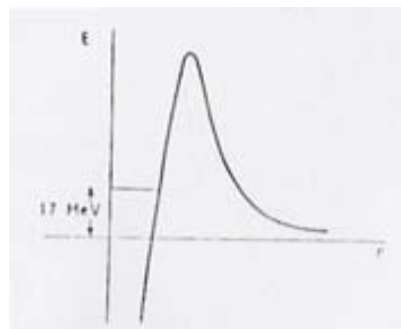


Figura 2.2: Model d'alt moment angular per a $V^0 \rightarrow N + \pi$

Thus far, no experimental evidence exists for doubly or negatively charged isobaric states although, according to strong coupling theory, they should not be rarer than neutral isobaric nucleons.¹⁰⁰

D'afegit, hi ha present el problema de la possible desintegració electromagnètica:

[...] it is not clear why the V^0 particle, identified as a neutral isobaric nucleon, does not decay by γ emission to the ground state, *i. e.*, the ordinary neutron, in an extremely short time."¹⁰¹

La primera de les limitacions —la multiplicitat de càrrega— anirà agreujant la desconfiança en el model, a mesura que les observacions experimentals no revelin la presència en la natura d'aquests estats amb càrrega major que la unitat. La segona —el paper de l'electromagnetisme— serà crucial per portar a pensar en la necessitat d'alguna regla de

⁹⁹Més endavant, amb la revalorització del paper d'isospín per descriure les partícules, la idea de barrera energètica s'amplia considerant aquest nombre quàntic en lloc del de spin. Nishijima (1953, 421), per exemple, proposarà aquesta possibilitat:

If V^0 is an elementary particle having a large isotopic spin, then the decay

$$V^0 \rightarrow p + \pi^-$$

becomes highly forbidden, since the system $p + \pi^-$ can assume only two values $I = 1/2$ and $3/2$, which are very low compared to that of V^0 .

En el cas d'isospín l'objecció al model és la mateixa que per al cas de spin, la predicció d'estats de càrrega múltiple que s'haurien d'observar en l'experiència.

¹⁰⁰Per situar-nos, en el moment de la cita de Marshak, 1952, es coneix clarament una V^0 que es desintegra en $p + \pi^-$ i comença a haver-hi indicis de la partícula cascada (actual Ξ^-) que es desintegra en la V^0 anterior més un π^- . Aquests serien els candidats a isòbares coneguts fins al moment, mai amb càrrega superior a la fonamental.

¹⁰¹Marshak (1952), 361.

selecció addicional, que inhibeixi la desintegració electromagnètica. I pel camí d'aquestes regles inhibidores s'arribarà a la via d'explicació correcta, quan se centri la regla de selecció en la conservació o no del nombre quàntic d'isospín.

LES “SELECTION RULES”

Genèricament, les regles de selecció es mostren molt útils des del principi com a sedàs per eliminar a *grosso modo* algunes possibilitats de desintegració de les noves partícules. En principi, aquestes regles de selecció es troben associades a lleis de conservació acceptades de forma universal, tal com la conservació de l'energia, el moment angular... Un simple balanç energètic —o la regla de selecció lligada a la conservació d'energia-moment— eliminarà per exemple, la possibilitat de connectar el mesó pesat τ amb la V nucleònica via la interacció $V \rightarrow N + \tau$. La regla de selecció associada a la conservació del moment angular total de les reaccions eliminarà les possibilitats $\tau^0 \rightarrow \pi^0 + \gamma$ o $\tau^0 \rightarrow e^+ + e^-$. De forma més indirecta trobem, per exemple, la distinció que Oppenheimer realitza al 2n congrés Rochester amb la hipòtesi del *heavy mate*. Aquesta hipòtesi es pot entendre com una regla de selecció on la conservació de l'energia n'és el paràmetre.

Però aquestes regles de selecció, diem-ne tradicionals, es mostren infructuoses per explicar totes les evidències experimentals, o la manca d'elles. Les regles de selecció han d'explicar la desintegració sorprenentment lenta de les noves partícules, en front de la seva producció abundant, i això no es pot fer únicament aplicant conservació d'energia, moment, moment angular, conjugació de càrrega, etc.

Les sorprenents propietats dels nous elements necessiten d'unes regles de selecció també noves. Aquest és el poder que presenta inicialment la formulació de la *even-odd rule* de Pais que, com hem vist, dóna una primera explicació d'aquestes propietats, amb la seva regla de selecció basada en la introducció del nou nombre de massa per a les diferents partícules. Però en el marc del model de Pais, a través de la nova regla de selecció, tampoc es podran justificar tots els esdeveniments experimentals. Caldrà adoptar una estratègia de treball diferent. Aquesta estratègia la proporcionarà la revalorització del spin isotòpic. La demostració que isospín és un bon nombre quàntic per descriure les interaccions fortes, que es produeix amb els experiments del grup de Fermi a Chicago el 1952, causarà un gran impacte en el panorama de la física de les partícules elementals, noves i velles. A partir d'aquest moment es pensarà a assignar isospín a les noves partícules i, consegüentment, la formulació de noves regles de selecció prendran isospín com el nombre quàntic clau, a conservar o no per a les reaccions que involucren els nous elements.

PART II

1950–1953: TAXONOMIA DEL ZOO DE
PARTÍCULES

Capítol 3

La proliferació i sistematització experimental

La segona etapa comença amb el malestar a Manchester per la manca de confirmació dels seus resultats i els intents per millorar les condicions de detecció. La primera de les millores que donarà fruits serà la pujada al Pic-du-Midi. Entre juliol del 1950 i gener del 1951 la cambra mostrarà 43 exemples més de traces forçades, per a les quals Manchester assajarà una primera sistematització de les V^0 ($V_1^0 \rightarrow p+\pi^-$ i $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$) i iniciarà un estudi de la cinemàtica dels esdeveniments, a partir dels paràmetres α , Q i p_t , per tal de determinar-ne la massa i els productes de desintegració. A mesura que el nombre de nous exemples creixi, el desconeixement de l'esdeveniment particular s'intentarà pal·liar amb anàlisis estadístiques que els classifiquin en diferent grups, com els proposats V_1^0 ($Q=46\pm 6$ MeV) i V_2^0 ($Q=122\pm 13$ MeV) de Manchester.

La classificació de Manchester no serà unànimement acceptada. Des de Caltech, es contraatacarà argumentant una dispersió dels valors de Q per a les desintegracions V_1^0 . A principis de 1952, l'anàlisi de 100 V^0 de Caltech els porta a distingir tres casos: $V^0 \rightarrow p+\pi^- + (35\pm 3)$ MeV, $V^0 \rightarrow p+\pi^- + (75\pm 5)$ MeV i $V^0 \rightarrow X^\pm + \pi^\mp + (\approx 60)$ MeV, sense descartar desintegracions a tres secundàries.

Per a la resolució de la polèmica serà definitiu el treball de R. W. Thompson des d'Indiana, que aportarà nous resultats i introduirà les "superfícies Q " per classificar-los. En el congrés de Bagnères (6-12 de juliol de 1953) es concreta una classificació de les V^0 en dos modes ben determinats ($V_1^0 \rightarrow p+\pi^- + 37$ MeV i $V_4^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 214$ MeV), que a partir del congrés es rebatejaran com hiperó Λ i mesó pesat θ . Entre mig dels dos es mantindran els casos anòmals presents en molts laboratoris, associats probablement a desintegracions a tres cossos.

La determinació de les V^\pm resultarà encara més difícil. Al final de l'etapa únicament es distingirà la partícula cascada ($V^- \rightarrow V_1^0 + \pi^-$), amb clar caràcter hiperònic, de la resta d'esdeveniments menys massius, que començaran a identificar-se amb els mesons pesats i les partícules S d'emulsions i multilàmines.

El treball en emulsions també veu una proliferació, especialment de mesons pesats. La desintegració $\tau^\pm \rightarrow 3\pi$, identificada a Bristol el 1949, resultarà la més ben coneguda per la visualització de les tres traces secundàries. També a Bristol es definiran les desintegracions $\kappa \rightarrow \mu + \nu + \pi^0$ i $\chi^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$, tot i que la polèmica s'allargarà més enllà d'aquesta etapa.

A principis de 1952 entrarà en joc la cambra multilàmines com a detector, que intentarà combinar els avantatges de la cambra de boira amb el major poder de parada de les emulsions. Des del MIT es definiran les "partícules S ", de l'anglès *Stopped Particles*, per la propietat que presentaven de parar-se a l'interior de la multilàmines. Les secundàries d'aquestes S seran pions i muons, i s'identificaran amb els modes κ i χ de Bristol. Però les seves energies també seran compatibles amb les V^\pm trobades en cambres convencionals, cosa que portarà a la identificació dels tres fenòmens: mesons pesats d'emulsions, partícules S de multilàmines i V^\pm de cambres convencionals. A partir de Bagnères, aquesta simplificació es concretarà en la nomenclatura de mesons K per designar-los conjuntament, tot i que una identificació de cada cas particular haurà d'esperar a la tercera etapa experimental, amb les millores dels muntatges en cambra i de les emulsions i, finalment, de l'estadística definitiva dels acceleradors.

La segona etapa experimental es clou amb la necessària taxonomia del zoo de partícules que presenta el congrés de Bagnères (6-12 de juliol de 1953) davant la proliferació de material experimental: els mesons K descriuran genèricament les observacions de mesons pesats (partícules amb massa intermèdia entre la del pió i la del protó), amb massa inferior als mesons K es definiran els mesons L (π , μ i altres possibilitats), i amb massa superior al protó hi haurà les partícules H . Entre aquestes partícules H , que es coneixeran més com hiperons, hi haurà la V_1^0 , la partícula cascada i noves evidències en emulsions presentades al congrés que rebran el nom de superprotons o partícules J , de massa similar a la V_1^0 . La terminologia V i S es mantindrà per descriure fenomenològicament els esdeveniments i quan quedin perfectament determinats es caracteritzaran amb lletres gregues (majúscules per als hiperons i minúscules per als mesons pesats).

3.1 Les partícules V

At the suggestion of Blackett and Anderson, the generic term “V-particle” was adopted to refer to the unstable parent particles which on decay were responsible for the forked tracks.

Thompson (1956), 257.

3.1.1 Primer intent de classificació: Manchester al Pic-du-Midi

A principis del 1950, el grup de Caltech confirmarà definitivament l'existència de les traces forçades (*forked tracks*) que, el 1947, el grup de Manchester havia evidenciat. Força temps abans de la confirmació del grup d'Anderson, el grup de Blackett ja s'havia plantejat estratègies de detecció alternatives per confirmar ells mateixos els dos exemples del 1947. En concret, l'esterilitat de les investigacions posteriors a Manchester els porta a traslladar el muntatge en cambra de boira a alta muntanya.¹ D'afegit, iniciaran la construcció d'un nou muntatge en cambra de boira:

To follow up the search for more of these phenomena, we are planning two major efforts. The first is to send Butler's magnet and cloud chamber to the Pic du Midi. This has already arrived but the chamber will not go until the spring. The second project is to build a new chamber, about 50 cms. square, in an iron clad solenoid, rather like your original one, to get some 6,000 gauss. This is to go to the Jungfrauoch late next summer.²

De fet, abans de les noves arribades de Caltech, Blackett confiava que el seu projecte al Jungfrauoch (Alps suïssos, 4158 m) s'hagués completat a temps per confirmar el descobriment de les traces forçades. Però els treballs de construcció i posta a punt es van

¹De sobres era conegut que la proporció de nucleons esperada a gran alçada era molt major que l'aconseguida a nivell del mar, cosa que afavoriria l'aparició de les noves partícules originades en aquestes col·lisions nuclears d'alta energia.

Dalitz explica a l'autora (11-10-99) aquesta necessitat de pujar a grans alçades:

The Powell group at Bristol worked only with nuclear emulsion and were plotting their own path. From an exposure, just before the war, of some nuclear emulsion at the Laboratory on the Jungfrauoch mountain (altitude about 3400 m.), they had already learned that the way to find massive fundamental particles was to go to the highest altitude possible, where the most energetic CR particles incident on Earth had not yet their energy degraded by collisions with nuclei of the atmospheric molecules. Their early discovery of the charged pions was made using high altitude exposures (at the Pic-du-Midi 2900 m.) and at Mt.Chacaltaya (5500m. in Bolivia). The R&B group similarly moved their cloud chamber and their magnets to the Pic-du-Midi, since they had noticed that their V-particles were associated with penetrating showers, which were due to incident CR particles which happened to have survived with no nuclear collision down to the altitude of their detectors.

²Blackett a Anderson, 5-12-1949 (Blackett Archive, Royal Society, London).

allargar excessivament. D'entrada, hi havia el problema del transport del material fins al cim. L'imant de Blackett era massa pesat per ser traslladat i es va pensar en la construcció d'un nou imant, del qual parla en la carta, que podia descomposar-se en petites peces per facilitar-ne la mobilitat. La construcció de la cambra de boira tampoc es va fer amb suficient celeritat i no va resultar efectiva al cim fins el febrer de 1951.

Fou en veure que els treballs d'aquest segon projecte anaven lents que G. P. Occhialini va suggerir a Blackett d'enviar el seu vell imant al Pic du Midi (Pirineus francesos, 2867 m), on diverses investigacions s'havien realitzat des de la dècada dels trenta aprofitant les instal·lacions del laboratori astronòmic que hi havia.³

L'entusiasme venia de pensar que l'imant podia arribar al cim i funcionar abans que s'acabés el 1949. Les reticències de Blackett venien de pensar en aturar l'experiment que continuava a Manchester, sota les ordres de Butler,⁴ tot i que no havia mostrat nous resultats positius. Finalment, la desesperança el portarà a acceptar la proposta d'Occhialini, com explica en una carta a Anderson:

I have just get back from a short visit to India and find the manuscript of your paper which you sent to Rochester. I am extremely pleased to see your excellent new results and specially delighted that you have managed to get so many of these interesting new events. We have been, frankly, very disappointed that we had no luck in the last two and a half years in finding any more. It was this failure to find any more which led me finally to move the magnet to the Pic du Midi.⁵

A principis de novembre del 1949 l'imant arriba al cim i serà utilitzat tot l'hivern sobre emulsions nuclears. La cambra de boira, però, no serà operativa fins a l'estiu següent. El 27 de juny del 1950, Blackett escriu a Anderson més optimista:

Very many thanks for your letter of 13 June and for telling me of your plans. Butler's magnet and cloud chamber are now at the Pic du Midi and already taking photographs. I am hoping that we will get some more examples of forked tracks within a few months.⁶

Malgrat que ja no van ésser a temps de confirmar el seu descobriment, un cop instal·lats al Pic du Midi, la reacció fou immediata. Entre juliol del 1950 i gener del 1951 el grup de Manchester detectarà 43 traces V, de les quals 36 neutres i 7 carregades.

Tot i que la publicació dels resultats no es farà fins el març de 1951, alguns resultats preliminars (20 V neutres i 4 V carregades) són analitzats per Blackett al congrés de Bombay

³El director de l'observatori en aquell moment, J. Rösch (1982, 215), ho explica:

Il fallait vraiment y croire. P. Auger et ses élèves avaient commencé à observer les Rayons Cosmiques au Pic-du-Midi dès la seconde moitié des années trente; L. Leprince-Ringuet et Max Cosyns y étaient passés aussi. Dès les premières années après la guerre, P. Auger suscitait l'installation par Jean Daudin d'un comptage continu des Grandes Gerbes de l'air, et Occhialini, de son côté, venait exposer certaines des plaques qui devaient le conduire, avec C. F. Powell, à la découverte du méson π .

⁴A partir del 1948, Blackett encarregarà a Rochester que es familiaritzi amb la tècnica d'emulsions, en les quals comença a treballar a Manchester mateix.

⁵Blackett a Anderson, 21-4-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

⁶Blackett a Anderson, 27-6-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

(14–22 de desembre del 1950). Pel que fa a la més abundant V^0 proposarà diferents desintegracions possibles assumint una desintegració a dos cossos, tot i que no es pot eliminar la possibilitat que una tercera secundària neutra sigui present:⁷

$$\begin{aligned} V_0 &\rightarrow \pi_+ + \pi_- \\ &\rightarrow \pi_{\pm} + \mu_{\mp} \\ &\rightarrow \mu_+ + \mu_- \\ &\rightarrow \pi_{\pm} + e_{\mp} \\ &\rightarrow \mu_{\pm} + e_{\mp} \end{aligned}$$

És evident que la natura de les secundàries d'aquestes desintegracions no està absolutament determinada, principalment per la incertesa en les mesures de la ionització de les traces.⁸ En la majoria de casos, les secundàries de la desintegració en vol de la V_0 són massa energètiques per identificar-les directament amb mesures sobre la traça. No obstant això, a vegades la seva natura es pot inferir de consideracions sobre el seu comportament. En alguns casos les secundàries travessen la làmina de plom del mig de la cambra sense produir ruixades electròniques, per tant s'entén que no són electrons. En d'altres casos, la secundària es desvia molt amb la làmina de plom que travessa la cambra, cosa que fa pensar en pions fortament interaccionants amb el plom, abans que en muons. En definitiva, en el cas de la primària neutra es poden restringir els casos més favorables a desintegracions en dos pions secundaris, o en un pió i un muó.

L'experiment també permet un càlcul aproximat de la vida de les V_0 . Anàlogament a com el grup de Caltech havia fet, computant la distribució dels punts de desintegració al llarg de les línies de vol d'aquestes primàries neutres, s'arriba a una vida aproximada de 3×10^{-10} s.⁹

⁷Com que la presència d'aquesta possible secundària neutra no és directament apreciable, s'ha de recórrer a arguments secundaris. Per exemple, una manera de detectar-la seria trobar una diferència entre la direcció de la partícula V , deduïda del seu punt d'origen, i la direcció del vector suma dels moments de les dues secundàries. Una altra manera seria fixar-se en les interaccions produïdes en la làmina que travessa la cambra i que poden trobar-se associades a l'esdeveniment: fotons i π^0 es desintegrarien ràpidament iniciant cascades d'electrons, els neutrons donarien lloc a interaccions nuclears. En aquests primers exemples, cap d'aquests arguments per detectar terceres secundàries no dona resultats positius, per tant assumeixen que es tracta de desintegracions a dos cossos.

⁸El mateix Blackett (1950, 66) ho explica en l'article:

Since it is not possible with the counter-controlled cloud chamber to measure the ionisation accurately, and since anyway most of the product particles are at minimum ionisation, it is not easy to identify the nature of the product particles.

⁹La idea era que el temps que trigava en desintegrar-se la V en el seu sistema en repòs venia donat per la distància entre el punt de la seva creació i el seu vèrtex (punt de la seva desintegració), juntament amb la seva velocitat: $\tau_0 = d/\beta\gamma c$.

En la publicació dels resultats, el març de 1951, redueixen molt més les propostes de desintegració de la V^0 .¹⁰

$$V^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$$

$$V^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

Al primer mode de desintegració hi arriben de la identificació de la secundària com un protó en 4 casos,¹¹ a través de la mesura del moment i de la ionització de la traça. El segon mode no està tan clar, però els autors proposen que l'exemple neutre de Rochester i Butler (1947) serà d'aquest tipus, encara que la natura de les secundàries no fos perfectament determinada.

De fet, tot i que els càlculs sobre moment i ionització semblen afavorir aquests pions i protons secundaris, cal notar que: “No neutral V-event has been found on which both secondaries can be identified.”¹² A partir d'aquest moment, però, el primer mode ($V^0 \rightarrow p + \pi^-$) passarà a ser el més ben identificat, ja que la ionització del protó secundari era fàcilment reconeixible, en especial per la diferència visual amb la traça del π^- que l'acompanyava en la desintegració. Per al segon mode ($V^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$), l'argument de la ionització no permetia distingir les secundàries, que en ser massa energètiques presentaven ionització mínima. Durant molt de temps serà clar que no es tractava de protons, però la distinció entre π i μ no serà definitiva.¹³

Des dels primers indicis, l'estimació directa de la massa de la primària havia resultat problemàtica, especialment per la manca de resolució en les estimacions de la ionització. En el cas de les partícules V, el còmput de la massa de la primària a partir de suposar coneguts els productes de desintegració donava una seguretat addicional a la realitat dels fenòmens, seguretat que no es trobava en els primers exemples de Leprince-Ringuet o altres, que sols podien basar-se en l'anàlisi de la traça primària. Ara, doncs, el problema es comença a plantejar a un altre nivell: l'existència de diferents tipus d'esdeveniments dins del grup de les traces forçades, amb diferents modes de desintegració. La distinció anirà produint-se amb una millora dels instruments de detecció i les tècniques associades, però també amb l'enginy dels experimentals per inventar mètodes de sistematització dels esdeveniments. Així, la dificultat de mesura de les quantitats que determinarien perfectament aquestes secundàries, com la ionització, es compensarà amb anàlisis conjuntes de les dades, que comencen a ser estadísticament tractables.¹⁴

¹⁰Conservem la V^0 per als dos modes que surt en l'article original. Aviat es diferenciarien afegint un subíndex: V_1^0 serà el primer cas i V_2^0 , el segon.

¹¹Per tant es pot considerar com el descobriment de l'hiperó Λ (v. apèndix A, fig. A.9).

¹²Armenteros *et al.* (1951), 502.

¹³En alguns casos, els arguments addicionals referents al comportament de les secundàries amb la làmina de plom intermitja a la cambra, o mesures de la curvatura i l'abast quan les traces eren prou llargues, cosa que no passava sovint, permetien donar com a més favorable un pió secundari en lloc d'un muó.

¹⁴L'augment de l'estadística a partir del 1950 es prou evident a través dels gràfics de la base de dades, en concret en els gràfics sobre tipus d'article (v. apèndix B, sec. B.4.3) o en el gràfic sobre fonts i detectors en

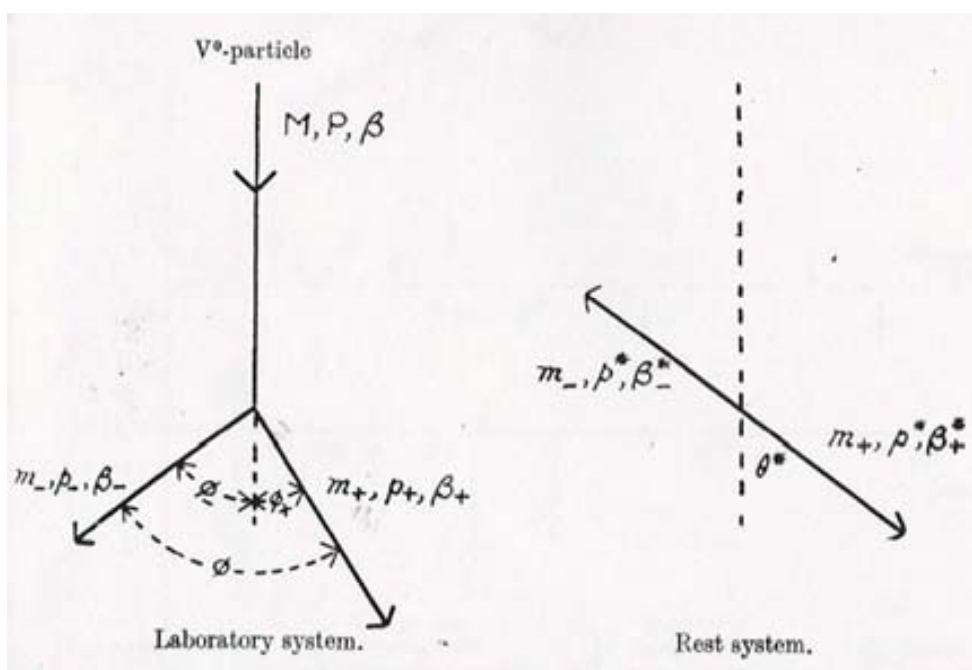


Figura 3.1: Representació vectorial d'una desintegració V^0 en dos fragments carregats.

Mètode cinemàtic de classificació de les V^0

Quan una partícula neutra es desintegra en vol donant dues secundàries carregades, la cambra de boira mostra la característica traça forçada. Sovint les condicions de la cambra, o de l'experiment en general, no permeten conèixer amb certesa la natura de les secundàries, per les raons que ja hem exposat. Això dificulta l'estimació de la massa de la primària, malgrat sigui clar que les V representen desintegracions de noves partícules. Per tant, el problema de la resolució en la determinació de la massa de les secundàries, per determinar la massa de la primària, es converteix en una qüestió de primer ordre. Estratègies alternatives s'han de posar en joc, de manera que no necessitin directament el valor d'aquesta massa de les secundàries, sinó que utilitzin altres quantitats més fàcilment determinables de les fotografies, com el moment de les secundàries, que es determina de la curvatura de la traça produïda pel camp magnètic aplicat, i l'angle entre les dues traces secundàries. El mètode de classificació desenvolupat a Manchester es basa simplement en el coneixement d'aquesta cinemàtica de la desintegració a dos cossos.

Qualsevol fotografia, que representi una desintegració en vol V^0 , es pot sintetitzar en els esquemes de desintegració a dos cossos de la figura 3.1, on es concreten aquestes quantitats. Sempre que es pugui determinar els moments de les secundàries (p_+ , p_-), i l'angle ϕ que formen les seves traces, el moment P de la primària queda perfectament determinat. Aquest

les revistes principals (v. apèndix B, sec. B.4.4).

moment P també es pot determinar si sols es coneix un dels moments de les secundàries i la línia de vol de la primària neutra, perquè en aquest cas, els angles ϕ^+ i ϕ^- entre la línia de vol de la primària i les secundàries també estan determinats, i la relació $p_+ \sin \phi_+ = p_- \sin \phi_-$ ens permet calcular el moment desconegut.¹⁵

Aleshores, coneixent aquests moments, el grup de Manchester defineix un nou paràmetre, α , que serà representatiu de la simetria o asimetria de la desintegració:

$$\alpha = \frac{(p_+)_L - (p_-)_L}{P} = \frac{p_+ \cos \phi_+ - p_- \cos \phi_-}{p_+ \cos \phi_+ + p_- \cos \phi_-}$$

La mesura d'aquest paràmetre indica com es reflecteixen les asimetries de les secundàries de les desintegracions V^0 en el sistema de laboratori, a través de les diferències en les components longitudinals dels moments dels fragments, $(p_+)_L$ i $(p_-)_L$.

Normalment, però, es desconeix el valor dels angles ϕ_+ i ϕ_- i sols es pot avaluar la seva suma ϕ . Per aquest motiu, acostuma a ser més útil la representació equivalent:¹⁶

$$\alpha = \frac{p_+^2 - p_-^2}{P^2}$$

Que permet una determinació del paràmetre α a partir, únicament, del coneixement del moment de les secundàries.

Fent ús de les transformacions de Lorentz, α també es pot escriure com:

$$\alpha = \frac{p_+^2 - p_-^2}{P^2} = \frac{m_+^2 - m_-^2}{M^2} + 2p^* \cos \theta^* \left\{ \frac{1}{M^2} + \frac{1}{P^2} \right\}^{1/2}$$

Expressió que es pot simplificar si entenem que el valor mitjà del segon sumand és zero per a un nombre d'esdeveniments qualssevol, que s'orienten a l'atzar en el seu sistema en repòs.¹⁷ Aleshores, el valor mig del paràmetre α serà:

$$\bar{\alpha} = \alpha_0 = \frac{m_+^2 - m_-^2}{M^2}$$

La quantitat invariant α_0 ens pot servir per caracteritzar la desintegració a dos cossos. En realitat, la consideració més simple és:

The mean value for 2-body decays into particles of the same mass is equal to 0 and

¹⁵Fixem-nos que conèixer la línia de vol de la primària significa conèixer l'origen de la partícula V, és a dir, la interacció nuclear en la qual s'ha originat, cosa que no sempre és possible.

¹⁶Per arribar a la qual hem fet ús de:

$$P = p_+ \cos \phi_+ + p_- \cos \phi_-$$

$$p_+ \sin \phi_+ = p_- \sin \phi_-$$

¹⁷L'angle d'emissió de les secundàries en el sistema centre de masses s'espera que sigui aleatori, i per tant a una desintegració a dos cossos li correspon un valor mig de $\cos \theta^*$ nul.

different from 0 if the particles have different masses.¹⁸

Entrant en la complexitat dels esdeveniments trobats, el pas següent més raonable serà estimar el valor d' α_0 per a casos amb la massa ben definida. Amb aquesta idea, el grup de Manchester considera 29 traves V^0 de què disposa fins agost del 1951 per a les quals p_+ , p_- i ϕ són computables. D'aquests 29 casos, 4 presenten un protó secundari clarament determinat. Per tant, aquests casos es poden interpretar considerant l'esquema $V^0 \rightarrow p + \pi^-$, i en determinen un valor mig d' α de +0.60. Anàlogament, prenent les secundàries d'uns altres 4 casos de V^0 que clarament són de natura no protònica s'associen al mode de desintegració $V^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. En aquest cas, el comput d' α_0 dona +0.08, valor proper al zero que seria d'esperar per a una desintegració simètrica com la proposada.

Determinats els valors per als dos modes de desintegració suposats sols queda veure en els casos més problemàtics a quin valor d' α s'aproximen més, segons l'angle entre les secundàries i els seus moments determinats de la fotografia. Per tant, s'intenten associar 21 casos de V^0 restants a un mode o altre segons el seu valor d' α .

Gràficament, es poden visualitzar els 29 valors d' α i els seus errors.¹⁹ La representació en funció de $\frac{1}{P}$ mostra un grup al voltant del valor $\alpha = 0.65$, prop del valor $\alpha_0 = +0.60$ trobat per als 4 casos més probables amb les 4 secundàries protòniques i que s'apropa al valor $\alpha_0 = +0.68$ esperat per a la desintegració asimètrica en protó més pió. Una altra concentració de punts apareix, clarament, al voltant de $\alpha_0 = 0$, valor esperat per al segon mode de desintegració en dos pions secundaris.

Per tal d'aconseguir una inspecció addicional dels resultats trobats és útil computar el valor del moment transversal p_t . La raó és que aquesta quantitat, igual com α , es pot fer el màxim independent de les condicions desfavorables per al coneixement de l'esdeveniment real, i quan més proper és α del seu valor mig α_0 , això indica que $\theta^* \approx \pi/2$, i per tant que $p_t \approx p^*$.²⁰ A més, la distribució del moment transversal de les secundàries, per a una emissió a l'atzar en el sistema en repós, es pot escriure com:

$$w(p_t)dp_t = \frac{p_t dp_t}{p^*(p^{*2} - p_t^2)^{\frac{1}{2}}}$$

Que ens indica que trobarem un nombre creixent d'esdeveniments a mesura que el valor de p_t s'aproximi al de p^* . Per a un procés donat, doncs, la probabilitat que les secundàries tinguin un moment transversal prop de p^* és molt elevada.

El valor específic de p_t per a cada desintegració es pot estimar a partir de:

$$p_t = \frac{p_+ p_- \sin \phi}{P}$$

¹⁸Peyrou (1982), 35.

¹⁹Vegeu apèndix A, fig. A.23.

²⁰Es tracta de valors constants per a tots els esdeveniments amb igual massa de la primària i de les secundàries.

Aleshores, al valor computat d' α per a cada desintegració trobada li afegim el càlcul d'aquest moment transvers. La distribució de les components del moment transvers ens pot ajudar a decidir a quin mode de desintegració és més probable que pertanyi un esdeveniment incert.²¹

En els casos més favorables s'estima el valor de la massa de la primària a partir de les masses de les secundàries, quan sembla prou raonable assignar-los un mode de desintegració específic, i la consegüent aplicació de la conservació d'energia i moment. La relació explícita és:

$$M^2 = m_+^2 + m_-^2 + 2p_+p_- \left[\left\{ 1 + \left(\frac{m_+}{p_+} \right)^2 \right\}^{1/2} \left\{ 1 + \left(\frac{m_-}{p_-} \right)^2 \right\}^{1/2} - \cos \phi \right]$$

Experimentalment s'imposarà també el còmput del valor de l'energia de la desintegració, definit com la disminució de massa en el procés de desintegració. O equivalentment com la suma de les energies cinètiques dels fragments secundaris en el sistema centre de masses:²²

$$Q = (M_{V_0} - m_+ - m_-)c^2$$

$$Q \equiv \sqrt{(E_+ + E_-)^2 - |\vec{p}_+ + \vec{p}_-|^2} - (m_+ + m_-)$$

La mesura d'aquestes quatre constants (α , p_t , M i Q) en el millor dels casos, o sinó d'aquelles que experimentalment resultin més fiables, permetrà una primera sistematització de les dades trobades pel grup de Manchester al Pic du Midi fins l'agost del 1951. Els 70 casos de V^0 trobats fins a la data es poden interpretar associant-los a un dels dos modes de desintegració definits com:

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$$

$$V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (\text{o } V_2^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-)$$

Per als quals es poden estimar unes masses:²³

$$M_{V_1^0} = (2203 \pm 12) m_e \quad (Q_{V_1^0} = (46 \pm 6) MeV)$$

²¹Veurem com aquesta anàlisi del moment transvers l'apliquen amb èxit en el cas de les V carregades, per a les quals molt sovint la informació que s'obté és més reduïda, a més de ser-ho el nombre d'esdeveniments trobats.

²²El càlcul del valor de Q s'imposarà per compatibilitzar les dades experimentals amb un mode de desintegració suposat. L'ús de Q com a paràmetre, substituint la massa de la primària, s'introdueix perquè en determinades condicions es mostra relativament insensible a les masses secundàries assumides i per tant és més proper a les mesures experimentals.

²³Valors donats en l'article Armenteros, Barker, Butler i Cachon (1951). Els errors computats són errors probables, calculats combinant els errors de distorsió coneguts en la cambra i els errors propis de les diferents mesures. No obstant això, no es pot eliminar la possibilitat de fonts d'error sistemàtics que afectin a les mesures de les masses individuals. Per exemple, distorsions del gas inesperades que no són detectades poden tenir lloc en fotografies individuals, ja que la magnitud de la distorsió del gas no és mesurable per a cada fotografia individualment.

$$M_{V_2^0} = (796 \pm 27) m_e \quad (Q_{V_2^0} = (122 \pm 13) MeV)$$

o

$$M_{V_2^0} = (705 \pm 32) m_e \quad (Q_{V_2^0} = (142 \pm 16) MeV)$$

Malgrat que aquests serien els modes de desintegració més probables, en aquest primer intent de sistematització no es pot eliminar encara la possibilitat que existeixin desintegracions de V^0 en tres secundàries,²⁴ hipòtesi que estudiarà el grup de Caltech.²⁵

V^\pm al Pic du Midi

En els primers experiments al Pic du Midi que realitza el grup de Manchester, el nombre d'esdeveniments V carregats es manté tan pobre com en els primers exemples trobats pel grup de Caltech el 1950.²⁶ Lògicament, la menor estadística disponible dificulta l'anàlisi de les desintegracions. En els resultats preliminars de les experiències, que es presenten al congrés de Bombay (14–22 de desembre del 1950), a més de l'anàlisi dels 20 exemples de V^0 que ja hem mostrat, Blackett proposa diferents possibilitats de desintegració per a 4 exemples de V carregades. Sempre suposant el cas més simple de desintegracions en dues secundàries:

$$\begin{aligned} V_\pm &\rightarrow \pi_\pm + \pi_0 \\ &\rightarrow \pi_\pm + \nu \\ &\rightarrow \mu_\pm + \pi_0 \\ &\rightarrow \mu_\pm + \nu \end{aligned}$$

Però potser l'exemple de V carregada que més crida l'atenció, ja en aquest congrés del 1950, és la que sembla mostrar un fenomen del tot nou: una doble desintegració d'una primària carregada donant una V neutra secundària que a la vegada es desintegra.²⁷

Per aquest motiu, en les possibles desintegracions d'aquestes V carregades, cal contemplar també les següents possibilitats:

²⁴Peyrou (1982, 37) ens explica que intentar descobrir el nombre de secundàries que intervenen en la desintegració es feia essencialment per tres vies:

(a) Verify that the plane made by the two charged secondaries contained the origin of the V^0 i. e. the apex of the nuclear interaction in which it was produced. That was the coplanarity test; (b) One could check that there was a balance of the transverse momentum components of the secondaries (transverse to the line-of-flight of the V^0 defined as the line joining the origin to the apex of the decay); (c) One could also check the uniqueness, within small experimental errors, of the Q value of a given decay mode: $Q = (M_{V^0} - m^+ - m^-)c^2$ a variable used at that time rather than the mass of the primary.

²⁵Vegeu aquest capítol, sec. 3.1.2, p. 118.

²⁶El 1950 a Caltech es detecten 34 casos, dels quals sols 4 corresponien a V carregades. Al Pic du Midi el grup de Manchester detecta, fins a gener de 1951, 43 traces V , de les quals 36 són neutres i 7 carregades.

²⁷De moment, però, no queda determinada la natura de la V^0 (no es determina si una de les seves secundàries és un protó o si es tracta de dos mesons).

$$\begin{aligned}
 V_{\pm} &\rightarrow \pi_{\pm} + V_0 \\
 &\rightarrow \mu_{\pm} + V_0
 \end{aligned}$$

Tot i que aquest sigui un anunci un xic prematur, per la manca de càlculs sobre les traces, l'evidència visual és suficientment forta com per permetre'n l'especulació. De fet, amb mesures posteriors, aquesta fotografia, presa el 4 de juliol del 1950, es reconeixerà com el primer exemple de partícula cascada ($\Xi^- \rightarrow V^0 + \pi^-$, $V^0 \rightarrow p + \pi^-$).²⁸

En el congrés de Dublí (setembre del 1951), Rochester destaca de nou el cas de la V^- que sorprenentment mostra entre les seves secundàries una V^0 . Premonitòriament diu: “This photograph might give a hint as to the mechanism of decay of the charged V-particle.”²⁹ Aquest esdeveniment és analitzat amb cura en l'article que el grup presenta el 1952 dedicat exclusivament als 21 exemples de V carregades trobades al Pic du Midi fins aleshores. Mitjançant la reconstrucció geomètrica de l'esdeveniment en dos plans perpendiculars,³⁰ s'argumenta en favor de la V^0 com a un dels productes de desintegració de la V^- , tot i que una coincidència casual de traces no és del tot descartable:

One photograph (track 2, Plate XXVIII) shows the apparent association of a V^0 -track with a V^- -track. This may be fortuitous, but, if it is assumed that the V^- -particle did produce a V^0 -secondary, a possible explanation of the double-decay process is:

$$V^- \longrightarrow V_{1,2}^0 + \pi^-$$

If a V_1^0 -particle was produced, the mass of the V^- -particle is about $2600 m_e$; if a V_2^0 -particle was produced, then the mass is about $1300 m_e$.³¹

La indeterminació persisteix pel que fa a la natura de la V^0 , particularment a causa de la poca longitud que presenten les secundàries de la seva desintegració, cosa que dificulta les mesures. Però el poder de la singularitat visual de l'esdeveniment fa que se'n reconegui l'existència i en determina la nomenclatura de “partícula cascada” (*cascade particle*), malgrat es tracta d'un únic exemple aïllat.

La informació obtinguda per als 20 esdeveniments V carregats restants que el grup ha trobat al Pic és més precària que per a les V^0 . Assagen, però, una anàlisi del signe de la V^{\pm} primària, el seu moment, l'angle entre aquesta primària i la secundària visible, la càrrega

²⁸Butler enviarà la fotografia d'aquest esdeveniment a Anderson, el qual mostrarà la seva sorpresa:

The photo of the double decay which Butler sent us is extraordinarily interesting. It is still true that neither theory nor imagination can keep up with facts.

Anderson a Blackett, 10-8-1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

²⁹Rochester (1952), 19. Veurem (cap. 4, sec. 4.2.2) com el model teòric de la producció en parelles tindrà dificultats per explicar la doble desintegració.

³⁰Vegeu apèndix A, fig. A.7.

³¹Armenteros *et al.* (1952), 609.

i moment de la secundària visible i, finalment, el moment transvers. Totes aquestes dades en aquells casos que l'estimació és possible. L'anàlisi fa especialment palès la dificultat per determinar la ionització i el moment de la traça ja que, dels 20 exemples avaluats, sols 3 es troben per sobre de la ionització mínima. Aleshores, la ionització mínima sols pot servir per estimar un límit superior de la massa de la primària, quan també sigui possible la determinació del seu moment, però això sols es dona en 1 dels 20 casos. En aquest cas concret, s'estima un límit superior per a la massa de la primària de $(1580 \pm 160) m_e$, on l'error és l'associat a la mesura del moment.

Davant les dificultats per determinar les variables físiques de les observacions, el grup de Manchester aguditzava l'enginy per construir raonaments associats que puguin ser d'utilitat. Així, recordem que el valor màxim del moment transvers p_t per a una desintegració a dos cossos coincidia amb p^* (moment del centre de masses), constant per a tots els esdeveniments amb igual massa de la primària i les secundàries. També vam veure que el nombre màxim d'esdeveniments que esperem trobar es produeix precisament per a valors del moment transvers que coincideixen amb p^* , i en aquest punt també p_t és màxim.³² Utilitzant aquest argument, el grup de Manchester suposa que el valor màxim per al moment transversal que ells observen ($p_t = 285 \text{ MeV}/c$) correspondrà aproximadament al valor màxim d'esdeveniments esperats teòricament. Però la distribució teòrica esperada amb aquesta suposició difereix irreconciliablement de la distribució experimental dels esdeveniments en funció del seu moment transversal.³³ L'explicació d'aquesta divergència serà:

Hence it is concluded that the assumption of a unique two-body decay scheme is probably false. It is necessary to assume, therefore, that either the V^\pm -particles have two or more modes of decay, each giving two secondary particles, or that there is a single decay process involving three or more secondary particles.³⁴

D'entrada, doncs, la classificació de les dades en dos modes de desintegració que havia resultat compatible amb els resultats experimentals en el cas de la V^0 no sembla aquí tan fàcilment explotable. Les hipòtesis subsegüents intentaran limitar aquestes possibles desintegracions i les associaran, immediatament, als esdeveniments trobats en emulsions fotogràfiques a partir del 1951:

Additional information can be obtained from a comparison of the V^\pm -tracks with those of κ -particles. It is concluded, provisionally, that both particles are of the same type; each produces a charged μ -meson and at least two neutral particles whose combined mass is less than $500 m_e$.³⁵

Però per arribar a aquesta assumpció sobre les noves partícules carregades, Manchester ja no es basta amb les seves estadístiques sinó que ha de recórrer als esdeveniments trobats

³²Vegeu p. 110.

³³Vegeu apèndix A, fig. A.24.

³⁴Ibid., 603.

³⁵Ibid., 609.

en aquestes emulsions, que es mostraran més efectives per detectar els esdeveniments de primàries carregades.³⁶

3.1.2 Complexitat de la classificació: V arreu del món

La confirmació de l'existència de les traces forcades servirà perquè molts grups, familiaritzats amb les investigacions en raigs còsmics, enfoquin l'atenció cap a la captació de més evidències dels nous fenòmens. Hem vist com les cambres de boira s'erigeixen en detectors especialitzades d'aquestes traces en forma de V invertida, mentre que, fins a principis del 1951, les emulsions romandran més concentrades en la investigació dels mesons π i μ . D'afegit, les emulsions no detectaran la característica desintegració en V, sinó que les observacions es basaran en el còmput sobre una única traça secundària en l'emulsió o, en el millor dels casos, s'observarà una desintegració en tres secundàries (τ), visualment molt diferent de les traces forcades trobades en cambres. Fins i tot quan les emulsions comencin a enfocar-se cap a la detecció de noves partícules, seran comptats els casos en què mostrin desintegracions V, cosa que ajudarà a mantenir diferenciat el treball segons el mètode de detecció i, en conseqüència, també la nomenclatura per descriure els nous elements.

Una excepció a aquest argument la constitueix l'exemple trobat el 1950 per un grup d'emulsions de la Universitat de Melbourne. En una emulsió nuclear Ilford G5, de 400 μ de gruix i exposada a una alçada de 70000 peus, detecten un exemple de traça forcada neutra desintegrant-se clarament en un protó i un mesó (π o μ).³⁷ De l'esdeveniment és curiós com fan notar que “fortunately, both tracks were of sufficient length to enable the masses of both particles to be identified. This has not been possible with the cloud-chamber observations.”³⁸ Certament, fins el moment de la publicació de l'article, no ha estat identificat cap esdeveniment complet de V^0 . Ara, els autors fins i tot estimen la massa de la primària en $2370 \pm 60 m_e$. Tot i que el grup de Caltech el 1950 ja havia detectat protons entre les secundàries, a més de mesons (π o μ), no havia explicitat cap cas on ambdues secundàries fossin perfectament definides. Hopper i Biswas associen clarament l'exemple que han trobat amb aquests esdeveniments a Caltech i amb els dos primers casos trobats per Rochester i Butler (1947).

Pel que fa a la nomenclatura, però, cal notar com es refereixen a aquests esdeveniments previs en cambra de boira com a traces forcades, mentre que per a l'exemple que ells han detectat utilitzen la nomenclatura, més habitual en emulsions, d'“estrella de dues puntes” (*two-pronged star*). De fet, a principis del 1951, la denominació de partícules V, proposada per Blackett a Manchester amb la col·laboració d'Anderson a Caltech, comença a imposar-

³⁶A l'estar carregades perden energia per ionització i acostumen a desintegrar-se després de parar-se en l'emulsió, medi més dens que les cambres. Quan l'emulsió les grava es fa més fàcil mesurar l'allargada de les traces de primària i secundària, la ionització i/o la dispersió coulombiana.

³⁷Vegeu apèndix A, fig. A.8.

³⁸Hopper, Biswas (1950), 1099.

se públicament en el treball en cambra de boira. “A Note on the V Particle” és el títol d’un article presentat per un grup de l’*Institute for Advanced Studies* de Dublí en el qual anuncien la detecció de 4 exemples més de partícules V neutres, al llarg d’una investigació en cambra de boira enfocada a l’estudi de les ruixades penetrants. Sorprenentment, dels 4 exemples tres semblen trobar-se en una mateixa fotografia. No arriben a donar resultats quantitativs, simplement presenten la certesa visual i la recolzen en el treball fet a Caltech i a Manchester:

These pairs of tracks are similar in appearance to the V tracks discovered by Rochester and Butler, and confirmed by Seriff *et al.*. They have been interpreted as the decay products of an unstable heavy neutral particle.³⁹

Altres grups de cambra de boira faran com el de Dublí, basant-se en els resultats de Manchester i Caltech iniciaran investigacions per detectar partícules V.

El grup de Berkeley

El treball en raigs còsmics del grup de Berkeley s’inicia el 1935 amb R. B. Brode, que havia passat un any amb Blackett a Londres per aprendre la tècnica de les cambres de boira controlades per comptadors. Un cop a Berkeley, les seves investigacions s’enfocaran a l’estudi de l’origen i la composició de la radiació còsmica, mercès a dos muntatges en cambres de boira que ell mateix construeix. Un dels muntatges, dissenyat per analitzar les partícules penetrants de les ruixades, serà una cambra multilàmines. El muntatge multilàmines consistia bàsicament en una cambra de boira travessada per un nombre variable de làmines, separades també una distància modificable. La idea era que les partícules penetrants, que s’escapaven de les cambres tradicionals, es veurien frenades per aquestes làmines i es gravarien els esdeveniments fins al final del seu abast.

W. B. Fretter arribarà al grup el 1938. Durant la Segona Guerra Mundial, ell i Brode seran enviats fora de Berkeley a complir tasques de guerra. Fretter hi torna el 1945 per completar el doctorat sobre la determinació de la massa del mesotró. Amb aquesta idea, construirà un muntatge format per dues cambres de boira: la cambra superior estarà sotmesa a un camp magnètic de 5300 G; la cambra inferior serà un muntatge multilàmines. Fretter dissenya l’experiment per tal d’obtenir bones mesures del moment en la cambra superior per la curvatura amb el camp magnètic i, al mateix temps, obtenir bones mesures de l’abast en la multilàmines inferior. Abast i curvatura serviran per determinar la massa del mesotró incident.

Més endavant, el muntatge de Fretter servirà de referent al grup de l’EP quan projectin la construcció d’una doble cambra que funcionarà al Pic du Midi i donarà els primers resultats al congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953). Els muntatges multilàmines i de cambres dobles jugaran un paper molt important a partir d’aquest 1953,⁴⁰ és per això

³⁹McCusker, Millar (1951), 290.

⁴⁰Vegeu cap. 5, sec. 5.1.1.

que les investigacions de Berkeley resulten importants per elles mateixes, però també com a precursors d'aquestes millores en cambres.

Amb el descobriment de les partícules estranyes, Fretter concentra l'atenció en la multilàmines i la modifica per a la detecció dels nous elements. Redueix el nombre de làmines de l'interior i les espai més. Amb el nou muntatge, es pretenia concentrar el màxim d'esdeveniments per als quals l'origen de la creació de la V^0 i la seva desintegració fossin observables, cosa que facilitava una estimació de la vida a partir del temps de vol i el coneixement per separat dels angles de les traces secundàries amb la línia de vol de la primària. A més, les làmines eliminaven la possibilitat que entre les traces secundàries hi haguessin electrons que haurien mostrat cascades en travessar-les. També permetien l'observació d'alguns pions secundaris, que mostrarien la seva desintegració en muons, afavorint així la idea que les secundàries de les V^0 eren π en lloc de μ . Finalment, les làmines eren necessàries per obtenir mesures de dispersió de les traces a través d'elles, quantitat que facilitaria el càlcul de les masses amb la mesura addicional de l'abast.

La cambra del grup de Berkeley comença a operar per a la detecció de partícules V el febrer del 1950, i es trasllada al *Lake Sabrina* (Califòrnia, 2700 m) l'estiu del 1951. Durant el 2n congrés Rochester (11–12 de gener del 1952) es reserva un temps important per a la intervenció de Fretter i l'exposició dels resultats sobre 35 possibles esdeveniments V trobats amb el seu muntatge. Però els resultats són poc concloents. Pel que fa als càlculs de les masses, únicament pot corroborar la presència dels modes de desintegració proposats pel grup de Manchester:

The data are not strong enough to establish definitely what the two decay schemes are, but they are sufficient to rule out the possibility that the data can be due to only one scheme, namely $p + \pi^-$ decay. The masses assumed in the analysis were 800 and 2300 electron masses.⁴¹

Més interessants són els càlculs de la vida de les noves partícules, afavorits, com hem dit, per la possibilitat de determinar el punt de creació de les V. En aquests casos:

This give 1.4×10^{-10} seconds for $V_1^0 [V_1^0 \rightarrow p + \pi^-]$ and 1.0×10^{-10} seconds for $v^0 [V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-]$, although the statistics are poor.⁴²

Les pobres estadístiques a què es refereix es veuran incrementades amb la continuació de les investigacions. A finals del 1952, disposen de 75 exemples de partícules V^0 , però les estimacions de les masses i les vides de les noves partícules no presenten una millora substancial respecte uns mesos abans en el congrés Rochester. Per Fretter, la manca de camp magnètic constituirà un dels principals handicaps del treball. Sense camp magnètic, l'estimació del moment de les secundàries no es pot fer a partir de la curvatura que pateixen

⁴¹Fretter (1952a), 54.

⁴²Ibíd., 55.

per la presència del camp i cal confiar més en les mesures d'ionització i de dispersió, afectades d'errors normalment més elevats.

El 1952 Fretter marxa un any a Europa per treballar amb el grup de l'EP, treballa a París i també al Pic du Midi. Curiosament, mentre a l'EP comencen a treballar amb un muntatge de doble cambra inspirat en origen en les primitives investigacions de Fretter, aquest començarà a pensar de canviar el seu muntatge multilàmines per una cambra de boira tradicional. Així, de tornada a Berkeley, construirà una nova cambra rectangular de grans dimensions ($\approx 51 \times 40 \times 13 \text{ cm}^3$) immersa en un camp magnètic molt potent (7500 G), amb la idea de centrar-se en mesures més acurades del moment i la ionització de les partícules que la travessaven. Amb aquest muntatge, el grup de cambres de Berkeley, amb Fretter al capdavant, continuarà aportant dades fins l'abandonament dels raigs còsmics el 1960.

Nous resultats a Caltech

Després de l'èxit assolit pel grup de Caltech amb la confirmació el 1950 de l'existència de les traces forcades, les seves recerques continuen enfocades especialment a la detecció i classificació de les V neutres. Durant tot el 1951, i després d'establerta a Manchester la classificació V_1^0 i V_2^0 , des de Caltech s'intenta engrossir l'estadística d'aquests tipus d'esdeveniments. A finals d'aquest any, Anderson escriurà a Rochester:

After a brief shut-down our two chambers are now operating on the top of Mt. Wilson at 5700 feet elevation. We, of course, would much prefer a higher altitude, but the summit of Mt. Wilson is only a one-hour drive from the campus over a high-gear paved road.

We do not yet have definite answers to some of the old questions concerning neutral V-particles, e. g., coplanarity and a unique Q-value. The data seem to show, however, several cases of good coplanarity, within one or two degrees, and also that the Q-value is not unique for those neutral V's which decay into a proton and a meson.

I am wondering what the latest ideas are now at Manchester.⁴³

En la carta ja mostra una certa discrepància pel que fa a la possibilitat d'una única desintegració del tipus V_1^0 proposada a Manchester. La dispersió en els valors de Q portarà a R. B. Leighton a suggerir desintegracions a tres cossos que involucrarien el mateix nombre i tipus de secundàries:

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + \pi^0$$

$$V_1^0 \rightarrow n + \pi^+ + \pi^-$$

D'aquesta manera, ambdós tipus representarien formes de desintegració d'una mateixa partícula V_1^0 en nucleó i dos pions, amb un valor de massa únic de $\sim 2600 m_e$.

Tot i que la idea és atractiva pel que suposa de simplificació en el nombre de noves partícules, es fa difícilment sostenible. D'entrada, la presència del π^0 com a secundària hauria d'evidenciar-se en alguns casos per l'aparició de cascades electròniques associades

⁴³Anderson a Rochester, 20-12-1951 (C. D. Anderson Papers, Caltech Archives, Pasadena, Califòrnia).

a l'esdeveniment ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow e^+e^-e^+e^-$). Pel que fa al segon mode, el neutró hauria de mostrar-se en alguns casos a través d'interaccions nuclears en la cambra. A més, s'esperaria que els moments de les secundàries carregades fossin menors en el segon esquema que en el primer, ja que el neutró prendria part important d'aquest moment. En canvi, les evidències experimentals mostren com són precisament les secundàries del primer mode les que presenten moments més baixos, afavorint la hipòtesi original del grup de Manchester.

En el 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), Leighton mostra la seva resolució davant la discrepància:

Leighton does not believe strongly in the two V particle decay schemes. He believes he can measure ionization better than the British have done, or think he can do.⁴⁴

Recordem que en els esdeveniments a Manchester, les secundàries provinents de la desintegració en vol d'aquestes V^0 eren molt energètiques, cosa que es traduïa en traces amb ionització mínima en la cambra. La presència de protons secundaris sí que es podia percebre per la ionització apreciablement major que mostraven respecte l'altra secundària de la desintegració. Però la distinció entre pions i muons no era gens clara. Des de Caltech, doncs, es permeten dubtar de la validesa dels modes V_1^0 i V_2^0 proposats a Manchester per la dificultat de determinar-ne les secundàries.

Les esperances de determinar millor la ionització no es materialitzaran immediatament. En aquest congrés, Leighton sols pot continuar l'especulació. Però les evidències de coplanarietat entre primària i secundàries detectades en els seus exemples comencen a afavorir una desintegració a dos cossos. Mantenint-se ferm en la idea d'una única V^0 , n'analitza els exemples que el seu grup ha trobat (entre 100 i 150) suposant que corresponen a la desintegració a dos cossos $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ proposada a Manchester, ja que la presència de protons secundaris sí que ha estat fermament establerta.

Leighton, doncs, estima el valor de Q suposant un protó i un π^- secundaris i mesurant sobre les fotografies el moment d'aquestes traces secundàries, per curvatura en el camp magnètic, a més de l'estimació de la ionització quan sigui possible. Els resultats mostren com tots els exemples semblen aglutinar-se al voltant de dos pics de $Q=34 \pm 3$ MeV i $Q=75 \pm 5$ MeV, amb aproximadament el mateix pes.⁴⁵

L'argument de Leighton serà objecte de crítica severa en el congrés. Semblen existir alguns casos clars on ambdues secundàries són menys massives que els protons, encara que no estiguin perfectament identificades. Fretter, que presenta les dades del seu grup de Berkeley, descarta que tots els esdeveniments puguin adscriure's a un únic mode de desintegració en

⁴⁴Fretter (1952a), 57.

⁴⁵Lògicament, que el valor de Q no sigui únic suggereix la presència de més d'un mode de desintegració a dos cossos, o de desintegracions en més de dues secundàries. Per tant, en certa forma s'invalida la pròpia suposició inicial de Leighton.

Fixem-nos, també, que els valors trobats es diferencien del valor trobat a Manchester: $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (46 \pm 6)$.

el qual sempre aparegui el protó secundari. També els resultats de Manchester, defensats per Marshak, que afegeixen a les mesures de Q les seves anàlisis en funció dels paràmetres α i del moment transvers, reafirmen la seva proposta inicial. Oppenheimer sentenciarà:

Oppenheimer commented that the assumption of only one mode of decay is quite special and that he was sure that we are not persuaded it is true. The only thing that is hard to reconcile between the Cal-Tech and the Manchester data is that one would expect to find a few more identifiable positive π mesons in the Cal-Tech data. [...] The discrepancy would be something to worry about only if it were forced by the data, which it is not.⁴⁶

A finals d'any, Caltech presenta un article on estudia en profunditat les seves dades (134 casos de V^0 i 18 casos de V carregades). En les conclusions seguiran mostrant-se en desacord amb els resultats de Manchester, tot i que ja accepten la desintegració a dos cossos $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$.

En l'article afegeixen, respecte consideracions anteriors, una anàlisi del paràmetre α per als exemples que presenten una millor resolució. Per això, necessiten determinar els valors dels moments de les secundàries, p^+ i p^- , involucrades en les desintegracions, per tal d'aplicar que:

$$\alpha = \frac{p_+^2 - p_-^2}{P^2}$$

Però la geometria de l'experiment es demostra especialment eficaç per detectar els punts d'origen o creació de les V^0 , de manera que, en un nombre important de casos, és possible determinar separatament els angles de la secundària amb la línia de vol de la primària, definits com ϕ_+ i ϕ_- . Per això, continuant amb la notació iniciada pel grup de Manchester, els convé redefinir α en funció, ja no sols dels moments sinó també dels angles:

$$\alpha = \frac{p_+^2 - p_-^2}{P^2} = \frac{\sin^2 \phi_- - \sin^2 \phi_+}{\sin^2 \phi} = \frac{\sin(\phi_- - \phi_+)}{\sin(\phi_- + \phi_+)}$$

Així, el valor d' α es pot computar a través de la mesura dels moments, però també, en els casos que siguin favorables, a través de la mesura d'aquests angles. En un histograma es poden visualitzar els valors d' α per a 60 casos dels quals s'ha mesurat ϕ_+ i ϕ_- i es pot comparar amb un altre histograma contenint 62 casos per als quals els moments es podien mesurar raonablement.⁴⁷ Un tercer histograma combina els casos més favorables dels dos histogrames anteriors.⁴⁸ Les línies verticals que travessen els tres histogrames indiquen valors d' α per als quals les masses de les secundàries serien:

⁴⁶Fretter (1952b), 73.

⁴⁷En aquest cas els autors —Leighton, Wanlass, Anderson (1953, 156)— especifiquen que:

All of these histograms represent only those cases in which the momenta could be measured with reasonable accuracy, so that those decays whose tracks inside the chamber were very short, and those whose tracks, although long, were too straight for measurement, are not represented.

⁴⁸Vegeu apèndix A, fig. A.27.

No.	Massa de les secundàries		α
	$M_+(m_e)$	$M_-(m_e)$	
1	276	276	0
2	276	210	0.06
3	500	276	0.22
4	1000	276	0.49
5	1837	276	0.69
6	1837	210	0.74

Dels resultats obtinguts conclouen:

The position of the rather sharp peak of the distribution at a value of α corresponding to a decay into a proton and a negative π^- or μ^- -meson, leads one to conclude that a great majority of the decays are probably of this type. However, since the distribution is not symmetrical about this peak, and since the selection of cases could hardly have been biased against large positive values of α , we conclude, on the other hand, that some of the decays are probably of another type.

It has been postulated that V^0 -particles exist which decay into two π -mesons. However, the number of negative values of α suggest that at least very few, if any, of the decays yielded particles of equal, or nearly equal, mass.⁴⁹

Per tant, estan disposats a admetre que les seves dades són compatibles majoritàriament amb el primer cas $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$, però segueixen rebutjant el segon cas $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. A més d'aquesta discrepància, els valors d' α de la taula superior mostren la possibilitat d'una complexitat encara més gran pel que fa a la desintegració de la V^0 . En especial, per l'evidència de dos casos on la secundària positiva no correspon ni a un protó ni a un mesó (π o μ).⁵⁰ Des de Caltech s'intentarà associar aquests esdeveniments als nous mesons pesats detectats en emulsions, ara com a secundàries de les V^0 :

There are, of course, other possible two-body decay schemes that would lead to the observed α -distribution, such as, for example, a decay in which the product particles are of unequal mass, the heavier of mass about 500–1200 m_e , perhaps a τ^- or κ^- -meson, and the lighter of π^- or μ^- -meson mass.⁵¹

Una estimació alternativa s'aconsegueix amb el còmput de l'energia de la desintegració (Q). Però els resultats tampoc són concloents. Analitzant les dades en termes de suposades desintegracions en $p + \pi^-$, com sembla que es produeix en un 80% dels casos, les dades són compatibles amb dos valors: $Q = 35 \pm 3$ MeV i $Q = 75 \pm 5$ MeV. A més, per als casos que mostraven una secundària positiva de massa entre 500 m_e i 1000 m_e , es pot estimar un valor de $Q \approx 60$ MeV, suposant que la desintegració és en $\tau^\pm + \pi^\mp$. Finalment, cal notar que

⁴⁹Ibíd., 155.

⁵⁰Casos 3 i 4.

⁵¹Ibíd.

arguments de coplanarietat no permeten eliminar completament la possible desintegració en tres secundàries.

Tot plegat portarà a catalogar les V^0 en un ventall més ampli de noves partícules. La majoria dels grups accepta les dues possibilitats nascudes de l'anàlisi a Manchester en funció del nou paràmetre α ($V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ i $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$). Però el grup de Caltech presenta dubtes sobre el segon cas (V_2^0) i proposa dividir el primer (V_1^0) en dos casos diferents:

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (35 \pm 3) MeV$$

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (75 \pm 5) MeV$$

Finalment, des de Caltech també s'enceta l'especulació sobre que aquest grup de la V_1^0 contingués desintegracions del tipus:⁵²

$$V^0 \rightarrow X^\pm + \pi^\mp + (\approx 60) MeV$$

Malgrat la complexitat, la sistematització aproximada que s'aconsegueix per a les V neutres, no s'aconsegueix per a les seves anàlogues carregades. D'entrada, igual com en la confirmació a Caltech el 1950, en què troben 30 primàries neutres i 4 primàries carregades, la freqüència de detecció dels esdeveniments carregats en cambra de boira era molt menor que la dels esdeveniments neutres. En el congrés de Dublí (setembre del 1951), Rochester nota que "It appears that about 10% of all V-particles emerging from penetrating showers are charged V-particles."⁵³ Conseqüentment, les discussions que incitin aquestes primàries carregades estaran molt més limitades que les dedicades a les V^0 . En el 2n congrés Rochester (11-12 de gener del 1952), Fretter, representant el grup de Berkeley, limitarà l'anàlisi de les V^\pm al següent comentari: "Six charged V's have been observed, but these may not be real."⁵⁴

A finals del 1952, els experiments del grup de Caltech en cambra de boira, a Pasadena mateix (Califòrnia, 220 m) i al Mount Wilson (Califòrnia, 1750 m), hauran revelat 18 exemples de V carregades junt amb els 134 exemples de V neutres. És per això que l'anàlisi de Caltech es trobarà enfocat prioritàriament cap als exemples de V^0 , per als quals una anàlisi estadística té sentit i una dialèctica sobre els possibles modes de desintegració ja es troba en marxa amb altres grups.

R. W. Thompson: mètode geomètric de classificació de les V^0

Decissiu per a la resolució dels problemes amb la V^0 seran les noves aportacions que des de la Universitat d'Indiana farà R. W. Thompson. Aquestes aportacions es concretaran amb

⁵² X^\pm representaria les partícules de massa entre $500 m_e$ i $1000 m_e$ que des de Caltech associen als mesons pesats de les emulsions.

⁵³Rochester (1952), 18.

⁵⁴Fretter (1952a), 55.

noves dades experimentals trobades pel grup, però també amb la representació geomètrica que en proposarà Thompson.

R. W. Thompson aconsegueix la posició de professor ajudant a Indiana després de completar el doctorat al MIT el 1948 amb B. Rossi, amb el qual es familiaritza amb les investigacions en raigs còsmics i amb la tècnica de cambra de boira.⁵⁵ Un cop arribat a Indiana, i amb la intenció de centrar-se en l'estudi de les ruixades penetrants que mostren l'existència de les noves partícules V, Thompson comença a construir la seva cambra. La nova cambra de boira magnètica és de grans dimensions ($\sim 28 \times 56 \times 12.7 \text{ cm}^3$) per afavorir la presència de més esdeveniments, i també per aconseguir traces més llargues que milloraran les estimacions dels moments. El camp magnètic disponible també és elevat (7000 G) i un recobriment tèrmic de la cambra permet que a més sigui molt uniforme en tot el seu volum. Aquesta millora el permetrà controlar les distorsions en les traces fins a un radi de curvatura de 100 m, cosa que es traduirà en la possibilitat de detectar partícules de moment elevat (fins a $10 \text{ GeV}/c$).⁵⁶

El treball de R. W. Thompson començarà a ser reconegut a partir del 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), quan s'enfronta amb 41 exemples de V^0 als resultats de la competència poderosa de Caltech i de Berkeley i tanmateix en surt airós. Steinberger al Fermilab (1985) ens explica el seu record d'aquesta presentació:

I would like to recall here an incident at the 1952 Rochester conference, in which the puzzle of the neutral V 's was instantly clarified. It was the session on the neutral V particles. Anderson was in the chair, but J. Robert Oppenheimer was dominant. He called on his old friends, Leighton from Caltech and W. B. Fretter from Berkeley, to present their results, but no one was much the wiser after that. Some in the audience, clearly better informed than I was, asked to hear from Robert W. Thompson from Indiana, but Oppenheimer did not know Thompson, and the call went unheeded. Finally there was an undeniable insistence by the audience, and reluctantly the lanky young midwesterner was called on. He started slowly and deliberately to describe his cloud chamber, which in fact was especially designed to have less convection than previous chambers,

⁵⁵Els dos físics havien coincidit a Los Alamos. La primavera del 1946, a B. Rossi li ofereixen una plaça de professor al MIT i a R. W. Thompson la possibilitat de realitzar-hi el doctorat. No és d'estranyar que les habilitats tècniques de R. W. Thompson vinguessin afavorides per la seva etapa a Los Alamos. Com Rossi (1990, 101) explica:

Four young physicists had come with me from Los Alamos: Herbert Bridge, Mathew Sands, Robert Thompson, and Robert Williams. They formed the core of the group which soon grew, as other young scientists became interested in joining it. The first to do so were John Tinlot and Robert Hulsizer, who, during the war, had worked on the development of radar at the Radiation Laboratory of MIT. Like their four colleagues from Los Alamos, they had come to MIT as Ph.D. candidates. But, because of their experience in war work, all six were much better prepared for independent research activity than the average graduate student.

⁵⁶Recordem que, fins el moment, la majoria de desintegracions V^0 detectades eren tan energètiques que els fragments observables es trobaven a valors prop de la ionització mínima detectable amb el mètode de la cambra de boira, cosa que dificultava el coneixement de les masses d'aquests fragments. Aquesta indeterminació havia ajudat en gran manera a complicar la classificació dels esdeveniments V^0 . Amb la cambra d'Indiana s'intentarà suplir les dificultats per calcular la ionització amb les millores en la curvatura.

an improvement crucial to the quality of the measurements and the importance of the results. Oppenheimer was impatient with these details, and sallied forth from his corner to tell this unknown that we were not interested in details, that he should get on the results. But Thompson was magnificently imperturbable: “Do you want to hear what I have to say, or not?” The audience wanted to hear, and he continued as if the great master had never been there. A few minutes later, Oppenheimer could again no longer restrain himself, and tried again, with the same effect. The young man went on, exhibited a dozen well-measured V^0 's, and, with a beautiful and original analysis, showed that there were two different particles, the $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ and the $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. The θ^0 (θ for Thompson) is the present K^0 .⁵⁷

Però malgrat l'entusiasme que mostra Steinberger, no serà fins uns mesos després, en el 3r congrés Rochester (18–20 de desembre de 1952), que el poder del seu mètode d'anàlisi quedarà perfectament establert.

Concretant la polèmica present a finals d'aquest 1952 pel que fa als possibles modes de desintegració de la V^0 , Manchester havia proposat:

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (46 \pm 6) \text{ MeV}$$

$$V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + (122 \pm 13) \text{ MeV}$$

Però Caltech no accepta el segon mode i prefereix dividir el primer en tres possibilitats:

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (35 \pm 3) \text{ MeV}$$

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (75 \pm 5) \text{ MeV}$$

$$V_1^0 \rightarrow X^\pm + \pi^\mp + (\approx 60) \text{ MeV}$$

Altres desintegracions V^0 en tres secundàries tampoc estan absolutament descartades.⁵⁸ Davant aquesta complexitat, R. W. Thompson proposarà una nova manera de sistematitzar els resultats experimentals, basat en les variables α , Q i p_t que ja eren habituals en les anàlisis precedents. Conscient, però, que les dificultats es troben en els propis experiments, combinarà l'anàlisi estadística amb la millora del seu muntatge experimental, per tal d'obtenir mesures més fiables en les desintegracions V^0 .

Thompson buscarà una representació geomètrica per classificar els esdeveniments V^0 de manera que no calgui inferir *a priori* les masses de primàries ni de secundàries. Aquesta idea és la culminació de l'intent d'eliminar al màxim les hipòtesis sobre els possibles modes de desintegració de les V^0 , lligades a la manca de resolució experimental.

El primer pas per minimitzar aquestes assumpcions és el coneixement genèric de les relacions que s'estableixen, a partir de la conservació d'energia-moment, en la desintegració

⁵⁷Steinberger (1989), 317. Cal notar que tot i que en el relat de Steinberger sembla que Leighton es trobés en el congrés, en realitat és Fretter qui exposarà els resultats del grup de Caltech en el seu nom.

⁵⁸Notem que estem mantenint la nomenclatura original que presenta quatre elements diferents amb el mateix subíndex V_1^0 perquè malgrat pugui induir a confusió és significativa de la confusió a l'època.

en vol d'una partícula inestable de massa M en dos fragments secundaris de masses m_+ i m_- . Comencem per l'equació de l'energia:

$$\sqrt{P^2 + M^2} - \sqrt{p_+^2 + m_+^2} - \sqrt{p_-^2 + m_-^2} = 0,$$

on P ve donat per:

$$P = \sqrt{p_+^2 + p_-^2 + 2p_+p_- \cos \phi}$$

Eliminant P entre elles el resultat és una equació que de forma funcional es pot expressar com:

$$h(M, m_+, m_-; p_+, p_-, \phi) = 0,$$

que es pot entendre com l'equació d'una família de superfícies en l'espai (p_+, p_-, ϕ) de valors observats en el laboratori, que té com a paràmetres (M, m_+, m_-) , característics de la desintegració. Així, cada desintegració observada es pot representar per un punt en l'espai definit pels tres valors (p_+, p_-, ϕ) . Tots els punts representatius d'un mode de desintegració determinat formen una superfície que caracteritza la desintegració i permet avaluar-ne els paràmetres (M, m_+, m_-) . Aquestes superfícies que es defineixen rebran el nom de superfícies Q .⁵⁹ Per tant, els esquemes de desintegració de les V^0 semblen poder determinar-se sense necessitat de conèixer la natura dels fragments secundaris.⁶⁰ No obstant això, cal buscar la forma de construir aquestes superfícies de manera que tinguin un significat físic fàcilment reconeixible. Thompson, familiaritzat amb les anàlisis precedents en funció de les variables α , Q i p_t , canvia l'espai (p_+, p_-, ϕ) per la nova triada $(\alpha, p_t, 1/P)$. Amb la nova tria, l'equació de la família de superfícies Q pren la forma:

$$\frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{4p'^2(\frac{1}{M^2} + \frac{1}{P^2})} + \frac{p_t^2}{p'^2} = 1,$$

o bé:

$$\frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{(\frac{2p'}{\beta M})^2} + \frac{p_t^2}{p'^2} = 1,$$

per a les quals els nous paràmetres $(M, \bar{\alpha}, p')$ replacen els valors anteriors (M, m_+, m_-) , en tant que paràmetres de la família de superfícies Q .

⁵⁹Donats dos fragments m_+ i m_- la posició dels punts representatius de constant Q és un membre de la família.

⁶⁰En realitat s'intenta eliminar la dificultat d'obtenir directament de la fotografia la massa de les secundàries de les mesures de la ionització i l'abast o la curvatura, especialment per la dificultat de computar la ionització en partícules molt ràpides. Ara, tan sols una d'aquestes tres mesures sobre les traces secundàries que permeti estimar el moment serà suficient per determinar el mode de desintegració.

Cal notar que el mètode és igualment aplicable per al cas de les V^\pm . En aquest cas, les variables escollides podrien ésser el moment de la primària, el moment de la secundària carregada i l'angle. El punt essencial és que les coordenades en l'espai de desintegració han de ser una triada de quantitats que sols siguin funcions de tres directament observables, i per tant no depenguin de les masses assumides o altres paràmetres bàsics de la desintegració.

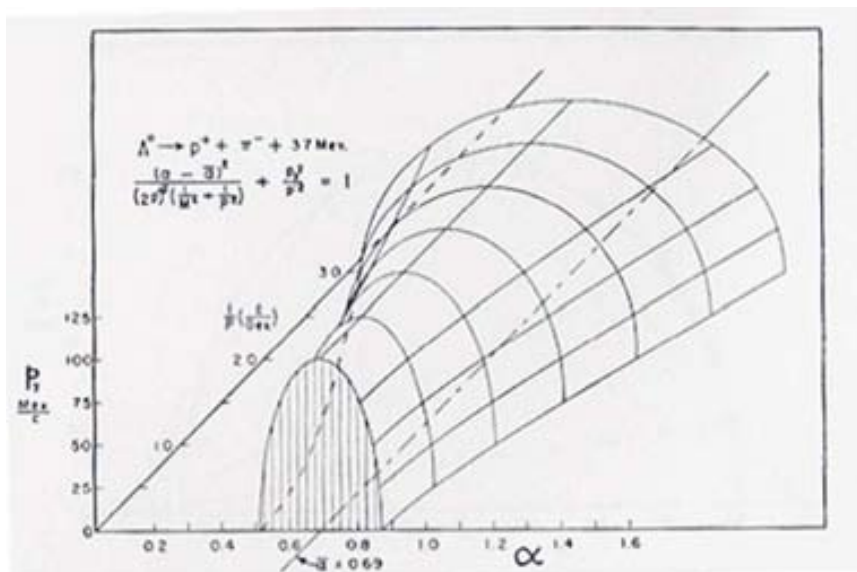


Figura 3.2: Exemple de representació de la superfície Q en l'espai $(\alpha, p_t, 1/P)$ per a la desintegració $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37 \text{ MeV}$.

Tot i que la tria sembla complicar encara més la interpretació, el cert és que d'aquesta manera les superfícies Q tenen seccions paral·leles al pla (α, p_t) el·líptiques, amb l'eix vertical de valor constant:

$$p_t = p'_t,$$

cosa que ens determina el moment en el sistema centre de masses, i centrades a:

$$\alpha = \bar{\alpha} = \frac{m_+^2 - m_-^2}{M^2}.$$

D'altra banda, l'eix horitzontal, paral·lel a l'eix α , val:

$$2p'_t \left(\frac{1}{M^2} + \frac{1}{P^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{2p'_t}{\beta M}$$

que s'aproxima al valor $\frac{2p'_t}{M}$ per a velocitats relativistes ($\beta \rightarrow 1$), o el que és el mateix quan $1/P \rightarrow 0$.

Per tant, per a desintegracions relativistes com són la majoria de desintegracions de les noves partícules, la forma límit de la secció el·líptica pot usar-se com una representació bidimensional de la corba Q , d'eixos α - p_t . Aleshores, donada una desintegració a dos cossos i un valor constant d'aquesta β , els valors α i p_t determinats experimentalment conformen una el·lipse. A partir d'aquesta el·lipse es poden trobar els paràmetres $\bar{\alpha}$, p_t i M que caracteritzen la desintegració.

Si la desintegració fos a tres cossos, és a dir, si una tercera partícula (neutra) fos produïda en la desintegració, aleshores els punts experimentals es dispersarien per tot el pla (α, p_t) .

Les primeres representacions el·líptiques de les dades obtingudes per la Universitat d'Indiana són exposades al 3r congrés Rochester (18–20 de desembre de 1952). Els resultats gràfics ja serveixen per donar una certa opinió sobre la polèmica iniciada al voltant de la V^0 .⁶¹

The data suggest a fit by a pair of ellipses corresponding to $p+\pi+37$ MeV and $\pi^+ + \pi^-+210$ MeV although Thompson emphasized that the latter decay scheme is suggested for purposes of comparison only. Present evidence cannot exclude other possibilities or a three body decay, etc. For example, the fit with $(\begin{smallmatrix} \pi \\ \mu \end{smallmatrix} \mu)$ is almost as good. The calculated Q-values from the events observed with the new magnet which lie near the new $\pi^+ + \pi^-$ curve lay between 205 and 216 MeV. This is higher than the 120 MeV reported by the Manchester group.⁶²

En línies generals, la representació obtinguda es desvia clarament de la $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 122$ MeV trobada a Manchester, i mostra resultats que correspondrien a un valor molt més elevat de Q (210 MeV) per al mateix tipus de desintegració en dos pions. Davant d'aquestes evidències, en la discussió posterior, es fa notar:

Sard said that Manchester had revised their estimate of the Q value for the V_2^0 upward.⁶³

Cosa que mostra com les idees de Thompson han quallat i com el grup de Manchester està disposat a aproximar resultats.

D'altra banda, pel que fa a la desintegració de la suposadament millor coneguda V_1^0 , de nou els resultats difereixen dels trobats a Manchester per aquest mode de desintegració ($V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 46 \pm 6$ MeV), aquest cop a la baixa respecte el valor de Q ($V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37$ MeV), i es mostren en millor acord amb el primer dels modes presentat per Caltech ($V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 35 \pm 3$ MeV). No obstant això, la coincidència amb els resultats de Caltech tampoc és total, perquè Thompson es mostra favorable a la desintegració en dos pions que des de Caltech es rebutja, i tampoc mostra cap indicatiu de la suposada $V_3^0 \rightarrow X^\pm + \pi^\mp + (\approx 60)$ MeV.⁶⁴

⁶¹Vegeu apèndix A, fig. A.25.

⁶²Thompson (1952b), 40.

⁶³Sard (1952), 40.

⁶⁴El subíndex 3 servirà per distingir-ho temporalment de les altres possibilitats definides des de Manchester $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ i $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, per a les quals es discuteix el valor de Q que porten associat, però tenen bastant definida la natura de les secundàries. També, tot i que no encara en aquest 3r congrés Rochester (18–20 de desembre de 1952) però si a principis del 1953, l'aparició d'un possible nou valor de Q per a la V_2^0 contribuirà que, a voltes, aparegui un nou subíndex 4. Resumint es tindrà:

$$\begin{aligned} V_1^0 &\rightarrow p + \pi^- + \sim 37 \text{ MeV} \\ V_2^0 &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \sim 122 \text{ MeV} \\ V_3^0 &\rightarrow X^\pm + \pi^\mp + \sim 60 \text{ MeV} \\ V_4^0 &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \sim 210 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Sortosament, la polèmica se simplificarà una mica en el congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), quan

A finals del 1952, doncs, la natura de la V^0 no està en absolut definida. L'evolució de la seva anàlisi permet veure les tensions entre els diferents grups que la tenen com objecte d'estudi i permet, també, estudiar els recursos que es posen en joc per anar resolent el trencaclosques. De bon principi, les dificultoses mesures de la ionització, que combinades amb l'abast o el moment determinarien la natura de les secundàries involucrades en les desintegracions V^0 , van orientant progressivament les investigacions dels diferents grups cap a una millor determinació de la dinàmica de la desintegració. De resultes, neixen els recursos de la metodologia experimental enfocats a l'anàlisi estadística en funció de paràmetres com α , Q i p_t . Però desviar l'atenció principal de les mesures d'ionització significa també prioritzar-ne d'altres com l'abast o la curvatura. Conscient d'aquesta necessitat, Thompson no sols contribuirà amb la seva representació geomètrica de les dades sinó que intentarà optimitzar el muntatge experimental per millorar les mesures dels moments.⁶⁵

3.2 Els mesons pesats

Actually, the distinction between heavy mesons and V particles is purely phenomenological at the present time and is determined chiefly by the experimental technique which is employed. If a photographic emulsion is used, the unstable particle has an excellent chance of coming to rest before decaying, while a cloud chamber favors decay in flight (provided, of course, that the lifetime is in the appropriate range).

Marshak (1952), 351.

3.2.1 Bristol (1951): τ , κ , χ

Després de l'explosió de noves partícules trobades en cambra de boira el 1950 pel grup de Caltech, el treball en emulsions, que ja n'havia donat alguns exemples interessants, va quedar temporalment menystingut. Des de Bristol, però, intentaran sobreposar-se a l'èxit aconseguit per les cambres i centrar l'atenció en els casos més ben definits que havien donat aquestes emulsions. D'entre aquests casos millor definits, l'exemple més paradigmàtic

Manchester reconeix que el valor de Q del seu V_2^0 és tan baix per haver subestimat els errors i s'arribarà a unir amb el V_4^0 de Thompson. Bagnères també evidenciarà la manca de consistència de la proposta V_3^0 de Caltech.

⁶⁵Jugarà el paper important, també, de mostrar a la resta dels grups aquesta necessitat i iniciar un programa de millores en la cambra encaminades a minimitzar els errors introduïts en els càlculs de la curvatura. El seu exemple sentarà precedent i influirà en la resta dels grups en un canvi de la metodologia experimental, centrat en un costum de realitzar autotests de les mesures per assegurar-ne els resultats.

corresponia a la desintegració d'una primària carregada en tres secundàries carregades, trobada pel grup el 1949 en les investigacions al Jungfraujoeh. Aquest primer exemple s'etiquetarà amb el nom τ que inicialment ja havia servit per definir els nous esdeveniments. El 1951, investigacions del grup de Bristol al Jungfraujoeh detectaran un nou exemple de τ . El cas servirà per confirmar la τ com l'esdeveniment millor conegut en emulsions i els esforços se centraran en assegurar que les seves secundàries carregades quedin fermament establertes com pions. La nomenclatura τ passarà a designar definitivament i exclusiva aquest esdeveniment característic:

[...] three particles appeared to diverge from a point at the end of the range of another particle, and the directions of motion of the three emergent particles were co-planar. [...] We therefore believe that the existence of these particles with their distinctive mode of decay can now be taken as established. It will be convenient to refer to them as τ -mesons.⁶⁶

L'estiu de 1952, les universitats de Bristol, Pàdua i Roma, en col·laboració amb altres universitats europees, organitzen expedicions a Sardenya (40° N) per tal de llançar globus carregats d'emulsions nuclears que aconseguissin alçades de fins a 30 Km.⁶⁷ Precisament els primers resultats analitzats des de les Universitats de Roma i Pàdua serviran perquè cadascuna evidenciï un nou exemple de mesó τ . Al 3r congrés Rochester (18–20 de desembre de 1952), Amaldi, de la Universitat de Roma, serà l'encarregat d'exposar les evidències conegudes fins el moment:

	Q
Bristol ₁	65±6 MeV
Bristol ₂	75±4 MeV
London ₁	76±15 MeV
London ₂	69±8 MeV
London ₃	73.5±7 MeV
Padua ₁	86.5±5 MeV
Rome ₁	75±4 MeV

These Q values were obtained under the assumption that all three particles are mesons. Using this assumption ($\bar{Q}=74\pm 2.5$ MeV; $m_{\pi}=277.4\pm 1.1 m_e$) a mass of $979\pm 4 m_e$ is obtained by averaging the above results.⁶⁸

A partir d'aquest moment, Amaldi serà l'encarregat de resumir en congressos posteriors els progressos pel que fa a la partícula τ . A Bagnères (6–12 de juliol de 1953) analitzarà 10 casos, a Pàdua (12–15 d'abril de 1954) mostrarà 40 exemples del treball en emulsions, a Pisa (12–18 de juny de 1955) tabularà 104 exemples provinents de cambres i emulsions, ara ja detectats en raigs còsmics i acceleradors.

Tornant al 1951, malgrat l'extraordinària troballa dels mesons τ , la investigació fonamental a Bristol seguirà enfocada en el seu èxit més recent: l'anàlisi i diferenciació dels mesons de raigs còsmics π i μ . Amb aquest propòsit, el 1949, havien posat a punt una

⁶⁶Fowler *et al.* (1951), 1040.

⁶⁷Vegeu cap. 5, sec. 5.1.2.

⁶⁸Amaldi (1952), 50.

nova emulsió sensible a electrons (Ilford G5), que va permetre estudiar la distribució energètica dels electrons secundaris emesos en la desintegració del mesó μ . Els experiments seguiran realitzant-se al Jungfrauoch, amb les làmines, de 400μ de gruix, cobertes per una làmina de plom de 30 cm. En principi, la protecció de la làmina de plom estava destinada a eliminar les cascades electròniques que haurien embrutat la impressió de les plaques, i se centrava la investigació en el rang dels muons que, feblement interaccionants amb aquest plom, arribarien a l'emulsió per desintegrar-s'hi.

Això no obstant, la làmina de plom permetia també el pas de partícules altament energètiques, o n'afavoria la creació en interaccions nuclears, que tenien com a secundàries pions, o altres partícules que podien visualitzar-se en l'emulsió. La majoria la travessava sense desintegrar-se i mostrava una traça d'ionització mínima que en dificultava qualsevol mesura. Ocasionalment, però, alguna d'aquestes partícules en creuar l'emulsió arribava a desintegrar-s'hi. Amb les emulsions sensibles a electrons (en general sensibles a partícules relativistes), aquestes secundàries altament energètiques també mostraven la traça.

Precisament en aquest estudi del grup de Bristol al Jungfrauoch el 1951 sobre la distribució energètica dels electrons emesos en la desintegració del μ , O'Ceallaigh va detectar dos casos excepcionals.⁶⁹

En el primer cas visualment l'esdeveniment presentava el mateix aspecte que una típica desintegració μ -e. Mitjançant l'observació de la dispersió s'avaluava l'energia d'aquests electrons secundaris. Però a l'establir l'energia de la secundària de l'esdeveniment excepcional, suposant que es tracta d'un esperat electró secundari, el resultat és ~ 240 MeV, més de 4 cops l'energia màxima detectada per als electrons de les desintegracions muòniques de l'experiment.⁷⁰

Davant l'excepcionalitat, O'Ceallaigh se centra en la investigació d'aquest esdeveniment. La traça de la primària, que etiqueta com κ_1 , té una longitud major de 4000μ , cosa que n'afavoreix una bona estimació de la massa de les mesures de la dispersió i l'abast. El resultat trobat fou que la primària tenia una massa de $1260 \pm 290 m_e$. Aquesta massa també la recalculen de la mesura de la ionització juntament, de nou, amb l'abast. En aquest cas, $m_\kappa = 1385 \pm 200 m_e$, en acord amb el primer càlcul trobat.

Pel que fa a la traça secundària, la densitat de grans que ens determina la ionització no és distingible de la causada per qualsevol partícula amb ionització mínima, per tant no és possible una determinació acurada de la seva massa. Això no obstant, la ionització mínima combinada amb la dispersió que ens ha permès determinar l'energia d'aquesta secundària, ens permet assegurar que tindrà una massa no superior a les $400 m_e$. Amb molta probabilitat, per tant, es tractarà de π o μ secundaris.

⁶⁹Vegeu apèndix A, fig. A.10.

⁷⁰Vegeu Brown *et al.* (1949a, b). Dels muons detectats en les emulsions sensibles a electrons, un 65% es desintegraven amb l'emissió d'un electró del qual es podia distingir la traça. L'energia mitjana d'aquestes secundàries era de 35 MeV, però es detectaven màxims de 50–55 MeV.

La conservació d'E-p obliga també que una o més secundàries neutres siguin emeses en la desintegració. Suposant totes les possibilitats que involucrarien una desintegració a dos cossos, O'Ceallaigh proposa genèricament que la seva partícula κ_1 pot correspondre a:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &\rightarrow \pi \text{ o } \mu + \nu \\ &\quad + \pi^0 \\ &\quad + V_0(800 m_e) \\ &\rightarrow e + \nu \end{aligned}$$

El segon cas excepcional trobat per O'Ceallaigh es presenta com una típica desintegració π - μ -e.⁷¹ Però ara el que xoca és l'abast excepcional del muó secundari, de nou comparant amb els esdeveniments coneguts fins aleshores. L'abast de 1090μ és gairebé el doble de l'abast mig esperat per als muons de les desintegracions del π . A l'estudiar la traça de la partícula primària —batejada com κ_2 — pels mateixos mètodes que en el primer cas, es conclou que no es pot tractar d'un pió, perquè la massa computada és $m_{\kappa_2} = 1125 \pm 140 m_e$. El muó secundari de la desintegració es para en l'emulsió i emet el que suposadament és un electró, tot i que la traça és massa curta per ser identificada perfectament.

Un cop assumit que efectivament es tracta de la desintegració d'una nova partícula, sorprèn la diferència d'energies que presenten els dos muons secundaris de cada cas, κ_1 i κ_2 . Aquest fet fa pensar que si s'intenten associar al mateix tipus de partícula ambdós esdeveniments, en la seva desintegració possiblement hi haurà involucrada una tercera secundària neutra. Per tant, suposant el cas mínim de dues neutres acompanyant al muó secundari, es pot pensar en un mode de desintegració comú dels dos casos com:

$$\kappa \rightarrow \mu + ?^0 + ?^0$$

Però es pot especular sobre la natura d'aquestes secundàries neutres atenent a arguments aliens a l'observació. Així, apel·lant a la possible igualtat entre totes les observacions de mesons pesats, es pot suposar que κ és un mode de desintegració alternatiu de la mateixa partícula que es desintegra en el mode ja conegut τ . Per a la τ és ja força provada la desintegració en tres pions secundaris, d'on s'infereix que haurà de tenir spin enter. Per tant, per conservació del moment angular de la reacció, si κ representa un mode de desintegració diferent de la mateixa partícula, κ també haurà de tenir spin enter. Però del mode κ es reconeix clarament el muó secundari, que és un fermió. Aleshores, les dues secundàries neutres addicionals, presents en la desintegració, no podran ésser iguals: una haurà de ser fermiònica i l'altra bosònica. D'aquí que es proposi un neutrí i un pió neutre com a secundàries:

$$\kappa \rightarrow \mu + \nu + \pi^0$$

⁷¹Vegeu apèndix A, fig. A.10.

Malgrat aquesta proposició, O'Ceallaigh no està convençut que els esdeveniments τ i κ corresponguin a una mateixa partícula:

The results suggest that the κ -particles are about 1.3 times more massive than the τ -particles, but the inaccuracies in the experimental values are such that the possibility cannot be excluded that they represent alternative modes of decay of particles of the same type.⁷²

Els exemples d'O'Ceallaigh representen, doncs, les primeres evidències d'un mode de desintegració del mesó K amb un muó secundari perfectament definit, que correspondrà segurament al posteriorment anomenat $K_{\mu 3}^+$ ($\kappa \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu$), tot i que no es pot descartar que el primer cas sigui el primer exemple del que s'anomenarà $K_{\mu 2}^+$ ($\eta \rightarrow \mu^+ + \nu$), donat l'elevat moment del muó secundari.⁷³

Això no obstant, amb perspectiva, podem copsar la feblesa de l'argument que associa els dos esdeveniments a una desintegració a tres cossos per la diferència d'energia de les secundàries respectives. L'argument és d'economia en les suposicions. En lloc de proposar dues partícules diferents, amb desintegracions en dos i tres secundàries, és menys arriscat pensar en una única nova partícula, que no pot correspondre a una desintegració a dos cossos perquè la secundària visible no és monoenergètica. Més endavant, nous exemples acabaran per diferenciar una desintegració a tres cossos d'una a dos cossos, però per això caldrà l'aparició en escena de les cambres multilàmines i les dobles cambres.⁷⁴

Pel que fa a la relació d'aquests esdeveniments amb les partícules V trobades en cambres de boira, no es pot descartar que es tracti del mateix tipus d'esdeveniments, però:

These considerations do not exclude the possibility that the various charged V and κ particles, which emit a single charged secondary particle, represent a variety of modes of decay of particles of the same type. But it would be surprising to find several different modes, occurring with approximately equal probability, such as the limited experimental material suggests.⁷⁵

Bandejant la τ com el mesó pesat més clarament definit de les deteccions en emulsions mercès a la singular desintegració en tres secundàries, el problema començarà a enfocar-se en aquests esdeveniments que, com en els casos κ d'O'Ceallaigh, sols presentaven una traça secundària.

Malgrat les dues primeres observacions d'aquest tipus es realitzen al Jungfraujoeh, l'augment d'esdeveniments de mesons pesats a una secundària visible trobats a Bristol començarà a ser significatiu quan canviïn l'alta muntanya per les exposicions en globus a gran alçada. A principis de 1953, el laboratori computa fins el moment uns 60 casos de mesons pesats primaris que es desintegren donant una única secundària carregada.

⁷²O'Ceallaigh (1951), 1038.

⁷³Vegeu apèndix C.

⁷⁴Vegeu cap. 5, sec. 5.1.1.

⁷⁵O'Ceallaigh (1951), 1038.

D'aquests esdeveniments, sols 20 permeten mesures de la massa d'una de les dues traces, primària o secundària, o d'ambdues alhora.⁷⁶ Aquest augment de l'estadística ja obliga a replantejar-se la proposició inicial d'un sol mode de desintegració κ .

L'anàlisi dels 20 esdeveniments se centra, primerament, en un estudi de la possible natura de les secundàries. La massa es pot inferir a través de l'estimació de la densitat de grans d'aquestes traces secundàries junt amb la mesura de la dispersió múltiple que presenten. En analitzar els valors obtinguts a través d'aquest mètode arriben a la conclusió que en 7 casos no poden computar la massa de la secundària perquè la densitat de grans és indistingible de la mínima o perquè no es pot estimar la dispersió de la traça, a causa principalment de la seva longitud reduïda. En 8 dels 20 casos restants, on s'inclouen els dos exemples d'O'Ceallaigh (1951), la secundària carregada és més probablement un muó, tot i que, a vegades no es pot excloure totalment que es tracti de pions o, fins i tot, d'electrons. En els 5 casos restants, la secundària s'identifica amb un pió.

Com a mínim, doncs, els darrers 5 casos s'han de redefinir com corresponents a un nou mode de desintegració. El còmput del moment de les secundàries carregades mostra com en tots els casos els valors són similars i distribuïts en un rang entre 160 i 200 MeV, cosa que afavoreix entendre el nou mode, que batejarem com χ , com una desintegració a dos cossos:

$$\chi^\pm \rightarrow \pi^\pm + N^0,$$

⁷⁶Aquesta informació es concreta en una de les reunions habituals del grup de Bristol, celebrada el 29 de gener de 1953. Menon, O'Ceallaigh (1954, 293) presentaran aquests 20 casos de nous mesons pesats, trobats del 1951 ençà. És interessant veure com 15 dels exemples es troben en aquests globus a gran alçada, confirmant així, l'augment d'esdeveniments amb l'alçada. Notem que ja usen per a descriure'ls la nomenclatura K. Conservant aquesta nomenclatura original, la taula mostra també l'observador que detecta l'esdeveniment. Entre aquests observadors, la dona de C. F. Powell i la de M. G. K. O'Ceallaigh:

event	observer	exposure
K1	Miss Ann Stradling	JJT
K2	Mrs Isobel Powell	JJT
K3	Miss Anne Littlejohns	JJT
K4	Miss Margaret Stott	HA34
K5	Miss Anne Littlejohns	JjCu
K6	Mrs C. O'Ceallaigh	JJT
K7	Miss Rosemary Mitchell	HA46
K8	Mr R. R. Daniel	HA30
K9	Miss Rosemary Mitchell	HA46
K10	Mrs M. L. Andrews	HA46
K11	Miss Ann Stradling	HA34
K12	Mr P. H. Fowler	LR
K13	Miss Rosemary Mitchell	HA46
K14	Miss Rosemary Mitchell	HA46
K15	Miss Rosemary Mitchell	HA46
K16	Miss Anne Littlejohns	CM
K17	Dr G. G. Harris	CM
K18	Miss Anne Littlejohns	CM
K19	Mrs D. M. Ford	CM
K20	Mrs D. M. Ford	CM

The details of the exposures are as follows:

JJT: Ilford G5 emulsions, 400 μ thick, exposed for 30 days at the Jungfrauoch (11000 ft.) under 30 cm of lead.
 JjCu: Ilford G5 emulsions, 600 μ thick, exposed for 30 days at the Jungfrauoch (11000 ft.) under 10 cm of copper.
 HA30: Ilford G5 emulsions, 400 μ thick, exposed for 5 h at \sim 65000 ft.
 HA34: Ilford G5 emulsions, 400 μ thick, exposed for 5 h at \sim 65000 ft. under 10 cm of lead.
 HA46: Ilford G5 emulsions, 600 μ thick, exposed for 7 h at \sim 90000 ft.; stack of 34 plates.
 LR: Ilford G5 emulsions, 600 μ thick, exposed for 5 h at \sim 67000 ft.
 CM: Ilford G5 emulsions, 600 μ thick, exposed for 50 h between 30000 and 42000 ft., with 14 cm of iron on the top and 9 cm of iron on all sides, in a Comet jet airliner.

on N^0 indica una secundària neutra no determinada. Davant aquesta assumpció, Menon i O'Ceallaigh notaran la importància de noves aportacions per confirmar la seva proposta:

It will be possible to verify the correctness of this interpretation only by similar observations of greater statistical weight, and the possibility that more than two secondary particles are involved in the decay cannot, at present, be excluded.⁷⁷

La proposta suposarà el descobriment del mode de desintegració del mesó K que més endavant s'anomenarà $K_{\pi^2}^+(\chi)$ ($K \rightarrow \pi^+ + \pi^0$).⁷⁸

Pel que fa als exemples del mode κ , que confirmen els dos esdeveniments del 1951, l'augment de l'estadística reforça l'assumpció que es tracta de desintegracions a tres cossos, ja que, en aquest cas, el moment de les secundàries es troba distribuït en un rang molt més ampli, 10–170 MeV/c. Es confirma per tant,

$$\kappa \rightarrow \mu + ?^0 + ?^0.$$

Però la polèmica sobre els modes de desintegració del mesó pesat no es restringirà al treball realitzat en emulsions, sinó que un nou tipus de muntatge en cambra de boira entrarà en joc a partir del 1951 al MIT, i aportarà noves dades.

3.2.2 Les primeres partícules S a la cambra multilàmines del MIT

De bell antuvi les cambres de boira s'havien mostrat reticents a revelar la presència de noves partícules carregades en igual proporció que les neutres. Habitualment, aquestes partícules V, neutres i carregades, mostraven la seva desintegració en vol en l'interior de la cambra i s'intentava una anàlisi de les traces obtingudes per tal de determinar els paràmetres de la desintegració que ens portarien al coneixement de la seva massa. Per a l'obtenció d'aquests paràmetres es posava en joc l'estudi de la ionització de la traça, mitjançant el recompte de gotes, el seu abast i/o la seva curvatura per la presència d'un camp magnètic.

Aviat, però, es va observar que la informació que es podia obtenir venia limitada principalment per la determinació de l'abast de la traça i de l'energia de les partícules. Majoritàriament, les traces forcades neutres i carregades abandonaven la cambra sense arribar al final del seu abast i amb energies elevades que, molt sovint, no permetien diferenciar-les de la ionització mínima. Per aquest motiu, a partir del 1951 es comença a pensar en l'aplicació d'un muntatge de multilàmines a l'interior de la cambra de boira que afavorís l'aturada de les noves partícules.⁷⁹

⁷⁷Menon, O'Ceallaigh (1954), 303.

⁷⁸Fins l'any següent no es detectarà la desintegració del π^0 en una doble cambra a Princeton i quedarà el mode perfectament establert.

Recordem que la primera V^+ detectada per Rochester i Butler (1947) també podria correspondre a un esdeveniment d'aquest tipus, tot i que sembla més probable que es tractés d'un $K_{\mu^2}^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ per la poca interacció de la secundària carregada.

⁷⁹Vegeu cap. 5, sec. 5.1.1.

D'entrada, el muntatge multilàmines afavoriria la creació d'un nombre major de primàries d'esdeveniments V , i amb molta més probabilitat permetria observar en la mateixa cambra la desintegració en V i la interacció nuclear que l'havia vist néixer en alguna de les plaques superiors. En el cas de les V^0 aquesta característica permetia assegurar que el pla format per les secundàries s'intersecava amb l'origen de la primària, resolent que es tractava de desintegracions a dos cossos; també facilitava l'obtenció dels angles de les traces secundàries respecte la direcció de vol de la primària, angles importants en la determinació del moment de la primària.⁸⁰

El poder de parada de la cambra amb les làmines afavoriria també el coneixement de les traces secundàries que amb molta més probabilitat s'aturarien en el seu interior. Sovint, a més de permetre determinar-ne l'abast, l'aturada de les secundàries en les plaques permetia fer inferències visuals sobre la seva natura. Així, si al final de l'abast s'observaven cascades electròniques, podia tractar-se de π^0 , fotons o electrons. Per contra, l'absència d'interacció portava a pensar que en alguns casos les secundàries eren muons.

El projecte de detecció de les noves partícules contingudes en les ruixades penetrants s'inicia al MIT de la mà de Bruno Rossi. Rossi comença l'activitat professional a la seva Itàlia natal: estudia a les universitats de Pàdua i Bolonya, on es doctora el 1927, i tot seguit arriba a la Universitat de Florència, com a professor ajudant de física experimental de l'Institut de Física a Arcetri. Serà a Arcetri que coneixerà, entre d'altres, a G. Bernardini i a G. Occhialini i on sabran del descobriment de la radiació còsmica i s'iniciaran en la seva investigació. El 1932 obté una càtedra de física a Pàdua, on treballarà fins el 1938, any que es veu obligat a deixar Itàlia. La primera parada en la seva fugida és Copenhague, mercès a la hospitalitat de N. Bohr, que contactarà amb P. M. S. Blacket, el qual oferirà una beca a Rossi per a una estada a Manchester. Un cop a Manchester, durant els primers mesos de 1939 treballarà amb Jánossy sobre l'absorció en plom de la component fotònica de la radiació còsmica, com una comprovació de la teoria de Bethe i Heitler, i amb Blackett sobre l'absorció dels mesotrons en l'atmosfera. Finalment, el juny de 1939 marxa cap als EUA. Passa un temps a Nova York amb E. Fermi, que havia arribat uns mesos abans i amb H. Bethe, un vell conegut ja d'Arcetri. El juliol de 1943 és cridat per formar part del projecte de Los Alamos, on coneixerà alguns dels físics que l'acompanyaran en la seva recerca al MIT: H. Bridge, M. Sands, J. Tinlot, R. W. Thompson, etc.

La primavera de 1946, després de la contribució a Los Alamos, li és oferta una posició

⁸⁰Si es coneixen els moments d'ambdues secundàries, p_+ i p_- , i l'angle ϕ que formen les seves traces, el moment P de la primària queda determinat de la relació:

$$P = \sqrt{p_+^2 + p_-^2 + 2p_+p_- \cos \phi}$$

En aquells casos que sols es pot determinar un dels moments de les secundàries, si es coneix la línia de vol de la primària neutra es coneix en realitat els dos angles ϕ^+ i ϕ^- entre la línia de vol de la primària i cada secundària. Amb aquestes dades també es pot determinar el moment de la primària, afegint a la relació anterior l'expressió $p_+ \sin \phi_+ = p_- \sin \phi_-$.

de professor al MIT, on reemprendrà la recerca experimental sobre la radiació còsmica. Com per a la majoria de laboratoris que feien recerca en raigs còsmics en aquell moment, una de les incògnites més interessants era determinar l'origen de les ruixades penetrants i els elements que les formaven. D'entre aquests productes eren força evidents les cascades electròniques i les partícules penetrants. Calia, però, determinar la natura d'aquestes partícules penetrants, d'entre les quals, s'acabava de determinar l'existència de nous elements:

The search for these 'new particles', and attempts to establish their nature and behaviour became one of the most fascinating and demanding activities of our group.⁸¹

Les activitats de recerca del MIT, en el camp de les noves partícules, es desenvoluparan al mateix laboratori i a Echo Lake (Colorado, 3260 m). La primera cambra multilàmines enfocada a detectar partícules estranyes començarà a donar resultats el 1951. El muntatge consistia en una cambra de boira de grans dimensions ($50 \times 50 \times 18 \text{ cm}^3$) travessada per 11 làmines de plom (o en alguns casos de coure).

Els primers resultats s'identifiquen amb les V trobades en les cambres de boira habituals. Un dels primers exemples mostra una típica V^+ on la secundària queda perfectament determinada com un π^+ , mercès a la visualització per primer cop de la seva desintegració en un μ , conegut plenament de les mesures de dispersió i abast. La interpretació global de l'esdeveniment s'avé a dues possibilitats. D'una banda,

$$V^+ \rightarrow \pi^+ + n,$$

i de l'altra,

$$V^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0.$$

En el primer cas, una estimació de la massa de la primària portaria a un valor major que $2200 m_e$, per tant similar a l'estimació feta per a la $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$. En el segon cas, el límit inferior computat per a la massa de la primària seria de $850 m_e$, compatible, doncs, amb la $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Això no obstant, la dificultat en aquest segon cas és que, donat el muntatge, és difícil explicar que el π^0 no es desintegrés en dos fotons, i la consegüent materialització en dues parelles electró-positró.⁸²

A mesura que les investigacions avançaran, començaran a adonar-se de la complexitat dels fenòmens que involucren les seves observacions. En alguns casos, el medi més dens de la multilàmines resultarà favorable per a la determinació d'electrons i pions secundaris, perquè afavorirà la presència d'interaccions d'aquests amb el material de les làmines. En

⁸¹Rossi (1990), 117.

⁸²Estrictament parlant, aquest exemple suposaria el descobriment del primer $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$, però en tractar-se d'un cas únic i compatible amb una segona possibilitat de desintegració no serà del tot clar. En realitat, el descobriment oficial es produirà poc temps després, en el treball en emulsions dels grups de Gènova i Milà i del seu reconeixement al congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953).

molts casos, però, la manca d'aquesta interacció serà decisiva per fer inviable la suposició d'un electró o un pió secundari:

This particle is heavily ionizing and comes to rest in a lead plate of the chamber, giving rise in this plate to a lightly ionizing particle which traverses five 1/4" lead plates without multiplying and without scattering more than two or three degrees. It is practically impossible to assume that this is an electron of less than 50 MeV, so this cannot be a case of μ -electron decay. That is, an electron of 50 MeV traversing 35 grams per square centimeter of lead would lose 42 MeV by ionization alone, while this particle shows no scattering and emerges from the last plate still at minimum ionization.⁸³

Que la secundària no pugui ser un electró assegura que la desintegració no es pot confondre amb un cas de desintegració μ -e, però el fet que no mostri cap interacció nuclear i una dispersió coulombiana molt petita determina que, probablement, serà un μ :

This particle therefore looks like a kappa one has observed at Bristol, and its mass as estimated from scattering and range is 800_{-400}^{+800} electron masses.⁸⁴

En conjunt, les cambres multilàmines també presentaven dificultats per establir una mesura acurada de la massa de la primària, tot i que ionització, dispersió i abast asseguraven que es tractava d'una primària pesada. La dispersió múltiple a través de diferents làmines també dificultava una mesura acurada de la massa de la secundària, però, des del punt de vista fenomenològic, les cambres multilàmines evidenciarien dos nous trets que ni les emulsions ni les cambres de boira havien aconseguit mostrar: la presència de cascades electròniques associades a algunes d'aquestes secundàries, d'on s'inferirà l'existència de π^0 o γ entre aquestes secundàries, i l'absència majoritària d'interaccions nuclears en les làmines de la cambra, que decantarà la balança cap a la presència de μ secundaris en lloc de π .

Durant el 2n congrés Rochester (11–12 de gener del 1952), Rossi anomena aquest tipus de partícules observades pel seu grup al MIT amb la cambra multilàmines com a “partícules S” (*Stopped Particles*), perquè es paren a l'interior de la cambra. Genèricament, doncs, les partícules S es definiran com a primàries que es paraven en les làmines de la cambra i tot seguit emetien una secundària d'ionització mínima, és a dir, una secundària lleugera molt energètica que podia identificar-se amb π o μ . Immediatament, s'intenta establir quina relació pot existir entre els seus esdeveniments i la resta de noves partícules carregades observades amb altres medis de detecció, les V^\pm que es desintegren en vol en les cambres de boira tradicionals i les K, que s'aturen i desintegren en les emulsions nuclears:

If an attempt is made to identify the S, K, and charged V particles as all the same particle, then they cannot have lifetimes much shorter than 10^{-9} seconds. However, the identification of the decay products of the kappa's as μ mesons and the identification of the decay products of this charged v particles as a π meson makes it impossible to

⁸³Rossi (1952a), 79.

⁸⁴Ibíd.

simplify the pictures to this extent. Furthermore, the mass of the v^+ going to $\pi^+ + \pi^0$ at 850 electron masses is definitely smaller than the S or kappa mass. [...] So, the only simplification possible is the identification of the S and kappa mesons as the same particle.⁸⁵

A finals del mateix any, Rossi representa de nou al grup del MIT al 3r congrés Rochester (18–20 de desembre de 1952). Aquesta vegada presenta els resultats sobre 8 exemples més de les seves partícules S, i 6 de partícules V^\pm . Les mesures de dispersió múltiple i abast sobre aquestes primàries S el porten a una estimació de la seva massa de 1470_{-360}^{+410} . En dos dels 8 casos, les secundàries també s'aturen a l'interior de la cambra, cosa que afavoreix millors mesures de la dispersió i la ionització, encara que sols permet assegurar que es tracta de mesons, però no es pot discernir si π o μ . En aquest cas, resulta d'interès, també, el còmput del moment d'aquestes secundàries: 213 ± 2 MeV/c si és un π , i 184 ± 2 MeV si es considera que és un μ . En la resta de casos una estimació més grollera del moment els fa compatibles amb el valor trobat per aquests dos casos millor definits. La conclusió de Rossi és clara:

From the momentum of the secondary particles these particles are similar to the χ particles of Bristol.⁸⁶

Però Rossi va més enllà pel que fa a l'intent d'identificar els resultats en V carregades dels diferents grups i intenta acostar els resultats obtinguts amb cambres i emulsions. En el seu experiment al MIT ha detectat 6 casos de V^\pm que es desintegren en vol a l'interior de la cambra. En aquests casos arriben a una estimació del moment de les secundàries, a partir del seu abast, que és compatible amb el valor de 212 MeV. Aleshores, Rossi recorda els resultats sobre 20 casos de V^\pm trobats a Manchester: “All of the cases appeared to be consistent with the momentum of 213 MeV/c.”⁸⁷ Però els casos de Manchester tenien un moment transvers compatible amb una desintegració a 3 cossos i els havien identificat amb la possible κ trobada a Bristol. Ara, Rossi intenta mostrar que aquesta anàlisi del moment transvers, en ésser realitzat sobre únicament 14 casos i mostrar grans errors, pot menystenir-se en favor de la seva assumpció que, en realitat, es tracta de desintegracions a dos cossos anàlogues a les V^\pm trobades en la seva cambra multilàmines. Suposant que els exemples de Manchester es reinterpreten com a pions secundaris de la desintegració a dos cossos d'una primària $\chi \rightarrow \pi^\pm + N^0$, el còmput dels moments d'aquests π secundaris són molt similars en els resultats d'ambdós grups.

L'intent d'homogeneïtzació de resultats de Rossi conclou:

⁸⁵Ibíd., 81.

⁸⁶Rossi (1952b), 66. Recordem que el moment de les $\chi^\pm \rightarrow \pi^\pm + N^0$ de Bristol es determinava entre 160 i 200 MeV, mentre que en el mode definit com a $\kappa \rightarrow \mu + ?^0 + ?^0$, el muó secundari tenia un rang de moments molt més extens (10–170 MeV/c). Per tant, la secundària del MIT s'aproxima més als marges de Bristol si se suposa que és un pió (si és una primària χ).

⁸⁷Ibíd., 67.

Rossi said that he and Butler were agreed that most but perhaps not all of the Manchester V^\pm could be χ 's. Rossi concluded that probably all of the S's and many perhaps all of the V^\pm are χ 's.⁸⁸

A finals de 1952, doncs, comença una nova polèmica al voltant de la natura dels mesons pesats trobats en emulsions, les V^\pm trobades en cambres, i les S trobades en cambres multilàmines. De fet, la tensió s'origina amb l'intent d'unificar els resultats obtinguts a través dels diferents mètodes per tal d'obtenir-ne evidències acumulatives. Però la indeterminació pel que fa a la natura i quantitat de secundàries dels diferents esdeveniments és encara molt elevada.

Es pot argumentar com la forma visual de l'esdeveniment juga un paper molt important a l'hora de determinar-lo. Ja hem mencionat com el mesó τ en emulsions serà ràpidament reconegut i reconeixible, el mateix passava amb la V_1^0 i V_2^0 en cambres o la primera partícula cascada $V^- \rightarrow V^0 + \text{mesó}$. Però aquesta percepció visual és de poc servei quan l'esdeveniment simplement mostra una traça primària i una traça secundària, com són els casos habituals de les V^\pm de les cambres de boira, les κ i χ de les emulsions o les noves partícules S de la multilàmines del MIT. En aquests casos, són les anàlisis quantitatives les que diferencien o agrupen aquests nous elements. De moment, però, la divisió bàsica contempla aquells casos en què la primària es para en l'emulsió (τ , κ i χ) o cambra multilàmines (partícules S) abans de desintegrar-se i aquells casos en què la primària es desintegra en vol en les cambres de boira, conegudes com V^\pm .

A finals de 1952 les anàlisis quantitatives no permeten desentrellar aquest "zoo de partícules". La distinció entre pions i muons secundaris era molt difícil de fer en base als càlculs sobre les traces i, majoritàriament, se n'inferia la natura a partir del comportament amb la matèria nuclear de cambres i emulsions. Conseqüentment, les emulsions, més denses, resultaven més efectives per discernir la natura de les secundàries: la τ està perfectament determinada; el cas κ té ben definit la natura muònica de la secundària i l'ampli rang d'energies de les secundàries porta a pensar que es tracta d'una desintegració a tres cossos; i el cas χ té ben definit un pió secundari prou monoenergètic com per suposar que es tracta d'una desintegració a dos cossos. En canvi, els modes de les desintegracions V^\pm en cambres estaven per determinar.

En aquest moment, sembla que les cambres multilàmines hauran mostrat com les seves partícules S i les V^\pm podrien identificar-se a través de l'energia i l'abast de les seves secundàries amb el mode χ de Bristol. Però, en realitat, aquesta identificació és encara fortament especulativa, i supeditada a l'anàlisi estadística dels moments i abastos de les secundàries. Cal notar, també, que nous modes de desintegració dels mesons i noves partícules més pesades que els protons encara hauran de fer acte de presència.

La polèmica continuarà durant el 1953 i serà especialment rellevant el tractament que

⁸⁸Ibíd.

se'n farà al congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953). Però aquest tampoc en serà el punt final. El debat continuarà més enllà d'aquest congrés i nous recursos instrumentals i de metodologia experimental s'hauran de posar en joc per albirar-ne el final: l'expansió del treball en cambres multilàmines, l'aparició de les dobles cambres de boira, o l'esforç internacional del *G-stack* en el camp de les emulsions.

3.2.3 Descoberta dels hiperfragments

A finals del 1952, M. Danysz i J. Pniewsky, de la Universitat de Varsòvia, van tenir l'oportunitat d'exposar una emulsió Ilford G5, de 600μ de gruix, en un dels vols de globus que el grup de Powell a Bristol realitzava per tal d'exposar les plaques a radiació còsmica de gran alçada (~ 26000 m).

Les làmines, un cop tractades i revelades a Bristol, són analitzades pels dos físics polonesos que arriben a mostrar una fotografia que es presta a una interpretació del tot novedosa.⁸⁹ En una estrella (A) s'identifiquen 9 partícules α , 11 partícules amb càrrega simple i un fragment pesat (f). Aquest fragment, de càrrega com a mínim 5e, sembla aturar-se a l'emulsió en el punt B i es desintegra emetent tres partícules carregades ràpides. Una de les quals semblava ésser un π^- . Un balanç de l'energia total de la desintegració mostra que aquesta és superior a 120 MeV. Excloent la possibilitat que es tracti d'una coincidència fortuïta de traces en el punt B, el fragment f ha d'haver estat emès de l'estrella A amb com a mínim aquesta energia interna de 120 MeV. Per tant, f representaria una interacció nuclear entre fragments pesats i nuclis de l'emulsió similar a la que havia provocat la primera estrella. Però aquesta explicació topa amb una dificultat: el fragment f roman estable durant més de 10^{-11} s, que és el temps de vol que se li observa a l'emulsió. En canvi, les interaccions nuclears que provoquen la desintegració de nuclis de l'emulsió són processos amb un temps de l'ordre de 10^{-20} s. El fragment f , doncs, sobreviu uns 9 ordres de magnitud més del que seria d'esperar si es tractés d'un procés d'excitació i desintegració nuclear.

D'afegit, el fragment nuclear f sembla aturar-se al punt B. Per tant, l'energia cinètica de què disposa en aquest punt no és suficient per produir l'estrella B en un típic procés d'interacció del fragment amb un nucli de l'emulsió, i consegüentment ha de ser el resultat d'algun tipus de desintegració espontània de f .

Danysz i Pniewsky suggeriran que podria tractar-se d'una mena de captura d'un π^- al punt B, el π^- havent estat captat en una òrbita coulombiana del fragment f al punt A. Per tant, considerant f com una mena d'estrella σ ,⁹⁰ però per aquests esdeveniments era força conegut el temps de vida de la σ (entre la captura del π^- i la interacció amb el nucli que provoca l'estrella), que sempre era $\leq 10^{-12}$ s. Hi havia per tant, un ordre de discrepància amb el temps observat per a la vida del fragment f . Tot i que aquesta possibilitat no és

⁸⁹Vegeu apèndix A, fig. A.12.

⁹⁰Vegeu pròleg, p. 11.

del tot descartable, una segona alternativa els sembla més favorable:

Another attempt to find an explanation of the event might be looked for in connection with the concept of the heavy neutral V_1^0 -particle considered as a nucleon in an excited state with a mean life-time of about 10^{-10} sec. We assume that an unstable particle identical with V_1^0 (or of similar type) might exist not only as a free particle but also in a bound state within the nucleus.⁹¹

Aleshores, la desintegració observada al punt B s'associaria a la desintegració d'aquesta $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$, que explicaria la llarga vida del fragment i també l'elevada energia interna de què disposa.

El primer anunci públic de la troballa es farà a l'Acadèmia de Ciències de Polònia el 20 d'octubre del 1952 i els resultats seran publicats a principis de 1953 al *Philosophical Magazine*, on publicaven majoritàriament els grups anglesos: Bristol, Manchester, *Imperial College*. . . La novetat del fenomen farà que Danysz i Pniewsky demanin l'opinió a alguns físics prominents com Heisenberg, Skobeltzyn i Powell. Powell es mostrarà especialment crític amb la interpretació donada:⁹²

The event is certainly most striking, but I feel that you would be well advised not to publish it at this stage. In spite of the most remarkable precision with which the heavy particle ends its range at the point of origin of the second star, you still have to meet the objection that you are dealing with a chance juxtaposition of unrelated events. Because of this, I think it would be best, either to wait until a second example of the same phenomenon is found, or to publish a photograph of it with a minimum of descriptive material.⁹³

El segon exemple que Powell demandava no es farà esperar. El 1953, des del grup de l'*Imperial College* de Londres i del grup d'emulsions de l'EP es presentaran noves evidències que es discutiran al congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953). En la sessió de cloenda B. Rossi citarà aquests esdeveniments, però es mostrarà cautelós pel que fa a la interpretació:

There have been four cases, presented by Danysz, the Ecole Polytechnique group, George and Ney and probably an example of the same kind by Peters. The way that people would like to interpret these events is that we have to do with a nucleus or a nuclear fragment in which a neutron is replaced by a V_1^0 .⁹⁴

L'any següent, al congrés de Pàdua (12–15 d'abril de 1954), es computaran un total de 17 esdeveniments, trobats fins el moment. Aquest mateix any, M. Goldhaber, des de

⁹¹Danysz, Pniewsky (1953b), 348.

⁹²Segons el propi Pniewsky (1988, 93):

Powell was not happy about our interpretation and advised us not to present this idea in our publication, but Heisenberg was rather encouraging us and Skobeltzyn answered after one year, sending us sincere congratulations when six events were already found.

⁹³Powell a Danysz (19–11–1952) a Bristol (1987, 95).

⁹⁴Rossi (1953), 261.

Brookhaven, proposarà donar-los el nom d'*hiperfragment*. El seu coneixement creixerà molt lentament, al congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955), Danysz revisarà l'estat de la qüestió mostrant l'existència de 29 exemples publicats fins el moment del congrés. El fenomen no aconseguirà una estadística rellevant fins que els feixos de kaons dels acceleradors no en permetin estudis sistemàtics. En particular, a partir del 1957, el feix de K^- del protosincrotró de Berkeley mostrarà que tots els hiperfragments provenen dels nuclis que fan de fitó al feix de kaons i es generalitza el nom d'*hipernuclis*.⁹⁵

En certa manera, el descobriment que les noves partícules inestables en raigs còsmics poguessin formar part dels components normals de la matèria feia d'aquestes noves partícules elements menys estranys: “The observation of the first nuclear fragment containing a bound Λ hyperon revealed the existence of a third nuclear component besides the two previously known constituents: the proton and the neutron.”⁹⁶ No obstant això, en el moment del descobriment (1952), el seu comportament ratificava encara més la problemàtica interacció de les noves partícules i la seva llarga vida. Així, es feia difícil d'explicar com la coneguda V_1^0 , produïda en un procés d'interacció d'alta energia entre dos nucleons, podia romandre lligada en aquests nucleons fins a la seva desintegració, mostrant les desintegracions nuclears d'aquests hiperfragments.

3.3 El congrés de Bagnères

Les particules décrites au cours de ce Congrès ne sont pas entièrement fictives, et toute analogie avec des particules existant dans la nature n'est pas une pure coincidence.

Portada de les actes del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953).

Des del moment que les observacions de noves partícules inestables en raigs còsmics deixen de ser un fenomen singular, i les dades comencen a créixer permetent les primeres anàlisis estadístiques, la nova àrea d'investigació s'encamina cap una síntesi dels fenòmens

⁹⁵Com a detector aplicat als acceleradors se seguiran utilitzant blocs d'emulsió perquè sols en medis densos es podia visualitzar tot l'esdeveniment global. Els hipernuclis eren emesos per nuclis lents desintegrant-se i per tant mostraven traces molt curtes que sols en emulsions arribaven a parar-se abans de desintegrar-se i així eren identificables, igual com els productes de la seva desintegració. El 1957, al protosincrotró de Berkeley es bombardejaven blocs d'emulsions amb el feix de kaons (~ 400 MeV/c). Els mesons K eren capturats pels nuclis de l'emulsió i produïen desintegracions amb un 1% de probabilitat que es produís un hipernucli reconeixible. És a dir, un bloc on s'haguessin injectat uns 50000 K^- proporcionava uns 500 hipernuclis detectables.

⁹⁶Pniewsky (1985), 323.

observats. El congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953) representarà un punt d'inflexió en aquest procés de proliferació i sistematització.

Des del punt de vista experimental, la sistematització començarà atenent a les característiques visuals de les observacions, donat que els instruments involucrats en aquesta detecció són les cambres de boira i les emulsions nuclears. Però en la pretensió de conèixer els nous elements cal anar a un nivell més profund que permeti determinar exactament la massa, els productes de desintegració, els mecanismes de producció, la vida, etc. Per això caldrà una sofisticació dels propis instruments de detecció i de les tècniques experimentals que involucren.

Però permetre una anàlisi estadística d'esdeveniments trobats en llocs diferents, amb detectors diferents i en condicions diferents sols serà possible si s'estableixen criteris entre els diferents grups sobre els mètodes i les tècniques de detecció. En definitiva, existeix el problema de traduir els resultats a un llenguatge comú. Cal conciliar els resultats de les dues grans tècniques: cambres de boira i emulsions nuclears, però fins i tot dins la mateixa tècnica cal saber com conciliar les metodologies de treball dels diferents grups i les petites variacions dels elements dels diferents instruments utilitzats per tal que, aquestes diferents evidències puguin sumar-se en anàlisis comunes. També a Bagnères es començarà a prendre consciència sobre aquesta necessitat de col·laboració.⁹⁷ Pel que fa a la necessitat d'augment de l'estadística, els experimentals que treballen en raigs còsmics comencen a notar la pressió dels acceleradors. Aguditzar l'enginy per obtenir més resultats en raigs còsmics serà una necessitat imperiosa per poder resistir els primers embats dels acceleradors. Paradigmàtic d'aquesta transferència de poder del cas individual al còmput estadístic serà el creixent poder de mètodes de tractament de dades, com les superfícies Q de Thompson o el *Dalitz Plot*.

Pel que fa a resultats, des del 1950 hem vist com poc a poc s'obren dues vies de treball lligades a l'instrument de detecció: la classificació dels esdeveniments V en cambres de boira, la polèmica de la V^0 i el desconeixement de les V^\pm , i la classificació dels mesons pesats carregats detectats en emulsions. També s'intenten les primeres aproximacions d'ambdós fronts, amb la visió dels mesons pesats, V^\pm i partícules S com possibles diferents manifestacions d'un mateix fenomen.

Però, a principis de 1953, la complexitat encara és màxima. És el moment de reorganitzar-se i concretar aquestes polèmiques i la manera com atacar-les. En aquest context se celebra el congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), que “devoted entirely to the strange

⁹⁷Al llarg de les contribucions al congrés s'entreu com a més de l'aportació de nous resultats i la seva discussió es clama per aquesta col·laboració. Per exemple, O'Ceallaigh (1953, 128) ho expressarà:

The scattering-range method of mass determination contains possible systematic errors due to the uncertainty of our knowledge of the scattering constant and the energy-range relation. The situation would be improved if workers in different laboratories were to use a standardised method of measurement.

particles and attended by all the leading cosmic-ray particle physicists in the world, was unique in timing and scope.”⁹⁸ Aquest congrés serà el tercer organitzat per la “Comissió de Raigs Còsmics” de la IUPAP (*International Union of Pure and Applied Physics*) d’ençà del final de la guerra.⁹⁹ Donada la complexitat que el camp dels raigs còsmics havia adquirit, els organitzadors limitaran el congrés a l’anàlisi de les noves partícules. En la primera sessió introductòria, Blackett justificarà aquesta tria: “We chose this subject because of the exciting new knowledge which is now forthcoming from so many laboratories.” Notant l’abast internacional que ha adquirit l’estudi dels nous elements, Blackett continuarà fent una crida per a la mobilització de recursos: “In fact, we found that all the available resources in accommodation and in finance would be required to bring together from all parts of the world those workers concerned directly with the new elementary particles.”¹⁰⁰ La crida de Blackett és justificada. Fins aquesta localitat al bell mig dels Pirineus es desplaçaran 185 congressistes de 24 grups de recerca d’arreu del món.¹⁰¹ Una estadística ens permet veure com els grups es reparteixen les quasi 80 sessions que s’hi desenvolupen:¹⁰²

⁹⁸Rochester (1989), 76. Fixant l’atenció en els gràfics de la base de dades queda palesa la importància d’aquest congrés, a través de la participació dels diferents grups (v. apèndix B, sec. B.4.2) i també dels detectors utilitzats (v. apèndix B, sec. B.4.4).

⁹⁹El primer havia estat a Cracòvia, l’any 1947, i el segon a Bombay, l’any 1950.

¹⁰⁰Blackett (1953a), 1.

¹⁰¹Una menció especial cal fer a la tria de l’indret escollit per a la trobada. Bagnères de Bigorre és una petita localitat dels Pirineus francesos al peu del Pic du Midi (2850 m), seu de l’observatori equipat per a l’estudi dels raigs còsmics on el grup de Manchester havia instal·lat la seva cambra de boira el 1950 i el grup de l’École Polytechnique n’havia seguit l’exemple desplaçant-s’hi dos anys més tard.

¹⁰²S’han considerat sessions del congrés les contribucions que segons els secretaris mereixien un ítem en l’índex, en el qual consta el títol, el ponent i el grup. Normalment una petita discussió acompanya cada contribució i se’n realitzen un promig de 10 al matí i 10 a la tarda durant els 4 dies. Cal notar que, per exemple, són considerades contribucions la introducció de Blackett el primer dia o el discurs de cloenda de Leprince-Ringuet l’últim, tot i que estrictament no aportin noves dades ni generin discussió.

Cal notar també que en el congrés hi ha representació d’altres grups que no presenten cap sessió i que no tots els 185 participants intervenen en la discussió directa (com a mínim que hagi quedat reflectit a les actes).

GRUP	SESSIONS
Manchester	12
École Polytechnique†	12
Bristol	10
Roma	6
Milà†, ‡	4
MIT	5
Bombay§	3
Brussel·les†, §	3
Chicago	4
Indiana	3
St.Louis (Washington Univ.)	3
Washington (Naval Research Lab)	2
Gènova‡	2
Pàdua	2
Rochester	2
Berna	1
Birmingham	1
Caltech	1
Cork	1
Göttingen	1
Israel	1
Mèxic	1
Princeton	1

§1 sessió de col·laboració entre dos grups: Bombay i Brussel·les.

†1 sessió de col·laboració entre tres grups: École Polytechnique, Milà i Brussel·les.

‡2 sessions de col·laboració entre dos grups: Milà i Gènova.

Pel que fa al contingut de les sessions, aproximadament un 52% presenta dades experimentals, un 18% analitza mètodes instrumentals i qüestions relacionades amb la metodologia experimental, un 14% es dedica a generalitats sobre la radiació còsmica, un 6% és exclusivament teòric,¹⁰³ i la resta (~ 10%) conté resums de les dades experimentals presentades,

¹⁰³De les sessions exclusivament teòriques destaca, junt amb l'aportació de Dalitz, la de Louis Michel. Michel exposarà a Bagnères les seves idees sobre paritat isotòpica, que tres anys més tard Lee i Yang definiran com a paritat G: la combinació del grup de simetria d'isospín amb la simetria discreta de conjugació de càrrega. Però en el moment del congrés la seva intervenció no tindrà gaire ressó, potser per la dificultat dels experimentals, majoria en el congrés, per absorbir aquests conceptes teòrics. El mateix Michel (1953, 272) mostra aquesta barrera entre teòrics i experimentals:

Most of you are quite suspicious against theorists and prefer, to their advice, the answer of Nature. You are right.

Tot i que l'anàlisi de Dalitz també es basa en conceptes teòrics de spin i paritat, que per als experimentals poden presentar igualment problemes de comprensió, s'accepta més fàcilment perquè permet visualitzar les dades experimentals. Galison (1997, 222–3) argumenta sobre aquesta barrera entre teòrics i experimentals precisament amb els exemples de Dalitz i Michel:

Dalitz's talk about pseudoscalars, vectors, and pseudovectors was a language that, however familiar to theorists, was not a weapon in the usual armamentarium of the assembled experimenters, some of the most accomplished of their day. Bruno Rossi, for example, reviewed the Bagnères de Bigorre conference results, specifically addressing the question of whether the theta, tau, kappa, and chi were to be identified. His detailed and thoughtful analysis *never* invoked the symmetry constraints so dear to the theorists' hearts. Rossi's world of constraints was (in July 1953) –as Louis Michel implied– one of masses, decay ratios, energies, and the multiplicities of decay patterns. The same could be said of Blackett's and Powell's closing remarks.

discussions sobre la nomenclatura, introducció i cloenda.¹⁰⁴

Si ho relacionem amb el mètode de detecció, les cambres ocupen el 35% de les sessions, en alguns casos s'especifica si és multilàmines (8% dels casos sobre el total) o si és un muntatge de doble cambra (8% dels casos sobre el total). Un 44% de les sessions tracten de les emulsions i en un 4% de les sessions es parla ja dels acceleradors com a font de detecció.¹⁰⁵

Les sessions dedicades a l'aportació de dades experimentals amb emulsions parlen, en un 56% dels casos de detecció de mesons pesats o mesons K (τ , κ , χ) exclusivament. En un 32% dels casos parlen de partícules V, i un 8% dels casos mescla ambdues nomenclatures: heavy mesons i V. El 4% restant parla de partícules transprotòniques.

Pel que fa a les sessions experimentals que tracten dels resultats en cambra de boira, 60% dels casos parlen exclusivament de partícules V, en un 20% d'aquestes sessions es parla de V i S plegades, i l'altre 20% correspon al tractament de V i mesons pesats o mesons K (τ , κ , χ) també plegats. Com veurem, el solapament de la nomenclatura pot fer-se correspondre precisament a aquests intents d'identificar mesons pesats, partícules S i V^\pm .

En realitat, durant totes les sessions del congrés es manté la separació entre el treball dels grups d'emulsions i els de cambres de boira. En molt poques ocasions els especialistes en un dels instruments de detecció intervenen en les discussions dels resultats trobats en l'altre instrument. El primer dia es dedica completament a les evidències trobades en cambra de boira, el tercer dia es fa el mateix amb les emulsions fotogràfiques, el segon dia es reparteix entre ambdues tècniques. Ja a les acaballes del congrés, es dedica la tarda del quart dia a resumir les aportacions fetes en emulsions. C. F. Powell serà l'encarregat de la sessió. Anàlogament, el matí del cinquè dia de sessions es dedica a la recapitulació dels resultats presentats amb el mètode de la cambra de boira. W. B. Fretter, de Berkeley, serà l'encarregat de desenvolupar-la. La tarda del darrer dia és dedica a la cloenda del congrés. B. Rossi del MIT, presidint-la, realitzarà un esforç considerable de concreció de tots els tipus d'esdeveniments coneguts, i acabarà la seva contribució amb una síntesi de la nomenclatura acordada en el congrés. La separació original, en raó del tipus d'instruments de detecció utilitzat, intentarà deixar pas a una nomenclatura genèrica, independent del mètode.

Les partícules V

Discussió sobre les V^0 Una de les primeres sessions és reservada a Thompson per a l'explicació tècnica dels seus intents de minimitzar els errors.¹⁰⁶ També evidenciarà la

¹⁰⁴Algunes sessions mesclen la discussió sobre instrumentació i metodologia de l'experiment amb la presentació de resultats. El criteri és considerar experimental sempre que la sessió aporti resultats experimentals, independentment de si explica també qüestions extres.

¹⁰⁵Amb emulsions com a detector aplicat als acceleradors. Ambdós grups, per tant, se solapen.

¹⁰⁶La gran cambra del grup d'Indiana és especialment dissenyada per evitar al màxim les distorsions en les traces que resulten de l'existència de gradients de temperatura en el seu volum. Per aconseguir-ho, el grup

manca de consens entre els diferents grups pel que fa al tractament d'aquests errors.¹⁰⁷ Seguidament, presentarà l'anàlisi dels resultats: 63 exemples de V^0 . Amb el seu mètode de les superfícies Q classifica els esdeveniments, i mostra com algunes dades s'aproximen clarament a una superfície Q centrada a $\alpha=0.69$, que correspondria al mode de desintegració:¹⁰⁸

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + \sim 37 \text{ MeV}$$

La resta de punts, llevat potser de dos inclassificables, sembla correspondre a una el·lipse centrada a $\alpha=0$ amb $p_t=200 \text{ MeV}/c$, i una massa de la primària $\sim 1000 m_e$. En aquest cas, la superfície Q defineix un mode de desintegració que, utilitzant la nomenclatura de Thompson seria:

$$V_4^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \sim 214 \text{ MeV}$$

Amb una massa de la primària de $(971 \pm 10) m_e$, curiosament “remarkably close to the well established mass of the tau-mesons. We have accordingly suggested the possibility that the V_4^0 particle is a neutral variety of the τ -meson.”¹⁰⁹

La representació mostra també corbes addicionals que representarien els dos grups suggerits per Manchester ($\pi + \pi + 122 \text{ MeV}$) i per Caltech ($p + \pi + 75 \text{ MeV}$). Però dels quals, Thompson manifesta no tenir evidències. Finalment, fa una crítica del suggeriment de Caltech del mode de desintegració:

$$V_3^0 \rightarrow \tau^- + \pi^+ + \sim 60 \text{ MeV}$$

posant com evidència el gran ajust de les seves dades al mode en dos pions secundaris:

The fact that the observed points fit the Q (π , π) curve as well as they do constituted evidence that both fragments are actually light; if one fragment were as heavy as $450 m_e$, the theoretical Q-curve would be distinctly assymmetric.¹¹⁰

l'envolta d'un recobriment tèrmic que manté la temperatura constant en el seu interior.

¹⁰⁷Concretament, Thompson *et al.* (1953, 5) notará els errors involucrats en la mesura del moment a partir de la curvatura de la traça en la cambra magnètica:

Although it is well known that track distortions may result in large errors in the determination of momentum and even uncertainty in the sign, it is not evident from the literature to what extent the various groups have established that their observed curvatures are significant. The present apparatus was designed from the beginning with the express object of reduction of track distortion.

La importància de controlar els errors associats a la distorsió de les traces per efecte dels corrents de convecció eren coneguts, però infraestimats per les dificultats per a controlar-los. El 1954, J. A. Newth (1954, 305), especialista de la tècnica en cambra de boira del grup de Manchester reconeixerà:

Experience with the Jungfraujoch chamber has shown that temperature differences of less than 0.2°C can produce intolerable distortion of tracks. Up to now attempts that have been made to isolate the chamber thermally and control its temperature to better than 0.1°C have not been successful.

¹⁰⁸Vegeu apèndix A, fig. A.26.

¹⁰⁹Thompson, Buskirk, Cohn, Karzmark, Rediker (1953), 34.

¹¹⁰Ibíd., 35.

El treball de Thompson i la seva metodologia contribuiran a simplificar la visió dels possibles modes de desintegració V^0 . En la sessió de recapitulació dedicada al treball en cambres es manifesta aquesta percepció. La polèmica se centra en la possible desintegració simètrica en dos pions secundaris, que Manchester havia proposat originalment, Caltech havia rebutjat i, finalment, el grup d'Indiana sembla confirmar definitivament. Un cop acceptada aquesta desintegració possible, la discussió girarà al voltant de per què la major part dels grups detecten valors de Q més baixos que els 214 MeV trobats per Thompson per a aquest mode. Thompson, davant aquesta polèmica que restarà una qüestió oberta per a anàlisis posteriors al congrés puntualitza:

I had the impression that one or two of the Manchester results were significantly lower than their best value of about 210 MeV. It is important that we should list all anomalous Q -values. There is one at Indiana and say, one and a half in Manchester and one and half in Princeton. Also several cases in California about which Leighton has not yet spoken.¹¹¹

Una possible solució al dilema apareix també de la mà de Thompson:

It may be significant that the majority of the anomalous cases have Q -values lower than 214 MeV; also the majority lie inside the limiting ellipse. This may indicate that there are two decay modes: one two-particle, another three-particle. It is necessary to wait for better statistics.¹¹²

Des del grup de Manchester, Barker defensarà les seves últimes dades com a coherents amb els resultats trobats a Indiana:

The majority are consistent with Q about 200 MeV; some decays with lower Q -values are, however, present. This tail towards low Q -values may not be significant but just a reflection of the fact the accuracy in our results is lower than in Thompson's.¹¹³

La contribució del grup de Manchester al congrés analitzarà els resultats provinents dels dos grans grups que té en funcionament. Des del Pic du Midi, C. C. Butler, R. Armenteros, K. H. Barker, M. S. Coates i M. G. Sowerby operen la petita cambra magnètica dels primers descobriments. Des del Jungfraujoeh, J. A. Newth, D. D. Millar, J. P. Astbury, operen amb un nou muntatge des del 1951.¹¹⁴ Ambdós grups sota el lideratge de P. M. S. Blackett, que també és present en el congrés.

¹¹¹Thompson (1953), 240.

¹¹²Ibíd.

¹¹³Barker (1953b), 240.

¹¹⁴Els resultats d'aquest grup que treballa al Jungfraujoeh van encaminats especialment a l'estimació de la vida de les V_1^0 i V_2^0 . El mètode que utilitzaran es basa en l'anàlisi de la distribució dels punts de desintegració en l'interior de la cambra. La vida d'una partícula inestable, com les V^0 , es pot entendre com una mesura del temps de vol d'aquesta partícula en el seu sistema en repòs. Aquest temps es pot deduir de les observacions en la cambra a partir de la longitud de la trajectòria que deixa la partícula abans de desintegrar-se:

$$l = (P/M)t,$$

amb l la longitud mesurada, P el moment de la primària de massa M , i t el seu temps de vol. Els resultats

Des del grup del Pic du Midi es defensa l'existència de $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (46 \pm 6) \text{ MeV}$ i $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + (122 \pm 13) \text{ MeV}$.¹¹⁵ Però tampoc és clara la natura piónica de la secundària negativa, perquè en alguns casos les mesures d'ionització de la traça i del moment, donat per la curvatura, no permeten descartar que es tracti d'un muó. Davant la incertesa, Armenteros limitarà el seu grup V_1^0 referint-se a les característiques més conegudes del protó secundari:

The analysis will be based on 32 V-tracks with the common characteristic that in all of them the positive particles are heavily ionizing i. e. have estimated ionizations equal or greater than twice the minimum value. When precise momentum measurements are possible the estimated masses of the positive particles are invariably greater than $1000 m_e$.¹¹⁶

Malgrat les reserves, Armenteros nota que "Very strong evidence is already available which favours a decay into a proton and a pi-meson." No obstant això, analitzen la informació de què disposen contemplant tres possibilitats genèriques:

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$$

$$V_1^0 \rightarrow p + \mu^-$$

$$V_1^0 \rightarrow 1500 + \pi^-$$

Assumint cadascun d'aquests modes determinen Q i el moment de les traces secundàries (de la curvatura i en alguns casos de la ionització). Un histograma de les dades (valor calculat de Q en funció del nombre d'esdeveniments) mostra que són compatibles amb un únic valor de Q calculat per a cada cas, és a dir, una gaussiana ajusta consistentment la distribució. Els valors de Q que es desprenen d'aquest histograma per a cada mode de desintegració són:

Decay-scheme	Q-value
$p + \pi^-$	42_{-2}^{+3}
$p + \mu^-$	42_{-3}^{+4}
$1500 + \pi^-$	41_{-2}^{+3}

sobre aquesta vida són:

$$\tau_{V_1^0} = (1.7_{-0.6}^{+2}) \times 10^{-10} \text{ s}$$

$$\tau_{V_2^0} = (3.7_{-1.3}^{+3.9}) \times 10^{-10} \text{ s}$$

Per arribar a aquests resultats utilitzen 26 casos clars de V_1^0 , considerats com aquells en els quals el valor calculat d' $\alpha > 0.5$, i 10 casos de V_2^0 , considerats com la resta d'esdeveniments neutres que no poden identificar-se amb V_1^0 .

¹¹⁵Des de Caltech, però, es dividirà el primer grup en 3 possibilitats: $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (35 \pm 3) \text{ MeV}$, $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + (75 \pm 5) \text{ MeV}$ o, $V_1^0 \rightarrow X^\pm + \pi^\mp + (\approx 60) \text{ MeV}$. Hem vist com Thompson intentarà conciliar resultats disminuint el valor de Q trobat a Manchester per a la V_1^0 i el farà més compatible amb el primer mode de Caltech ($V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37 \text{ MeV}$).

¹¹⁶Armenteros (1953), 16.

Per tant, en cap cas el càlcul de Q serveix per eliminar un dels possibles modes de desintegració, perquè tots tres són compatibles per separat amb un únic valor central. La seva pretesa anàlisi, intentant tractar genèricament les múltiples possibilitats de desintegració de la V_1^0 , no haurà servit per decidir quina és la correcta. De fet, Armenteros conclourà apel·lant de nou a les “fortes evidències” acumulades:¹¹⁷

We have therefore to fall back on the direct evidence about the nature of the secondaries which, as we said before, favours very strongly a decay into a proton and a pi-meson for the majority of the V_1^0 -particles and thus we conclude that if this is so the Q -value is unique and has a value of:

$$42_{-2}^{+3}$$

Tot seguit, el grup presenta les dades que, des del 1950, ha anat acumulant al Pic du Midi sobre suposats exemples del que originàriament havien definit com:

$$V_2^0 \rightarrow (\pi \text{ o } \mu) + (\pi \text{ o } \mu)^+ \sim 120 \text{ MeV}$$

En aquest cas, les discrepàncies respecte el valor de Q trobat per Thompson ($V_4^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \sim 210 \text{ MeV}$) són reconegudes com errors, la qual cosa contribueix a aproximar posicions:

The value of Q given there was 120 MeV. Unfortunately, the errors had been seriously underestimated and the present results based on fourteen cases give a mean Q value of 180 MeV.¹¹⁸

Per tal d'augmentar Q fins aquest valor calculen els moments de les secundàries i l'angle de la traça forçada, a partir dels quals obtenen el moment transvers i el paràmetre α . Assumint la desintegració en dos pions secundaris —assumpció que és compatible amb els valors trobats per p_t i Q — s'arriba al nou valor de Q . En les conclusions són taxatius respecte el poder dels resultats trobats per Thompson:

Thompson's results appear to firmly establish the existence of a V^0 meson (V_2^0 or V_4^0) decaying into two light mesons with a Q value of $\sim 200 \text{ MeV}$. The majority (say 80%) of the Pic du Midi data can be explained in this way. There are however several anomalous examples not consistent with this process, observed by Thompson, C.I.T. and the Pic du Midi group whose interpretation is at present speculative.¹¹⁹

Notem, doncs, la problemàtica encara no resolta a Bagnères de la presència d'un nombre indeterminat d'esdeveniments V^0 provinents de diversos laboratoris, per als quals no està determinat el mode de desintegració. El mode $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37 \text{ MeV}$ ha quedat definitivament establert. El mode $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 214 \text{ MeV}$ sembla definitivament establert a partir de l'anàlisi de Thompson, però altres casos anòmals no són identificables amb cap dels dos

¹¹⁷Ibíd., 18.

¹¹⁸Barker (1953a), 35.

¹¹⁹Ibíd., 39.

modos. De fet, la reacció més general dels altres grups és intentar dividir els seus exemples de V^0 en el cas ben conegut de V_1^0 , i la resta d'esdeveniments que no es poden identificar amb aquest V_1^0 els globalitzen amb el nom de V_2^0 .¹²⁰

També el grup de l'EP presenta alguns dels seus resultats preliminars en la doble cambra que ha instal·lat al Pic du Midi i que ha començat a donar resultats aquest 1953. L'interés de les dobles cambres residirà en una millor determinació del moment en la superior, a través de la curvatura, i el poder de parada d'una multilàmines a sota la primera cambra. En aquest congrés, però, les evidències dels grups que treballen amb cambres dobles encara seran preliminars i no serà fins l'any següent que els seus resultats començaran a ser determinants.¹²¹

Des del MIT, el poder de parada de la cambra multilàmines, que tan bons resultats estava donant respecte les primàries pesades carregades, s'aplicarà també a l'estudi de les V^0 . El nou muntatge basava les mesures del moment en la determinació de l'abast en lloc de la curvatura. Bridge i Rossi ho expliquen:

The most important results for the V_1^0 are based on 22 events in which the origin of the V^0 was a nuclear interaction visible inside the cloud chamber. When these events are analysed under the assumption that the only decay products are a proton and a pi-meson, one obtains Q-values which are not characterized by the usual statistical errors inherent in momentum measurements derived from a curvature in a magnetic field. Instead, one obtains the Q-values by using the range of one of the decay products and since in general the range must lie within well defined limits, the limits in Q must be correspondingly well defined. In 13 cases Q is determined to 15 MeV or better.¹²²

Els seus resultats es mostraran compatibles amb el mode $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37 \text{ MeV}$.

De Bagnères, doncs, es recordarà l'acceptació clara del mode $V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37 \text{ MeV}$ i l'aportació de Thompson a la simplificació del grup V_2^0 del qual n'ha determinat un subgrup ben definit $V_4^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 214 \text{ MeV}$, mitjançant la representació en superfícies Q i la seguretat en el muntatge del qual obté les dades. Però encara quedarà la resta de casos anòmals sense classificar, provinents de diferents grups entre els quals Caltech, Manchester, Princeton i el propi Thompson d'Indiana, i sense poder identificar la natura de les secundàries presents en aquests casos anòmals.¹²³

¹²⁰En aquest sentit, es manifesta per exemple Reynolds (1953, 248), que presenta resultats preliminars del grup de Princeton trobats amb una doble cambra instal·lada a Echo Lake (Colorado, 3260 m). Quan Thompson l'interroga sobre 13 casos que ells classifiquen com a V_2^0 , Reynolds es limita a respondre que "All we can say is that they cannot be V_1^0 's, but could be consistent with anything else."

És també per la complexitat que ha adquirit aquest V_2^0 que Thompson utilitza la nomenclatura V_4^0 , per remarcar que es tracta d'exemples ben determinats i diferenciats d'aquest grup complex V_2^0 .

¹²¹Vegeu cap. 5, sec. 5.1.1.

¹²²Bridge, Rossi (1953), 24.

¹²³La V_2^0 es resisteix a revelar el caràcter piònic de les seves secundàries. Sols estava clar que entre les secundàries no hi havia un protó, perquè es tractava de secundàries més lleugeres. Però en aquestes alçades del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), encara no ha estat identificat cap pió secundari de la desintegració del mode V_2^0 . Notem-ho en les conclusions de Fretter (1953a, 241):

Have any pi-mu decays been observed amongst the secondaries of particles not V_1^0 ? (Silence) This

Discussió sobre les V^\pm Les V^\pm són difícilment observables en les cambres de boira que les defineixen: “Only about 15% of the decays of all V-particles are due to charged V-particles.”¹²⁴ I fins i tot quan s’observen es fa difícil l’estimació dels moments de les traces primàries i secundàries, per l’alta probabilitat que les secundàries escapin de la cambra sense parar-s’hi, perquè són esdeveniments altament energètics i la poca densitat de matèria de les cambres de boira no ajuda a frenar-les.

Els experiments del grup de Manchester al Pic du Midi són especialment sensibles a aquestes limitacions, perquè la vella cambra de Manchester és de dimensions força reduïdes. En el congrés, Butler exposa els resultats de 4 exemples trobats al Pic du Midi i 2 al Jungfraujoch, amb valors de la massa de la primària molt dispersos, cosa que fa poc significat proposar-ne un valor mig per a tot el conjunt de V^\pm . Assumint aquest risc, però, arriben a: “The average mass is about $1100 m_e$, i. e. close to the average value for K-particles”.¹²⁵ I així, identificant entre les secundàries possibles π i μ , proposen que la majoria dels seus exemples de V^\pm corresponen a mesons κ i χ , millor definits del treball en emulsions.

Leighton, resumint els resultats de Caltech sobre V carregades, també les identificarà amb els mesons pesats provinents de les emulsions. Sense concretar tant l’anàlisi com els investigadors de Manchester, Leighton determina la massa de 17 exemples de V^\pm , i mostra com és compatible amb una partícula de massa $1000 m_e$, que ell identifica amb la τ de les emulsions.

Potser més destacable en l’aportació de Caltech al congrés és la presentació de 3 nous exemples d’esdeveniments “cascada”, anàlegs a l’exemple trobat el 1950 pel grup de Manchester al Pic du Midi. En les tres ocasions, una V^- es desintegra en una V^0 i una segona secundària que pot ésser piónica o muònica. En un dels casos és possible la determinació de la massa de la V^0 secundària en $\sim 1800 m_e$, ja que la positiva en la qual es desintegra té un moment-ionització compatible amb la massa del protó. La conclusió de Leighton serà:

In all 3 cases the positive secondary of the V^0 lies nearer the line of flight of V^0 than does the negative, (this is probably also true of the Manchester example.) and in the case of Cowan’s example a mass determination of the positive V^0 secondary gives $\sim 1800 m_e$.

It appears, therefore, that the positive secondary has a larger mass than the negative.

If the V^0 is a V_1^0 , the mass of the charged V must be superprotonic.

All four of the charged V-particles decaying into V^0 are of negative sign.¹²⁶

means no.

¹²⁴Butler (1953), 90. Notem que ja a l’època es parla genèricament de V^\pm , però en realitat els investigadors són conscients que les seves anàlisis es retringeixen a exemples trobats de V^+ , i que l’apel·latiu V^- tan sols es pot aplicar a la partícula cascada, ben diferenciada dels exemples de mesons pesats per la seva massa elevada.

¹²⁵Butler (1953), 91.

¹²⁶Leighton (1953), 100.

Es tracta de la confirmació del descobriment de l'hiperó Ξ^- :

$$V^- \longrightarrow V^0 + \text{mesó}$$

reconegut especialment per la característica desintegració en cascada:

$$\begin{aligned} \Xi^- &\longrightarrow \Lambda^0 + \pi^- + 65 \text{ MeV} \\ &\hookrightarrow p + \pi^- + 37 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Notem l'impacte de la confirmació d'un esdeveniment d'aquestes característiques. El nom de cascada ja ens en dóna indicis. Es tracta d'una partícula, més pesada que el protó, que a través de dos passos successius torna a convertir-se en protó. A més, també és impactant el clar caràcter negatiu, donat que fins aleshores la visualització de noves partícules negatives havia estat realment limitada. La partícula cascada jugarà un important paper en l'argumentació teòrica que intentarà explicar els nous esdeveniments i ajudarà a desbancar algun model teòric important que no en preveu el comportament.¹²⁷

La doble cambra de l'EP també donarà resultats preliminars sobre 14 V^\pm i notarà la possibilitat que un dels casos es tracti d'una partícula superprotònica, com els anteriors de Caltech i de Manchester. En aquests resultats, les V^\pm es detecten en la cambra superior i, tot i que les secundàries encara no es poden determinar com π o μ , en 4 casos la manca d'interacció en la cambra inferior porta a pensar en l'existència de μ entre les secundàries de les V^\pm .

Les partícules S

En nom del grup del MIT, bressol del descobriment d'aquests esdeveniments, Rossi i Bridge exposaran 20 exemples de partícules S i mostraran els primers casos de radiació electrònica associada amb els seus productes de desintegració. Per tant, se suggereix la possible presència de fotons i mesons neutres entre les secundàries d'aquests esdeveniments. Pel que fa a la natura de les secundàries carregades, els resultats encara no els permeten ésser concloents:

There is no evidence against the assumption that the charged decay products of all the particles lighter than protons are mu-mesons. We cannot rub out the possibility that they are a mixture of pi- and mu-mesons. It appears unlikely that they are all pi-mesons.¹²⁸

I estimen la vida de les partícules S de la següent forma:

For each S-particle decay, we have determined the actual time spent in the chamber by the primary particle from the moment it enters the chamber to the moment it stops. These times measured in the frame of reference of the moving particle, are almost all

¹²⁷Vegeu cap. 4, sec. 4.2.2.

¹²⁸Rossi, Bridge (1953), 112.

of the order of 10^{-9} sec. Since the number of particles decaying in flight is certainly less than the number of particles decaying at rest, we conclude that the mean life of S-particles is at least 10^{-9} sec.¹²⁹

Però les partícules S també comencen a ser objecte d'anàlisi en la doble cambra de l'EP al Pic du Midi. Aquest nou muntatge es mostra prometedor mercès a la millora que es pot aconseguir en la mesura de massa de les partícules que les travessen, a partir del mètode del moment-abast, ja que de les partícules es mesura la curvatura i el signe en la cambra superior, d'on traiem el moment, i moltes es paren en la cambra inferior, d'on determinem l'abast.

Els primers resultats de l'EP mostren 5 partícules aturant-se en la cambra inferior i emetent una secundària visible, per tant es tracta de 5 partícules S. L'estimació de la massa dóna:

$$m = 922 \pm 41 m_e,$$

on la major part de l'error ve de la mesura de la curvatura, ja que l'abast sol estar millor definit al parar-se la partícula i emetre una secundària. Cal notar també que la mesura té sentit, "S'il n'existe qu'un seul type de méson K".¹³⁰

En aquest cas, des de l'EP estan fent una doble suposició. D'una banda, sembla ja clara la identificació de les partícules S amb les V^\pm en cambra de boira que es desintegren en vol i amb els mesons pesats trobats en emulsions, i el congrés conclourà sense cap dubte sobre aquesta assumpció i amb l'acceptació del nom genèric K per descriure-les.¹³¹ D'altra banda, s'està suposant que, malgrat s'observen diferents formes de desintegrar-se —en pions i/o muons secundaris, i en dos o tres secundàries— tots aquests modes de desintegració són compatibles amb una partícula de massa única. L'aproximació de les tècniques és evident:

We heard yesterday a very illuminating discussion concerning the masses of particles which stop either in the cloud chamber or in the emulsion giving rise to a single charged decay product. The result was that all of these mass measurements are consistent with a single mass of around 990 electron masses for the photoplates experiments of $922 \pm 41 m_e$ from the recent cloud chamber experiments of the École Polytechnique.¹³²

Però, per arribar a aquestes conclusions, els resultats en emulsions presentats al congrés són imprescindibles.

Els mesons pesats K

El mesó pesat millor conegut del treball en emulsions és el τ . En el congrés es computaran 17 exemples coneguts fins al moment amb una massa promitjada de $970 \pm 5 m_e$. El grup

¹²⁹Ibíd.

¹³⁰Fretter *et al.* (1953), 117.

¹³¹Però no es pot descartar que entre aquests esdeveniments existeixin també casos de partícules superprotòniques, diferents dels millor coneguts V_1^0 i $V^- \rightarrow V_1^0 + \text{mesó}$, que tot just comencen a intuir-se.

¹³²Rossi (1953), 265.

de Bombay afegirà 3 exemples més trobats en un bloc de les noves *stripped emulsions*,¹³³ enlairat sobre Delhi. Fruit d'una altra expedició a gran alçada, aquest cop sobre el Mediterrani (Sardenya) durant el juny-juliol del 1952, el grup de Roma presentarà en el congrés dos exemples més de τ .

Ben establerta, doncs, l'existència d'aquestes desintegracions en tres pions, l'especulació començarà també a Bagnères sobre la possible existència d'altres modes similars. En concret, es parlarà de la possible existència de $\tau \rightarrow \pi^\pm + \pi^0 + \pi^0$ i es relacionarà amb els exemples, encara poc determinats, de mesons κ :

The fact that this mode of decay has not been observed does not mean that it does not exist. Only 20% of kappa-decays give measurable secondary tracks in plates. Only 12 tau-decays have been found. Therefore, between 2 and 4 examples of the alternative mode might be expected to have been seen.¹³⁴

En la discussió sobre les propietats del mesó τ jugarà un paper molt important el mètode de representació ideat per R. H. Dalitz, que començarà a cobrar importància a partir de l'any següent.¹³⁵ Si Thompson realitza un important treball per classificar les V^0 , Dalitz ho fa amb els mesons pesats carregats.

Des del grup d'emulsions de l'EP es presenten 6 exemples que defineixen genèricament com mesons K. Les mesures de dispersió i ionització fan compatibles les secundàries d'aquests esdeveniments amb un muó, abans que amb un pió, i per tant compatibles amb un mode $K \rightarrow \mu + 1$ o 2 neutres.¹³⁶ La identificació amb altres tipus de mesons pesats és també present:

Ces quelques exemples sont tous compatibles avec un méson K unique, de masse 940 ± 33 . Cette masse est très voisine aussi de celle trouvée pour les particules S par le groupe de l'École Polytechnique (922). Elle est voisine aussi de celle du τ .¹³⁷

També des de les recents expedicions conjuntes dels grups de Gènova i Milà, mostren 6 exemples més de mesons K. En aquest cas, però, entre les secundàries sembla aparèixer algun pió. La mesura de la seva energia també és compatible amb els valors trobats a Bristol per al pió monoenergètic del mode definit com χ .

Precisament des de Bristol, Menon recopilarà els resultats del seu grup. Des del 1951, any en què defineixen els modes κ i χ , acumulen 60 exemples de primàries pesades mostrant

¹³³Les característiques d'aquestes noves emulsions les expliquem a cap. 5, sec. 5.1.2.

¹³⁴Peters (1953), 229.

¹³⁵Vegeu cap. 5, sec. 5.1.3.

¹³⁶Aquesta desintegració s'associava al mesó κ , proposat a Bristol (1951). El mode s'havia definit a partir de la determinació de la secundària carregada com un muó, que en alguns casos s'havia identificat per la seva desintegració en un electró visible. També en les cambres multilàmines es reconeixien els muons secundaris d'aquest mode per la manca d'interacció amb les làmines de la cambra. L'ampli rang d'energies amb què sortia expel·lit el muó secundari semblava afavorir més la desintegració a tres cossos ($\kappa \rightarrow \mu + 2$ neutres).

¹³⁷Crussard *et al.* (1953), 132.

una única secundària carregada que genèricament anomenen mesons K.¹³⁸ La conclusió del grup és:

There is decisive evidence for the presence of μ -mesons among the secondary particles. The decaying particle is then referred to as κ . The κ -meson appears to arise in a 3-body process of which the neutral particles are at present unknown. The mass of the κ -particle appears at present to be greater than 1000 electron-masses. There appears to be evidence, which is not yet decisive [decisive], of the presence of π particles among the secondary particles. The decaying particles are then referred to as χ mesons and the decay appears to involve only 2 particles and though the nature of the neutral particle is yet unknown we suggest that it is a particle of mass less than 300 em.¹³⁹

El congrés, doncs, no resol la problemàtica existència del mode χ , bàsicament per la dificultat de discernir entre π i μ en les secundàries d'aquestes desintegracions.¹⁴⁰

Els mesons pesats negatius En alguns casos s'havia observat mesons pesats provocant estrelles. Aleshores, seguint el comportament ben conegut dels pions, on la fenomenologia permetia dividir-los en estrelles σ quan eren π^- absorbits en la matèria nuclear de l'emulsió i en ρ quan es desintegraven abans d'ésser absorbits donant una única secundària visible, aquestes estrelles es podien explicar com mesons pesats negatius absorbits per la matèria nuclear de les emulsions. S'esperava que aquests K^- produïssin explosions similars a les observades per a la captura dels π^- , però amb una energia superior.¹⁴¹ El primer exemple d'aquest tipus es pot remuntar a un cas controvertit de l'EP de l'any 1948,¹⁴² però poc reconegut per la comunitat. En fer balanç, a Bagnères sols es reconeixen 6 casos de mesons pesats negatius trobats fins el moment: 5 trobats per Peters a Bombay i 1 per l'EP, ara ja més clar que el de 1948, tots provinents del treball en emulsions.

¹³⁸La denominació mesons K sembla nascuda a Bristol amb la pretensió de separar aquests esdeveniments d'una primària carregada donant una única secundària carregada (κ i χ), dels mesons τ , amb tres pions secundaris, i que conjuntament formen tota la fenomenologia de nous esdeveniments trobats en emulsions. A partir del congrés de Bagnères aquesta denominació s'imposarà de forma genèrica.

¹³⁹Menon, O'Ceallaigh (1953), 123.

¹⁴⁰Peyrou (1982, 45) concreta aquesta dificultat:

Nobody was very convinced. At 210 MeV/c, π s can be separated from μ s but very marginally so and all the critically minded physicists at the conference (99,9% of them) could not refrain from remarking that the so called π secondaries corresponded to a hole in the spectrum of the μ secondaries. Nevertheless, as we now know, Menon and O'Ceallaigh were right. The two-body decay $K_{\pi 2}$ exists and the π secondary has almost exactly the energy they found.

La classificació dels esdeveniments en funció del moment explica l'artificialitat de la distinció entre els dos esquemes (v. apèndix A, fig. A.28). Comptant la difícil distinció de la massa, els dos histogrames són fàcilment encaixables donant-ne un de sol que representaria la desintegració κ . De fet, el problema entre els modes κ i χ encara es veurà incrementat per les evidències del $K_{\mu 2} \rightarrow \mu + \nu$ en cambres, i la seva resolució final necessitarà de noves investigacions, entre les quals seran essencials el *G-stack* i el treball en dobles cambres.

¹⁴¹Fins i tot, en alguns casos, la nomenclatura s'adapta de manera similar a la del π i μ . Quan una partícula K es para en l'emulsió sense produir una traça secundària visible es denota ρK , quan la K es para i produeix una desintegració nuclear visible es denota σK .

¹⁴²Vegeu cap. 1, sec. 1.2.3.

En principi, el descobriment de les captures de K^- , mostrant-se com desintegracions nuclears en forma d'estrelles en les làmines fotogràfiques, havia passat desapercebut en les observacions dels nous esdeveniments. Durant un temps, aquesta mancança de la tècnica permetrà justificar la baixa proporció de mesons pesats negatius en front dels positius. Amb el treball sistemàtic dels acceleradors s'acabarà veient que la freqüència d'ocurrència d'aquests esdeveniments negatius és realment molt menor que la d'esdeveniments positius. La polèmica tindrà importants conseqüències per a la definició de la natura de les noves partícules: o bé existia un excés real de kaons positius que aquesta teoria hauria d'explicar, o bé sols una fracció dels mesons negatius eren capaços d'interaccionar amb els nuclis (K^- interaccionants o σK), mentre que la resta acabaven desintegrant-se encara que estiguessin lligats en òrbites atòmiques (K^- desintegrants). La solució haurà d'esperar a la teoria d'estranyesa que, el 1953, encara està a les beceroles.

Els hiperons

Afegit a la complexitat dels mesons pesats κ i χ que mostren la traça d'una primària desintegrant-se en una única secundària visible, des dels grups de Gènova i Milà, mostraran uns nous esdeveniments que també segueixen aquesta pauta. Però immediatament s'adonaran que els seus exemples no es poden incloure en el grup dels mesons pesats K .¹⁴³

Els primers resultats d'aquests grups es publicaran al *Nuovo Cimento* uns mesos abans del congrés. La publicació reflectirà un únic esdeveniment, prou singular com per dedicar-li l'article. La fotografia mostra una primària carregada que recorre un camí inusualment llarg en l'emulsió (15760 μ), sembla aturar-se, i es desintegra emetent una secundària carregada que s'escapa d'ella. Aquesta primària l'anomenen J , nom que respon a la forma visual de la traça:¹⁴⁴

The mass value obtained, together with the knowledge of the direction of motion of the particle J , makes it so very likely that we are dealing here with the decay of a particle of transprotonic mass with the emission of a fast secondary.¹⁴⁵

De fet, l'estimació de la massa de la primària a partir del seu llarg abast, ionització i dispersió múltiple porta a un valor de $2500 \pm 345 m_e$. Aquest serà el primer exemple clar d'una desintegració de l'hiperó Σ^+ . Probablement desintegrant-se en $n + \pi^+$ enlloc de $p + \pi^0$, perquè la secundària visible és molt energètica i interacciona poc amb l'emulsió. En el moment del descobriment, però, sols poden fer una estimació de la massa de la primària, mentre que el mode de desintegració queda com una incògnita:

¹⁴³En general, les emulsions es mostraran més útils per al treball en kaons que no en hiperons. El fet que les estimacions es basin especialment en el recorregut de les partícules (junt amb un altre paràmetre com la ionització o la dispersió) afavoreix l'anàlisi d'aquells casos en què les partícules es paren en l'emulsió i tot seguit es desintegren. Normalment, són els kaons els que es desintegren o interaccionen a partir del repós, mentre que una gran part dels hiperons semblen desintegrar-se més aviat en vol.

¹⁴⁴Vegeu apèndix A, fig. A.11.

¹⁴⁵Bonetti *et al.* (1953a), 346.

Attribution of a scheme of decay is also made impossible by the lack of information on the secondary; the statistical accuracy involved in mass measurement of the primary particle seems however to exclude an identification of the described decay at rest with the decay of the K-particles.¹⁴⁶

En el congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953) el grup aportarà dos exemples similars a l'anterior i ara ja aventuraran possibles modes de desintegració:

This is the decay of a superproton and if we assume that $J' \rightarrow P + \pi^0$ and if we take into account the energy and the mass of the proton we obtain for the mass of J' : $m_{J'} = 2320 \pm 3 m_e$ and Q value: $Q = 115 \pm 3$ Mev.

In this scheme π^0 would have an energy of about 96 Mev. If an alternative scheme of decay would exist like the following $J' \rightarrow N + \pi^+$ then the pi would have about 96 Mev and in this case it would be at minimum of ionization.¹⁴⁷

Abans d'acabar aquest mateix any, C. M. York, de Caltech, en presentarà un altre exemple trobat en cambra de Wilson, que s'afegirà als resultats en emulsions per confirmar l'existència d'una nova partícula.

Fins al moment, les noves partícules conegudes amb massa superior a la protònica es limitaven a la $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ i a la partícula cascada ($V^- \rightarrow V_1^0 + \text{mesó}$). La identificació de la secundària d'aquests esdeveniments com protons o neutrons acompanyats d'un mesó farà que la primera reacció a Bagnères sigui entendre aquestes J superprotòniques (Σ^+) com els companys carregats de la ben coneguda V_1^0 (Λ^0). Aviat, però, noves aportacions experimentals confirmaran que les masses d'aquests superprotons són substancialment més elevades que les de la V_1^0 . De fet, les primeres estimacions de Q dels superprotons ja eren força més elevades ($Q \simeq 115$ MeV) que el valor ben conegut per a la V_1^0 ($Q \simeq 37$ MeV).¹⁴⁸

Però el camp dels superprotons quedarà obert en les conclusions al congrés. Si bé l'existència de les partícules cascada quedarà perfectament establerta amb sols 4 exemples, tres dels quals són aportats pel grup de Caltech al congrés; les primeres evidències de superprotons des de Gènova i Milà no es consideraran concloents, com Rossi sentència: "There are I believe 5 cases which can be interpreted in this way, but all of them, perhaps with some stretching of imagination, can be also interpreted in a different manner."¹⁴⁹

La taxonomia del zoo de partícules a Bagnères

El 1953 la taxonomia del zoo de partícules només es podrà fer atenent a dues característiques que des d'un principi havien anat distingint els nous elements: la forma visual i la massa.¹⁵⁰

¹⁴⁶Ibíd.

¹⁴⁷Bonetti *et al.* (1953b), 182. No serà fins l'any 1957 que Franzinetti, Morpurgo (1957) identificaran del tot la secundària com pions monoenergètics o protons de baixa energia ($\simeq 19$ MeV).

¹⁴⁸Mercès a l'acumulació de dades, a principis del 1954 la teoria arribarà a diferenciar un estat d'isospín singlet Λ , de l'estat triplet Σ^+ , Σ^0 , Σ^- (v. cap. 4, sec. 4.3.2).

¹⁴⁹Rossi (1953), 261.

¹⁵⁰El signe de la càrrega de les partícules també podria considerar-se una característica genèrica. Evidentment, lligat a la forma visual dels esdeveniments, la presència de traça ja indicava que es tractava d'una

Pel que fa a la massa, es farà una divisió en tres grups: L, K i H. El grup L (L de *Light*) contindrà els mesons π , μ i altres possible mesons lleugers encara per descobrir. A continuació vindran els mesons pesats (τ , κ , χ , V_2^0 , V^\pm i partícules S), més massius que el pió però menys que el protó. En el congrés s'ajuntaran tots aquests casos amb el nom de mesons K, tot i que no és definitiu que es tracti d'una única partícula amb diferents modes de desintegració. Finalment les partícules més massives formaran part del grup H (H de *Heavy* o d'*Hyperons*),¹⁵¹ al qual pertanyerán totes les partícules de massa superior a la nucleònica. Aquest grup contindrà la ben coneguda V_1^0 ,¹⁵² les cascades V^- i les noves evidències de partícules J transprotòniques.

El grup més complex i discutit serà el dels mesons K. Pel que fa a les K neutres, l'exemple millor conegut és el primer detectat $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, confirmat mercès al treball de Thompson.¹⁵³ Precisament el recolzament que el treball de Thompson obté en el congrés serveix a Rossi per afermar la convicció que V_1^0 (Λ^0) i V_2^0 (θ^0) no són les úniques noves partícules neutres que existeixen. De fet les investigacions evidencien que, excloent aquests dos grups ben definits, hi ha altres casos que no s'hi poden incloure. Aquests esdeveniments de difícil classificació donen peu a especular sobre possibles desintegracions a tres cossos, corresponents a la companya neutra del mesó τ de la forma:

$$\tau^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

del qual fins el moment no hi ha evidències directes.

partícula carregada, perquè ionitzava el medi que travessava. Més complicat era distingir si la partícula era positiva o negativa. En cambres la presència de camp magnètic permetia en molts casos fer aquesta distinció, però per a les emulsions, que poques vegades se sotmetien a un camp magnètic, la càrrega no era coneguda. En comptades ocasions el signe de la càrrega es podia inferir del comportament de la partícula al final del seu abast quan interaccionava amb la matèria nuclear del detector. Argumentem, doncs, que la forma visual serà un criteri més general de classificació.

¹⁵¹La denominació hiperó neix precisament al congrés, sembla que de la mà de Leprince-Ringuet (1982, 167), i serà acceptada no sense algunes discrepàncies:

[...] je voudrais vous dire aussi que le mot hypéron a été annoncé pour la première fois au congrès de Bagnères. Il y avait B. Rossi, E. Amaldi, C. Powell. Et on s'est demandé comment appeler ces nouvelles particules qui s'arrêtaient, qui étaient lourdes et qui donnaient un méson. Alors on a proposé divers noms. Et je dois dire que c'est ma principale contribution à la physique, j'ai prononcé le mot hypéron: le mot hypéron n'a pas été bien accueilli par Rossi. Rossi a dit "oh, hypéron, piperone, ça va pas". Et au contraire Powell était là et a dit "oh hypéron (prononcer haiperon) marvelous". Et on a adopté le mot hypéron. Et il a à Bagnères de Bigorre l'avenue de l'hypéron: c'est peut être le seul endroit au monde où une particule fondamentale a donné un nom à une avenue.

¹⁵²Per a la qual s'haurà establert perfectament el valor de Q en 37 MeV, i una estimació de la seva vida de 3.3×10^{-10} s, a partir de promitjar els valors proposats per diferents grups.

¹⁵³Per a aquesta partícula Rossi (1953, 262) proposa en la sessió de cloenda un nom definitiu, amb el qual se la coneixerà durant molt de temps:

This particle which has been variously called ($V_2^0, V_4^0 \dots$) we would like now to give a definite name, for example:

$$\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

Al voltant d'aquests esdeveniments θ i τ s'encetarà una polèmica de solució encara imprevisible. La semblança en els valors de massa calculats per ambdós partícules farà pensar que es pugui tractar de dos estats de càrrega de la mateixa partícula. Però és difícil conciliar aquesta hipòtesi amb el fet que comporta dos estats de diferent paritat per a la mateixa partícula, un per a la desintegració en dos pions i el contrari per a la desintegració en tres:

Before concluding my remarks there is one point which I would like to make which was made already in the course of the conference: it is very close similarity, between the masses of two of the best established particles, I mean the charged tau-particle with a mass of 970 and θ^0 -particle with a mass of 971. This looks hardly like an accident, and on the other hand it is very difficult to see how the θ^0 -particle could be the neutral counterpart of the tau-particle.¹⁵⁴

Aquest serà l'origen de la violació de paritat de les desintegracions febles. A partir del primer crit d'alerta sobre la possible identificació de θ i τ , els esforços es concentraran en millorar el coneixement de la massa d'ambdues partícules, i en determinar-ne les característiques de spin i paritat. Les millores en emulsions, i en especial l'expedició del *G-stack*, augmentaran considerablement l'estadística que mostrarà com els valors de massa cada cop es van aproximant més. Però l'augment de l'estadística també permetrà a Dalitz determinar les característiques de spin-paritat del mesó τ , i mostrarà la seva discrepància amb el cas θ .¹⁵⁵

Pel que fa a la resta de mesons K carregats, Rossi en la cloenda del congrés confessa que "I have now come to the most difficult part of my task, it is to summarize the discussion bearing on the charged *K*-particles". Afegit al problema d'identificació de θ i τ , Bagnères no resoldrà les desintegracions $\kappa \rightarrow \mu + ?^0 + ?^0$ i $\chi \rightarrow \pi + ?^0$, però unificarà τ , κ , χ , partícules S i V^\pm com diferents manifestacions de mesons K:

These K-particles have been observed, in cloud chamber and emulsions; they have been observed to decay at rest and in flight, and have been called, depending on the mode of observation and on the mood of the observer, S-particles, charged V-particles, K-particles, tau-particles and so on...¹⁵⁶

L'exposició final de Rossi quedarà sumaritzada en un apèndix en forma de taula on es concretarà la nomenclatura que ha de definir aquesta taxonomia de les noves partícules.¹⁵⁷

A partir de l'acord sobre la nomenclatura quedarà clar que quan es tracti de definir partícules específiques s'adoptaran les lletres gregues. Gregues majúscules per als hiperons¹⁵⁸ i minúscules per als nous mesons pesats. Les lletres llatines majúscules es reser-

¹⁵⁴Rossi (1953), 261.

¹⁵⁵Vegeu cap. 5, sec. 5.1.3.

¹⁵⁶Rossi (1953), 263.

¹⁵⁷Vegeu apèndix A, fig. A.36.

¹⁵⁸Tot i que a la taula de Bagnères s'especifica aquesta definició, els exemples que la segueixen no mostren encara la nomenclatura Λ per descriure la V_1^0 . Repassant les actes, el símbol Λ no apareix, en tot moment

varan per a descriure els grups genèrics de partícules (L, K, H) o les seves descripcions fenomenològiques (S, V).¹⁵⁹

El congrés de Bagnères es clourà amb aquesta taula, intent de classificació de les noves partícules, però també amb l'amenaça que els acceleradors comencen a representar. El grup de Chicago haurà exposat els primers intents de producció artificial de V^0 al ciclotró i també hi haurà rumors sobre deteccions al cosmotró de Brookhaven. En la cloenda, Leprince-Ringuet ironitzarà:

[...] nous savons que nous pourrions très bien aller nous reposer à la campagne pendant six mois, et qu'au retour nous connaîtrions par Brookhaven la vérité sur les problèmes que nous avons examinés au sujet des super-protons, des super-neutrons, de tous les hypérons que nous avons étudiés ces jours-ci.¹⁶⁰

Els raigs còsmics no podran competir amb l'estadística que els acceleradors aconseguiran, ni amb la facilitat que dona la font controlable per dissenyar experiments a la mida dels resultats que es volen obtenir. Els *cosmicciens*, però, no hauran dit encara l'última paraula i durant un parell d'anys més seguiran obtenint resultats essencials.

es parla de V_1^0 . No obstant això, és clar que la seva utilització s'estendrà ràpidament a partir d'aquest moment. Prova n'és que, immediatament després del congrés, els seus màxims representants (E. Amaldi, C.D. Anderson, P. M. S. Blackett, W. B. Fretter, L. Leprince-Ringuet, B. Peters, C. F. Powell, G. D. Rochester, B. Rossi i R. W. Thompson) enviaran una nota a diferents revistes del camp per informar dels acords presos sobre la nomenclatura que designarà les noves partícules, i en aquesta nota, la denominació Λ ja és present (vegeu apèndix A, fig. A.37). D'afegit, els superprotons J presentats a Bagnères, són vistos en aquesta nota com la companya carregada de la V_1^0 :

$$\begin{aligned}\Lambda^0 &\rightarrow p + \pi^- \\ \Lambda^+ &\rightarrow n + \pi^+ \\ \Lambda^+ &\rightarrow p + \pi^0\end{aligned}$$

En aquest moment, la diferència de masses no és del tot clara i no permetrà una distinció entre el singlet Λ i el triplet de les més endavant dites Σ . Aquesta distinció serà un primer cop d'efecte de M. Gell-Mann des de la teoria.

¹⁵⁹Una excepció en aquesta idea de definir les partícules amb lletres gregues seran els vells protons i neutrons, que lògicament conservaran la designació p i n. En canvi, la classificació sí que s'adapta a altres velles partícules (γ , μ , ν , π).

¹⁶⁰Leprince-Ringuet (1953a), 289.

Capítol 4

L'aplicació de la simetria d'isospín

La proliferació experimental i els primers intents de sistematització guiaran l'aproximació teòrica a les partícules estranyes. Però el marc teòric no dependrà únicament del coneixement experimental, descobriments en el món de les “velles partícules” donaran la clau per entendre les noves. El 1952 es revaloritzarà la simetria d'isospín, quan s'interpreti la dispersió de pions com l'existència d'estats isobàrics dels nucleons fonamentals, en llenguatge actual ressonàncies. En aquell moment, més que el descobriment per ell mateix serà important l'ús de la conservació d'isospín per a les interaccions fortes, conseqüència de la independència de càrrega d'aquestes interaccions. Si isospín serveix per caracteritzar les interaccions entre pions i nucleons, el pas següent serà aplicar-lo a les noves partícules, que experimentalment s'observa com participen d'aquestes interaccions amb pions i nucleons.

A principis de 1952, Peaslee serà el primer en pensar d'aplicar isospín a les noves partícules. Però les seves aportacions, lligades a les velles idees d'isòbars nucleòniques i a una assignació incorrecta d'isospín, no reeixiran. Pais tampoc arribarà a l'assignació correcta, però el seu treball gaudirà d'un reconeixement especial per la proposta de la producció en parelles i els intents de teoritzar els nous elements. El seu model original (1952) és reformulat per incloure isospín sense perdre la idea de producció associada (1953). Això no obstant, la nova formulació tampoc resoldrà les dificultats de l'original: no pot explicar la partícula cascada Ξ^- i la producció associada segueix sense mostrar-se inequívocament en els experiments.

L'assignació correcta d'isospín per a les noves partícules la donaran Nishijima i Gell-Mann. Per arribar en aquesta assignació, els teòrics hauran de vèncer els prejudicis i admetre fermions amb isospín enter (isobosons) i bosons amb isospín semienter (isofermions). A l'època, els bosons fortament interaccionants coneguts (γ i π) eren isobosons i, anàlogament, els fermions (p i n) eren isofermions. Assumir que el fermió $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ fos isobosó ($I=0$ o 1) era complicat. Però més complicat era admetre que el bosó $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ tingués isospín $\frac{1}{2}$, perquè se'n deduïa l'existència d'una partícula neutra diferent de la seva antipartícula (V_2^+ , V_2^0 i V_2^- , $\overline{V_2^0}$). No obstant això, l'assignació d'isospín enter per a la V_1^0 era necessària per evitar la desintegració electromagnètica ($\Delta I = 0, \pm 1$; $\Delta I_3 = 0$), més ràpida que la desintegració feble observada experimentalment.

Tot i que Nishijima comença a treballar en la teoria de les partícules estranyes el 1951, fins al 1953 no se centrarà en l'assignació d'isospín. La seva tria inicial és $I=1$ per a la V_1^0 i, consegüentment, $I=\frac{1}{2}$ per a la V_2^0 , si s'accepta la reacció forta de producció associada $p + \pi^- \rightarrow V_1^0 + V_2^0$ que ha de conservar isospín. L'any següent, 1954, Nishijima presentarà la llei $q=I_3 + \frac{b+\eta}{2}$, en la qual es reconeix la simetria d'estranyesa, que ell designa η . Finalment, el 1955 Nishijima distingirà un estat d'hiperons singlet (Λ , $I=0$) d'un estat triplet (Σ , $I=1$), davant les evidències experimentals.

Gell-Mann publica per primer cop sobre les noves partícules el 1953. Igual com Nishijima, començarà suposant que V_1^0 és membre d'un triplet ($I=1$). El model de Gell-Mann tindrà un poder extra: enunciarà clarament les reaccions que malgrat estar permeses per la producció associada no ho estaran amb el seu model (per exemple $N+N \rightarrow V_1^0 + V_1^0$). Quan els resultats experimentals verifiquin no detectar aquestes reaccions, el model de Gell-Mann s'anirà imposant. Però fins el 1955 no definirà l'estranyesa i formularà la llei $q=I_3 + \frac{b+s}{2}$.

4.1 L'experiment a Chicago: la revalorització del paper d'isospín amb el descobriment de la primera ressonància

Oppenheimer, however, asserted that it is the first time that there is any smell at all of phenomena which have been on the books for ten years, namely, the existence of some loosely bound systems of isotopic spin 3/2 and spin 3/2; and this very fact is worth some attention.

Rochester (1952a, 37), referint-se al descobriment de la Δ_{33} .

Amb la distinció π - μ , el 1947, els raigs còsmics semblaven resoldre un dels enigmes que des de la dècada dels trenta havia ocupat gran part de les investigacions experimentals sobre la composició d'aquesta radiació. Les evidències constituïen un bàlsam per a la malmesa teoria de mesons, que es recuperava redefinint una teoria de dos mesons diferenciats. La teoria dels dos mesons resultarà exitosa per explicar les discrepàncies entre la teoria de les interaccions nuclears, postulada originalment per Yukawa, i l'observació experimental dels mesotrons de raigs còsmics.

L'optimisme, però, serà breu. La teoria mesònica *per se* continuava presentant problemes. Un dels més importants era la inutilitat final d'una expansió pertorbativa. Amb el referent de l'èxit obtingut a QED, l'expansió pertorbativa basava tots els càlculs en teoria de camps, però en el cas de la interacció nuclear la constant d'acoblament que definia l'expansió era major que la unitat. La teoria mesònica d'acoblament feble¹ havia permès anar trampejant aquest problema, però a mesura que els resultats experimentals van augmentant la concordància teoria-experiment es va fent molt més difícil d'aconseguir. La solució genèrica portarà a un cert abandonament d'aquesta teoria mesònica en favor d'un treball més fenomenològic.

Clau en aquest procés serà el començament de les investigacions sistemàtiques en acceleradors. A principis del 1950 començaran a produir-se pions artificialment. Els acceleradors desplaçaran els raigs còsmics i es convertiran en l'eina més útil per a l'estudi d'aquestes partícules.

La dècada comença amb la detecció del π^0 al sincrociclotró de Berkeley, que funcionava amb un feix de protons de 340 MeV. Immediatament seguiran la determinació del caràcter pseudoescalar del triplet mesònic, a partir de consideracions sobre la desintegració fotònica del π^0 , de la distribució angular i de les seccions eficaces de producció i dispersió dels mesons. El 1951, el ciclotró de Chicago, amb un feix de protons de 450 MeV, va ser el

¹Vegeu cap. 2, sec. 2.1.1.

primer accelerador capaç de produir mesons prou energètics com per estudiar-ne amb cura aquestes seccions eficaces de producció i de dispersió. Les dades experimentals que els acceleradors nord-americans proporcionaven en creixent augment sobrepassaven el poder d'explicació de la vella teoria de mesons, en especial les dades experimentals de dispersió π -N i de fotoproducció de pions. S'imposava el gir cap a models més fenomenològics als quals, d'altra banda, els investigadors ja estaven avesats.²

En el cas de l'explicació de les dades de dispersió, aquesta fenomenologia portarà a la revalorització de la simetria d'isospín, de l'interpretació de les dades com la possible existència, i posterior confirmació, d'estats isobàrics dels nucleons fonamentals. Aquests estats isobàrics determinarien definitivament la independència de càrrega de les interaccions fortes, cosa que suposava la conservació del nombre quàntic d'isospín per a aquestes interaccions. Isospín es convertia així en un nombre quàntic essencial per etiquetar les partícules que interaccionaven fortament.

Tot aquest procés es desenvoluparà a partir, essencialment, del treball d'investigació al sincrociclotró de Chicago. Enrico Fermi era el cap visible dels experiments sobre pions que s'hi duïen a terme. Ben aviat, les investigacions van posar en evidència resultats inesperats per a les seccions eficaces de dispersió:

The striking features of the results of these scattering experiments are

- (a) the very rapid rise in the π^- total scattering cross section from 18 mb at 60 MeV to a broad plateau of 60 mb at about 200 MeV;
- (b) the considerably larger scattering of π^+ than of π^- mesons in hydrogen at 60 MeV;
- (c) the equality of the π^+ and π^- scattering in deuterium [...]³

Ja en aquest article, K. A. Brueckner proposarà que l'explicació d'aquestes dades podia fer-se en termes de l'existència d'estats nucleònics ressonants:⁴

It is found that the steep variation of cross section with energy, the broad plateau suggesting a resonance peak of the π^- scattering at about 200 MeV, and the anomalous ratio of π^+ to π^- scattering can be interpreted to be an indication of the existence of an excited nucleon isobaric state. Assignment of the isobar to the state with total angular momentum $J = 3/2$ and total isotopic angular momentum $I = 3/2$ gives predictions in excellent agreement with experiment.⁵

²Recordem que els models fenomenològics també formaven part de la teoria de mesons. Per descriure la força n-p, Heisenberg introduiria un potencial fenomenològic de curt abast. A partir d'aquí, altres models intentaran descriure la interacció nuclear ajustant diferents potencials als resultats experimentals, com l'energia de lligam del deuteró i les partícules α o les primeres dades sobre dispersions p-p i n-p (v. cap. 2, sec. 2.1).

³Brueckner (1952), 106.

⁴El 1951 Goldberger i Yamaguchi proposen també una explicació, en la mateixa línia de Brueckner, partint de dades de dispersió anteriors dels grups de Chicago i Columbia, però disposant d'energies més baixes.

⁵Brueckner (1952), 109.

Una nota afegida, en què mostra les dades experimentals més recents obtingudes pel grup de Chicago, li serveix per corroborar la hipòtesi presentada en el seu article.⁶ Els recents resultats són els mateixos que H. L. Anderson presenta al 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952) i E. Fermi, tot seguit, discuteix:

If one assumes charge independence, i. e. that the isotopic spin is a good quantum number, the two possible isotopic spins, namely $I = 3/2$ and $I = 1/2$ scatter independently. If moreover, one assumes that the isotopic spin $I = 1/2$ does not scatter at all, one gets just the ratio 9 : 2 : 1 which has been considered above; on the other hand, to assume that the $I = 3/2$ does not scatter at all, would lead to the ratio 0 : 1 : 2. This conclusion is independent of angular momentum, spin correlation, or anything else. One can therefore interpret the experimental results by postulating the existence of a broad resonance level $I = 3/2$ in the band of energy 100–200 MeV, with the consequence that practically all the scattering comes through $I = 3/2$ in this energy region.⁷

És a dir, els processos de dispersió estudiats:

1. $\pi^+p \rightarrow \pi^+p$, dispersió π^+ elàstica (σ_1)
2. $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$, dispersió amb intercanvi de càrrega (σ_2)
3. $\pi^-p \rightarrow \pi^-p$, dispersió π^- elàstica (σ_3)

Amb la consideració, únicament, que es tracta d'interaccions que conserven isospín i que l'estat d' $I = 3/2$ és el que domina, verifiquen la relació:

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 9 : 2 : 1$$

Relació que justament s'intueix en els pics de ressonància de les seccions eficaces de les reaccions considerades per a pions amb energia ~ 120 MeV.

Els resultats experimentals, doncs, semblen confirmar la hipòtesi de l'existència d'una ressonància en aquesta banda d'energia 100–200 MeV, que per les seves característiques de spin i d'isospín ($3/2, 3/2$) es coneixerà amb el nom de Δ_{33} .

A la llarga, aquest descobriment significarà l'origen d'un nou món de partícules inestables, que s'aniran descobrint a Berkeley, Brookhaven i al CERN,⁸ més inestables, fins i tot, que les recentment descobertes partícules estranyes. A curt termini, però, l'efecte més important del descobriment serà la revalorització d'isospín com un bon nombre quàntic per explicar aquestes interaccions fortes, la conservació del qual ha permès la corroboració experimental de la relació 9 : 2 : 1, esperada teòricament.

⁶Brueckner basa els càlculs en les dades més recents que J. Steinberger i H. L. Anderson obtenen dels experiments a Columbia i a Chicago, respectivament. Aquests resultats, abans de publicar-se formalment, són coneguts en reunions de l'*American Physical Society* i en comunicacions privades.

⁷Fermi (1952), 26.

⁸Estem parlant ja de la dècada dels 60, quan es descobrirà un gran nombre de ressonàncies estranyes. És el que s'anomenarà la *Particle Explosion*.

La distinció a llarg i curt termini és important. Malgrat l'anunci del descobriment de la ressonància, la seva percepció en tant que primer element d'un nou món de ressonàncies per descobrir no serà immediata.⁹ Però el reconeixement de la utilitat d'isospín com a bon nombre quàntic per caracteritzar les partícules que interaccionen fortament sí que sembla definitivament establert.¹⁰ Aquesta confirmació revalida la importància d'una aproximació més fenomenològica als problemes de la física de les interaccions nuclears (fortes), independentment d'un tractament pertorbatiu de la teoria de camps mesònica. Sols cal la hipòtesi genèrica de la independència de càrrega de les interaccions fortes, i per tant la conservació d'isospín per a aquestes interaccions, per interpretar les dades experimentals.¹¹

La influència del tema en la física de les forces nuclears, que ocupa gran part d'esforços de l'època, es farà notar en un doble sentit en la física de les noves partícules estranyes descobertes en raigs còsmics. D'una banda, feblement l'aparició de les ressonàncies farà reviu també la idea d'isòbara nucleònica que ja havia estat aplicada a les noves partícules.¹² De l'altra, l'ús d'una anàlisi teòrica més fenomenològica per als vells mesons acabarà distanciant també els models sobre les noves partícules d'aquestes velles teories, i buscarà explicacions en termes de regles de selecció. En particular, de la possibilitat d'aplicació d'isospín també a les noves partícules i de l'esperada conservació d'aquest nombre quàntic

⁹Aquesta percepció caldria buscar-la fora dels límits d'aquesta tesi, en la dècada dels 60. Com a introducció a aquest argument vegeu la discussió al congrés de París, posterior a la contribució de H. L. Anderson (1982, 160-1).

¹⁰Marshak (1989, 651) fa notar aquesta diferència:

Soon after Rochester II, C. N. Yang pointed out an ambiguity in the phase-shift analysis of the πN scattering experiments, and it took several years before the $I = \frac{3}{2}, J = \frac{3}{2} \pi N$ resonance (i. e., the Δ resonance) was placed on a completely sure footing.[...] But it is fair to say that after Rochester II, the concept of isospin invariance of the πN interaction, and consequently the search for other symmetry principles, moved into the forefront of theoretical thinking in particle physics.

¹¹Pais (1986, 486) ens expressa molt clarament aquesta idea:

When, in the late thirties, Kemmer incorporated isospin into meson theory he had insisted that the consequences of isospin invariance hold regardless of dynamical approximations. In those days calculations were so dominated by second-order perturbation theory, however, that the real generality of isospin arguments receded into the background of, I dare say, nearly everyone's mind. All that changed in 1951, when Berkeley data on π -production in N-N and N-nucleus collisions provided an incentive for analyzing these reactions by isospin methods, [...]

¹²Recordeu cap. 2, sec. 2.1.3. Aquesta hipòtesi, malgrat les dificultats respecte el temps de vida que presenta, es repetirà sovint en la literatura. Per exemple, encara en el congrés de Pàdua (12-15 d'abril de 1954), quan Dallaporta (1954, 179) resumeix la situació de possibles nous hiperons descoberts ($Y^\pm \rightarrow \pi^\pm + n$, $Y^+ \rightarrow p + \pi^0$, $\Lambda^+ \rightarrow \pi^+ + n$, $Y^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$), els relaciona amb aquests possibles estats excitats del nucleó:

The isotopic spin formalism, originally proposed to express in a synthetic way the different types of nuclear forces, has found in the interpretation of the scattering of π -mesons by nucleons an important field of application, which underlines its physical significance, and it now seems the most natural way of expressing the hypothesis of charge independence of nuclear forces. It would therefore also seem possible to try to interpret the different types of hyperons as different possible charge values of given excited states of nucleons.

en les reaccions “fortes” que les involucren.

Parlar de les noves partícules estranyes produint-se fortament resultaria un anacronisme, perquè aquesta interacció forta tot just comença a definir-se amb l'aparició de les noves partícules.¹³ Sí és cert, però, que a partir del 1950 amb la proliferació de nous esdeveniments, cada cop és més clar que les noves partícules es produeixen en interaccions nuclears a la radiació còsmica, en processos de col·lisions entre nucleons similars als que donen lloc als pions que es descobriren desintegrant-se en muons en cambres i emulsions. Per tant, si isospín és un bon nombre quàntic per als pions, perquè es conserva en les interaccions amb nucleons que involucren aquestes partícules, també pot servir per caracteritzar les interaccions nuclears semblants que produeixen les noves partícules. El problema ve de la asimetria que mostren aquestes partícules respecte els processos de producció i desintegració, perquè un cop creades semblen mostrar poca interacció amb la matèria nuclear de les cambres i emulsions que les detecten. Les seves llargues traces permeten estimar una vida 13 ordres de magnitud major del que seria esperat per a una partícula que es crea i desintegra via aquestes interaccions nuclears.

L'aplicació d'isospín a les noves partícules que es creen i desintegren en pions i protons secundaris, per als quals aquest nombre quàntic és conegut, serà, doncs, un pas raonable. El que no serà tan evident és que l'assignació d'isospín resolgui immediatament l'enigma sobre la producció i la desintegració de les partícules estranyes.

D. C. Peaslee serà el primer en aplicar isospín als nous elements i es mourà encara en aquest doble sentit que acabem d'explicar: s'aferrarà a la idea d'isòbara nucleònica per a les noves partícules, però intentarà salvar el problema de la llarga vida observada, respecte a la curta vida esperada per a les ressonàncies, amb una tria adequada d'isospín.

4.2 Primeres assignacions d'isospín a les noves partícules

Recent experiments and interpretations on the scattering of mesons by protons have suggested that the isotopic spin T is a good quantum number for meson-nucleon systems. It is therefore of interest to consider the implications of this quantum number for the unstable cosmic-ray particles.

Peaslee (1952, 127).

¹³Vegeu cap. 2, sec. 2.1.4.

4.2.1 D. C. Peaslee: entre isospín i barrera de potencial

Dave Peaslee havia estat predecessor de M. Gell-Mann com a estudiant de V. F. Weisskopf al MIT. Serà, però, a la Universitat de Columbia on desenvoluparà la idea d'aplicar spin isotòpic a les noves partícules. Recordem que en aquesta universitat s'havien desenvolupat els importants treballs experimentals del grup de Steinberger, que junt amb el grup de Fermi a Chicago, havien portat al descobriment de la primera ressonància. Aquesta influència apareix des de la seva primera contribució al respecte, escrita poc després del 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), de la qual la cita que encapçala la secció n'és un exemple.

Amb el descobriment d'aquest primer estat ressonant sembla clar que isospín és un bon nombre quàntic per caracteritzar els sistemes formats per nucleons i pions. Aleshores, Peaslee considera la V^0 fermiònica, que experimentalment s'observa com es desintegra en $p+\pi^-$ (actual $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$), com un d'aquests sistemes. En concret, com un estat excitat del protó.

Per assignar un valor de l'isospín (t) a aquesta V^0 , Peaslee argumenta l'estabilitat de la V^0 en front del decaïment en pions o fotons. Així, segons Peaslee, la no desintegració ràpida de la V^0 en pions s'explica si l'energia d'excitació E i l'isospín t satisfan la relació:

$$E < (t - \frac{1}{2}) 140 \text{ MeV}$$

on t correspon a l'isospín de la V^0 , $1/2$ correspon a l'isospín de l'estat desexcitat (el protó) i els 140 MeV corresponen a la mínima energia per crear un pió en la reacció $V^0 \rightarrow p + \pi^-$. La condició d'estabilitat anterior es pot entendre com una mena de barrera de potencial, que permet o no la desintegració en pions segons l'isospín de la V^0 .¹⁴ Altres arguments referents a la no desintegració en fotons de V^0 indiquen que el seu isospín ha de ser $t > 1/2$.

La conclusió que se'n deriva és la necessitat d'assignar a la V^0 un isospín $t \geq 3/2$. En conseqüència, la V^0 no tan sols hauria d'estar acompanyada d'una V^+ , sinó també d'una V^- i d'una V doblement carregada. Experimentalment, però, no es troben indicis de l'existència d'una V^{++} , cosa que portaria a pensar que l'isospín de les V seria $t < 3/2$. Si es confirmés la no troballa experimental d'una V^{++} , s'invalidaria, doncs, la utilització de l'isospín com a argument per explicar simultàniament la no desintegració de les V^0 en pions o fotons. Un test directe de l'isospín t de les partícules V seria mesurar experimentalment la raó $(n+\pi^+):(p+\pi^0)$, la qual seria 2:1 o 1:2, segons si $t=1/2$ o $3/2$.

La influència del recent descobriment a Chicago es fa evident en aquesta conclusió. Peaslee proposa computar l'esperada proporció experimental de desintegració $(n+\pi^+):(p+\pi^0)$ per a la suposada V^+ , anàlogament a com la raó entre les seccions eficaces de dispersió havia permès intuir l'isospín $3/2$ per a la primera ressonància trobada. Però, l'estabilitat de

¹⁴Aquesta condició d'estabilitat es dedueix de l'hamiltonià d'interacció $H_0 \sim t \cdot \tau$, on τ és l'isospín del pió.

les partícules V , comparada amb la curta vida de la ressonància, posa problemes per a una assignació d'isospín equivalent als nous elements, problemes que Peaslee intenta evitar amb la definició d'una barrera energètica. Malgrat l'intent de solució amb la barrera, aquesta comportaria una assignació d'isospín de com a mínim $5/2$ per a la V , cosa que porta a predir estats doblement i triplement carregats d'aquesta V , que experimentalment no apareixen. Es comença a intuir així que, si es pretén continuar per la via d'assignació d'isospín, caldrà una regla de selecció per evitar la desintegració de les noves partícules, via interacció forta i via interacció electromagnètica, que porti a resultats conformes amb les observacions experimentals, o com diu Peaslee, potser T no és un bon nombre quàntic per als nous elements.

L'any següent, 1953, presenta una versió més elaborada de la seva teoria: pretén explicar ja no sols la V_1^0 (actual Λ) sinó també el mesó pesat V_2^0 (mesó $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$). Igual com en la seva primera formulació, Peaslee intentarà justificar la llarga vida d'aquestes partícules utilitzant el formalisme d'isospín. Ara, però, l'autor s'oblida de la idea de barrera energètica i inclou un nou nombre quàntic que ell defineix com spin v . Malgrat el nom de spin, el nou v no té les mateixes característiques que el spin ordinari. Peaslee deixa la definició oberta pel que fa a una descripció detallada d'aquest nou nombre quàntic: “the new quantum number v need not actually have properties identical with a spin, which has only the recommendation that it is familiar and easy to handle.”¹⁵ La definició d'aquest nombre quàntic presenta també l'avantatge de no haver de considerar necessàriament la producció associada per a les noves partícules. Producció associada que, si bé hem vist com tenia la simpatia de la comunitat física, es resistia a la confirmació experimental:

Qualitative agreement with some V^0 particle anomalies is obtained by assigning to these particles and to the nucleon (N) and π -meson an additional quantum number, “v-spin”: $v = t = 1/2$ for N; $v = 0, t = 1$ for π ; $v = t = 3/2$ for V_1^0 [$V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$]; $v = t = 1$ for v_2^0 [$V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$]. Here t is isotopic spin. All strong nuclear forces are postulated to conserve v -spin absolutely and can lead to copious production of V particles in nuclear matter. This production is sometimes but no means always in pairs. Interactions that violate v -spin are assumed to be very weak, accounting for the long lifetimes of isolated V^0 .¹⁶

Aquest treball de Peaslee és presentat al *Spring Meeting* de la *American Physical Society* del 30 d'abril de 1953, amb R. Marshak presidint la sessió que genèricament es titula *Cosmic Rays: Stars, Curious Particles*.

La introducció del spin v , tot i que explicaria amb la seva conservació o no l'estabilitat de les V contra desintegracions fortes, no resol el problema de l'estabilitat d'aquestes partícules contra possibles desintegracions electromagnètiques, i per tant “an ad hoc rule must be postulated to prevent γ -decay of V^0 .”¹⁷

¹⁵Peaslee (1953b), 229.

¹⁶Peaslee (1953a), 446.

¹⁷Ibíd.

A més, la definició del spin v no queda perfectament establerta. Com l'autor diu “There is of course no real necessity at this point to choose the new quantum number of fundamental particles to behave exactly like a spin, and later data may force abandonment of this formalism.”¹⁸

Amb Peaslee veiem, doncs, com a partir de la revalorització d'isospín, immediatament es pensa en aplicar-lo a les noves partícules. Malgrat l'establiment immediat d'aquesta connexió, l'assignació correcta involucrarà noves idees que en aquest primer moment encara s'escapen, com per exemple la possibilitat d'assignar isospín enter per a les V fermiòniques (com la V_1^0 , o actual Λ) i isospín semienter per a les V bosòniques (com la V_2^0 , o actual mesó K). També és pràcticament immediat adonar-se que l'assignació d'isospín a les noves partícules no resol les incògnites sobre la seva fenomenologia i que, consegüentment, serà necessari introduir alguna regla de selecció addicional, que Peaslee assaja amb el seu spin v .

Peaslee haurà estat el més precoç en l'assignació d'isospín a les noves partícules i en pensar com adequar-lo a les propietats experimentals d'aquests elements. A més, la seva formulació s'haurà concretat en forma d'articles en dues de les revistes importants: el *Physical Review* i el *Progress of Theoretical Physics*, cosa que li procurarà una certa consistència addicional.

Nogensmenys, la mateixa primavera de 1953, altres investigadors estaran pensant com aplicar isospín a les noves partícules, d'entre els quals destaquen Gell-Mann i Nishijima. Tot i que el camí sembla ja obert en aquesta nova línia, cal recordar el model teòric d'A. Pais que poc temps ha, havia estat dels més discutits i considerats. Hem vist com la seva formulació original de la producció en parelles es realitza al marge de la idea d'isospín. Ara, però, Pais veurà la necessitat d'ampliar aquest model original per incloure-hi aquest concepte.

4.2.2 Formalització de la producció associada: poder sintètic i divulgatiu d'Abraham Pais. II

Amb motiu de la *Lorentz-Kamerlingh Onnes Conference*, celebrada el juny de 1953, Abraham Pais presenta noves idees teòriques sobre les partícules elementals. Un any abans, en el 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), ja havia sorprès la comunitat científica amb la formalització de la producció associada a través de la *even-odd rule* i de la seva classificació en famílies de partícules.¹⁹ Ara, intentarà anar més enllà i proposarà una generalització de l'equació de Dirac que contingui implícitament isospín. El resultat pretès seria poder explicar les partícules de spin $1/2$, nucleons però també els nous barions,²⁰ amb

¹⁸Peaslee (1953b), 227.

¹⁹Vegeu cap. 2, sec. 2.2.4.

²⁰El nom de barió l'introdueix Pais per primer cop en la conferència de Tokyo&Kyoto (setembre de 1953), v. aquesta secció, p. 175.

l'equació de Dirac reformada, per tal que el mateix formalisme inclogui els diferents estats de spin isotòpic.²¹

Pais, doncs, pretén ampliar el marc teòric conegut per descriure totes aquelles partícules que intervenen més directament en les interaccions nuclears. La manera com veu aquesta ampliació és a través d'isospín, nombre quàntic que s'ha revelat de gran importància per a les interaccions fortes des dels recents experiments a Chicago. Per tant, com ell mateix diu: "if one wishes to take the isotopic spin seriously, one has to widen the framework of description."²² La seva argumentació comença amb un seguit de qüestions sobre aquesta futura teoria genèrica:

The first question concerns the isotopic spin. Ever since it became clear that proton and neutron can transform into each other and in many instances are exchangeable in nuclear systems, we have been faced with the question whether a theoretical foundation could be given for the fact that these two particles seem to behave like different states of one entity now called nucleon. The formal shorthand of isotopic spin takes cognizance of the situation but explains nothing of course. Let us then ask:

I. Can the isotopic spin be incorporated in a wave equation which yields proton and neutron as possible states? [...]

Now if we attempt to build the isotopic spin concept into the foundations of the theory it is natural to inquire:

II. Can charge independence be an intrinsic invariance property of such a theory? [...]

IV. Can the V_1 [$V_1 \rightarrow p + \pi^-$, actual Λ] be incorporated in a theory of the nucleon? If so, not only the long lifetime of the V_1 for π -decay but also the even longer (if not infinite) lifetime for γ -decay should have a rational explanation:

V. What is the reason for the γ -stability and π -metastability of the V_1 ? [...]

I would now like to report on some work in progress in which it is attempted to answer these questions from a comprehensive point of view. The entire approach grew out of a search for a nucleon equation that intrinsically contains the isotopic spin.²³

De bon principi, doncs, Pais pretén un tractament més formal per als nous elements.

Per tal d'incloure l'isospín del nucleó en l'equació de Dirac, proposa entendre aquest espai d'isospín, que anomena espai ω , en analogia a l'espai de spin 1/2. En conseqüència, juntament amb l'isospín intrínsec \mathbf{T} haurà d'incloure un nou tipus d'isospín, anomenat isospín orbital \mathbf{K} , altra cop en analogia amb el moment angular orbital. Així doncs, l'isospín total \mathbf{I} d'una partícula serà la suma directa $\mathbf{I} = \mathbf{K} + \mathbf{T}$. D'aquest formalisme es trien com a nous nombres quàntics els valors esperats d' \mathbf{I}^2 i de la seva tercera component I_3 , a més del valor associat a l'operador reflexió ω . La reflexió ω representa en l'espai d'isospín el que l'operador paritat representa en l'espai tridimensional.

²¹La seva temptativa també s'ampliarà a la generalització d'una equació de Klein-Gordon que contingui implícitament isospín. És a dir, es generalitzarà per poder explicar partícules de spin 0 en els diferents estats d'isospín.

²²Pais (1953a), 873.

²³Ibíd., 870-3.

Una nova notació espectroscòpica ${}^{2T+1}K_I$ s'utilitzarà per classificar les partícules en l'espai d'isospín de Pais. S'assignarà paritat ω positiva a les velles partícules i paritat ω negativa a les noves. Aleshores, amb aquesta notació el nucleó s'entén com ${}^2S_{1/2}$ i paritat ω igual a +1 ($k = 0$), i les noves partícules V_1 com a ${}^2P_{1/2}$ i paritat ω igual a -1 ($k = 1$).

Pel cas de les V_1 , l'assignació d'un isospín total $\mathbf{I} = \mathbf{1}/2$ implica, de la relació $Q = I_3 + 1/2$, l'existència únicament d'una V_1^+ i d'una V_1^0 . La definitiva confirmació experimental d'una V_1^- invalidaria la consideració de les V_1 com un doblet d'isospín. Escollir l'altra possibilitat d'isospín total ($\mathbf{I} = \mathbf{3}/2$) explicaria una possible V_1^- , però prediria l'existència d'una partícula doblement carregada V_1^{++} , que experimentalment no ha estat detectada.

Les partícules de spin 0 es poden també explicar en aquest nou formalisme incloent l'isospín en l'equació de Klein-Gordon. Amb aquesta modificació es dedueix que els pions es classifiquen com 3S_1 i paritat ω positiva. Un possible intent també de classificar els mesons pesats (mesó K) seria assignar-los la representació 3P_1 i paritat ω negativa. La inclusió del mesó K d'aquesta manera en aquest formalisme obliga a identificar-lo com una partícula pseudoescalar (0^-), assignació poc clara en aquell moment des del punt de vista experimental.

Altrament, la possible identificació del mesó K com un triplet d'isospín té com a conseqüència l'existència dels tres estats de càrrega K^+ , K^0 i K^- . Malgrat que aquests tres estats apareixeran experimentalment, l'assignació correcta d'isospín 1/2 per als mesons K, que s'establirà aviat amb els esquemes de Gell-Mann i Nishijima, invalidarà el triplet previst per la teoria de Pais.

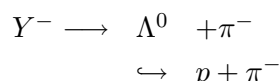
La nova teoria de Pais copsarà la importància d'isospín i l'introduirà implícitament en el formalisme. Al mateix temps, a través de la definició de la paritat ω , mantindrà l'essència de la producció associada original. Ara, serà la no conservació de la paritat ω el que prohibirà la desintegració forta de $V_1 \rightarrow N + \pi$.²⁴ Però malgrat l'evolució del seu treball, les assignacions d'isospín que fa per a les noves partícules no són les correctes. A més, els problemes que la *even-odd rule* arrossegava des de la seva formulació original segueixen presents en aquesta reformulació.²⁵ D'entrada, el model de producció en parelles, que postulava aquesta *even-odd rule* per a les noves partícules, no tindrà confirmació experimental. I no menys important, amb la confirmació del descobriment de la cascada de desintegració Ξ^- , de la qual se'n comencen a tenir indicis tan aviat com el 1950, la teoria de Pais pateix un revés seriós, ja que la seva paritat ω no és capaç de justificar la reacció de desintegració que té

²⁴La problemàtica de la possible desintegració via interacció electromagnètica queda també resolta dins l'esquema de Pais. Com ell mateix diu (1953a, 883):

There are additional selection rules due to ω -parity. Example: A neutral excited meson level can decay into two γ -rays if and only if its ω -parity is even, (as is the case for π^0).

²⁵Recordeu cap. 2, sec. 2.2.4.

lloc:



Segons aquesta teoria, cal assignar paritat ω negativa a les V fermiòniques més pesades que els nucleons (actuals Λ , Σ , Ξ). D'altra banda, la paritat ω ha de ser conservada per a les interaccions fortes, la qual cosa explicaria la producció en parelles de les noves partícules. Aleshores, la primera reacció de la cascada anterior ($Y^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$) tindria lloc fortament, perquè conservaria aquesta paritat ω negativa. Malgrat això, l'experiència indica que el procés de desintegració que té lloc es produeix tan lentament com la resta de desintegracions de les noves partícules i que, per tant, es tracta d'una desintegració via interacció feble.

Malgrat les limitacions del seu model, Pais és considerat un respectable entès en el tema. Amb la proposició de la hipòtesi de la producció associada, especialment a partir d'aquest segon treball, les investigacions en raigs còsmics enfocaran part dels esforços a detectar aquesta doble producció. Però els raigs còsmics mostraran resultats contradictoris que faran difícil tancar la qüestió. A finals del 1952, dues investigacions centrades en l'estudi de la V_1^0 en cambra de boira semblaran afavorir la producció senzilla d'aquests elements.²⁶

A principis d'aquest 1953, doncs, sembla clar que, malgrat l'entusiasme de la hipòtesi teòrica de la producció associada, les dades experimentals segueixen refutant-la.²⁷ Les primeres investigacions en acceleradors tampoc seran definitives. Per l'abril d'aquest mateix any, Dick Garwin, encarregat del programa de recerca de partícules V al ciclotró de Chicago amb feixos de protons de 450 MeV, sembla sentenciar la qüestió al citar aquests treballs

²⁶D'una banda, el grup de Caltech [Leighton, Wanlass, Anderson (1953), 148] aconseguix en l'anàlisi de 23000 fotografies de ruixades penetrants un total de 152 exemples clars de partícules V (134 neutres i 18 de carregades). Una de les conclusions és que "V-particles are generally produced singly and not in pairs." De l'altra, investigacions a la Universitat de Califòrnia [Fretter, May, Nakada (1953), 180], a Berkeley, per diferenciar les V neutres en els dos tipus més clars, V_1^0 (actual $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$) i V_2^0 (actual $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$), conclouen també que:

[...] Three pairs were observed. Only one allowed classification of both its members, one of which turned out to be a V_1^0 and the other a V_2^0 . This frequency of observation contradicts the hypothesis that V^0 's are created only in pairs, unless one V^0 usually has a value of $\beta\gamma$ from 5 to 10 times as large as the other.

²⁷Rochester (1989, 83) es planteja perquè la producció associada no es va manifestar més clarament abans. Per ell, la raó més probable és la utilització de materials amb un nombre atòmic Z elevat, principalment plom, i en la selecció d'esdeveniments de gran multiplicitat que portaria a una gran confusió de partícules. Peyrou a París (1982, 406) presenta una explicació més simple:

One has often accused the cosmic rays physicists of making difficulties to the Gell-Mann scheme in not finding associated production. In fact before September 1953 the cosmic rays physicists were asked to verify the Pais theory which predicted the production of $\Lambda_0\Lambda_0$ pairs. They said they had no evidence for it and they were right. True associated production was almost impossible to prove in the complicated situation of cosmic rays events. Emulsions could not see Λ_0 's; K_0 's have only $\frac{1}{3}$ probability to decay in π^+ , π^- ; K^+ were very difficult to detect in a systematic way.

anteriors:

Two definitive investigations of V^0 particles have appeared since this paper was prepared. This work confirms the earlier data on natural V^0 and adds the information that V^0 are produced singly rather than in pairs.²⁸

Però aquests experiments a Chicago no podran confirmar amb seguretat l'observació de les primeres V produïdes artificialment. Els primers resultats positius seran anunciats aquest mateix any 1953 pel grup del cosmotró de Brookhaven, que operava amb protons a 2.3 GeV. Amb ells, la hipòtesi de la producció associada es començarà a veure com una hipòtesi plausible, tot i que encara mostraran certes reserves:

Of course, instead of one heavy particle several lighter ones (for instance two π^0 's, or a π^0 and a V_2^0) could originate from the events in addition to the V_1^0 . However, the present results are consistent with the possibility of production of V_1^0 together with one other heavy unstable particle.²⁹

La tensió produïda per la confirmació o no de la producció associada es manifesta també al congrés de Tokyo&Kyoto (setembre de 1953). En una de les discussions, que compta amb la presència de Pais, Hayakawa reitera: "The cosmic ray evidence seems to favour single production of V_1^0 particle, but the cosmotron evidence is against it."³⁰ C. N. Yang, de Princeton, s'afanya a veure en aquests resultats de Brookhaven la confirmació dels intents teòrics de producció associada:

[...] the hypothesis advanced by many Japanese authors and Prof. Pais that the V particles are produced in pair seems to be proved by this experiment.³¹

La polèmica aixecada fa de la contribució de Pais en aquest congrés de Tokyo&Kyoto (setembre de 1953) un referent teòric important. Com recordava Gell-Mann: "he was making a big splash there with these ideas about orbital angular momentum in isotopic space."³²

Novetats de la participació de Pais a Tokyo&Kyoto són la proposta del nom "barió":

For light particles we have leptons and for intermediate ones mesons, and perhaps baryon is a good name for the heavy ones, but I don't insist.³³

I l'extensió de la conservació dels nucleons d'una reacció a la conservació de barions (incloent junt als nucleons les V fermiòniques més pesades que ells), tot i que la llei de conservació bariònica no s'explicita:

²⁸Garwin (1953), 274.

²⁹Fowler, Shutt, Thorndike, Whittemore (1953b), 1287.

³⁰Hayakawa (1953), 265.

³¹C. N. Yang (1953), 140.

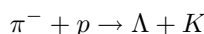
³²Gell-Mann (1982), 399.

³³Pais (1953b), 157.

If we take p and n together, we must really seriously consider the question of conservation of heavy particles which, I believe, was raised for the first time by Prof. Wigner. This is certainly decisive for the stability of our entire universe. Therefore one may ask whether it is possible to get an equation which at the same time allows you to write down the conservation of charge and the conservation of heavy particles.³⁴

La resolució experimental de la problemàtica de la producció associada es donarà mercès a subsegüents investigacions al cosmotró de Brookhaven. Malgrat que sempre es citen els primers esdeveniments de producció artificial a Brookhaven com els que confirmaran la producció associada (1953) el cert és que aquests esdeveniments es reinterpreten posteriorment a la llum de nous casos més clars del mateix cosmotró. Així, a principis de 1954, el grup de Brookhaven afegeix als exemples encara dubtosos:

These examples of the production of heavy unstable particles in $\pi^- - p$ collisions have been shown to be consistent with a double production process,



occurring with a cross section of about 1 millibarn for 1.5-BeV π^- . Further work is required to determine whether production is *always* double in these and nucleon-nucleon collisions.³⁵

A finals del mateix any, la percepció d'aquests esdeveniments ja varia:

One of the most significant results from the Brookhaven Cosmotron has been the clear evidence obtained by Shutt and his collaborators for the production of heavy unstable particles in pairs.³⁶

En el congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954) es recolliran opinions com la de Thorndike, ja més confiat respecte els resultats del seu grup d'experimentals a Brookhaven: "These seem to indicate that Y and K are produced together, as is required to fit the theories of Pais, Gell-Mann, and others."³⁷

La hipòtesi de la producció associada sembla anar afiançant la seva posició. Els resultats en acceleradors seran importants per mostrar reaccions de producció en parelles, però també per mostrar que algunes de les reaccions previstes no tenen lloc. Així, paradoxalment, la verificació de la producció associada suposarà l'èxit de la teoria de Pais i a la vegada el seu declivi gradual a favor de la teoria de M. Gell-Mann. Des de les primeres investigacions en el ciclotró de Chicago, les recerques se centren en les reaccions de producció associada que se suposava havien d'aparèixer amb un llindar energètic de producció més baix. En un primer

³⁴Ibíd. La llei de la conservació bariònica s'anirà definint en aquest moment d'inclusió dels nous elements. Com Pais exposa, sembla que el primer de parlar-ne és Wigner (1949). També apareix el 1951 en els articles dels grups japonesos, en particular, de Nambu, Nishijima i Yamaguchi (1951b, 621). La formalització definitiva s'aconseguirà al no poder obviar la seva presència en la llei de Gell-Mann–Nishijima de l'estranyesa ($q=I_3 + \frac{B+S}{2}$).

³⁵Fowler, Shutt, Thorndike, Whittemore (1954), 861.

³⁶Thompson, Burwell, Huggett, Karzmark (1954), 1576.

³⁷Thorndike (1955), 333.

moment, l'equip de Dick Garwin pretén detectar, amb el feix de protons que proporciona l'accelerador, la producció de partícules V de les col·lisions d'aquest feix amb els nucleons de fitons de grafit o polietilè. Creient la hipòtesi de producció associada a la manera de Pais, s'esperava detectar experimentalment, entre d'altres, reaccions amb nucleons N , hiperons Y i mesons pesats B , de la següent forma:

$$N + N \rightarrow Y + Y,$$

$$N + N \rightarrow Y + B + N,$$

$$Y + N \rightarrow Y + N,$$

essent la primera la més probable pel que fa al llinar energètic. La seva recerca, però, resultarà infructuosa. Alguna llei més restrictiva que la genèrica producció associada haurà d'actuar. La solució la donarà el model de Gell-Mann–Nishijima, a partir del qual les reaccions com la primera, energèticament més favorable, no es podran donar. Tant Gell-Mann com Nishijima, després d'alguns dubtes, arribaran a l'assignació correcta d'isospín per a les noves partícules, i a partir d'aquí, a la simetria addicional d'estranyesa —segons defineix Gell-Mann el 1955— o càrrega v —segons la terminologia adoptada per Nishijima el 1954.

4.3 L'assignació correcta d'isospín

Assuming the charge independence for V -particles, the qualitative features of these unstable heavy particles are investigated.

Nakano, Nishijima (1953, 581).

4.3.1 Kazuhiko Nishijima

Kazuhiko Nishijima s'inicia en l'estudi teòric de les partícules estranyes força abans que M. Gell-Mann. El 1951, el seu nom venia associat als de Y. Nambu i Y. Yamaguchi, i relacionat amb les precursors contribucions dels grups japonesos a la teorització de les noves partícules. Aquestes primeres contribucions ja proposaven la idea de la producció en parelles de les noves partícules. Després, la divulgació i evolució teòrica posterior de la producció associada dependrà bàsicament del treball d'A. Pais. Però els lligams amb l'escola japonesa es mantindran, com ho demostra l'èxit de Pais en el congrés de Tokyo&Kyoto (setembre de 1953).

K. Nishijima mostrarà la influència del treball de Pais. En un article en solitari de principis del 1953 adopta la terminologia *even-odd*, introduïda per Pais, per caracteritzar les interaccions forta i feble respectivament.³⁸ Una constant d'acoblament g_{even} caracteritzaria les interaccions fortes, responsables de la producció de les partícules que, en notació de Pais, tindrien estat inicial i final *even*. Anàlogament, una g_{odd} descriuria les interaccions febles, per a les quals els correspondria, segons Pais, uns estats inicial i final *odd*.³⁹

Nishijima utilitza aquestes definicions per construir un model de producció indirecta de les noves partícules, perquè “the pair production of V^0 -particles seems unfavourable according to recent experimental evidences, [...]”⁴⁰ Per tant, malgrat mostrar la influència de la teoria de Pais sobre producció associada, Nishijima intenta desmarcar-se'n en vista de la manca de confirmació experimental. Curiosament, però, no es tracta de rebutjar aquesta producció en parelles sinó, simplement, de fer-la compatible amb les observacions.

Amb aquesta idea en ment, considera que l'opció més favorable és introduir un nou tipus de partícules (X) de vida molt curta, que farien d'intermediàries entre la producció i la desintegració de les partícules estranyes. La seqüència d'aquestes interaccions es pot simplificar com:

$$N + N \xrightarrow{g_{even}} X + X, X \xrightarrow{g_{int}} \begin{cases} V^0 + \dots & V^0 \xrightarrow{g_{odd}} p + \pi^- \\ N + \dots & \end{cases}$$

Amb g_{even} i g_{odd} aquestes constants d'acoblament de les interaccions forta i feble i g_{int} una constant d'acoblament de magnitud intermèdia, que caracteritzaria la desintegració d'aquesta partícula intermèdia no observada, necessària per conciliar la producció forta (a través de g_{even}) i la desintegració feble (a través de g_{odd}).

Aquesta proposta no és nova. Les primeres investigacions teòriques al Japó, i posteriorment Oppenheimer al 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952), ja l'analitzen. Oppenheimer l'anomenarà la hipòtesi del *live parent* i en discutirà la manca de consistència.⁴¹

Per salvar la inconsistència que mostra Oppenheimer, Nishijima afegeix una regla de

³⁸Nishijima (1953, 430) agraeix a A. Pais l'enviament del seu article [Pais (1952b)] abans de publicació. En aquest article Pais concreta les idees que ja havia exposat al 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952) i defineix la *even-odd* rule.

³⁹Cal mencionar que Nishijima ja utilitza la denominació d'interaccions fortes i interaccions febles que sembla iniciar-se a partir del 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952) i del treball de Pais. De fet, a voltes alterna el nom de *strong interactions* amb el de *strong nuclear interactions*, indicatiu que les velles interaccions nuclears ja no s'associen únicament a nucleons i al seu mediador piònic, sinó que també inclou la producció de noves partícules i per això cal generalitzar la terminologia. Anàlogament, les desintegracions d'aquestes partícules s'han de produir a través d'interaccions molt més febles que les anteriors, ja que mostren una llarga vida. En paraules de Nishijima (1953, 419):

[...] it is worth while to remember that V-particles are produced through strong interactions comparable with the $NN\pi$ coupling, but decay through very weak interactions.

Respecte a l'adquisició d'aquesta terminologia forta i feble vegeu cap. 2, sec. 2.1.4.

⁴⁰Nishijima (1953), 414.

⁴¹Recordeu cap. 2, sec. 2.2.5.

selecció addicional que postula la producció en parelles d'aquests elements intermedis X. Ara, la desintegració de X en les V observades no cal que sigui forta, sinó que es produeix en un valor intermedi caracteritzat per la desintegració simple, en lloc de la producció en parelles via interacció forta amb els nucleons. Alhora, aquest acoblament intermedi permet que la desintegració de la X en les V sigui prou ràpida com perquè experimentalment la X no s'hagi detectat. Així, l'observació experimental no ens mostra aquestes X perquè es produeixen molt ràpidament i en parelles (amb g_{even} típic de la producció forta), mentre que el que observem directament són les seves descendents, les V, que es desintegren lentament (amb g_{odd} típic de la desintegració feble).

La finalitat bàsica que persegueix Nishijima a l'introduir aquest model és conservar la hipòtesi de la producció associada salvant, però, el problema essencial de l'evidència experimental que li sembla anar en contra. Malgrat que aquesta proposta de Nishijima no trobarà gaire ressó quan es doni a conèixer, és interessant per veure el mestissatge que es produeix partint de les diferents hipòtesis bàsiques, en aquest cas, de la hipòtesi del *live parent* amb la *even-odd rule* o producció en parelles.

Aquest 1953 Nishijima sembla mostrar-se favorable en aquest model de producció indirecta, però en el seu article discuteix també altres possibilitats que podrien explicar el comportament de les noves partícules.

Centrant-se en la possibilitat de producció directa, Nishijima encara distingirà els models que proposen una producció simple, dels quals destaca els models de barrera postulant un spin o un isospín alt de les V, dels models que proposen una producció en parelles, com la *even-odd rule* de Pais, que en l'article pretén generalitzar.

La proposta de generalització comença amb la divisió de les *hot elementary particles*⁴² en dos grups: G_0 i G_1 . En el primer grup (G_0) estan inclosos nucleons, pions i fotons, és a dir, les “velles partícules”. En el segon grup (G_1) Nishijima engloba totes les V, suposant que realment interaccionen fortament, i deixa oberta la possibilitat que n'existessin d'altres encara no descobertes que catalogaria en grups successius ($G_2 \dots$).

Qualsevol interacció portarà associada una nova quantitat als seus estats inicial i final, que es relaciona amb aquests grups:

$$\epsilon(G_a) = (-1)^{n(G_a)}$$

on $n(G_a)$ representa el nombre de partícules del grup G_a presents en l'estat considerat. La regla a verificar-se ara serà:

For strong interactions responsible for the production of hot particles, $\epsilon(G_1)$, $\epsilon(G_2)$,... are separately conserved.⁴³

⁴²Per l'autor la terminologia *hot* indica partícules que interaccionen fortament. Anàlogament, *cold particles* seran aquelles que interaccionen feblement.

⁴³Nishijima (1953), 422.

A tall d'aclariment, com que les partícules V són produïdes en interaccions entre pions i nuclis o nucleons i nuclis, en l'estat inicial $n(G_1)$, $n(G_2)$... sempre és zero, per tant $\epsilon(G_1) = +1$, $\epsilon(G_2) = +1$. Si, com postula Nishijima, aquestes quantitats han de conservar-se separatament, en l'estat final les $\epsilon(G_{1,2})$ també han de valer $+1$, cosa que comporta obligatoriament la producció en parelles de les noves partícules.

L'explicació per a la desintegració de les V és igualment factible amb aquesta regla. El cas més conegut de $V^0 \rightarrow p + \pi^-$ és prohibit fortament, ja que $\epsilon(G_1)$ canvia de -1 a $+1$. Per tant, les interaccions fortes no contribueixen als processos de desintegració de les noves partícules.

Un punt extra en favor d'aquest esquema de Nishijima és que permet explicar l'esdeveniment cascada (desintegració Ξ^-) que Pais no havia arribat a explicar amb el seu model. La desintegració d'aquesta partícula es veu com:

$$V^- \rightarrow V_1^0 + \pi^-$$

i s'observa que, en tant que nova partícula, V^- presenta una llarga vida. Al mateix temps, però, seguint la idea de la producció en parelles de Pais, aquest seria un cas típic de producció associada perquè apareixen dues noves partícules en la reacció, per tant seria un cas d'interacció forta, incompatible amb la llarga vida observada per a la V^- primària.

No obstant això, aplicant el model de Nishijima, la V^- cascada es pot considerar membre d'una família d'hiperons d'un grup superior al cas conegut V_1^0 , i per tant, li assignem l'etiqueta G_2 . Aquesta assignació obliga que $\epsilon(G_1)$ i $\epsilon(G_2)$ s'hagin de conservar separatament en la reacció, si es pretén que sigui una interacció forta de producció. Però en considerar que V^- pertany a un grup diferent de V_1^0 , l'estat inicial tindrà $n(G_1) = 0$ (per tant $\epsilon(G_1) = +1$) i $n(G_2) = 1$ (per tant $\epsilon(G_2) = -1$). En l'estat final, en canvi, $n(G_1) = 1$ (per tant $\epsilon(G_1) = -1$) i $n(G_2) = 0$ (per tant $\epsilon(G_2) = +1$). Com ambdues quantitats no són separatament conservades, la interacció no es pot produir fortament i això explica la llarga vida de la V^- .

Aquest model de producció directa en parelles que proposa Nishijima pretendrà solucionar el problema del model de Pais per incloure la partícula cascada. Però sembla que el propi Nishijima no el veu més que com un exercici d'especulació i, en realitat, en aquest moment pensa que la solució correcta és el model de producció indirecta.

La darrera de les possibilitats que Nishijima discuteix és la de la independència de càrrega de les interaccions de producció de les noves partícules, en analogia amb els recents experiments a Chicago que han mostrat la validesa d'aquesta independència per a les interaccions pió-nucleó. L'autor evidencia dos problemes a l'hora de fer l'assignació correcta d'isospín als nous elements:

An important aspect of the isotopic spin is that Fermions can assume half integral values as well as integral values, while Bosons can assume only integral values.

Since there seems to be no charged counter particle to V^0 [actual Λ], we have to assign zero isotopic spin to V^0 .⁴⁴

En la primera afirmació es presenta un problema resultat d'una creença fermament establerta. Fins el moment, els hadrons coneguts —que interaccionen fortament i per als quals té sentit l'assignació d'isospín— són pions i nucleons. En un sistema amb aquestes partícules s'observa que, o bé ambdós són enters (bosons isobosons), o bé ambdós són semienters (fermions isofermions). Per a les noves partícules aquesta regla acceptada no es verificarà. Assumir que el fermió V^0 tingui isospín enter 0 no presenta cap conseqüència de difícil acceptació. Però, per al cas dels bosons —corresponents als mesons pesats (V_2^0 o V_4^0)— acceptar que el seu isospín pugui ser 1/2 és més difícil. De fet, Nishijima no arriba a fer aquest pas en aquest primer article, perquè la conseqüència que se'n segueix és l'existència de dobles d'aquestes partícules: (K^+ , K^0) i (K^- , \bar{K}^0). Fins al moment, cap partícula bosònica neutra coneguda té la corresponent antipartícula diferent.

Nishijima, però, ferm en la seva tria del model de producció indirecta no mostra més interès en la independència de càrrega que la simple exposició de la possibilitat que s'acaba d'obrir. Però uns mesos més tard de la publicació d'aquest article, es produirà l'impacte definitiu de la revalorització del nombre quàntic d'isospín. Alhora, els experiments del cosmotró semblaran mostrar l'existència de processos de producció associada. Amb aquestes noves dades en ment, a finals del mateix any 1953, Nishijima junt amb T. Nakano canvien d'opinió sobre el model correcte per descriure les noves partícules i se centren en la hipòtesi de la independència de càrrega.

Nakano i Nishijima escullen considerar V_1^0 (actual Λ) com part d'un triplet de càrrega, per tant amb isospín 1. Aquesta tria —ara sabem que errònia— la justifiquen a partir de la informació experimental disponible a partir del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953): junt amb la coneguda $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ s'ha detectat exemples de “superprotons”, que es presenten com a companyes carregades de la V_1^0 ($V_1^+ \rightarrow p + \pi^0$, $V_1^+ \rightarrow n + \pi^+$).⁴⁵ Per tant, no és descabellat atribuir en aquests casos un isospín 1.

Un cop feta aquesta atribució se segueix automàticament un isospín 1/2 per als mesons pesats, que ells denoten com Π^0 (actual K^0). Ho justifiquen amb la informació experimental proporcionada pel cosmotró de Brookhaven sobre la producció en parelles i la suposició de conservació d'isospín per a les interaccions fortes:

$$\pi^- + p \rightarrow V_1^0 + \Pi^0, (\Pi^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-)$$

D'aquí que, Π^+ i Π^0 són tractats, com el protó i el neutró, com un doblet d'isospín 1/2.⁴⁶ Aleshores, Nakano i Nishijima ja estan disposats a acceptar que Π^0 s'ha de distingir de

⁴⁴Ibíd. 428.

⁴⁵Vegeu cap. 3, sec. 3.3.

⁴⁶Si volem que la primera reacció conservi isospín, com a interacció forta que és, i hem assignat isospín 1 a la V_1^0 , immediatament se segueix que la V_2^0 haurà de tenir spin semienter 1/2.

la seva antipartícula $\overline{\Pi^0}$: “Hence the Π^0 -particle should be described by a complex wave function as well as the charged Π -particle, and we must distinguish between the Π^0 -particle and its anti-particle $\tilde{\Pi}^0$.”⁴⁷

Nakano i Nishijima mostren també en aquest article com el seu model es veu molt influït pel d'A. Pais, ara que els experiments semblen recolzar la producció associada. Tot i que el protagonisme ja no el donen a la *even-odd rule*, puntualitzen que aquesta regla es pot considerar una conseqüència de la independència de càrrega:

If both the spin and isotopic spin of a hot particle are integer or half-integer we call it an even particle, whereas if only one of them is integer and the other is half-integer we call it an odd particle. The even-odd rule holds for such an even-odd assignment of hot particles.⁴⁸

Finalment, un dels punts més importants de l'article és que, adonats de l'assignació que acaben de fer de spin isotòpic, els autors pensen en canviar les relacions existents entre aquest nombre quàntic i la càrrega de la partícula.

Fins al moment, es coneix que $q = I_3 + 1/2$ per als barions —pràcticament des que Heisenberg en fa l'assignació (1932)— i que $q = I_3$ per als mesons —des de l'assignació de Kemmer (1938). Ara, aquestes relacions s'han de modificar perquè els mesons pesats tenen càrrega entera i, en canvi, isospín semienter amb l'assignació anterior. Així doncs, proposen la següent relació per a un sistema de mesons (pions i kaons), nucleons i hiperons:

$$q = I_3 + 1/2[n(N) + n(\Pi)],$$

on $n(N)$ representa el nombre de nucleons menys el nombre d'antinucleons i, anàlogament, $n(\Pi)$ representa el nombre de mesons pesats (Π^+ , Π^0) menys el nombre d'antimesons pesats (Π^- , $\tilde{\Pi}^0$). Els hiperons, igual com els pions, sols contribuïrien a la fórmula en la tercera component d'isospín, ja que en la forma com hem definit isospín per a aquestes partícules (+1, 0, -1), l'assignació dóna directament el valor de la càrrega. En canvi, com ja sabíem per als nucleons —i ara per als kaons— cal afegir un valor que reguli l'equilibri entre q i I_3 . Per als nucleons ja sabem que aquest valor és 1/2. Però, intuïtivament, cal afegir també el nombre de kaons menys el de les seves antipartícules, perquè sinó la llei que relaciona la càrrega amb I_3 no funciona. D'aquí l'expressió que presenten.

Són conscients, doncs, que la regla original s'ha de modificar per la presència de les noves partícules, però fallen encara al no assignar el corresponent nombre bariònic als hiperons —encara que aquesta natura en ells ja era coneguda.⁴⁹

Podem apuntar que l'article és novedós perquè està pensant en modificar la “vella” llei. Modificació necessària, d'altra banda, a partir de l'assignació agosarada d'isospín (fermions

⁴⁷Nakano, Nishijima (1953), 581.

⁴⁸Ibíd. Recordem que per Nishijima una *hot particle* és una partícula que interacciona fortament.

⁴⁹Veurem més endavant (cap. 6, sec. 6.1) com aquesta reticència a introduir el nombre d'hiperons en l'expressió retardarà la consecució final de la idea d'estranyesa en el model de Gell-Mann.

isobosons i bosons isofermions).

Poc després d'haver acabat aquest treball, Nakano i Nishijima tenen coneixement que, a Occident, Gell-Mann està realitzant una teoria similar.⁵⁰

En el cas de K. Nishijima, la formulació final d'aquesta regla l'arriba a presentar en un article datat el 13 de juliol de 1954. Tot i que Nishijima no utilitzarà el nom d'estranyesa, que donarà un pes addicional al treball realitzat per Gell-Mann en introduir aquesta denominació definitiva amb la qual serà comunament acceptada i divulgada, arribarà primer a la relació:

$$Q = I_z + N/2 + S/2,$$

coneguda actualment amb el nom de llei de "Gell-Mann–Nishijima".⁵¹ Nishijima defineix la moderna S com v -charge i proposa:

Let us consider the collection of the elementary particles that obey the requirement of charge independence, then as is well known there is always a definite relationship between the third component of the isotopic spin and charge for each elementary particle, e. g. $q = I_3 + 1/2$ for nucleon and $q = I_3$ for pion.

In a similar way we may write

$$q = I_3 + 1/2 + 1/2 \cdot \eta_a$$

for a hyperon N_a and

$$q = I_3 + 1/2 \cdot \eta_b$$

for a heavy meson Π_b .

In this note we call this η the v -charge. The v -charge of a nucleon or a pion is zero as is clear from the definition. If we assume the charge states of Λ and K as Λ^+ , Λ^0 , Λ^- ($I = 1$) and/or Λ^0 ($I = 0$) and K^+ , K^0 ($I = 1/2$) following the assignments in I , we have $\eta(\Lambda) = -1$ and $\eta(K) = 1$. In general an anti-particle has an opposite v -charge of the particle as is the case for the electric charge.

The total charge q and the third component of the total isotopic spin of a system are connected with each other by

$$\begin{aligned} q &= I_3 + 1/2 \sum_a n(N_a) + 1/2 \sum_a \eta_a n(N_a) + 1/2 \sum_b \eta_b n(\Pi_b) \\ &= I_3 + 1/2 b + 1/2 \eta, \end{aligned}$$

[...] In production processes only charge independent and electro-magnetic interactions

⁵⁰Veurem com Gell-Mann (sec. 4.3.2 i cap. 6, sec. 6.1) també mostra aquesta idea del nombre de mesons pesats en un preprint d'agost del 1953. Nakano i Nishijima (1953, 581) envien aquest article per publicació el novembre de 1953 i expliciten que no coneixen del treball de Gell-Mann més que la seva existència:

After the completion of this work, the authors knew in a private letter from Prof. Nambu to Prof. Hayakawa that Dr. Gell-Mann has also developed a similar theory.

⁵¹Analitzarem com Gell-Mann (cap. 6, sec. 6.1) no publicarà la llei correcta fins la contribució al congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955), cosa que sembla subratllar el pes de Nishijima en el desenvolupament del model per a les noves partícules.

are operating for which q , I_3 , and b are conserved. Hence we have a conservation law

$$\eta = \text{const.},$$

this is nothing but the conservation of ν -charge. Contrary to the case of electric charge, ν -charge is defined only for such particles that have strong nuclear interactions and its conservation is violated by the weak interactions responsible for decays.⁵²

La idea teòrica apareix així en la forma correcta. Malgrat que Nishijima no distingeix en els barions l'estat singlet Λ de l'estat triplet Σ , l'aplicació d'aquesta idea no depèn de tenir un singlet i un triplet, o qualsevol altre conjunt de multiplets.

Finalment, en una recopilació del març de 1955, K. Nishijima presenta el seu model teòric amb tot detall. Després d'un breu sumari de les evidències experimentals, on les observacions del cosmotró ja juguen un paper fonamental, l'autor passa a explicar la importància de la hipòtesi de la independència de càrrega aplicada als nous fenòmens. Mercès a l'actualització d'aquesta informació experimental, respecte l'article anterior, Nishijima associa correctament un estat singlet a la Λ^0 , diferenciat d'un altre estat triplet:⁵³

Experimentally charged hyperons Λ^\pm are known, but their masses are considerably heavier than the Λ^0 mass and are less copiously produced than Λ^0 . These facts lead us to conclude that these charged hyperons cannot be the counter particles to Λ^0 . Hence we assign the isotopic spin of Λ^0 as

$$I = 0 \text{ for } \Lambda^0.$$

It may be natural to assume that Λ^+ and Λ^- belong to the same charge multiplet. A number of reasons make us assign

$$I = 1$$

to Λ^\pm together with a supplementary neutral particle. This neutral particle is different from the former Λ^0 and they are distinguished by subscripts indicating their isotopic spins as

$$\Lambda_0^0,$$

$$\Lambda_1^+, \Lambda_1^0, \Lambda_1^-.$$

A partir d'aquestes assignacions, i de les relacions entre Q i I_z conegudes per a les velles partícules, Nishijima explica novament la teoria de la càrrega ν . Però, ara, la redefineix com càrrega η . Les relacions conegudes per a les velles partícules suposaven que $q = I_3 + 1/2$ per als nucleons, i que $q = I_3$ per als pions. Si pretenem generalitzar aquestes lleis, per tal que incloguin els nous hiperons i els nous mesons pesats, podem escriure genèricament:

$$q = I_3 + 1/2 + (1/2)\eta_a$$

⁵²Nishijima (1954), 107.

⁵³Nishijima (1955), 290.

per a qualsevol barió genèric N_a i,

$$q = I_3 + (1/2)\eta_b$$

per a qualsevol mesó pesat Π_b .

De la definició, la càrrega η és nul·la per a nucleons i pions, les velles partícules. I l'assignació per a les noves partícules se segueix automàticament si s'han de complir les lleis anteriors. Per tant, tenint en compte que la conservació de càrrega i del nombre bariònic són lleis absolutes, s'ha de complir sempre:

$$\eta(\Lambda) = -1,$$

$$\eta(\Pi) = 1.$$

A més de sobreentendre que les corresponents antipartícules tindran una càrrega η oposada a la càrrega η de la partícula corresponent, com en el cas de la càrrega elèctrica. Per a un sistema format per tot tipus de partícules hadròniques, on té sentit la definició d'isospín, podem generalitzar la llei:

$$q = I_3 + b/2 + \eta/2$$

En certa manera, aquesta càrrega η o v porta una mena de justificació teòrica de l'assignació d'isospín, necessària per explicar el comportament de les noves partícules, i les distingeix de les velles. Serà el nou nombre quàntic definitivament conegut amb el nom d'estranyesa S , que s'imposarà a partir de la definició de Gell-Mann i que introduirà una nova simetria $U(1)$ de conservació de la càrrega S .

Acabem de veure com en l'article del 13 de juliol de 1954, Nishijima ja presenta la llei correcta i demostra entendre les característiques de la nova simetria. En aquest moment ja disposa, doncs, de la llei que més endavant serà coneguda com "llei de Gell-Mann–Nishijima". Hem notat també que M. Gell-Mann no presentarà aquesta llei, com a mínim oficialment, fins el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955). Però M. Gell-Mann juga amb altres armes al seu favor: l'associació amb A. Pais, la predicció de noves partícules i els seus modes de desintegració, un major poder divulgatiu influït per la seva presència a Occident i les seves relacions amb els experimentals... Aquestes seran raons suficients per atribuir la prioritat del descobriment, majorment, a M. Gell-Mann.

4.3.2 Murray Gell-Mann

M. Gell-Mann es doctora en física pel MIT el gener de 1951, i passa la resta d'aquest any a l'*Institute for Advanced Study* de Princeton. L'any següent es desplaça més a l'interior dels EEUU, fins a Chicago, per treballar a l'*Institute for Nuclear Studies and Department of Physics*, on E. Fermi està a punt d'anunciar els importants resultats trobats al sincrociclotró, que portaran a la revalorització del paper d'isospín.

A Chicago, M. Gell-Mann comença treballant en temes que directament poc tenen a veure amb les noves partícules inestables: mètodes no pertorbatius de càlcul en el marc de la teoria de camps, amb M. L. Goldberger, i relacions de dispersió i spin isotòpic en el domini nuclear, amb V. Teledgi. Notem, doncs, que el primer contacte teòric que M. Gell-Mann tindrà amb les noves partícules ja estarà lligat a la hipòtesi de la independència de càrrega, tema candent a Chicago en el moment de la seva arribada.

El 1953, amb vint-i-tres anys, Gell-Mann presenta la primera publicació sobre les noves partícules basada en la possible atribució d'un spin isotòpic als nous elements. Malgrat en els reculls històrics afirma no conèixer el treball de Peaslee,⁵⁴ de fet en aquest primer article constantment en fa referència, juntament amb el treball de Pais:⁵⁵

PEASLEE has considered the interesting possibility that the principle of charge independence, now believed to hold for nucleons and pions, may extend to the new unstable particles as well. In order to discuss this suggestion[...]

In connection with the work of Peaslee and Pais, the author would like to put forward an alternative hypothesis that he has considered for some time, and wich, like that of Pais, overcomes the difficulty posed by electromagnetic interactions.⁵⁶

La hipòtesi alternativa que cita Gell-Mann apareix a partir del problema de l'assignació d'isospín a les noves partícules “that the new unstable particles are fermions with integral isotopic spin and bosons with half-integral isotopic spin.”⁵⁷ De fet, quan M. Gell-Mann presenta aquest primer article a publicació, sembla que els *referees* es mostren recelosos a acceptar-lo. Les objeccions són diverses. D'entrada, hi ha el problema de com anomenar les noves partícules, la qual cosa obligarà a Gell-Mann a modificar el títol de l'article dos cops:

⁵⁴En la contribució sobre el concepte d'estranyesa que M. Gell-Mann fa a París (1982, 396) expressa així aquest desconeixement sobre el treball de Peaslee:

I didn't read the article at the time, I only glanced at it for a few seconds, but a couple of days ago I tried to read it and found it difficult to follow.

⁵⁵A. Pais envia el seu treball sobre la paritat ω a Gell-Mann abans de la publicació. No obstant això, Gell-Mann (1982, 396) insisteix que el desenvolupament de les seves idees és del tot independent de la producció associada de Pais:

In my subsequent papers I have often started, in explaining the work on strangeness, from associated production and from the elegant paper of Abraham Pais. In fact, though I was unacquainted with his work and did not proceed from associated production. I learned about associated production just as I invented the scheme. But logically, for purposes of explanation, it was better to discuss associated production first and then the special idea of the connection with displaced isotopic multiplets.

En el seu cas aquesta afirmació sembla perfectament justificada. També és cert, però, que el model de Pais fou molt estimat, i quan la clau sembla isospín els que pensen en aquesta nova simetria per explicar les noves partícules sempre reserven un espai per incloure en el nou model la regla fenomenològica de Pais, fins i tot, Gell-Mann. Aquest fet ha comportat que l'explicació didàctica d'estranyesa sovint sorgeixi a partir de la producció associada, tot i que històricament no hagi estat un desenvolupament tan lineal.

⁵⁶Gell-Mann (1953b), 833.

⁵⁷Ibid.

[...] Isotopic Spin and New Unstable Particles. That was not my title, which was: Isotopic Spin and Curious Particles. Physical Review rejected “Curious Particles”. I tried “Strange Particles”, and they rejected that too. They insisted on: “New Unstable Particles”.⁵⁸

Però encara més difícil d'acceptar és l'afirmació anterior que porta a l'existència d'una V_2^0 (actual K^0) diferent de la seva antipartícula \bar{V}_2^0 . Gell-Mann es veu obligat a presentar a la revista una justificació, on mostra com la teoria no priva l'existència d'un bosó neutre diferent del seu antibosó, encara que aquest no sigui el cas del conegut π^0 :

Another thing I had to do for the Physical Review was to explain that the generalized Pauli principle was applicable to fermions with integral isotopic spin and to bosons with half integral isotopic spin. It was widely believed that there was a mathematical demonstration that fermions had to be isofermions and bosons had to be isobosons because that was the only way the Pauli principle could be generalized to include isotopic spin. It simply wasn't true, and I succeeded in pointing that out.⁵⁹

Malgrat les dificultats,⁶⁰ finalment l'article és acceptat i Gell-Mann presenta la seva assignació d'isospín. A la coneguda $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ se la suposa el membre neutre d'un triplet d'isospín 1, consistent per tant en: V_1^+ , V_1^0 , V_1^- . La τ^+ ($K^+ \rightarrow 3\pi$) i la θ (a l'època encara dita V_2^0 o V_4^0 , actual $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$) formarien un doblet isotòpic, que redefineix amb el nom τ^+ i τ^0 . Aquesta assignació comporta que les antipartícules corresponents, $\bar{\tau}^+$ i $\bar{\tau}^0$ seran diferents de les seves partícules. No sols canvia la seva càrrega sinó també, com a mínim, la seva tercera component d'isospín.

La qüestió clau que desperta l'argumentació de Gell-Mann és: què justifica l'atreuiment de considerar aquesta assignació d'isospín “antinatural”?⁶¹ Intentar respondre-la ens fa adonar de l'important paper que juga la interacció electromagnètica, que determina aquesta assignació. Malgrat que l'electromagnetisme no semblarà directament involucrat en les reaccions de producció usuals —que són interaccions fortes— ni en les de desintegració conegudes en aquest moment —que són interaccions febles— serà necessari pensar en prohibir també aquesta possible via de desintegració. La sort és que es coneix el comportament de l'isospín de les partícules respecte la interacció electromagnètica:

$$\Delta I = 0, \pm 1; \Delta I_3 = 0.$$

⁵⁸Gell-Mann (1982), 400.

⁵⁹Ibíd.

⁶⁰C. N. Yang (1982, 407) confessa la seva pròpia reticència a acceptar el model de Gell-Mann en aquests primers moments:

In reference to Murray's interesting account of the history of the concept of strangeness, I remember that in the summer of 1953, I did not like Murray's idea at all. In fact, I convinced everybody at bull sessions at Brookhaven in the early summer of 1953 that Murray's proposal was all wrong. I had two objections. I did not feel that a boson should have half integral spin, and I had believed that there is only one neutral K. But just to keep the records straight, I was not the referee that Murray mentioned!

⁶¹En el sentit de bosons no necessàriament isobosons i fermions no necessàriament isofermions, com acabem de discutir.

Aleshores, l'única manera d'evitar estrictament aquest tipus de desintegració serà suposar que la variació, entre l'isospín de la primària i de les secundàries, es produeix en un valor semienter. Concretant, la coneguda $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ es desintegra donant un estat final amb isospín semienter ($\frac{1}{2} \otimes 1 = \frac{1}{2} \oplus \frac{3}{2}$). Per tant, perquè aquesta reacció no es produeixi per transicions electromagnètiques i ho faci amb la lentitud que experimentalment s'observa, cal suposar que l'isospín de la primària serà enter ($I=0$, si fos un estat singlet o $I=1$, si es considera triplet) i així, mai es verificarà $\Delta I = 0, \pm 1$ que permetria la desintegració electromagnètica. D'afegit, l'observació experimental de la $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ durant molt de temps com un hiperó únic, feia raonable aquesta assignació isobosònica, encara que el dubte entre triplet i singlet es mantindrà fins a noves aportacions experimentals.

Recordem que K. Nishijima proposa aquesta assignació d'isospín en l'article rebut el 24 de març de 1953 al *Progress of Theoretical Physics*, però el raonament que el porta a admetre l'existència de fermions (V_1^0) isobosons no quedarà tan clara. Per la seva banda, M. Gell-Mann, més sol·lícit i també més sol·licitat a l'hora de fer un relat històric dels successos, presenta aquesta curiosa versió de la forma com va arribar a l'assignació d'isospín en aquest article rebut el 21 d'agost de 1953 al *Physical Review*:

A few weeks after that, probably in May of 1952, I paid a visit to the Institute for Advanced Study, where I had spent the previous year. While I was there someone asked me whether I had read Peaslee's letter. I described the situation, and I was then asked to get up and talk for a few minutes in the seminar room on the idea and why it wouldn't work. I don't recall exactly who was there but I think Francis Low, T. D. Lee, Abraham Pais, and various others. In my explanation, as I got to the $I = 5/2$ proposal I made a mistake, a slip of tongue, and said $I = 1$. I paused and didn't go on with the talk for a minute or two because I was thinking to myself " $\Delta I = 1$ or 0 , $\Delta I_z = 0$, are the rules for electromagnetism; if we need $\Delta I = 1/2$ and $\Delta I_z = \pm 1/2$ for decay electromagnetism will have trouble doing that, and the problem is solved". I went on, but at the end I said: "by the way, a few minutes ago I got what I think is the right idea. If this V particle belongs to a triplet, plus, zero and minus, with $I = 1$, electromagnetism will have great difficulty causing decay; we don't know of any kind of electromagnetic interaction that will change isotopic spin by a half unit, or the z component by a half unit, and so the decay can be weak" I might have gotten very excited about it at that time but in fact the audience was not very enthusiastic.⁶²

El juny del mateix any, Gell-Mann inicia una primera visita a Europa, que el porta a l'École Polytechnique, mercès a la intermediació de Bernard d'Espagnat que havia estat treballant a Chicago. Leprince-Ringuet el convida a una reunió del seu grup de recerca i, segons Gell-Mann, serà en aquesta reunió on per primer cop exposa obertament la seva assignació d'isospín, davant Bernard Grégory, Louis Michel, André Lagarrigue i altres.

A finals del 1952, ja de nou a Chicago, Gell-Mann exposa la idea al seminari setmanal de l'Institut d'Estudis Nuclears. En aquell moment, però, a Chicago Dick Garwin realitza un experiment per detectar $n+n \rightarrow \Lambda + \Lambda$, reacció predita pel model de producció associada

⁶²Gell-Mann (1982), 396.

de Pais. La fe en la producció d'aquesta reacció, que d'altra banda estava prohibida per conservació d'isospín en les interaccions fortes segons el model de Gell-Mann, fa que el seu seminari no resulti massa exitós. Indici afegit que la producció associada de Pais era reconeguda com a model teòric de les noves partícules.

Després d'una estada a Urbana (Illinois), col·laborant amb Francis Low en el que s'anomena grup de renormalització, Gell-Mann torna a Chicago el juliol de 1953, amb la sorpresa de tenir un avís per incorporar-se a files, amb la guerra de Corea com a destí més probable. D'altra banda, l'èxit aconseguït per Pais amb la paritat ω es troba en el punt més dolç, després de la gran acceptació que té en el congrés de Tokyo&Kyoto del 1953.⁶³ Sembla que aquest panorama mou Gell-Mann a escriure finalment un article on concreta les seves idees sobre les noves partícules. El resultat és la *letter* que acabem d'analitzar i que constituirà la seva primera publicació sobre el tema.⁶⁴

A partir d'aquest moment, un dels impactes que provoquen els articles de Gell-Mann és la presentació evident d'allò que el seu model pot predir i allò que no. És a dir, són escrits on els experimentals poden llegir clarament què s'espera que els seus experiments detectin. A tall d'exemple, en aquest primer article ja justifica amb el seu model que certes reaccions són prohibides:

In a similar fashion, all reactions of the form *nucleon* + *nucleon* \rightarrow $V_1 + V_1$ and all reactions of the form τ + *nucleon* \rightarrow $V_1 + \pi$ are forbidden, while reactions such as *nucleon* + *nucleon* \rightarrow $V_1 + \tau$ + *nucleon* or $[\tau]$ + *nucleon* \rightarrow $V_1 + \pi$ are allowed.⁶⁵

De les reaccions citades, les dues primeres no eren prohibides segons el model de Pais, però tots els intents per trobar-les experimentalment seran infructuosos, quan el llindar d'energia era suficientment baix com per esperar detectar-les amb relativa facilitat. Es tracta d'un pols, mantingut entre un model ja relativament ben acceptat, com el de Pais, i un model incipient, com el de Gell-Mann. Aquest darrer, però, té l'avantatge afegit d'incloure isospín des del primer moment.

Fermi, que es trobava com Gell-Mann a la Universitat de Chicago, en el Departament de Física i Institut pels Estudis Nuclears, segueix fidel a la hipòtesi de l'alt moment angular i s'oposa aferrissadament a les hipòtesis de Gell-Mann. En particular, l'assignació d'isospín semienter als kaons és considerada revulsiva als ulls de Fermi, perquè aquesta assignació obliga a classificar aquests kaons en un parell de doblets (K^+ , K^0) i (\bar{K}^0 , K^-), o d'altra forma, ens està indicant que existeix un bosó neutre diferent del seu antibosó. El problema que Fermi es planteja és:

⁶³Vegeu aquest capítol, sec. 4.2.2.

⁶⁴Amb anterioritat, el més d'agost de 1953, Gell-Mann emetrà un preprint que analitzarem més endavant per la seva relació amb la prioritat del descobriment de la coneguda com a "lleï de Gell-Mann–Nishijima" (v. cap. 6, sec. 6.1).

⁶⁵Gell-Mann (1953b), 834.

If K^0 and \overline{K}^0 are non-identical particles, how does one see that in the laboratory?⁶⁶

que no és de solució immediata amb l'estadística proporcionada pels esdeveniments de raigs còsmics.⁶⁷

Malgrat l'oposició de Fermi, i d'altres més partidaris de les hipòtesis estructurals que permeten no haver d'introduir les noves partícules com elementals,⁶⁸ el model basat en una regla de selecció sobre el nombre quàntic d'isospín anirà prenent força.

Un cop aquesta assignació feta, l'intent posterior serà pensar la raó fonamental que porta a les noves partícules a diferenciar-se de les "velles". Això no obstant, buscar aquesta simetria amagada suposarà l'adquisició d'una certa perspectiva a partir del moment de l'assignació correcta d'isospín. Ja hem vist com es produeix aquesta evolució en el cas de K. Nishijima. Però en el cas de M. Gell-Mann, la transició prendrà una altra forma i passarà

⁶⁶Pais (1986), 521. A les reserves presentades per Fermi sobre la hipòtesi d'un K^0 diferent d'un \overline{K}^0 , la teoria d'estranyesa respondrà dient que K^0 difereix de \overline{K}^0 precisament en el nou nombre d'estranyesa ($S = +1$ per a la primera i $S = -1$ per a la segona) de manera que és lícit tractar-les com partícules diferents (v. cap. 6, sec. 6.2.1).

⁶⁷Fermi començarà a pensar seriosament en la idea d'isospín com la correcta a principis del 1954. En una carta a Giuseppe Cocconi, del 24 de febrer de 1954, començarà a acceptar aquesta possibilitat:

I am returning to you the manuscript "Strange' Particles and Multiple Meson Production". As far as I can see, what you say is possible. Of course, if Pais and Gell-Mann are right, the long lifetime is due to a selection rule that permits only pair interaction. I am not sure that this is finally proved and the alternate interpretation of strange particles as states of high angular momentum is perhaps still possible.

Fermi a Cocconi, 24-2-1954 (Enrico Fermi Papers, The University of Chicago Library, Chicago). Notem que és una de les primeres vegades que apareix escrit l'ús de la paraula *strange particles* per descriure les noves partícules inestables en raigs còsmics. De fet, l'article de Cocconi al qual es refereix Fermi, que sortirà publicat aquest mateix any, serà el primer que hem detectat en la literatura publicada amb el nom de *strange particles* [vegeu Cocconi (1954)]. També apareix aquesta denominació en la carta que Cocconi envia a Fermi presentant-li l'article anterior:

Caro Professore,
 le mando alcune pagine in cui sono fatte alcune semplici considerazioni sulle "strange particles".
 Le sarò grato se vorrà rimandarmile con qualche commento in margine, se quel che vi è detto merita un commento.

Cocconi a Fermi, 11-2-1954 (Enrico Fermi Papers, The University of Chicago Library, Chicago). La denominació ens sembla mostrar com realment es tracta d'un nom originat en llengua anglesa i com, malgrat en les publicacions a revistes no és encara habitual, és un nom ja conegut pels físics que treballen en el camp.

⁶⁸Sobre aquesta actitud reservada de Fermi envers les noves partícules, Dalitz (1989, 435) la defineix molt bé respecte la complexitat dels esdeveniments kaònics:

The senior physicists took the general attitude of Enrico Fermi: Collect evidence, but make no assumptions about the identity of any of these K mesons until the evidence allows no other possibility. They took a severe attitude toward hypothetical speculation, especially simplifying assumptions, about the K mesons, [...]

Aquesta actitud, que Dalitz aplica al cas concret dels modes de desintegració dels kaons, és generalitzable en un cert corrent conservador que es repeteix al llarg dels descobriments de l'època. Fermi n'és un exemple davant l'oposició a les idees de Gell-Mann, de la nova generació de físics. Però també l'actitud conservadora de la comunitat teòrica genèrica s'ha fet present en el primer moment de l'etapa de descobriment, amb els intents d'inclusió en la teoria mesònica que priven d'enunciar els nous fenòmens com clarament i obertament nous.

per entendre les partícules com multiplets d'isospín desplaçats de càrrega. Aquesta etapa de transició es produirà just en el moment de màxima divulgació de la teoria de Gell-Mann. En especial, com el resultat de la participació a diferents congressos amb què iniciarem la tercera etapa.

PART III

1953–1957: DARRERS DESCOBRIMENTS EN
RAIGS CÒSMICS I PRIMERS EN
ACCELERADORS EN EL MARC DEL MODEL
D'ESTRANYESA

Capítol 5

Darrers descobriments i prediccions confirmades

La tercera etapa comença enllaçant amb els acords a què s'arriba al final de la segona. A partir de 1953, s'accentuaran les millores tècniques, les col·laboracions, i consegüentment el coneixement de les noves partícules... Aquests esforços, però, tindran visos agònics, davant del poder creixent dels acceleradors. El capítol arranca analitzant les millores i limitacions de les dues tècniques bàsiques: cambres i emulsions; continua amb els nous descobriments que resulten d'aquestes millores; i acaba definint els enigmes pendents que el treball en acceleradors i els avenços teòrics hauran de resoldre.

Respecte les cambres, especialment problemàtiques eren: la mesura de la ionització, el control dels corrents de convecció i el control de la dispersió coulombiana. La solució vindrà d'intentar minimitzar els errors més controlables, com els corrents de convecció, i d'assajar muntatges nous, com les multilàmines, dobles cambres, cambres de difusió i d'alta pressió. Les multilàmines explotaran la mesura de l'abast i la major interacció de les partícules en el medi més dens. Les dobles cambres combinaran els beneficis de les multilàmines amb les mesures de la curvatura en la cambra convencional, així com la capacitat de gravar esdeveniments complets.

El treball en cambres se centrarà en la determinació de les secundàries dels mesons pesats carregats, per diferenciar-ne els modes de desintegració i comparar-los en massa i altres propietats amb els exemples de les emulsions (τ , κ , χ), de les cambres convencionals (V^\pm) i de les multilàmines (partícules S). La problemàtica es pot seguir del cas concret de diferenciació dels modes $\kappa \rightarrow \mu + \pi^0 + \nu$ ($K_{\mu 3}$), $\eta \rightarrow \mu + \nu$ ($K_{\mu 2}$) i $\chi \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ($K_{\pi 2}$). Aquest cas mostra com el coneixement avança amb les millores experimentals i amb la confrontació de postures entre diferents grups i tècniques (emulsions de Bristol, multilàmines del MIT i doble cambra de l'EP). Però el coneixement també avança amb les aportacions d'altres grups que investiguen en cambres, com Princeton, Caltech i Indiana. En conjunt se seguiran investigant els modes de desintegració de les K^\pm , donaran informació puntual sobre hiperons, i evidenciaran més V^0 anòmales, que s'aniran definint com desintegracions de K^0 ($K_{\pi 3}^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$, $K_{\mu 3}^0 \rightarrow \mu^\pm + \pi^\mp + \nu$, $K_{e 3}^0 \rightarrow e^\pm + \pi^\mp + \nu \dots$).

Les emulsions també experimentaran millores a partir de 1953. Des de Bagnères, es veuran amb el repte afegit de millorar perquè el treball en cambres començava a immiscir-se en el seu territori d'anàlisi dels mesons pesats. La limitació bàsica era la pèrdua d'esdeveniments per la manca d'igual orientació espacial amb l'emulsió i per la fuga de les traces més enllà dels seus límits. Calia, doncs, augmentar el volum, solució que s'aconseguirà amb els blocs de *stripped emulsions*, desenvolupades entre 1951 i 1954. El treball més complex en aquests blocs canviarà la dinàmica de treball dels grups i n'augmentarà les col·laboracions. Destacarem tres col·laboracions entre 1952 i 1954, l'última de les quals, el *G-stack*, representarà un gran èxit de col·laboració entre molts laboratoris i d'obtenció de resultats sobre mesons pesats carregats (300 casos). La seva anàlisi afegirà molta informació als modes coneguts (τ , τ' , κ , χ , K_μ , K_β) i permetrà un acostament del valor de les masses, que cada cop sembla més clar que pertanyin a un únic mesó K . Aquest acostament mostrarà, però, la dificultat d'identificar el mesó $\tau \rightarrow 3\pi$ amb el mesó $\theta \rightarrow 2\pi$. Amb el tractament estadístic del problema que farà Dalitz es conclourà que θ i τ no poden ser la mateixa partícula perquè tenen diferent paritat. La solució final vindrà del món teòric, amb la proposta agosarada de la violació de paritat de les interaccions febles, que permetrà veure θ i τ com la mateixa partícula.

A mitjan dels cinquanta, les cambres i emulsions aplicades als raigs còsmics hauran pràcticament acabat la seva tasca. Els mateixos grups de treball començaran a exposar aquests detectors als acceleradors que, a partir de 1955, disposaran de feixos de kaons. Per als acceleradors quedarà la tasca de determinar les secundàries no carregades dels modes κ i K_β , l'esclarament de les V^0 anòmales, la confirmació definitiva de la producció associada, el descobriment dels hiperons Σ^0 i Ξ^0 , que la teoria predirà, o la resolució de l'enigma θ - τ amb la violació de paritat.

5.1 Milliores en les tècniques i els resultats

The track patterns observed in cloud chamber and emulsion, in addition to the V's, testified to a variety of decay schemes, of possibly many new particles. The taxonomy and the number of species of the subnuclear zoo were proving difficult to establish.

Brown, Dresden i Hoddeson (1989), 7.

A partir del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), el camp d'estudi de les noves partícules semblarà haver assolit un cert grau d'autonomia i organització. En el congrés es concreta una classificació experimental de les noves partícules que permetrà organitzar un llenguatge comú a l'hora de donar a conèixer futures investigacions. Pel que fa a la metodologia experimental, a Bagnères també es precisarà la necessitat de minimitzar i reconèixer errors, d'homogeneïtzar els procediments lligats als dos mètodes de detecció bàsics: cambres i emulsions; i aconseguir, així, mesures més acurades que possibilitin la distinció clara dels diferents elements observats i que facin raonable la identificació d'esdeveniments trobats per diferents grups. L'èxit queda palès en les remarques finals:

Turning to the present conference, I think it has been in many respects the best I have ever attended, especially for the sustained interest, the high level of the discussion and the friendly but sharp, critical attitudes of the participants. It has also been remarkable for the high level of attendance.

I think this conference will have a very good effect on experimental workers. I feel that all young physicists who have attended this conference (and not a few older ones) will be a little more careful when publishing their next paper to ensure that they have not overlooked any systematic error or under-estimated their random error.

[...]

So, when we meet again we may hope to have so improved our accuracy that many of the controversies of this week will be quite settled. However, if the history of scientific discovery is any guide, the same increase of accuracy which will serve to settle our present controversies will equally, surely, itself bring to birth new controversies by leading of some discoveries.¹

Sols amb una organització adequada i un major control dels procediments, l'estadística de fenòmens detectats en diferents indrets i amb diferents mètodes es pot considerar sumativa i superar d'aquesta manera la singularitat dels *golden events*, malgrat tot, tan essencials en el descobriment de les noves partícules. Però el congrés també evidenciarà que els detectors estan en procés de perfeccionament, per tal de millorar aquestes estadístiques:

¹Blackett (1953b), 291.

Il nous apparaît que dans un très proche avenir nous allons voir un grand nombre de données expérimentales surgir ou se préciser progressivement. Cela est dû au fait que de nouvelles techniques, comme celle des émulsions pelées, comme celle de la conjugaison de plusieurs Chambres de Wilson avec champ et écran, commencent à donner des informations importantes: nous saluons les premiers résultats que l'on a observés grâce à elles et qui viennent de nous être présentés.²

Tot plegat —millores tècniques, organització, control d'errors...— també es fa necessari per afrontar l'arribada dels acceleradors com a font de detecció dels nous elements, i poder competir amb ells pel que fa a resultats. Malgrat que l'amenaça dels acceleradors ja és present a Bagnères, la detecció en la font natural encara sobreviurà uns anys més, amb l'esforç multidireccional dels *cosmicists*, que ja s'intueix aquest 1953.

Les millores tècniques en cambres i emulsions es produeixen amb la idea bàsica d'augmentar-ne l'eficàcia. En aquest sentit, un dels problemes bàsics de les cambres convencionals era que el gas que contenien oferia relativament pocs fitons amb els quals la partícula incident podia interaccionar. En cada funcionament es perdia un gran nombre d'esdeveniments que corresponien a partícules que travessaven la cambra sense ser captades o, sovint, també, que interaccionaven en les parets de la cambra on no podien ser detectades. Les multilàmines, les dobles cambres i fins i tot les cambres de bombolles s'idearan per augmentar el nombre d'esdeveniments gravats. Per això, l'altre detector visual, les emulsions, també oferiria un treball complementari a la detecció en cambres. En les emulsions el volum sensible és un sòlid, que oferiria més fitons i un major poder d'aturada. Però en aquest cas el problema era la gravació contínua, que dificultava la distinció de traces deixades a temps diferents. A més, partícules que no fossin coplanars amb l'emulsió no eren detectables, i per això de bell antuvi es va pensar en la construcció d'emulsions més i més gruixudes, tot i que la solució no s'aconseguirà fins el moment que ens ocupa, amb els grans blocs de *stripped*.

Cal puntualitzar que les millores tècniques no estan sempre lligades a la investigació de les noves partícules. Així, pel que fa a la tècnica de cambres, la incorporació del camp magnètic a les cambres convencionals, l'aparició de les multilàmines, i fins i tot els primers muntatges en dobles cambres apareixeran en els vells estudis sobre la natura de la radiació còsmica i la investigació de pions i muons. Però l'eficàcia de multilàmines i dobles cambres s'explotarà especialment en la investigació de les noves partícules. Bagnères (6–12 de juliol de 1953) registrarà els resultats de la doble cambra de l'EP al Pic du Midi, de les cambres de Manchester al Jungfrauoch i també al Pic du Midi, de la gran cambra magnètica del grup d'Indiana, de la multilàmines del MIT, de la doble cambra de Princeton, de la cambra de Caltech, etc. L'any següent, al congrés de Pàdua (12–15 d'abril de 1954), un resum del treball fet en cambra de boira a les universitats americanes cita resultats de la cambra multilàmines del MIT, de la doble cambra de Caltech, i de la cambra de boira magnètica d'Indiana, a més dels resultats presentats per l'EP i de la novetat de la cambra de boira

²Leprince-Ringuet (1953a), 288.

d'alta pressió de la Universitat d'Edinburgh. En el 4t congrés Rochester (25–27 de gener de 1954) destacaran els resultats obtinguts al cosmotró de Brookhaven amb una cambra de difusió d'alta pressió. A Pisa (12–18 de juny de 1955), Leprince-Ringuet presenta una taula amb les cambres utilitzades per analitzar els esdeveniments S i V carregats on apareixen les dobles cambres de l'EP al Pic du Midi, de Princeton a Echo Lake, de Caltech, les cambres multilàmines dels grups de Manchester, del MIT, de Berkeley, de l'EP a Chamonix, de Brookhaven... El 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955) afegirà també els resultats en cambra de boira de difusió al cosmotró i el 6è Rochester (3–7 d'abril de 1956) tornarà a parlar de la cambra de difusió aplicada al cosmotró i també al bevatró de Berkeley, així com els primers resultats de la cambra de bombolles aplicada al cosmotró de Brookhaven. Al final, aquesta cambra de bombolles, que començarà com un altre intent de combinar els avantatges de les cambres convencionals amb el poder de parada i visualització de les interaccions de materials més densos com les emulsions, acabarà imposant-se en la investigació en acceleradors.

Pel que fa a les emulsions, l'augment de la seva eficàcia derivarà bàsicament de l'augment del seu volum. El resultat seran els blocs d'emulsió —*stacks*— i els *sandwiches*. En paraules de C. F. Powell:

A striking feature of the work in the past few years has been the rapid rate at which new methods have been introduced in response to the need to solve particular problems, and we have repeatedly seen the great value of being able to make our experimental attack with a variety of technical resources. To illustrate the speed of advance in one method alone, I need only mention that it is only nine years ago that OCCHIALINI climbed on foot to the Pic-du-Midi, during the Christmas vacation in 1946, carrying a few glass plates coated with 2 or 3 cm³ of the first Ilford A1 Nuclear Research emulsion. Only three years ago we were using stacks of glass plates coated with about 300 cm³ of emulsion; much of our work today is done with stacks of stripped emulsions 10 litres or more in volume.

These technical innovations have resulted in a rapid extension of knowledge.³

És clar la importància de l'augment del volum, i també que la investigació de les noves partícules impulsarà la millora de les emulsions. En paraules del grup de Bombay:

In deciding the over-all dimension of the detector one has to make a compromise between what is desirable and what is practical. Since part of our objective was to get precise information on the mass and decay schemes of various K-mesons and Hyperons it would have been best to have a detector with a stopping power of at least 100 grams/cm², i. e., linear dimension of 25 cms. This is needed because at present exact information on the energy and the nature of charged decay products from unstable particles is only obtainable if their range can be measured.⁴

Però les millores introduïdes comportaran noves dificultats que repercutiran en un canvi en la forma de treball dels grups d'emulsions. La necessitat de col·laboració entre diferents grups es farà evident:

³Powell (1956), 337.

⁴Daniel *et al.* (1954), 152.

One set of difficulties, by no means negligible, is connected simply with the larger number of plates to be handled. Apart from the more than normal precaution to be taken in order to recover such valuable equipment after the ballon flight, it is necessary to organize the processing, cutting and aligning in such a way that it can be done in a reasonable number of manhours.⁵

Les empreses Ilford i Kodak seran les responsables de proporcionar el material, que un cop exposat es repartirà entre diferents laboratoris per a la seva anàlisi i detecció de nous esdeveniments. El treball en blocs d'emulsió s'imposarà a l'ús de les emulsions senzilles.

Al final de l'etapa, emulsions i cambres s'aplicaran als acceleradors amb més o menys fortuna, la qual cosa permetrà prolongar el treball dels *cosmicciens* familiaritzats amb els aparells de detecció i els relacionaran amb les noves generacions especialitzades en acceleradors.

5.1.1 Les cambres de boira

Les cambres de boira convencionals. La cambra de boira s'havia revelat com una eina primordial per a la detecció i visualització dels nous elements. No obstant això, a mesura que els fenòmens són més complexos es va exigint de la tècnica una millor resolució pel que fa a la mesura d'ionització, càrrega, curvatura, abast i/o dispersió. A Bagnères, per exemple, es fa evident les dificultats en les mesures de la ionització:

Remarque: Les particules de massa 1000 citées au cours de la conférence se trouvaient dans un domaine de moment tel que l'estimation visuelle de l'ionisation ne permettait pas de les distinguer avec certitude d'un électron.⁶

L'any següent, remarquant els problemes en el càlcul de la ionització i analitzant nous mètodes possibles, Blackett afirmarà: “there is little doubt that the new techniques will rapidly supersede the subjective method of making visual estimates of ionization.”⁷

El mètode subjectiu a què es refereix la cita de Bagnères és el recompte visual de gotes, forma habitual d'estimar la ionització. En la cambra de boira, les partícules carregades es materialitzen per la pèrdua d'energia que manifesten i que transfereixen a la formació d'ions en la cambra, aquests ions es poden veure quan al seu damunt es condensa el vapor sobresaturat. Un cop els comptadors donen el senyal de la presència d'una partícula de possible interès, es retarda l'expansió de la cambra per deixar que els ions formats puguin expandir-se per difusió per ser observats en les fotografies. Amb l'ajut d'un visor estereoscòpic, per diferenciar la traça del fons, s'efectua el recompte de grans. Per a la mesura es divideix la traça en cel·les i es compta el nombre de gotetes que caben en cada cel·la. La

⁵Ibíd., 153.

⁶Becker *et al.* (1953), 14.

⁷Blackett (1954), 276.

ionització relativa de la traça ve donada aleshores pel nombre mig de gotetes contingudes en cada cel·la i la seva mesura ens permet estimar la velocitat de la partícula.⁸

El problema d'aquest mètode era que permetre la difusió dels ions en la cambra per mesurar la ionització també difuminava la traça i dificultava la mesura de la curvatura de la partícula en el camp magnètic,⁹ a través de la qual es calculava el moment, i ambdues mesures eren necessàries per determinar la massa de la partícula que deixava la traça.¹⁰ Com que permetre la difusió era necessari per a la mesura de la ionització, l'error involucrat en la curvatura era inevitable. Es tractava, doncs, d'arribar a un conveni entre la possibilitat de mesurar acuradament el moment o de mesurar la ionització. A causa de la imprecisió en general major en la mesura de la ionització, en les investigacions de noves partícules amb cambres de boira magnètiques convencionals el compromís entre ionització-moment normalment sempre es feia a favor del moment. Això volia dir que sovint la determinació de la ionització no passava de ser una estimació visual per comparació de les diferents traces presents en un esdeveniment.

A partir de 1953, s'intentaran esforços addicionals per millorar aquesta mesura de la ionització. Per permetre el recompte de gotes de traces controlades per comptadors sense difusió excessiva era necessari reduir la mida de les gotes i mantenir un contrast fotogràfic adequat. Una possible solució era canviar el gas habitual de les cambres per una mescla de gasos amb una ionització específica menor, tot i que les mesures de la curvatura també sortien perjudicades. El conveni més acceptat fou l'ús d'una mescla que contenia una proporció important d'heli que augmentava la ionització per sobre la mínima mesurable.

Però no sols la difusió dels ions dificultava la mesura dels moments. També els corrents de convecció originats pel gradient de temperatures en l'interior de la cambra eren distorsionadors importants en la mesura de la curvatura. Quan major era la longitud de la traça a estudiar, major era aquesta distorsió, per tant el control de les condicions tèrmiques en la cambra era també bàsic.¹¹ Finalment, cal esmentar la dispersió coulombiana múltiple d'una partícula carregada com una causa d'error poc controlable en la mesura de la curvatura de la traça. Els estudis van mostrar que quan major era el moment de les partícules que deixaven la traça, més important es feia l'error associat a la difusió, per davant de l'associat a la dispersió. Evidentment, el joc era reduir els errors per convecció, i altres

⁸En el primer capítol ja vam veure que la densitat d'ionització, I , es relacionava amb la velocitat, β , com:

$$I = Z^2 f(\beta)$$

on f depenia únicament de la natura i pressió del gas.

⁹La presència d'aquest error en els càlculs de traces no és considerada fins el 1951 (Wilson, 1951).

¹⁰Recordem que la curvatura d'una partícula de moment p (eV/c) en un camp magnètic H és: $C = 300 \frac{eH}{pc}$ ($C = \frac{eH}{pc}$, en unitats cgs). Combinada aquesta mesura amb l'obtinguda de la ionització $I = Z^2 f(\beta)$, es podia deduir la massa.

¹¹En aquest sentit, recordem el treball essencial fet per Thompson amb el seu grup d'Indiana i que a Bagnères ja es posa de manifest (v. cap. 3, sec. 3.3, p. 142).

distorsions relativament controlables, per sota dels errors menys controlables associats a la difusió o la dispersió. Però a mesura que s'augmenten les dimensions de les cambres per gravar esdeveniments més complets, aquest joc es va fent més complicat. La solució radical serà assajar modificacions de la cambra que permetin mesures alternatives. Així, les multilàmines i dobles cambres intentaran reforçar la dificultosa mesura de la ionització amb la mesura de l'abast i combinar-la també amb la de la dispersió en les làmines.¹²

Un altre dels problemes presents era la millora dels sistemes de selecció d'aquests esdeveniments. En la dècada dels quaranta, la cambra de boira s'havia convertit en l'analitzador dels fenòmens de raigs còsmics de diferents energies i diferents poders de penetració. Quan a finals d'aquesta dècada comencen a sorgir tímidament les partícules V, la menor presència desencadenarà la modificació dels sistemes de selecció per tal de fer-los més sensibles als nous elements. De bon principi, la majoria de sistemes de selecció disparava el funcionament de la cambra amb les ruixades penetrants produïdes per un nucleó o nucleons incidents d'energia major que 10 GeV. Però als anys cinquanta se n'adonen que aquest requeriment no ha de ser tan estricte i que algunes partícules V es poden produir amb nucleons incidents de pocs GeV d'energia. Quan Brookhaven comença els experiments, s'observa que un feix de pions d'1.5 GeV és suficient per produir Λ^0 i θ^0 . Amb disparadors de la primera generació, aquests esdeveniments entre 1 i 10 GeV escapen a la detecció en la cambra.¹³

Des del món dels raigs còsmics, totes aquestes dificultats en la mesura de moments, ionització, eficiència i control d'errors tindrà com a resposta el desenvolupament de cambres de boira modificades. Les cambres multilàmines, les dobles cambres, les cambres d'alta pressió i les cambres de difusió s'aniran imposant en la recerca de les noves partícules.

¹²Recordem que quan la partícula s'aturava en la cambra, l'abast es podia relacionar amb el moment per una equació del tipus:

$$\frac{R}{m} = \frac{1}{Z^2} F\left(\frac{p}{m}\right)$$

on R és l'abast de la partícula, m la massa, Z la càrrega, p el moment i F una funció que sols depèn del material que omple la cambra.

Pel que fa a la dispersió coulombiana, primitivament permetia una distinció visual dels mesons lents al final del seu abast respecte dels protons que no dispersaven tant. Els estudis en emulsions van permetre una teoria detallada de la dispersió que es relaciona amb el moment i la velocitat de la partícula com $\bar{\alpha} \propto \frac{Z}{pv}$, on $\bar{\alpha}$ representa el canvi de direcció per unitat de longitud de la partícula que travessa el medi, a causa de la dispersió coulombiana produïda pels nuclis que es troben en la seva línia de moviment.

Queda clar que la combinació de la mesura de l'abast amb la dispersió coulombiana, la ionització i/o la curvatura per un camp magnètic permet determinar la massa de la partícula.

¹³Es pot estimar que 1/20 dels esdeveniments que contenen partícules V és produït per nucleons o pions entre 1 i 10 GeV/c. Com que processos en aquestes energies més baixes n'hi ha uns 50 cops més que els d'energia més elevada, esperaríem 2.5 cops més esdeveniments V a baixa energia que per a les energies superiors a 10 GeV. No és fins el 1954 que se n'adonen que caldria millorar els sistemes de detecció i fer-los sensibles en aquestes energies més baixes, alhora que es disminuís el temps de recuperació de la cambra per aprofitar aquest major flux de possibles partícules V. Però donar cabuda als esdeveniments d'aquesta energia faria augmentar també de forma molt elevada el fons de processos involucrant pions, muons, etc., amb els conseqüents problemes de distinció en les fotografies. La imprevisibilitat manifesta de la radiació còsmica sols serà eliminada quan els acceleradors guanyin la batalla en el control de la investigació dels nous elements.

Les cambres multilàmines. Les cambres multilàmines eren cambres de boira amb l'interior travessat per làmines relativament primes, normalment de plom o de coure. La finalitat bàsica del muntatge era determinar el moment, a partir de la mesura de la dispersió en les làmines, i l'energia, a partir de l'abast de les partícules, que en el material més dens tindrien més probabilitat d'aturar-se.

Els avantatges de les cambres multilàmines per davant dels muntatges tradicionals es van posar ràpidament en evidència: facilitaven l'estudi de les interaccions nuclears, la distinció entre partícules penetrants i electrons, que es multiplicaven donant cascades en travessar les làmines, la detecció de fotons produïts en una interacció nuclear i l'estimació de la seva energia a través de la materialització en parells electró-positró, l'estudi de desintegracions en repòs dins la cambra (partícules S), del seu recorregut, la seva energia i la seva massa, etc. A principis dels cinquanta, aquests avantatges de les multilàmines s'apliquen a la investigació de les noves partícules. Comparar l'abast de les secundàries d'aquests esdeveniments donava informació sobre si eren protons, pions, muons o electrons. També significa una millora per distingir les secundàries neutres: un fotó secundari es materialitzarà en una cascada d'electrons en un interval d'uns pocs milímetres de plom, si la secundària fos un neutró ràpid produiria una interacció nuclear en la seva línia de vol, si es tractés d'un π^0 els fotons provinents de la seva desintegració es materialitzarien també en cascades electròniques.

Les multilàmines, però, també presenten limitacions. La important precisió en l'abast queda limitada per les possibles interaccions nuclears que poden afectar les partícules en travessar les plaques. A més, el gruix d'aquestes làmines introduirà imprecisions en els càlculs, especialment quan les partícules entren en la placa i moren en ella, la qual cosa no permet més que donar un límit superior i inferior de l'abast, segons el gruix de la placa. El signe de la càrrega tampoc es pot conèixer del treball en multilàmines, perquè no disposen de camp magnètic que resultaria inútil per mesurar la curvatura amb la influència de les làmines interferint constantment en la trajectòria de la partícula. Pel que fa a les estimacions de la ionització, tot i que possibles, resultaran més grolleres per fer-se en els trams més curts que separaven les plaques. Davant les dificultats, a la pràctica els experimentals arriben a una mena d'acord referent a les dimensions elementals d'interval entre làmines i el seu gruix. Quan més gruixudes són les làmines més fenòmens es perden i quan menor és l'interval entre plaques més dificulta el funcionament de la cambra per problemes d'il·luminació, males estimacions de la ionització, etc. Però, al mateix temps, si l'interval entre làmines és gran, disminueix el nombre de plaques que podem col·locar a l'interior de la cambra. En general, doncs, una cambra multilàmines útil ha de tenir grans dimensions per contenir un nombre elevat de làmines al seu interior i que puguin estar espaiades a conveniència.

Les dobles cambres. Una doble cambra és una combinació de cambra de boira magnètica convencional amb una multilàmines, per tal d'aprofitar els avantatges d'ambdós instruments.

Aquest tipus de combinació neix a finals de la dècada dels trenta, en els estudis de les partícules penetrants. El 1939, J. C. Street i E. C. Stevenson, de Harvard, posen en funcionament un muntatge de dues cambres sobreposades. La cambra superior tenia un camp magnètic que proporcionava el moment i la càrrega de les partícules. La inferior contenia làmines de plom (multilàmines). Un bloc de plom al damunt de la cambra superior seleccionava partícules penetrants que disparaven la cambra quan eren detectades per un sistema de comptadors Geiger-Müller. La clau en aquests experiments era detectar el llarg abast d'aquestes partícules en la cambra inferior. Així, es podia comprovar que les partícules penetrants, bàsicament muons, presentaven un abast molt més llarg del que s'esperaria per protons de moment similar i una ionització menor que aquests protons. A més, tampoc podien ser electrons, perquè després d'un llarg recorregut encara no presentaven ruixades. El muntatge, doncs, permetia diferenciar els nous mesotrons de les velles partícules ja conegudes. Més tard, el 1946, W. B. Fretter, de Berkeley, utilitzarà un muntatge similar per obtenir la massa del mesotró amb una precisió que fins aleshores no havia estat aconseguida.¹⁴

Precisament fou el muntatge de Fretter el que crida l'atenció del grup de l'EP, i impulsa la construcció de la doble cambra que s'instal·larà al Pic du Midi i donarà els primers resultats al congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953). Els múltiples avantatges eren evidents. Les noves partícules inestables penetraven en la cambra magnètica superior on, a diferència de les multilàmines, es podia conèixer la càrrega i el moment, de la curvatura del camp, i estimar visualment la ionització. Quan la partícula arribava a la multilàmines inferior se'n podia determinar l'abast i també, sovint, estudiar els productes de la seva desintegració fins al final del seu abast. Així, en el cas ideal, els mesons pesats carregats, de vida més llarga ($\sim 10^{-8}$ s) que els neutres i que els hiperons ($\sim 10^{-10}$ s), es podien estudiar directament, obtenint una massa de la primària a partir de la traça en la cambra magnètica, sense necessitat de conèixer les secundàries en què es desintegrava. Si a més s'aconseguien unes bones mesures sobre les traces de les secundàries (d'abast, dispersió i/o ionització) la massa de la primària es podia establir amb més rigor. D'afegit, sovint la natura de les secundàries també es podia inferir del comportament que mostraven en la matèria de la multilàmines: interaccions nuclears, ruixades... i distingir així si es tractava de protons, pions, muons o electrons.

Cal tenir en compte que perquè una doble cambra fos útil calia fer-la de grans dimensions, ja que la idea era que una ruixada secundària de la ruixada penetrant, produïda a sobre de la cambra magnètica (superior), pogués travessar el màxim de matèria possible, per tal d'augmentar la possibilitat d'interacció o d'aturada. Ja en les multilàmines simples, la manera d'augmentar aquest poder d'aturada era crear un medi més dens a l'interior de

¹⁴Sobre aquests precursors, vegeu J. C. Street, *Journal of the Franklin Society*, 227 (1939): 765; W. B. Fretter (1982): 192.

la cambra, és a dir, ajuntar els avantatges de les emulsions amb les dimensions i possibilitat de selecció d'esdeveniments de les cambres de boira. A més de les multilàmines, altres projectes tindran com a fita aconseguir unir els avantatges d'un i altre mètode i serà així com naixeran les cambres d'alta pressió i de difusió, i també la cambra de bombolles. Però les cambres de bombolles, malgrat el seu inventor D. A. Glaser (1952) les dissenya per a la seva aplicació a la radiació còsmica, demostraran la seva efectivitat en el camp naixent dels acceleradors.

Les cambres d'alta pressió i de difusió. Les cambres d'alta pressió comencen a operar a mitjan de la dècada dels quaranta a Anglaterra, a l'*University College* de Londres i s'aplicaran al sincrociclotró de Harwell i a l'estació de muntanya de les Dolomites al pic de la Marmolada (2020 m), on la Universitat de Pàdua tenia el laboratori de recerca en raigs còsmics, sovint usat per l'*University College* i per la Universitat d'Edinburgh. Però no s'acabarà de desenvolupar un treball sistemàtic d'identificació de partícules.

El principi bàsic de les cambres d'alta pressió era la idea d'augmentar la densitat de matèria en el seu interior fent-la treballar a pressions molt més elevades que les convencionals. A mode d'exemple, la densitat de matèria d'una emulsió nuclear típica era de 4 gcm^{-3} . Per a una cambra de boira plena d'argó, aquesta densitat baixava fins a 0.0018 gcm^{-3} . En canvi una cambra anàloga a l'anterior, que operés a alta pressió (100 atm), veia augmentada la seva densitat de matèria fins a 0.18 gcm^{-3} . Malgrat que la densitat encara distava molt de l'existent en les emulsions, les cambres d'alta pressió tenien l'avantatge de l'homogeneïtat del material. A més les interaccions es veien de forma molt més nítida en les cambres d'alta pressió que en les multilàmines, perquè es produïen directament en el gas i no en el material de les làmines. D'altra banda, les cambres d'alta pressió admetien l'ús de camps magnètics per determinar els moments de les partícules, tot i que l'efecte de la dispersió coulombiana també era més important que per a les cambres convencionals i així influïa en les mesures del moment a través de la curvatura.

Pel que fa a les cambres de difusió, la idea s'origina al MIT a principis dels quaranta. Una forma d'augmentar l'eficàcia d'una cambra de boira era augmentar el temps que podia romandre sensible. Les cambres de difusió tenien sensibilitat contínua. Per aconseguir-ho, la sobresaturació d'aquestes cambres no s'obtenia d'una expansió adiabàtica, sinó a partir d'un gradient de temperatura constant al seu interior, prou alt perquè el vapor es condensés contínuament sobre els ions. D'afegit a la sensibilitat contínua, la construcció i manipulació d'una cambra de difusió era més senzilla que les cambres convencionals. Però també presentava problemes: mentre que les cambres convencionals es podien operar en qualsevol orientació, la cambra de difusió sols ho podia fer horitzontalment, perquè temperatura i sobresaturació variaven respecte la vertical. Tot i que la limitació anterior tenia la seva part positiva en assegurar a la cambra de difusió una estabilitat extrema pel que feia als possibles corrents de convecció accidentals, limitava moltíssim la seva aplicació

al camp de la radiació còsmica, en el qual controlar l'orientació d'arribada de les interaccions no era possible. Això va fer que, en general, la seva aplicació es restringís als camps de la radioactivitat i la física nuclear, que treballaven amb fonts artificials.

Des del punt de vista de la investigació de partícules estranyes, la cambra de boira de difusió d'alta pressió s'aplicarà profitosament al cosmotró de Brookhaven i donarà importants resultats.¹⁵

La dialèctica École Polytechnique-MIT: la polèmica $K_{\mu 3} (\kappa) - K_{\mu 2}$.

En la sessió de cloenda del congrés de Bagnères, B. Rossi, màxim representant del grup del MIT, exposava sumàriament els descobriments trobats fins el moment. En parlar dels “mesons K carregats”, Rossi redueix els possibles modes de desintegració al conegut τ i als menys coneguts $\kappa \rightarrow \mu + ?^0 + ?^0$ i $\chi \rightarrow \pi + ?^0$, i fa notar que es poden correspondre amb les recents partícules S definides al MIT amb la multilàmines i a les V^\pm de les cambres convencionals. Tot i que l'acord final intentarà unificar, sota la denominació de mesons K, els mesons pesats de les emulsions (τ , κ , χ), les partícules S i les V^\pm , Rossi fa notar: “Even though many new results of very great importance have been presented during this meeting, no unique clear picture emerges from them, and it becomes quite difficult to present coherent picture.”¹⁶

A partir d'aquest moment, un dels temes centrals en la investigació de les noves partícules serà el discerniment de les secundàries d'aquests mesons pesats. La distinció purament fenomenològica farà que vagin rebent diferents noms (τ , κ , χ ...), però a mesura que les seves masses es van homogeneïtzant al voltant d'un valor de $1000 m_e$, es veu la necessitat de pensar en elles com en una sola partícula (mesó K).

La primera polèmica es genera ja de l'anterior suposició de Rossi, segons la qual tots els mesons pesats que mostren un pió secundari, i que no corresponen al $\tau \rightarrow 3\pi$ perfectament diferenciable, s'associen al mode $\chi \rightarrow \pi + ?^0$, que presenta una desintegració a dos cossos.

Contra aquesta suposició de Rossi, abans d'acabar-se aquest any del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), membres de la Universitat de Rochester anunciaran el descobriment en una *stripped emulsion* d'un nou mode de desintegració,¹⁷ després d'eliminar la possibilitat que es tracti d'un dels modes ja coneguts:

The unstable particle we observe certainly cannot be the κ meson, and the energy of the emerging π^+ is completely inconsistent with the assumed decay scheme of the χ meson. Though no particles have yet been observed decaying in two different ways, we believe the most likely interpretation is the alternate decay mode of the τ^+ meson, $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + 2\pi^0$. Since the Q value for τ decay into three charged π mesons is ~ 72 Mev, our observed π^+ energy is consistent with this interpretation.¹⁸

¹⁵Vegeu aquest capítol, sec. 5.2, p. 234.

¹⁶Rossi (1953), 263.

¹⁷Vegeu apèndix A, fig. A.13.

¹⁸Crussard *et al* (1954), 253.

Aleshores, podem dir que pel que fa a les desintegracions de mesons pesats carregats en pions secundaris, hi ha una altra possibilitat a més de τ i χ que passarà a conèixer-se com τ' .

Però la complexitat també s'agreugerà per a la resta de casos en què la secundària és un muó. De moment, Rossi sols pot identificar la desintegració a tres cossos κ , justificada per l'ampli espectre energètic que s'observa en els muons secundaris d'aquestes desintegracions.

En aquest moment, Rossi parla també en nom de l'EP ja que, poc després de Bagnères, Leprince-Ringuet i el mateix Rossi firmen un article comú en el qual es mantenen amb aquests tres modes de desintegració únics. Però la veu d'alarma s'alçarà en el grup francès, quan comencin a analitzar aquest espectre energètic de les secundàries, que tan bé es pot estudiar a partir dels abasts registrats en les cambres multilàmines i, sobretot, en la doble cambra de l'EP.

La instal·lació de la doble cambra de l'EP al Pic du Midi constava d'una cambra magnètica de $64 \times 68 \times 30 \text{ cm}^3$ i 2500 G, a sobre d'una cambra multilàmines $63 \times 68 \times 40 \text{ cm}^3$. En principi, les làmines eren de plom i carboni alternativament, però posteriorment es van canviar per 15 làmines de coure, amb un poder de parada superior, necessari per verificar les seves hipòtesis. Les cambres eren disparades per un detector de ruixades penetrants situat a sobre de la cambra magnètica que exigia que com a mínim una partícula entrés en la cambra inferior. D'aquesta manera es podia obtenir la massa de les partícules de les ruixades penetrants a partir del moment, mesurat en la cambra magnètica, i del recorregut o abast, mesurat en la multilàmines.

El projecte de construcció de la doble cambra sorgeix dels esforços comuns de Ch. Peyrou i B. Grégory, ambdós membres de l'École Polytechnique, tot i que Grégory havia estat treballant al MIT amb Rossi en el moment dels descobriments de partícules S en la multilàmines. Peyrou coneixia perfectament el treball en cambra de boira immersa en un camp magnètic i Grégory, des de la seva estada al MIT, dominava la tècnica de les multilàmines. Però a Leprince-Ringuet li costarà d'aprovar el projecte, immers com estava en aquell moment en el treball en emulsions. Finalment, pel setembre de 1950 es convenç de la seva utilitat. El 17 de maig de 1951, Grégory i Peyrou pugen al Pic du Midi per inspeccionar com es podria compartir l'espai amb el grup de Manchester, que des de 1950 estava treballant en aquest cim. Encara que el muntatge va trigar força a funcionar a ple rendiment, al congrés de Bagnères es van presentar els primers resultats. D'acord amb els resultats d'altres grups, i en especial del MIT, l'EP aportarà valors per a les masses dels mesons K que afavoriran la idea d'unificació en una sola partícula de les V^\pm , les partícules S i els mesons pesats provinents de les emulsions. Però malgrat aquesta unificació final, pel camí l'EP evidenciarà una major complexitat entre els diferents modes de desintegració dels "mesons K".

L'argumentació del MIT se centrava en els abasts calculats de les secundàries, i les intentava associar en algun dels tres modes coneguts del treball en emulsions (τ , κ , χ).

Però hi havia el problema principal que, malgrat les secundàries de les partícules S eren “mesons”, no es podia diferenciar amb seguretat si es tractava de pions o muons: no sempre era clara la interacció nuclear dels π i la no interacció dels μ . En la majoria dels casos la secundària entrava en una placa amb ionització mínima i no en sortia. En les condicions de l'experiment del MIT, aquest fet no permetia distingir el comportament d'un pió del d'un muó, perquè en el primer cas es podia haver parat a causa d'una interacció nuclear, o en el segon cas haver arribat al final del seu abast. En definitiva, a Bagnères arribaran a la següent conclusió:

[...] we are not yet in a position to decide whether the secondary charged products of S-particles are pi-mesons or mu-mesons, even though the second assumption appears more likely.¹⁹

Bandejant el cas τ , que era fàcilment reconeixible per les tres secundàries carregades, es tractava d'analitzar el moment de la partícula secundària a partir de l'abast deixat en la cambra multilàmines. La mesura d'aquest abast, junt amb la densitat d'ionització, que donava la velocitat, els permetia determinar la massa de la partícula.²⁰ Però la mesura de la ionització era molt difícil de concretar en aquestes secundàries de partícules S que penetraven la multilàmines, perquè massa sovint les traces mostraven ionització mínima, que no permetia estimacions.²¹

Després de Bagnères, en l'article conjunt que firmen L. Leprince-Ringuet i B. Rossi, representants respectius de l'EP i el MIT, afirmaran:

EP and MIT do not find any evidence for the presence of π mesons among the decay products of K mesons. The presence of such particles, however, is not ruled out. On the other hand, there is some evidence that the secondary charged products of K particles decaying at rest or in flight are, for the most part at least, μ mesons.²²

El problema era que s'havia arribat a aquesta conclusió després que el MIT no observés pràcticament interaccions de les secundàries en la multilàmines, per tant era més probable que es tractés de muons que no de pions. No obstant això, malgrat que el MIT havia identificat les primàries com a partícules S, sols en tres casos la secundària parava en la multilàmines (amb abasts en el plom de $65.6\text{--}67.7\text{ gcm}^{-2}$, $64.4\text{--}74.3\text{ gcm}^{-2}$ i $19\text{--}29\text{ gcm}^{-2}$), en la resta d'exemples la secundària no es parava abans de travessar 85 gcm^{-2} de plom.²³

¹⁹Rossi, Bridge (1953), 109.

²⁰Recordem que la ionització específica d'una partícula que travessa la cambra de boira depèn de la seva velocitat i la seva càrrega amb una llei: $I = Z^2 f(\beta)$; si es combina les mesures obtingudes d'aquesta funció amb l'abast de la partícula, que és una funció del moment: $\frac{R}{m} = \frac{1}{Z^2} F(\frac{p}{m})$, es pot determinar la massa de la partícula en qüestió. En les relacions anteriors, Z és la càrrega de la partícula, β la seva velocitat, p el moment, R l'abast i m la massa de la partícula.

²¹Calia explotar arguments més grollers: una penetració de les secundàries per sobre dels 40 gcm^{-2} de plom (o l'equivalent per a altres materials) assegurava que aquestes secundàries no eren electrons.

²²Leprince-Ringuet, Rossi (1953), 722.

²³Cosa que indicava un moment màxim per aquestes secundàries major que $240\text{ MeV}/c$, si es tractava de pions, o de $210\text{ MeV}/c$, si es tractava de muons.

En tot cas, els resultats semblaven mostrar que aquestes secundàries no formaven un grup monoenergètic, eliminant la possibilitat d'associar les partícules S a un únic mode de desintegració en dues secundàries. Així, el MIT proposa com a mode més favorable:

$$K \rightarrow \mu + \gamma + \nu$$

Aviat l'EP es desmarcarà dels arguments del MIT. Eliminant el cas d'abast 19–29 gcm⁻², associable a un pió lent, les altres dues secundàries que paraven en l'emulsió presentaven abasts molt similars. Si se suposava que eren pions, i no muons com pensava el MIT, els abasts corresponien a energies que concordaven perfectament amb les esperades per a una desintegració $\chi \rightarrow \pi^+ + \pi^0$, malgrat no fos visible la desintegració del π^0 .

Però el raonament de l'EP va més enllà: les primeres evidències del MIT semblaven mostrar que, llevat dels casos anteriors, no apareixien secundàries de partícules S abans dels 85 gcm⁻² de plom. Es podia buscar aquestes secundàries més enllà d'aquesta distància i suposar que es trobarien a un abast únic, cosa que demostraria que es tractava de muons provinents d'una desintegració a dos cossos, per tenir les secundàries la mateixa energia. Per tant, en oposició a l'argumentació del MIT, podia existir un nou mesó K que es desintegrés en un muó secundari i que no correspongués a la desintegració a tres cossos κ , sinó a una desintegració a dos cossos.

Per confirmar la seva hipòtesi calia modificar el poder de parada de la doble cambra: es canviaran les làmines de plom i carboni, que permetien un poder de parada màxim de 93 gcm⁻², per làmines de coure, amb un poder de parada màxim de 170 gcm⁻². Ara, en el coure, s'esperava que les secundàries apareguessin a partir dels 73 gcm⁻², equivalents als 85 gcm⁻² de plom.

Amb el nou sistema, la doble cambra de l'EP verificarà la seva hipòtesi el gener de 1954. La nova desintegració en dues secundàries rebrà el nom de K_μ : “Afin d'éviter une identification prématurée avec des particules déjà connues”,²⁴ però el més interessant és el raonament a través del qual arriben al descobriment, en el qual associen abasts amb moments de forma molt segura:

“The mass of S particles as measured by momentum-range is either smaller than the one of the τ or can be equal to it, but it is highly unlikely that the heavy mesons we observe may be contaminated by particles of a mass larger than 1000 m_e . It is also very

²⁴Grégory *et al.* (1954), 303. Des del conveni adoptat a Bagnères, quan d'un mesó pesat en quedava determinada la desintegració rebia de nom una lletra grega, seguint la nomenclatura nascuda a Bristol en emulsions. K_μ , doncs, es pensa com un nom provisional que especifica el caràcter muònic de la secundària carregada. Poc després, la necessitat de diferenciar la desintegració en dues i en tres secundàries, de les quals una és un μ reconegut, porta als noms $K_{\mu 2}$, $K_{\mu 3}$. Aquesta nomenclatura més basada en la fenomenologia de l'esdeveniment anirà imposant-se a mesura que les evidències vagin acostant els diferents mesons pesats a un únic mesó K amb diferents modes de desintegració. Finalment, la nomenclatura de Bristol en lletres gregues es veurà totalment superada, malgrat que és simptomàtic que l'enigma θ - τ la mantindrà viva un temps més, per les dificultats en identificar els dos modes com provinents del mateix mesó K sense acceptar la violació de paritat.

probable that S particles whose mass has not been measured are of the same type as the other ones. If among all the S particles there are τ 's ($K_{\pi 3}$) we will observe either no secondary at all i. e. all the π 's will remain in the copper plate, or if we observe a secondary it will stop before crossing 15 g/cm^2 of copper, and indeed we observe three events of this type. If a particle χ [$\pi^+ + \pi^0$] stops, its secondary will either have a nuclear interaction or stop with a range of 45 g/cm^2 of copper and indeed we observe one event of this type. If secondaries are going considerably further than 50 g/cm^2 of copper, they are μ mesons since π 's of such range cannot be emitted by primaries of mass less than $1000 m_e$. If there is among the S particles a great proportion of κ [$\mu + \pi^0 + \nu$] we should observe stopping secondaries at range different from the preceding ones unless the spectrum of emission has a peculiar shape (peaked at high energies). If the shape of spectrum is peculiar enough to be a line, the secondary μ would have a range going from 73 g/cm^2 to 76 g/cm^2 of copper depending on the assumed primary mass between $920 m_e$ and $960 m_e$ (if the neutral secondary had a light mass). And indeed we observe all that, ranges greater than 50 g/cm^2 of copper hence μ 's. No stops but the ones mentioned above and two others at the expected range of about 75 g/cm^2 . The comparison between that range and the assumed mass smaller or not larger than $966 m_e$ proves that the recoil neutral particle has a small mass, possibly equal to zero. Therefore, we think that there is a heavy meson which has a two-body decay into a μ meson and a light neutral, probably a neutrino since no γ is detected in the direction opposite to the one of the charged secondary". (End of the reasoning).²⁵

Amb aquests resultats de principis del 1954, el grup de l'ÉP haurà predit i descobert un nou mode de desintegració del mesó K:²⁶

$$K \rightarrow \mu + \nu$$

Amb la seva argumentació, posen en primer pla la importància del major poder de parada per detectar les secundàries dels mesons K, així com l'interès de les hipòtesis *a priori*, encara que serveixin per afegir un nou mode de desintegració possible i no per unir els resultats ja coneguts. També cal notar que la hipòtesi se sosté considerant un únic valor de la massa de la primària, a partir del qual no s'espera pions més enllà dels 50 g/cm^2 .²⁷

El punt clau en l'argument de l'EP és, doncs, que les secundàries de partícules S havien de ser majoritàriament muons, perquè pions amb abasts superiors a 50 g/cm^2 de coure haurien de provenir de primàries amb massa superior a $1000 m_e$. A més, els muons secundaris amb aquests llargs abasts paraven tots donant un valor del moment únic i compatible amb 220 MeV/c . Aquest argument indirecte d'identificació dels muons era vist d'una força ex-

²⁵Peyrou (1982), 50–1.

²⁶Vegeu apèndix A, fig. A.17.

²⁷Evidentment, secundàries de mesons pesats carregats ja s'havien determinat en emulsions, però en les dimensions més limitades d'aquest detector sovint es mostraven primàries ràpides amb secundàries també massa ràpides per permetre mesures a l'emulsió abans d'abandonar-la sense parar-s'hi. Com escriuen Grégory *et al.* (1954, 303) a l'EP el 1954:

Il est intéressant de remarquer que l'identification du secondaire se fait sur des particules ayant un moment $p > 195 \text{ MeV/c}$, c'est-à-dire dans une région où les mesures dans les plaques photographiques sont difficiles.

traordinària dins del mateix grup, fins el punt d'adequar un mínim a la seva conveniència els valors de la massa de la primària. En paraules de Peyrou:

I have a small confession. It's well known by the old experts that our mass was a little on the low side, by two standard deviations or so, but we never tried to push it up because the argument was much better if it was lower.²⁸

Leprince-Ringuet exposarà els arguments i resultats del seu grup al 4rt congrés Rochester (25–27 de gener de 1954) i R. W. Thompson confirmarà que alguns dels resultats a Indiana en cambra de boira magnètica presenten un moment de la secundària que concorda amb els resultats de l'EP. Immediatament seran acceptades les evidències del nou mode de desintegració K_μ , com ho mostra el fet que C. D. Anderson afegeix la nova partícula en la taula que resumeix els resultats obtinguts fins en aquest congrés Rochester.²⁹

Al congrés de Pàdua (12–15 d'abril de 1954), des del grup del MIT es fa notar que la seva multilàmines ha donat 40 partícules S, de les quals en alguns casos apareixen cascades electròniques associades, que poden correspondre a la presència de fotons, electrons o π^0 secundaris. Però en cap moment el MIT parla d'associar els seus esdeveniments als K_μ proposats per l'EP.

En el mateix congrés, l'EP presenta una contribució on parla específicament de les propietats del seu descobriment K_μ : la llarga vida, estimada en $5 \cdot 10^{-9}$ s, la massa de $914 \pm 20 m_e$, la natura de les dues secundàries, etc. En total, el grup disposa d'onze partícules K_μ , dues partícules amb secundària d'abast inferior a 20 gcm^{-2} de plom, que probablement seran exemples de partícules τ , i sis casos que poden ser o bé K_μ o bé τ . En tots els casos la cambra magnètica superior permet assegurar que es tracta de partícules de càrrega positiva. Cap primària negativa ha estat trobada. D'aquesta forma, el mode K_μ apareixerà en el resum referit a les partícules K com un dels modes ben establerts i contribuirà també a cridar l'atenció sobre l'excés de positives present entre les noves partícules.³⁰

Finalment, en el 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955), el grup del MIT es mostra favorable a l'existència de partícules K_μ entre les seves partícules S descobertes el 1952. De fet, el MIT presentarà 66 exemples trobats fins el moment i els classificarà a partir de l'abast de les seves secundàries en dos grups, el primer al voltant de 60 gcm^{-2} i el segon al voltant de 100 gcm^{-2} de plom:

It is quite reasonable to explain the MIT results by assuming that the secondaries are resulting from two particles, S-60 and S-100, which undergo a two-body decay and give secondaries of ranges 60 and 100 gr. Cm⁻² of lead.³¹

La gran aportació del MIT serà la percepció de la presència de fotons associats en alguns dels esdeveniments, que els servirà per classificar aquests dos grups, S-60 i S-100, en modes de desintegració ja coneguts. Per al primer grup l'argument serà:

²⁸Peyrou a Bristol (1988, 155).

²⁹Vegeu apèndix A, fig. A.38.

³⁰V. apèndix A, fig. A.39.

³¹Rossi (1955a), 88.

On the other hand, it was perfectly possible to assume that these photons arose from the decay of a neutral π which was emitted in a two-body decay together with a charged secondary. The energy distribution of the associated gamma rays was perfectly consistent with this assumption and it was very reasonable to assume the following decay scheme: S-60 is identical with the positive $\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$.³²

Amb el segon grup, vindrà l'acceptació del mode de desintegració proposat per l'EP:

The best assumption with regard to the S-100 particle was that it was a $K_{\mu 2}$ particle which decayed into a μ and a neutrino.³³

En el resum final del congrés, Rossi notará l'acord dels dos grups: "The very strong evidence for the $K_{\mu 2}$ comes from the multiplate cloud chamber work at the Ecole Polytechnique and MIT. After some initial apparent discrepancies, the results of the two groups agree quite well."³⁴ El MIT concentrarà els esforços en la identificació dels fotons associats a la desintegració de les partícules S i, d'aquesta forma, aconseguirà l'acceptació definitiva del π^0 com a secundària neutra del mode $K_{\pi 2}$ (χ o θ^+).³⁵ Al mateix temps mostrarà com no totes les partícules S tenen aquests fotons associats, i per tant són mescla de diferents modes de desintegració.³⁶

Poc després del congrés, el MIT presentarà un article on concretarà de nou els resultats presentats al Rochester i on exposarà com veu la patent del descobriment del mode $K_{\mu 2}$:

The existence of heavy mesons disintegrating into light mesons with ranges greater than about 85 gcm^{-2} Pb was first established by the M.I.T. group. Further examples of long-range secondaries were later reported by this group and by the group at the École Polytechnique. Moreover, from a simultaneous measurement of the primary mass and of the secondary range, the French group reached the conclusion that the charged decay product was a μ -meson, and that the mass of the neutral product was smaller than the π^0 -mass. The French group also concluded that the events observed by them probably represented a two-body decay process: $K_{\mu} \rightarrow \mu + \nu$.³⁷

A més, l'anàlisi de 67 exemples d'esdeveniments S , classificats segons els abastos de les secundàries en la cambra multilàmines com desintegracions $K_{\pi 2}$ (χ) i $K_{\mu 2}$, els porta a

³²Ibíd., 89.

³³Ibíd.

³⁴Rossi (1955b), 127.

³⁵Respecte a les confirmacions sobre kaons en aquest congrés, Powell escriu a Dee, de Glasgow:

I have just heard from Menon, who is attending the Rochester Conference, that there is now very good additional evidence for the existence of the chi meson which decays into two π -particles, one charged; and for the existence of the β -decay of the heavy mesons. I am sorry there was so little time during my lecture to talk about the details and implications of recent experiments.

Powell a Dee, 1-2-1955 (Powell Correspondence, University of Bristol, Bristol).

³⁶De fet, cal notar que d'alguna forma el mode $K_{\mu 3} \rightarrow \mu + \pi^0 + \nu$ també és present entre les deteccions de $K_{\mu 2}$ i $K_{\pi 2}$ de la multilàmines i doble cambra. Possiblement la baixa probabilitat que el K^+ es desintegri en aquest mode ($\sim 3.2\%$) fa que no afecti els arguments d'un abast únic pel muó secundari del $K_{\mu 2}$, si es té en compte que el muons secundaris dels $K_{\mu 3}$ no presentarien una única energia, ni per tant un únic abast en la cambra.

³⁷Bridge *et al.* (1955), 885.

estimar unes masses per a aquestes partícules de:

$$m_{K_{\pi 2}} = 952 \pm 11 m_e$$

$$m_{K_{\mu 2}} = 950 \pm 15 m_e$$

i fan notar que aquesta massa és molt a prop de la massa estimada per a la τ . L'enigma θ - τ es fa palès a mesura que millors estimacions de les masses es van obtenint en aquestes cambres:

It is interesting to speculate about the possible relationship between the various kinds of decay processes that have been detected so far.

The $K_{\pi 2}$ -particle has a mass very similar to that of the τ -meson. However, arguments have been presented showing that the τ -meson is probably a particle with zero spin and odd parity. If this is so, the τ -meson cannot decay into a charged and a neutral π -meson, and the $K_{\pi 2}$ -decay cannot be regarded as an alternate mode of decay of the τ -meson.

The $K_{\pi 2}$ -particle has a mass very similar to that of the θ^0 -particle ($966 \pm 10 m_e$) and the decay schemes of the two particles bear a close resemblance to one another:

$$\theta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, \quad K_{\pi 2}^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0$$

For these reasons it has been repeatedly pointed out that the $K_{\pi 2}$ -particle is perhaps the charged counterpart of the θ^0 -particle.³⁸

Les cambres de l'EP i del MIT continuaran les seves investigacions. Establiran límits per al temps de vida de les primàries en funció del que triguen a desintegrar-se a l'interior de la cambra. Així, pel 1955, la cambra multilàmines del MIT donarà una vida de les S de l'ordre de 10^{-9} s, i la doble cambra de l'EP donarà un límit més gran que $5 \cdot 10^{-9}$ s. L'acumulació d'esdeveniments S d'ambdós grups posarà també de manifest la dificultat de detectar-ne la contrapartida negativa.

Al congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955) es presentaran alguns exemples de τ^- desintegrant-se en vol en cambres de boira. El mode K_{μ} , descobert a l'EP serà de moment positiu: “Il est positif. On n'a pas d'informations favorables à un K_{μ} négatif: s'il existe, il est en faible proportion par rapport au positif dans les événements S des chambres de Wilson.”³⁹ Tampoc el χ ni el κ semblen mostrar-se en versió negativa.⁴⁰ També a Pisa, l'EP presentarà amb detall les característiques de la seva partícula K_{μ} i promitjarà la seva

³⁸Bridge *et al.* (1955), 886.

³⁹Leprince-Ringuet (1956a), 512.

⁴⁰Això no significa que els mesons pesats negatius no existeixin. Leprince-Ringuet (1956a, 512–3) afirma:

Par ailleurs, on sait qu'il existe un méson lourd négatif à temps de vol long observé parfois dans des chambres de Wilson (par exemple traversant toute la chambre sans se désintégrer); on sait que des mésons lourds négatifs sont absorbés au repos par les noyaux; ils sont obtenus grâce aux rayons cosmiques ou aux machines. On identifie parfois ces mésons lourds négatifs avec le τ , mais ce n'est pas démontré.

massa sobre 22 casos escollits ($928 \pm 13 m_e$). En la mateixa contribució Ch. Peyrou insistirà en l'excés de positives que sembla existir entre els mesons pesats detectats: "The result is that we have 2 K^- for 22 K^+ ."⁴¹

Abans d'acabar aquest 1955, apareix una nova contribució de l'EP en la qual parla d'esdeveniments V, per distingir fenomenològicament entre partícules que es paren en la cambra (S) i partícules que es desintegren en vol (V). Ambdós tipus són visualitzats en la doble cambra del Pic du Midi. En aquest cas, "The total sample of V^\pm consists of some 180 events of which about 100 were positives and about 60 negatives; the signs of the others being undeterminable."⁴² La solució a l'enigma sobre l'excés de positives la donarà M. Gell-Mann, en el marc de la teoria d'estranyesa.⁴³

A més d'estudiar la proporció entre positives i negatives, l'article també tracta de la identificació dels diferents modes de desintegració de kaons carregats (τ , τ' , κ , χ , K_μ , K_β),⁴⁴ i també dels hiperons; així com l'estimació de la vida d'aquestes partícules, major de $5 \cdot 10^{-9}$ s per a les partícules S i de l'ordre de $1.5 \cdot 10^{-9}$ s per a les V carregades que es desintegren en vol.⁴⁵

Finalment, l'últim gran èxit de la doble cambra de l'EP serà la fotografia d'una possible desintegració $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$, el 1958. Però la patent d'aquest descobriment en raigs còsmics és dubtosa. Caldren els resultats del bevatró de Berkeley per confirmar-la definitivament, així com per a les desintegracions negatives dels kaons.

El treball en raigs còsmics agonitzava i no es podrà obviar per més temps que els acceleradors tindran l'última paraula pel que fa a les propietats i darrers descobriments de les noves partícules. Ja el 1956, les estadístiques mostren com ambdós grups, MIT i EP, giren els seus interessos cap el treball en aquests acceleradors, en especial al bevatró de Berkeley, on exposaran emulsions i seguiran investigant els mesons pesats.

Darreres investigacions en cambres de boira

Darreres investigacions a Princeton. De retruc de l'èxit aconseguit amb les dobles cambres i les multilàmines, altres grups concentraran esforços envers aquests instruments. Des del *Palmer Laboratory* de la Universitat de Princeton se seguirà l'exemple de l'EP i s'instal·larà al laboratori d'alta muntanya d'Echo Lake (Colorado, 3260 m) una doble cambra que començarà a funcionar l'octubre de 1952. La cambra superior era de $40 \times 40 \times 15 \text{ cm}^3$

⁴¹Armenteros, Grégory, Hendel *et al.* (1956), 527. Com que la doble cambra permet mesurar directament la massa de la primària i el signe de la seva càrrega, l'EP detectarà directament la proporció K^+/K^- .

⁴²Armenteros, Astier *et al.* (1956a), 530.

⁴³Vegeu cap. 6, sec. 6.2.1, p. 257.

⁴⁴La K_β , de la qual encara no hem parlat, correspon al mode de desintegració $K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu$, que es definirà com K_β a partir dels indicis que se'n trobaran el 1954 en emulsions (v. sec. 5.1.2, p. 217).

⁴⁵És lògic esperar una vida major per a les partícules S ja que corresponien a l'actual K^+ amb una vida d' $1.2 \cdot 10^{-8}$ s. En canvi, les V carregades que es desintegraven en vol contenien amb més probabilitat una barreja d'aquest K^+ amb hiperons Σ^+ , de vida més curta ($0.8 \cdot 10^{-8}$ s).

amb un camp magnètic mig de 5500 G; la multilàmines inferior era de $50 \times 50 \times 17 \text{ cm}^3$. Per tant, les dimensions eren una mica més reduïdes que la doble cambra de l'EP, però amb un camp magnètic molt més potent. El 1954 la cambra haurà detectat 60 V^\pm i 270 V^0 , d'entre els quals passarà a la història la fotografia que mostra els 2 parells d'electrons de la desintegració del π^0 secundari d'una desintegració $\text{K}_{\pi 2}^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$, amb la qual resultarà definitiva l'acceptació d'aquesta desintegració tan tractada des del MIT i l'EP.⁴⁶ En aquest exemple, el mesó pesat es desintegra en vol en 5 secundàries: el pió positiu i dos parells e^-e^+ , resultat de la desintegració del π^0 . A més, els intents d'unificació d'aquests mesons pesats són presents en l'article:

A comparison of the energy released in the decay of this K^+ meson, $Q(\pi^+, \pi^0) = (213_{-10}^{+15}) \text{ MeV}$, with that released in the decay of a θ^0 particle, $Q(\pi^+, \pi^-) = (214 \pm 5) \text{ MeV}$, suggest that this K^+ meson may be a charged counterpart of the θ^0 particle:

$$\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + (213_{-10}^{+15}) \text{ MeV}.$$

The mass value corresponding to this decay scheme is $(954_{-20}^{+30}) m_e$.⁴⁷

Princeton continuarà els estudis de mesons pesats i d'hiperons, i en un article del 1955 donarà una taula on resumiran les constants de desintegració dels diferents elements trobats.⁴⁸ Per aquest any, el grup haurà detectat 46 V carregades, de les quals 44 ens permeten conèixer el signe de la seva càrrega (22 V^+ i 22 V^-). D'entre les positives detecten mesons τ , χ i K_μ , però també possibles hiperons Σ . De les negatives distingeixen una cascada Ξ^- i sense massa fermesa proposen la presència de $\chi^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$. La cambra també es mostra eficaç en la detecció de V neutres, amb un balanç de 300 casos. L'anàlisi de 27 esdeveniments anòmals de V^0 , és a dir, diferents de Λ^0 o θ^0 ben conegudes, mostra 15 casos compatibles amb el mode de desintegració $\text{K}_{\pi 3}^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + 80 \text{ MeV}$, tot i que no es pot descartar altres modes de desintegració proposats, com $\text{K}_{\mu 3}^0 \rightarrow \mu^\pm + \pi^\mp + \nu + 249 \text{ MeV}$ o $\text{K}_{e 3}^0 \rightarrow e^\pm + \pi^\mp + \nu + 354 \text{ MeV}$, que sorgeixen com a contrapartides neutres dels coneguts $\text{K}_{\mu 3}^\pm$ i $\text{K}_{e 3}^\pm$, respectivament.

Darreres investigacions a Caltech. Malgrat els avantatges de les multilàmines i dobles cambres, el grup de Caltech es mantenia amb l'ús de les cambres convencionals, tot i que amb muntatges sobreposats. Les investigacions del grup d'Anderson, continuaran enfocades a l'esclariment de les V^0 , que eren la seva especialitat.⁴⁹ A partir del 1953, però, els problemes que presenten els mesons pesats carregats mouen també el grup a investigar les V^\pm trobades en cambres, i intentar verificar la hipòtesi de Rossi sobre la identificació de mesons pesats d'emulsions amb les V^\pm de les cambres. Per afrontar les noves investigacions, Caltech realitzarà un curiós muntatge amb base la cambra convencional:

⁴⁶Vegeu apèndix A, fig. A.16.

⁴⁷Hodson *et al.* (1954), 1095.

⁴⁸Vegeu apèndix A, fig. A.44.

⁴⁹Recordeu cap. 3, sec. 3.1.2., p. 118.

The data discussed in this paper were obtained with the 48-in. magnet cloud chambers which have been in operation in Pasadena (220 m elevation) since January, 1953. For the first seven months of operation, this equipment consisted of a vertical array of four cloud chambers each 55 cm long, 20 cm high, and 20 cm in illuminated depth, placed in a magnetic field of approximately 8000 gauss. In July, 1953, the two upper chambers were replaced by a single double-size chamber. Expansions were triggered by a penetrating-shower detector consisting of three trays of eight G.M. [Geiger-Müller] counters placed above, between, and below the chambers. Each pair of chambers was separated by approximately 50 g/cm² of lead or copper absorber.⁵⁰

El nou muntatge presentava alguns avantatges per a les investigacions específiques que es proposaven. Si aquestes investigacions s'enfocaven a les partícules V que es desintegren en vol, la cambra convencional oferia més possibilitats de detectar les dues traces que la definien ja que en un medi més dens, com les emulsions o les multilàmines, aquestes V podien interaccionar amb la matèria circundant abans de desintegrar-se i fer més difícil la seva anàlisi. A més, les majors dimensions de la cambra podien aconseguir visualitzar en més casos el punt de creació de les primàries V^0 i determinar així els angles de les secundàries amb la línia de vol de la primària, informació que simplificava sovint la cinemàtica de l'esdeveniment i permetia conèixer-ne la natura, a partir del còmput del paràmetre α .⁵¹ Precisament l'avantatge d'aquests muntatges per localitzar el punt de creació de les noves partícules també permetrà realitzar estudis sobre el procés de creació de les mateixes, i investigar la hipòtesi teòrica de la producció associada, tot i que les conclusions definitives vindran dels acceleradors. Finalment, a mesura que les masses de les noves partícules es van coneixent, altres propietats comencen a ser investigades, en especial la vida, facilitada en aquest muntatge per l'estudi de la distribució dels punts de desintegració en l'interior de les cambres.

Pel que fa a les V^0 , Caltech mantenia la seva línia d'investigació que des de principis del descobriment de les noves partícules l'havia mantingut en primer pla de la polèmica sobre la classificació dels esdeveniments anòmals, i en la qual també participava molt activament el grup d'Indiana. En aquest afany per esclarir les V^0 , el 1954 C. D. Anderson proposarà:

A possible interpretation for all the anomalous cases, which does not require the assumption of any new particle is that they represent an alternate mode of decay of the well known θ^0 e.g. $\theta^0 \rightarrow \pi + \mu + \nu + 245 \text{ MeV}$.⁵²

La proposta serà ben acollida malgrat que, com Anderson continua:

It should be emphasized that there is no direct evidence for such an assumption. It is indeed a very broad assumption and could explain a great variety of anomalous cases.⁵³

⁵⁰Trilling, Leighton (1955), 1468.

⁵¹Recordeu cap. 3, sec. 3.1.1, p. 104.

⁵²Anderson (1954), 90.

⁵³Ibíd.

De fet, les desintegracions de les V^0 anòmales no passarà, en l'època dels raigs còsmics, de la simple especulació. En analogia amb els esdeveniments V carregats, en els quals les secundàries quedaven millor determinades, els experimentals intentaran classificar tots els exemples que no concordin amb la V_1^0 o amb la V_2^0 en desintegracions anàlogues a les carregades. Així es proposaran la θ^0 anterior des de Caltech, però també d'altres com:

$$K_{e3}^0 \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \nu$$

$$K_{\pi 3}^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

$$K^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$$

Les anàlisis i especulacions sobre aquestes desintegracions vindran especialment de Caltech, Manchester i Indiana, grups que tradicionalment ja havien enfocat els seus estudis a les V^0 , en cambres de boira convencionals, i als mètodes cinemàtics per estudiar estadísticament les dades obtingudes. Malgrat els esforços, però, el discerniment final dels modes de desintegració de les V neutres necessitarà l'empenta donada per la classificació obtinguda a partir del model de Gell-Mann–Nishijima⁵⁴ i les confirmacions experimentals dels acceleradors.⁵⁵

Darreres investigacions a Indiana. Des d'aquestes cambres convencionals el grup d'Indiana continuarà les seves investigacions amb el muntatge que tan havia impressionat en el congrés de Bagnères. En les seves investigacions sobre les V^0 anòmales, pel 1954 en computaran dos exemples més que podrien ajustar-se al mode τ^0 proposat en aquest congrés i per al qual fins el moment no hi ha evidències, però es mostren molt cautelosos:

In both cases $\tau^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ is permissible. However, some higher Q values have been found at Cal. Tech. It appears, therefore, that some other kind of neutral particle which undergoes a three body decay is a more likely explanation.”⁵⁶

Thompson no aventura quines serien les secundàries d'aquest mode de desintegració més probable, tot i que es mostra conforme amb els resultats presentats per Caltech referits al mode alternatiu de la $\theta^0 \rightarrow \pi + \mu + \nu + 245 \text{ MeV}$.

En el repàs que Thompson fa al congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955) posa de manifest quin és el punt clau en la polèmica dels mesons pesats: “Actually, the present unusual interest in the precise values of the K^+ masses derives from the question of the identity of the K -particles.”⁵⁷

Els treballs en cambres que hem repassat s'enfoquen a determinar els possibles modes de desintegració tan de V carregades com la polèmica sobre les V^0 anòmales, però el 1955

⁵⁴Vegeu cap. 6, sec. 6.2, p. 256.

⁵⁵Vegeu aquest capítol, sec. 5.2.2, p. 240.

⁵⁶Thompson (1954), 79.

⁵⁷Thompson (1956b), 653.

dues noves i poderoses fonts d'informació saltaran a l'actualitat i, amb el temps, acabaran resolent la polèmica anterior:

Whereas no less than six distinct decay modes [τ , τ' , κ , χ , K_μ , K_β] have been established for the positive K-particles, mass measurements as reported at this Congress principally by the Berkeley group and by the G-stack collaboration indicate that the parent masses are identical to within a few electron masses.⁵⁸

Les millores en emulsions i els primers resultats en acceleradors contribuiran amb nous resultats. Les cambres continuaran funcionant en raigs còsmics per pocs anys i es reconvertiran als acceleradors, en especial, en la seva versió de cambres de boira de difusió i alta pressió. També les emulsions es reconvertiran en detectors aplicats als acceleradors i a partir del 1955, especialment a Berkeley, contribuiran notablement a les investigacions sobre les noves partícules.⁵⁹ Cambres de boira i emulsions, aplicades als acceleradors, serviran de pont fins a l'ocupació gairebé total de les cambres de bombolles com a detectors en la font artificial.

5.1.2 Les emulsions

Si de nou prenem el congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953) com a punt de partida, veurem com no sols el treball en cambres està canviant, sinó que un procés similar s'està donant en el treball en emulsions. Els canvis vindran directament influïts per la necessitat de millorar la detecció de les noves partícules, com el grup de Bombay expressa:

I would like to discuss today some work which have carried out during the last ten months with the object of improving the usefulness of nuclear emulsions as a detector for rare nuclear phenomena (particular of unstable particles) and improving determination of the mass of particles from multiple scattering and range. [...] The first objective was to construct a solid block of nuclear emulsion consisting of stripped emulsions and the subsequent alignment of such sheets with sufficient accuracy to trace the entire chain of interaction or decay processes which are initiated in the block.⁶⁰

Ja de bell antuvi els investigadors que treballaven amb emulsions havien intentat augmentar-ne el gruix per tal de gravar esdeveniments més complets, més enllà d'aquells que presentaven una orientació espacial just coincident amb la de la làmina exposada. A finals dels quaranta, les millores en el revelatge en profunditat aconseguides per Dilworth, Occhialini i Payne⁶¹ van permetre treballar amb gruixos de $\sim 600\mu$, molt superiors als

⁵⁸Ibíd.

⁵⁹Els gràfics de les bases de dades sobre fonts i detectors evidencien aquesta tendència de cambres i emulsions (v. apèndix B, sec. B.4.4). En el gràfic B.4.4 (p. 384) podem veure com el pes de cambres i emulsions decau visiblement el 1956, al mateix temps que la seva aplicació en acceleradors va prenent importància, especialment pel que fa a les emulsions.

⁶⁰Biswas *et al.* (1953), 67.

⁶¹Vegeu cap. 1, sec. 1.2.3, p. 48, nota 74.

fins aleshores utilitzats que mai superaven les $\sim 100 \mu$.⁶² Però aquests gruixos encara es mostraven insuficients per discernir els diferents elements presents en les investigacions de noves partícules, en especial dels mesons pesats més energètics que s'escapaven de l'emulsió sense mostrar amb claredat la natura i el nombre de secundàries.

La clau en l'augment del poder de parada de les emulsions fou adonar-se que, en lloc d'intentar seguir augmentant el gruix d'una emulsió senzilla, el que es podia fer era fabricar-les amb els gruixos habituals, desmuntar-les del vidre en què normalment venien preparades i empaquetar-les plegades, com una baralla de cartes. Un cop feta l'exposició del bloc d'emulsions, es tornaven a separar les diferents làmines, normalment es tornaven a muntar en vidre una per una, i es processaven i revelaven en la forma habitual. El mètode era més laboriós: les traces se seguïen làmina a làmina fins que es reconstruïa l'esdeveniment complet, que ara podia tenir abasts molt més grans. Però perseguir les llargues traces de les partícules a través de les diferents làmines en requeria una alineació perfecta, que assegurés que d'una làmina a l'altra els punts es corresponien, i requeria també un control rigorós del processat de les diferents làmines.

Aquesta nova tècnica de les *stripped emulsions* es desenvoluparà, entre el 1951 i el 1954, en tres laboratoris diferents: Bristol, el *Tata Institute for Fundamental Research* de Bombay i el *Naval Research Laboratory* a Washington.

L'interès en les noves partícules és un dels factors que impulsa les millores en les emulsions, però la competitivitat entre els propis instruments a través dels quals es realitzen aquests descobriments també mou al perfeccionament. D'una banda, hi ha la competència de les multilàmines i dobles cambres que, ja a Bagnères, es mostraran com un clar rival en l'anàlisi dels mesons pesats:

In presenting the mass measurements on the charged particles stopped in matter, Powell said that two developments in technique had increased the precision of the measurements. The first was the use of blocks of stripped emulsions with the consequent gain in track lengths available for measurement and the second was the use by the Ecole Polytechnique of two cloud chambers to measure the momenta and ranges of S-particles.⁶³

D'altra banda, hi haurà la competència una mica més llunyana, però certa, dels acceleradors.

Pel que fa a la radiació còsmica, des de les noves cambres multilàmines i dobles cambres s'inicia la polèmica de les partícules S, que de fons contindrà les dificultats en la investigació dels mesons K més energètics. La seva presència havia evidenciat la complexitat del grup dels mesons pesats i la incertesa de no saber si aquestes desintegracions diferents corresponien a un únic mesó K. En aquesta batalla, les emulsions no podien cedir el seu

⁶²El descobriment del mesó pesat τ , el 1949, es feu sorprenentment amb una emulsió de 100μ de gruix, en les primeres NT4 exposades a la radiació còsmica. Fou un cop de sort que va permetre gravar primària i secundàries en l'orientació espacial adequada.

⁶³Powell (1953b), 222.

territori d'investigació més profitós com eren aquests mesons carregats, als quals havien vist néixer i havien batejat com τ , κ , χ ... Calia, doncs, posar-se a l'alçada de les investigacions en multilàmines i dobles cambres, per la qual cosa l'augment estadístic que s'esperava dels grans blocs de *stripped emulsions* era prometedor.⁶⁴

La influència d'un mètode sobre l'altre es fa evident en el moment de triar les dimensions dels blocs d'emulsions. Les dimensions de l'expedició del 1954, el *G-stack*, es van adequar pensant que si el μ secundari del mode K_μ , trobat a l'EP i al MIT, creuava 75 g/cm^2 de coure abans d'aturar-se, comparativament aquest mesó es pararia en l'emulsió després de travessar 20 cm. Per tant, si s'esperava aturar aquests mesons a l'emulsió calia com a mínim tenir aquesta longitud.

En les emulsions primes dels primers temps rarament es trobava la traça d'una K prou llarga i en el pla de l'emulsió de forma que permetés una bona avaluació de la massa d'aquesta primària K. Fins i tot quan es trobava una traça com la mencionada era molt improbable que una secundària carregada aparegués en la mateixa emulsió amb una traça prou llarga com per permetre la seva identificació i, per tant, s'establís el mode de desintegració. En la majoria dels casos, les secundàries es catalogaven com mesons lleugers, però la dificultat residia en distingir entre π i μ . Aleshores, el valor de la massa de la primària sols es podia determinar directament, a partir de les mesures d'ionització i abast o de dispersió i abast de la primària, però no a través de lleis de conservació que involucressin el coneixement d'aquestes secundàries.⁶⁵

D'afegit, les *stripped* permetien el reconeixement del signe de la càrrega de les partícules que detectaven, cosa que fins el moment havia estat impossible en emulsions, llevat dels casos comptats en què s'envoltaven d'un camp magnètic. Aquest coneixement era possible de l'observació del comportament de les secundàries que es paraven a l'emulsió i interaccionaven o no amb la matèria de les plaques. Per exemple, el coneixement de la τ en sortirà molt reforçat després d'aquestes investigacions:

The remarkable advantage of the use of stripped emulsions with respect to the usual nuclear plates is quite evident in such a type of investigation: in all four cases it was possible to follow the track of the τ -meson back to the star in which it was originated and the tracks of 9 among the 12 π -mesons emitted in their decay process, come to an end inside the emulsions.

Therefore it was possible, in all these 9 cases, to establish the sign of their electric charge

⁶⁴A mode de comparativa entre les cambres convencionals i les emulsions, podem notar que els experiments amb globus del 1952 usaven làmines de $\sim 600 \mu$ de gruix que s'empaquetaven en blocs de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ cm}^3$ (0.375 l). Aquests blocs tenien un poder de parada equivalent en una cambra de boira que operés a 1 atm de dimensions aproximades $300 \times 200 \times 50 \text{ m}^3$, per tant de dimensions molt majors a les usades convencionalment. El 1954 es van utilitzar blocs d'emulsió de 15 l.

⁶⁵Els treballs amb multilàmines i dobles cambres es van revelar com a eines potents per a la detecció d'abastos més llargs de primàries i secundàries en la mateixa fotografia, cosa que va comportar millors estimacions de la massa. Amb els esdeveniments trobats en les *stripped*, la precisió aconseguida en la mesura de l'abast serà encara millor que en les multilàmines.

by recognizing if they gave rise to a typical $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ process or to a star.⁶⁶

En el congrés de Pàdua (12–15 d’abril de 1954) es comptabilitzen 39 exemples d’aquests mesons τ observats en emulsions des del primer exemple de Bristol al 1949. És representatiu que dels 39, 14 han estat observats en emulsions nuclears convencionals i 25 en les noves *stripped emulsions*. Queda demostrat, doncs, el poder de la millora tècnica.⁶⁷

La nova tècnica de les *stripped* no suposarà tan sols un augment en l’estadística. Més enllà dels resultats experimentals en noves partícules, els científics que treballaran en el camp veuran com canvia la seva forma de treball. S’inicia un procés d’organització, col·laboració i especialització per tractar els grans blocs, que serà el preludi dels treballs posteriors en acceleradors:

One set of difficulties, by no means negligible, is connected simply with the larger number of plates to be handled. Apart from the more than normal precaution to be taken in order to recover such valuable equipment after the ballon flight, it is necessary to organize the processing, cutting and aligning in such a way that it can be done in a reasonable number of manhours.⁶⁸

A Europa, l’organitzador d’aquests treballs serà C. F. Powell que, el mes de desembre de 1951, a la *Bristol Conference on Heavy Mesons* ja suggereix la preparació d’expedicions per fer volar en globus emulsions, i exposar-les a la radiació còsmica a gran alçada. El paper de Powell en aquestes expedicions va més enllà del seu treball com a investigador, és el veritable incitador de les primeres col·laboracions entre un gran nombre de laboratoris.⁶⁹ M. Friedlander, que es trobava a Bristol en el moment de l’expedició del *G-stack*, declara que: “At one stage Powell was almost like a travelling salesman going around Europe inducing other groups to join in for more manpower.”⁷⁰

A finals dels 50, la tècnica de les emulsions s’anirà limitant a aplicacions cada cop més particulars a mesura que la física de partícules es va reorientant cap a les cambres

⁶⁶Amaldi, Baroni *et al.* (1954), 181.

⁶⁷Per completar l’estadística, Peyrou, al mateix congrés de Pàdua (1954, 429), afegeix que en cambres de boira s’han detectat 7 τ^+ i 3 τ^- desintegrant-se en vol. Comptant que els 39 esdeveniments d’emulsions són considerats, amb molta probabilitat, positius, veiem com aquest 1954 és clar l’excés de positives, com a mínim pel que fa en aquest mode de desintegració.

L’any següent, al congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955), Leprince-Ringuet resumeix els mesons pesats negatius dels quals té constància. L’estadística és ben mins: 3 casos de τ^- en cambra de boira, un possible χ^- observat en emulsió, i alguns possibles exemples de mesons negatius que travessen la cambra sense desintegrar-se i que, per tant, són poc coneguts.

⁶⁸Daniel *et al.* (1954), 153.

⁶⁹Així ens ho explica Rostagni (1954, 168) al congrés de Pàdua:

L’idea di questa spedizione e della precedente del 1952, eseguite giovandosi di una vasta collaborazione europea, nacque a Bristol nel Dicembre 1951, in una riunione promossa dal prof. C. F. Powell, in base alla considerazione che lo studio delle nuove particelle instabili, o di altri eventi più rari dei raggi cosmici, implica ormai un impegno di mezzi finanziari e di uomini che esorbita dalle possibilità di un solo o di pochi laboratori. È la stessa considerazione che già in precedenza, e su scala più vasta, aveva portato alla creazione del CERN.

⁷⁰Friedlander (1988), 100.

de bombolles, començant per Berkeley i seguit per Brookhaven, Chicago i el CERN. Igual com les investigacions en cambres aniran confluint cap el treball en acceleradors, el mateix passarà amb les investigacions en emulsions que faran de fitons, i alhora de detectors, per als feixos de nucleons, pions i, a partir del 1955, de kaons. Aquest treball dels vells detectors aplicats a les noves màquines s'acabarà a finals de la dècada, abans, però, quedarà l'esforç de les grans expedicions que acabem d'apuntar.

Les expedicions a Sardenya.

La primera expedició es va realitzar el juny-juliol de 1952 i involucrava els grups de Gènova, Roma, Pàdua, Milà, Torí, Brusel·les, Göttingen, l'*Imperial College* de Londres i les Universitats de Bristol i de Lund, aquestes dues encarregades de proporcionar els globus i emulsions necessàries. El material preparat es va llançar des de Nàpols en direcció al mar, on queia i era recuperat mitjançant un transmissor que incorporaven els globus envoltats.⁷¹ La Mediterrània fou el lloc triat per als enlairaments per tal d'evitar que el terreny muntanyós del Sud d'Itàlia pogués malmetre les plaques d'emulsió i, en general, per aprofitar la baixa latitud geomagnètica.⁷² Per a la seva recuperació, la Marina i les Forces Aèries Italianes van posar a la disposició dels *cosmicists* un vaixell i un avió, i es va establir la base d'operacions al port de Cagliari, a l'extrem sud de l'illa de Sardenya.

Aquesta primera expedició no va resultar del tot exitosa ja que no es van poder recuperar tots els globus llançats. Però com afirmaven participants de Bristol i Roma: “Nevertheless, 1300 cm³ of emulsion were satisfactorily exposed and the experience helped to make the recent 1953 expedition a great success.”⁷³

La nova expedició a la qual fan referència va suposar una col·laboració encara més gran entre universitats, amb una participació total de 23 institucions. També va ser més profitosa, principalment per l'ús de les *stripped emulsions*, que en la primera expedició encara no havien estat utilitzades.

⁷¹ Aquestes expedicions es fan ja amb el patrocini del CERN, que es troba als inicis. Com Amaldi a Bristol (1988, 102) fa notar:

The last two expeditions were done under the auspices of CERN because the only work going on at CERN in this period was constructing machines and it was very important to introduce a spirit of research. In agreement with Powell we said that it was under the auspices of CERN even though CERN did not provide any money.

Edoardo Amaldi era el líder natural entre els grups italians. A diferència de la majoria de físics italians eminents, Amaldi va romandre a Itàlia. Després de participar en la guerra al nord d'Àfrica, el 1940, torna a Roma i es posa al capdavant de l'Institut de Física, on Conversi–Pancini–Piccioni realitzen la seva troballa que permetrà distingir el π del μ . Poc temps després, Amaldi jugarà un paper essencial en la creació del CERN.

⁷² Una baixa latitud geomagnètica assegurava que sols la radiació còsmica primària més energètica (per sobre 7 GeV per nucleó) penetrava l'atmosfera. El camp magnètic terrestre eliminava la resta de radiació menys energètica, que no era massa eficient per a la producció de secundàries energètiques i que embrutava les làmines fotogràfiques amb esdeveniments que no es desitjava estudiar.

⁷³ Davies, Franzinetti (1954), 480.

Els globus es van llançar des de Cagliari entre els mesos de juny i juliol de 1953, i van passar aproximadament 8 hores a una alçada d'uns 80000 peus. En total es van enlairar 37 blocs d'emulsió nuclear, cada bloc format per 40 làmines d'emulsió Ilford G5, de $15\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 600\mu$ cadascuna. Els blocs recuperats es van repartir entre els grups de Roma, Bristol i Pàdua, on els *cosmicists* s'havien preparat per al revelatge de les plaques. En total es van recuperar i analitzar uns 9 litres d'emulsió. Tot un èxit comparat amb els 1.3 litres útils de la primera expedició.

Algunes de les primeres anàlisis dels resultats d'aquesta expedició de Sardenya (16 de juny–30 de juliol de 1953) es van exposar al congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953). L'anàlisi final detallada de tots els resultats de l'expedició es va realitzar al congrés de Pàdua (12–15 d'abril de 1954), pensat expressament per a aquest fi.⁷⁴

D'entre els resultats obtinguts cal destacar l'obtenció de 39 exemples de mesons τ dels quals poden obtenir un valor de la massa per a aquesta primària de $m_\tau = (965.5 \pm 0.7) m_e$. Les dades també mostren que tots els casos trobats són de τ positives, per tant, malgrat l'estadística és encara pobre, es pot dir que en la producció d'aquestes partícules hi ha un excés de positives.⁷⁵ L'estimació de la vida no és massa detallada: "One can conclude that the mean life of the τ -meson is probably not shorter than 10^{-8} s."⁷⁶ Potser el cop d'efecte que més servirà per consolidar el poder de la nova tècnica serà la gravació de la primera τ amb totes les secundàries parant-se en l'emulsió. L'esdeveniment es mostrarà simptomàtic de la major informació que les noves *stripped* poden proporcionar.⁷⁷

En aquest congrés s'anuncien també els resultats preliminars d'una desintegració, molt probablement kaònica, però de difícil comparació amb casos coneguts. L'anàlisi completa de l'esdeveniment apareix en el *Philosophical Magazine* del mes d'octubre d'aquest mateix any 1954: un mesó pesat, de massa estimada $m=1050\pm 100 m_e$, es para en l'emulsió i emet una partícula lleugera, que després de recórrer 2.3 mm mostra un angle inesperat de dispersió i sembla perdre energia per *bremsstrahlung*. Aquesta secundària carregada s'interpreta indefectiblement com un electró, cosa que ens porta a parlar del primer exemple clar de la desintegració d'un mesó pesat en, com a mínim, un electró secundari. Per la similitud amb la desintegració β se li posarà el nom de K_β (més endavant K_{e3}):

The above considerations make it very improbable that the secondary particle is a L -meson. We therefore suggest that the event corresponds to a mode of decay: $K^\pm \rightarrow e^\pm + \text{one or more neutral particles}$. The grain density and scattering measurements, and the behaviour of the particle are completely consistent with the interpretation that

⁷⁴També en aquest congrés (p. 480–97) J. Davies, de Bristol, i C. Franzinetti, de Roma, relaten els detalls de l'expedició: la concreció de la idea, detalls tècnics, horaris i condicions dels llançaments, finançament, etc.

⁷⁵Fins el moment d'aquest congrés únicament ha estat observada una τ^- pel grup de Caltech i dos casos més, no confirmats del tot, al Pic du Midi.

⁷⁶Amaldi, Fabri *et al.* (1954), 431.

⁷⁷Vegeu apèndix A, fig. A.18.

it is an electron which loses energy in producing *bremsstrahlung*.⁷⁸

El descobriment es confirmarà amb nous exemples en l'expedició del *G-stack*, però la desintegració completa d'aquesta partícula ($K \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu$) ja no serà determinada en els raigs còsmics sinó que serà un èxit dels acceleradors.

El *G-stack*.

Una darrera expedició semblant a les de Sardenya fou preparada per les Universitats de Bristol, Milà i Pàdua. Un gran bloc, format per una pila de 250 làmines d'emulsió Ilford G5 de $37 \times 27 \text{ cm}^2$, amb un gruix total de 15 cm i un volum de 15 litres, es va fer volar en globus, durant 6 hores a 27000 m d'alçada al nord d'Itàlia, sobre Nova Ligúria, el mes d'octubre de 1954. Aquest fou el bloc d'emulsió més gran llançat mai en globus, per la qual cosa se'l va anomenar *G-stack* (G de gegant).

La gran expedició va comportar dificultats tècniques afegides. En primer lloc, processar un bloc d'unes dimensions tan gegants suposava que si es perdia una de les làmines que el conformava es trencava una seqüència i es dividia el bloc en dues parts. Per això calia posar molta cura en el processat de l'emulsió, en especial en la reticulació del bloc per assegurar la coincidència de les diferents làmines. En segon lloc, va caldre desenvolupar una nova forma d'enlairament i un major control del vol per evitar la pèrdua als Apenins o al mar, perquè les grans dimensions portaven associades un pes també molt gran (63 kg d'emulsió i 136 kg amb el globus i accessoris).

El *G-stack* també serà gegant en col·laboració. En la publicació dels resultats apareixeran més de 36 autors, en lloc dels 2 a 7 habituals en aquesta mena d'articles. Un cop exposat, el bloc es va dividir per a la seva anàlisi entre les universitats de Bristol, Milà i Pàdua i, entre altres, col·laboradors de Dublín (*University College* i *Institute of Advanced Studies*), Copenhagen i Gènova. L'anàlisi dels resultats no serà encara disponible per al 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955), però en el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955) —celebrat per commemorar els cent anys de vida d'*Il Nuovo Cimento*— s'exposaran amb tot detall. L'objecte principal d'investigació del *G-stack* serà del tot evident a Pisa: “As the main purpose of the G-stack was to obtain information on the secondaries arising from the decay of the heavy unstable particles, we have concentrated our efforts and scanning power along these lines.”⁷⁹

En relació als mesons pesats, doncs, el *G-stack* n'aplegarà més de 300 nous exemplars. La classificació inicial es fa segons les característiques visuals de l'abast que presenten. Així, sols 22 es paren en l'emulsió i es desintegren en mesons μ , dels quals 6 també es paren en l'emulsió. Com tots els casos són compatibles amb un únic abast d'aquest μ , es pot concloure que és clarament una desintegració a dos cossos i que coincideix amb el mode $K_{\mu 2}$

⁷⁸Friedlander *et al.* (1954), 1047.

⁷⁹Davies, Evans, Fowler *et al.* (1955), 401.

($K \rightarrow \mu^+ + \nu$) descobert pel grup de l'École Polytechnique.⁸⁰ El valor estimat de la massa de la primària d'aquest mode és $M_{K_{\mu 2}} = (969 \pm 7) m_e$.

D'entre els esdeveniments en què les secundàries no paren en l'emulsió, una manera de classificar-los és establir-ne dos grups, depenent de l'abast que aquestes secundàries aconseguixen, en analogia amb el mètode iniciat pel grup de la doble cambra de l'EP. Si l'abast és major de 10 cm, podem esperar que entre les secundàries hi hagi muons — poc interaccionants amb la matèria circundant—, mentre que per a un abast d'entre 5 i 10 cm el més probable és que es tracti de pions. En el primer grup, per tant, trobarem desintegracions:

$$\begin{aligned} \kappa (K \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu) \\ K_{\mu 2} (K \rightarrow \mu^+ + \nu) \end{aligned}$$

En canvi, en el segon grup hi haurà:

$$\begin{aligned} \tau' (K \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0) \\ K_{\beta} (K \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu) \\ \chi (K \rightarrow \pi^+ + \pi^0) \end{aligned}$$

D'entre els casos del primer grup que semblen consistents amb el mode $K_{\mu 2}$, s'arriba a un valor de la massa una mica menor que el calculat pels casos en què el μ secundari parava en l'emulsió: $M_{K_{\mu 2}} = (966 \pm 8) m_e$.

Dels casos compatibles amb el mode χ , un és particularment interessant perquè mostra un parell electró-positró:

$$\chi^+ \rightarrow \pi^+ + \gamma + e^+ + e^-$$

cosa que confirma que la secundària neutra de la desintegració χ és un π^0 . La massa calculada per aquest mode és $M_{\chi} = (965 \pm 5) m_e$. Per tant, els valors de massa deduïts per als modes $K_{\mu 2}$ i χ^+ es mostren molt similars a la massa de la ben coneguda τ , que al congrés de Pàdua (12–15 d'abril de 1954) s'havia establert en $M_{\tau} = (965.5 \pm 0.7) m_e$. Aquest fet contribueix a l'acostament dels diferents mesons K en una única partícula.

Pel que fa al mode κ , 4 d'entre tots els esdeveniments del *G-stack* corresponen indubtablement a aquest tipus de desintegració i 5 corresponen al K_{β} , recentment descobert a l'expedició de Sardenya.

Els resultats finals sobre mesons pesats trobats en el *G-stack* apareixeran al *Nuovo Cimento* del mes de novembre d'aquest mateix 1955. L'anàlisi dels resultats sobre 80 esdeveniments ben identificats com a tals mesons es concreta en un gràfic on es mostren les energies obtingudes per a les seves secundàries (π , μ , e).⁸¹

⁸⁰Recordeu aquest capítol, sec. 5.1.1, p. 199.

⁸¹Vegeu apèndix A, fig. A.29.

En un primer grup A es representen les 28 secundàries que es paren en l'emulsió, 16 s'identifiquen com mesons π i 12 com "mesons" μ . Els 16 pions es poden classificar en dos grups d'abastos (o energies) diferents, 10 recorren uns 12 cm i 6 no arriben a recórrer 3 cm. En el primer cas, l'anàlisi permet inferir que es tracta de 10 esdeveniments $\chi^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$, compatibles amb un valor únic de l'energia d'uns 110 MeV (com es pot observar de la gràfica). Els altres 6 pions d'abast més curt presenten energies més disperses en la taula (dels 0 als 50 MeV), cosa que ens permet suposar que es tracta de desintegracions a tres cossos, com és la $\tau'^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$.

Pel que fa als 12 muons que paren en l'emulsió, 7 tenen un abast d'aproximadament 20 cm i els altres 5 un abast menor que 5 cm. El grup de 7 és compatible amb un valor únic de l'energia, de forma que podem suposar que es tracta d'una desintegració a dos cossos, compatible amb el mode de desintegració $K_\mu \rightarrow \mu + \nu$. Per al grup de 5, les energies es troben més repartides (entre 20 i 60 MeV), cosa que fa pensar en una desintegració a tres cossos, probablement el mode $\kappa \rightarrow \mu + ? + ?$.

El grup B representa 22 esdeveniments per als quals les secundàries escapen del *G-stack* després d'haver recorregut com a mínim 2/3 del seu abast total, cosa que permet agrupar-les en 15 muons d'uns 14 cm d'abast, que corresponen per tant a la desintegració K_μ , i 7 pions d'abast aproximat 8 cm, cosa que permet suposar que corresponen a secundàries del mode χ .

En el grup C s'inclouen les secundàries que presenten forta interacció nuclear (7 pions secundaris clars), les que perden energia per radiació (5 electrons) i 16 suposats muons. Els electrons confirmen l'existència de desintegracions $K_\beta \rightarrow e + ? + ?$, que serà determinada completament en acceleradors, però amb una dispersió energètica que ja permet intuir que són desintegracions a tres cossos. Els 16 muons s'inclouen en el grup de $K_\mu \rightarrow \mu + \nu$, pel valor únic i elevat de l'energia d'aquestes secundàries. Finalment, l'energia dels 7 pions restants fa que s'incloguin entre les secundàries de desintegracions χ .

Els resultats permeten realitzar una anàlisi estadística de les raons de desintegració segons el mode. Així, en un 67% dels casos la desintegració és a través del mode K_μ ($K_{\mu 2}$), en un 20% tenim una desintegració χ , un 9% són K_β , un 3% κ , i un 1% són τ' .⁸² El fet que els dos darrers modes de desintegració siguin molt menys abundants que el K_μ ($K_{\mu 2}$) i el χ , crea alguns dubtes sobre la fiabilitat de l'esdeveniment:

As has become evident from the preceding communications, our sample contains a large proportion of K_μ 's and χ 's and much fewer κ 's and K_β 's. This statement is apparently in contradiction to earlier conclusion drawn from emulsion work. It is perhaps as well to consider the reason for this discrepancy, since in them lies the basis of both our

⁸²Cal recordar que aquestes anàlisis són per al cas en què una única secundària deixa traça visible, i per això no s'inclou en l'estadística la desintegració $\tau \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, ben coneguda per les tres traces secundàries.

Les proporcions obtingudes es poden comparar amb les actuals en l'apèndix C, p. 388.

confidence in, and our doubts about, our present results.⁸³

Els resultats del *G-stack* completaran força la informació disponible dels diferents modes de desintegració del mesó K. Ara bé, encara quedarà obert el problema de les secundàries de les desintegracions K_β i κ , de les quals únicament es coneixerà l'electró i el muó secundari, respectivament. Aquestes determinacions ja seran mèrit dels acceleradors.

Malgrat els problemes encara pendents, el *G-stack* permetrà una aproximació dels valors de les masses dels diferents modes que farà difícil interpretar-los com a partícules diferents. La polèmica creixerà quan l'experiment evidència la gran semblança entre la massa de la ben coneguda $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ i la massa de la $\chi^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$. A més, quedarà ben establerta la desintegració en dos pions secundaris de la χ , a partir de la materialització del π^0 en parells e^+e^- . Serà clar que χ és la contrapart positiva de la θ^0 ($K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$), fet que juntament amb les semblances de masses dels tres modes (τ , θ i χ) concretarà l'enigma θ - τ , que portarà a la violació de paritat de les interaccions febles.

El *G-stack* haurà estat el major esforç de col·laboració entre laboratoris que treballen en raigs còsmics. El sentiment de profit d'aquesta col·laboració l'expressa molt bé C. F. Powell:

There are, of course, difficulties in establishing a succesful collaboration. It takes time for standard procedures to be worked out, and to be put into general use. But, we have found that the advantages greatly outweigh the difficulties. In particular, we have not found the collaboration onerous or that it tends to inhibit the flow of new ideas. On the contrary, the friendly mutual support has seemed to us to result in an easy relation between the different laboratories which has tended to release and encourage individual initiative.⁸⁴

5.1.3 Els mesons θ i τ analitzats amb el diagrama de Dalitz

A partir del 1954 el diagrama de Dalitz es convertirà en una figura habitual en l'anàlisi de les dades experimentals dels mesons pesats. El mode de desintegració τ resultarà fàcil de reconèixer per les tres secundàries carregades, cosa que en facilitarà la recerca en les investigacions, i el convertirà en la més ben definida de les noves partícules des del punt de vista experimental. D'altra banda, el mode θ ($V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$) serà també un mode de desintegració del mesó K ben conegut, sobretot a partir del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953) i del treball de Thompson.⁸⁵ Ja a Bagnères es farà evident la dificultat d'identificar els dos modes θ i τ com provinents d'una mateixa partícula, malgrat les seves masses seran cada cop més properes. El camí definitiu cap a la visualització del que s'anomenarà enigma θ - τ passarà per un augment de l'estadística que, d'una banda, n'igualarà les masses i, de

⁸³Davies, Evans, Fowler *et al.* (1955), 419.

⁸⁴Ibíd., 400.

⁸⁵Vegeu cap. 3, p. 103.

l'altra, en mostrarà les característiques de spin i paritat, que en faran difícil la igualtat. L'anàlisi d'aquestes característiques de spin i paritat per a la partícula τ es farà precisament a través del *Dalitz Plot*. Aquest mètode de representació serà més fiable a mesura que els experimentals van mostrant més casos d'esdeveniments τ . Teòrics i experimentals hauran trobat un punt de comunió.

El contacte de Dalitz amb les noves partícules s'inicia amb una estada a Bristol l'any acadèmic 1948–1949, com ajudant de recerca del professor N. F. Mott. Tot i que Mott no treballava en la recerca de les noves partícules, el grup de Powell es trobava en l'últim pis del mateix edifici del *H. H. Wills Physical Laboratory* i les visites en aquests *cosmicciens* van portar a Dalitz a interessar-se pels nous elements:

Although not one of them, my contact with many of the younger people on the fourth floor was quite close and I was well informed about the new discoveries being made there. After moving to work with Prof. R. E. Peierls at Birmingham University in 1949, I remained in touch with them and with this work at Bristol in the subsequent years.⁸⁶

R. H. Dalitz centrarà la seva investigació en la coneguda partícula τ . En el 3r congrés Rochester (18–20 de desembre de 1952), Edoardo Amaldi compila 7 τ^+ i en calcula una massa $m_{\tau^+} = 500 \pm 2 \text{ MeV}$. Menys d'un mes després, el gener de 1953, en una reunió a la *Royal Society of London* es presenten 11 esdeveniments més i queda clar que $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ és una de les partícules de raigs còsmics millor identificades. Segons Dalitz, aquesta reunió va condicionar les seves investigacions posteriors:

It was an important stimulus for me to see these events all presented at the same occasion and discussed as a class of events having a common parent mass value. This had an impact far greater than separate and scattered publications could ever have had, and it gave me an early and deep understanding of the importance of personal contact between scientists and of the benefits of their direct communication, with questions and immediate answers to settle apparent differences between them. In any event, it became clear to me at that meeting that the time had come for an attempt to determine the spin parity of the τ^+ meson, because the number of events available for analysis was increasing quite rapidly.⁸⁷

A principis de juliol de 1953, Dalitz intentarà relacionar aquesta partícula amb altres esdeveniments:

Recently, however, a number of events described as χ -meson decay have been found from which a charged π -meson of unique energy 110 Mev results (Menon and O'Ceallaigh 1953). If it is supposed that the neutral particle produced in this decay is a π^0 -meson, these events may be interpreted as the decay of a particle of mass about $980 m_e$. Also the analysis of V^0 -particle decay (Armenteros *et al.* 1951, Barker 1953, Thompson *et al.* 1953) strongly suggests that there exists a V_2^0 -meson which decays into two π -mesons with a Q -value corresponding to a V_2^0 mass of $962 m_e$. It is very plausible that

⁸⁶Dalitz (1982), 195.

⁸⁷Dalitz (1989), 438.

this V_2^0 meson is the neutral counterpart of the χ -meson and an attractively simple representation of the data is offered by the further hypothesis (Menon and O'Ceallaigh 1953) that the τ - and χ -mesons are identical, the events observed representing two alternative decay schemes of the (τ, χ) particle.⁸⁸

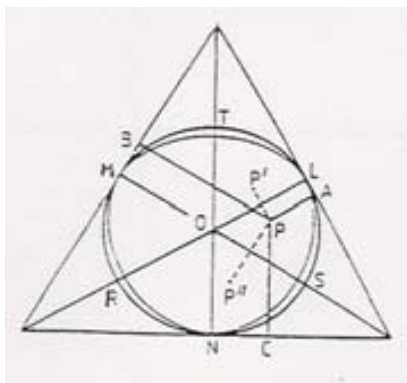


Figura 5.1: Espai fàsic per als esdeveniments τ .

Aquesta conservació queda ben definida en la figura per la propietat que la suma de les perpendiculars sempre dóna l'alçada del triangle.

Així, cada punt P de l'interior del triangle és una representació possible de les energies de les secundàries d'un esdeveniment τ . Com la suma de les perpendiculars PA, PB i PC és constant per a qualsevol punt P, escollim P de forma que la longitud PC representi l'energia cinètica del π^- secundari, i PA i PB les energies cinètiques corresponents als dos π^+ secundaris. Si tenim en compte que els π^+ positius són indistingibles, podem reduir la superfície que ens és útil a la meitat dreta del triangle.

A més, si la conservació de l'energia ens suggeria el triangle com una bona superfície de representació, la conservació del moment redueix aquesta superfície útil a un semicercle inscrit dins del triangle. Quantitativament, per a una desintegració no relativista l'energia dels pions es pot escriure com $\epsilon_i = m_i + \frac{p_i^2}{2m_i}$ i la conservació del moment com $0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3$ en el sistema centre de masses. Si reescrivim aquesta conservació del moment en termes de les energies $(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$, el lloc geomètric dels punts que representa aquesta conservació és un cercle inscrit en el triangle. Si ens cal considerar la desintegració relativista, aquest lloc geomètric ja no és un cercle. En aquest cas la relació energia-moment que hem de substituir a la relació de conservació del moment és $\epsilon_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2}$, que dóna un triangle invertit inscrit en el triangle original. Un esdeveniment qualsevol es trobarà entre aquests dos límits (el cercle clàssic i el triangle relativista) de manera que, en general, la forma que presentarà el lloc geomètric dels esdeveniments τ serà la d'un cercle deformat contingut en el cercle que constitueix el límit clàssic.

Tanmateix aquest lloc geomètric encara es pot reduir més si considerem el desconeixement de la càrrega dels tres pions secundaris, ja que per a cada esdeveniment P podem

⁸⁸Dalitz (1953a), 1074.

Amb la idea d'unificació en ment, Dalitz busca un medi gràfic de representació dels esdeveniments. La partícula τ , que és la millor identificada experimentalment, es desintegra en tres fragments d'igual massa (tres pions). Esdeveniments d'aquesta mena es poden representar de forma convenient en un triangle equilàter com el de la figura 5.1. Les perpendiculars representen les energies de les secundàries $(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ i, aleshores, la seva suma representarà la massa de la primària per conservació de l'energia en el sistema centre de masses.

tenir tres possibles localitzacions en el semicercle (deformat o no) inscrit en el triangle, depenent cada localització de quin dels tres pions secundaris és el negatiu. A més de P, els punts P' (reflexió de P en la diagonal ROL) i P'' (reflexió de P en la diagonal MOS) són igualment possibles. Aquest fet permet reduir el semicercle al sector de 60° LOS de la figura 5.1, sense conèixer una a una les càrregues dels pions emesos. En els primers gràfics que presenta, Dalitz redueix el seu dibuix en aquest sector circular, però a mesura que avança el coneixement de les secundàries, mercès a les millores en emulsions i als acceleradors, el coneixement perfecte del signe de cada secundària el porta a ampliar el dibuix fins a mitja circumferència.

Un cop definit el sector geomètric dels punts que representen els esdeveniments τ , la idea és aplicar el fet que la distribució de punts d'aquesta desintegració sobre el gràfic depèn d'una ulterior llei de conservació, la del moment angular i la de la paritat.

L'estat resultant d'una desintegració τ té una paritat

$$P_{\tau} = P_{int}(\pi^{+}) P_{int}(\pi^{+}) P_{int}(\pi^{-}) (-1)^J$$

on J representa el moment angular total del sistema i $P_{int}(\pi)$ les paritats intrínseques dels mesons secundaris, que són negatives.

Si spin-paritat s'ha de conservar, les diferents combinacions possibles de les secundàries han de ser congruents amb el valor suposat pel τ , cosa que permet argumentar sobre els modes de desintegració permesos i prohibits d'aquesta partícula. I això és el que fa Dalitz al congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953):

What distribution should we expect for the experimental points in sector AOB [regió LOS]? This depends, of course, on the spin and parity of the τ meson and one must state first what values of the spin and parity are possible.

–if τ has spin 0 and odd parity (pseudoscalar) then $\tau \rightarrow 3\pi$ is allowed and $\tau \rightarrow 2\pi$ is forbidden.

–if τ has spin 0 and even parity (scalar) $\tau \rightarrow 3\pi$ would be forbidden and $\tau \rightarrow 2\pi$ allowed: we need not consider this case.

–if τ has spin 1 and even parity (pseudovector) $\tau \rightarrow 3\pi$ is allowed and so is the decay with a γ ray.

–if τ has spin 1 and odd parity (vector) $\tau \rightarrow 3\pi$, $\tau \rightarrow \pi + \gamma$ and $\tau \rightarrow \pi + \pi^0$ are all allowed.

Furthermore $\tau \rightarrow \mu + \nu$ and $\tau \rightarrow \mu + \nu + \gamma$ are allowed in all cases.⁸⁹

Tot i que aquest congrés és essencialment experimental, Dalitz farà una breu exposició teòrica del seu mètode i mostrarà la distribució dels 13 esdeveniments τ que coneix fins el moment. Aquest reduït nombre d'esdeveniments, no li provocarà encara cap problema pel que fa a la seva distribució sobre la secció circular,⁹⁰ perquè “it will be shown that

⁸⁹Dalitz (1953b), 236.

⁹⁰Vegeu apèndix A, fig. A.30.

the present statistics are insufficient to allow discrimination between the alternatives considered.”⁹¹

El problema, doncs, no s’havia desencadenat encara, però l’exposició de Dalitz al congrés presentarà una altra novetat: la predicció d’un nou mode de desintegració de la τ , en versió neutra, feta a partir de considerar què passaria si aquestes desintegracions fossin independents de càrrega, és a dir, conservessin isospín:

Another, more hypothetical, consequence of the charge independence hypothesis is that one expects a τ^0 to exist. This would decay by: $\tau^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^+ + \pi^-$ and Dalitz suggested a possible (though by no means certain) identification of such a neutral with some of the V_3^0 particles observed in cloud chambers photographs.⁹²

És curiós com, al marge del mètode que després resultarà tan impactant per l’enigma θ - τ , les mateixes motivacions de conservació d’unes certes quantitats (spin-paritat) en la desintegració el porten a considerar la conservació d’isospín en la mateixa desintegració, cosa lògica si recordem els recents descobriments d’independència de càrrega de les interaccions pió-nucleó.⁹³ Aquesta hipòtesi que resultarà falsa per a les desintegracions febles de les noves partícules, li permet predir l’existència de dos modes alternatius de desintegració del conegut τ , que a la llarga resultaran certs:

$$\tau' (K \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0)$$

$$V_3^0 (K \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0)$$

L’existència del primer mode ja hem vist com no trigarà a fer-se evident quan, a finals del 1953, un grup de la Universitat de Rochester presentarà un negatiu identificable amb la desintegració τ' , malgrat que els pions neutres no podran detectar-se per materialitzacions e^+e^- en l’emulsió.⁹⁴ També en l’anàlisi dels resultats del *G-stack* s’associa uns esdeveniments amb un π^+ secundari d’abast curt en l’emulsió i energies molt disperses entre 0 i 50 MeV amb aquesta desintegració a tres cossos.⁹⁵

Pel que fa a la segona desintegració proposada, s’associa de manera natural als exemples de V^0 anòmals que ja fa temps que investiguen les cambres —en especial Manchester, Caltech i Indiana—, però fins als treballs en acceleradors no s’acabaran de discernir les desintegracions presents en aquest grup anòmal.⁹⁶

Tot i les prediccions anteriors de Dalitz, la seva importància essencial rau en les consideracions de conservació de spin-paritat en les desintegracions dels mesons pesats que comença a exposar al congrés de Bagnères. En un article del mateix any 1953 ja intenta relacionar la τ no sols amb altres desintegracions observades, sinó especialment amb la θ (V_2^0), perquè els valors de les masses fan pensar que poden ser diferents modes de desintegració de la mateixa partícula. Però aquest intent d’identificació és el principi d’un problema que acabarà trencant una de les estructures més fermament establertes de la física, com és la conservació de la paritat.

⁹¹Dalitz (1953a), 1072.

⁹²Dalitz (1953b), 238.

⁹³Vegeu cap. 4, sec. 4.1.

⁹⁴Vegeu apèndix A, fig. A.13.

⁹⁵Vegeu aquest capítol, sec. 5.1.2, p. 223.

⁹⁶Vegeu aquest capítol, sec. 5.2.2, p. 240 i cap. 6, sec. 6.2.1, p. 257.

No cal dir que en els primers pensaments sobre la igualtat del mesó K , desintegrant-se en dos pions ($\theta \rightarrow \pi^+ + \pi^-$) i en tres pions ($\tau \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$), no es plantegen la possibilitat que una partícula pugui presentar dos estats de diferent paritat. De fet, el raonament de Dalitz intentarà evidenciar la implicació contrària: com que ambdós estats no poden tenir la mateixa paritat, no pot tractar-se de la mateixa partícula.

Per arribar en aquest raonament, Dalitz visualitza que el mode θ , que es desintegra en dos pions, necessàriament tindrà paritat $P = (-1)^J$, donat que els dos pions tenen la mateixa paritat, que és negativa. Aleshores, si τ , que es desintegra en tres pions, ha de ser la mateixa partícula que θ , cal esperar que la seva paritat sigui també $P = (-1)^J$. Traduint-ho a la representació geomètrica de la figura 5.2, que la partícula genèrica (θ o τ) hagi de tenir paritat $P = (-1)^J$ vol dir que, necessàriament, el nombre d'esdeveniments hauria de desaparèixer en la seva frontera, és a dir, sobre l'arc LS , que ens dóna tots els punts de possibles configuracions colineals dels tres pions. Veiem perquè cal esperar aquest comportament sobre el gràfic en tres casos particulars.⁹⁷

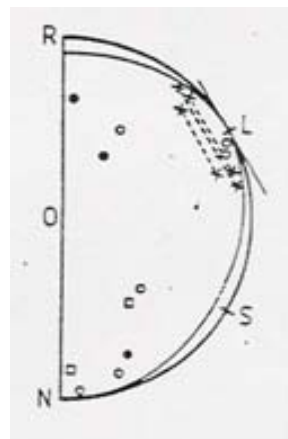


Figura 5.2: Espai físic per als esdeveniments τ .

1. Segons el conveni escollit, el punt N correspon al cas que el π^- estigui en repòs, per tant el J total del sistema 3π el porta el parell $\pi^+ + \pi^+$, la paritat del qual és $P = (-1)^J$ com pel sistema 2π . Però en aquest cas es tracta de la paritat d'un sistema de bosons, que cal que sigui positiva, cosa que es compleix per J parell. El π^- no contribuirà en aquest J però sí amb la seva paritat intrínseca, d'on la paritat neta serà negativa. Aquesta paritat no és compatible amb la del mode θ , i per tant tenim prohibit trobar esdeveniments τ al punt N sobre la línia (o prop d'ella, que representaria punts on el π^- tindria una velocitat molt petita i aquest argument seguiria essent vàlid).
2. En el punt L , també sobre la línia, és un π^+ el que està en repòs. En aquest cas, el moment angular total J el porta el parell $\pi^+ + \pi^-$ restant, que per tant té la mateixa paritat que el sistema d'una desintegració $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Però no podem oblidar la paritat intrínseca del π^+ en repòs, que de nou ens fa que la paritat total del sistema sigui $P_\tau = -(-1)^J$, de nou incompatible.
3. Finalment, en el punt R els dos pions positius es mouen paral·lels amb el mateix moment, en sentit contrari es mou el π^- . En el sistema en repòs dels dos π^+ no hi ha

⁹⁷Aquest raonament l'utilitza amb posterioritat Dalitz (1989, 443), quan explica el seu rol en el descobriment de la violació de paritat de les desintegracions febles.

moviment i, per tant, el sistema tindrà paritat positiva. De nou, en el sistema total haurem d'afegir la paritat intrínseca del π^- a la paritat positiva del sistema dels dos pions positius. Conseqüentment, la paritat total serà $P_\tau = -(-1)^J$, oposada a la del mode θ .

Per a qualsevol punt sobre la línia LS podem fer un raonament similar, de manera que si volem que θ i τ siguin la mateixa partícula, amb la condició indispensable que han de tenir la mateixa paritat, no podem trobar esdeveniments τ en aquesta frontera.

El problema s'esdevindrà quan a mesura que augmenta l'estadística disponible de desintegracions τ , la distribució de punts en el *Dalitz Plot* distarà molt d'anul·lar-se en aquesta "línia prohibida". Les dades disponibles al congrés de Bagnères no permetien encara inferir conclusions a partir de la distribució de punts. Ara bé, en un article escrit a principis de 1954, després d'una exposició feta al 4rt congrés Rochester (25–27 de gener de 1954), Dalitz comença a donar mostres de malestar. No sols la distribució no s'anul·la en la frontera del gràfic, ans el contrari, les dades semblen aproximar la desintegració τ en aquesta línia,⁹⁸ de forma que es va fent evident el valor més probable per al spin i la paritat de τ :

The available data are insufficient for any strong conclusion to be drawn but rather suggest even spin and odd parity for the τ meson.⁹⁹

El malestar s'agreuja a aquest mateix 1954 amb l'assentament del mode $\chi \rightarrow \pi^+ + \pi^0$, quan Hodson, de Princeton, mostrarà l'exemple paradigmàtic en el qual el π^0 queda definitivament establert de la visualització dels dos parells electró-positró en què es desintegra. L'analogia entre el $\tau \rightarrow 3\pi$ i la $\theta \rightarrow 2\pi$ és ja inqüestionable.

Amb el desenvolupament de les *stripped emulsions* s'augmenta considerablement l'estadística d'esdeveniments τ ; però a més augmenta també la qualitat dels esdeveniments, cosa que es tradueix en una disminució de la incertesa del punt que representa l'esdeveniment en el *Dalitz plot*. El congrés de Pàdua (12–15 d'abril de 1954), que acabem de tractar en relació a les expedicions amb *stripped emulsions*, mostra els primers resultats fermes de l'avenç aconseguit amb les noves emulsions. Cap contribució específica de Dalitz apareix al congrés, però la importància de la seva anàlisi és present a l'hora de parlar de spin i paritat del mesó τ :

This problem has been investigated by DALITZ who tried to obtain as much information as possible independently of the charge of the emitted π -mesons. However with the use of stripped emulsions technique it is now often possible to establish the sign of all 3 π -mesons emitted in the τ -meson decay. Consequently it became necessary to reconsider the problem taking into account the more detailed information which is beginning to be collected.¹⁰⁰

⁹⁸Vegeu apèndix A, fig. A.31.

⁹⁹Dalitz (1954), 1046.

¹⁰⁰Amaldi, Baroni *et al.* (1954), 185.

En el 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955), Dalitz participa amb l'estudi de 53 casos recopilats de $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, en els quals les 3 secundàries estan perfectament identificades, i que provenen 42 del treball en emulsions en raigs còsmics, 10 del bevatró de Berkeley i 1 del cosmotró de Brookhaven. Ara ja, les dades representades mostren la incompatibilitat spin-paritat entre el mode τ^+ i el mode θ^0 , perquè la densitat de punts no disminueix en el contorn del diagrama.¹⁰¹

L'estadística continua augmentant al congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955), on es presenten les dades del *G-stack* i es dedica la primera sessió exclusivament a revisar tots els casos disponibles de mesons τ i a presentar el *Dalitz plot* corresponent a 58 casos d'aquest tipus perfectament determinats:¹⁰²

A general view of the available experimental data can be obtained by plotting them in the triangular diagram of Fig. 3. Fig. 4 [v. apèndix A, fig. A.33] similar to Fig. 3, refers to 16 τ -mesons observed in cloud chambers; it was prepared and kindly sent to me by Dr. Dalitz shortly before the Conference.¹⁰³

Després d'explicar breument el funcionament del diagrama, Amaldi posarà èmfasi en l'anàlisi del spin i de la paritat de les partícules θ i τ que es pot inferir d'ell. Aquí, les dades de què es disposa ja permeten enunciar clarament el problema:

One can conclude that since the θ -mode of decay belongs to the class even-spin even-parity or odd-spin odd-parity, the τ -mode of decay must necessarily belong to one of the classes even-spin odd-parity, or odd-spin even-parity, i. e. τ and θ mesons must be different particles. [...] Furthermore, independently of this uncertainty about the value of the spin we have seen that according to the Dalitz arguments reported above, it is very unlikely, that the τ and θ have the same spin and parity.¹⁰⁴

La conclusió en aquest congrés de Pisa és que θ i τ no poden ser la mateixa partícula. El nombre d'esdeveniments no disminueix en el contorn de la circumferència, per tant es pot assegurar que τ no manté la paritat $P=(-1)^J$ pròpia de la θ . L'estat resultant en dos pions del θ^0 o θ^+ clarament difereix en paritat de l'estat del τ en tres pions.

El sentiment present al congrés és contradictori: d'una banda, les masses de totes les partícules K es van aproximant, però d'altra banda l'enigma θ - τ no en permet la identificació total. Com R. W. Thompson explica:

However, there is good evidence that the K-particles are not all identical. The analysis of τ -decay by Dalitz, which suggested that τ^+ and θ^0 cannot have the same spin and parity, has been confirmed by improved statistics. It would therefore appear that at least two of the K-particles are distinct. It is of great interest to know whether all K-particles are τ -mesons or θ -mesons, with alternate decay modes; or whether some of

¹⁰¹Vegeu apèndix A, fig. A.32.

¹⁰²A Pisa, Amaldi torna a ser l'encarregat de recopilar les dades disponibles del mesó τ , igual com havia fet en el 3r congrés Rochester (18–20 de desembre de 1952). L'estadística serà de 106 exemples, dels quals 35 són del bevatró, cosa que ens mostra la pressió, ara ja ineluctable, dels acceleradors.

¹⁰³Amaldi (1955), 206.

¹⁰⁴Ibíd.

the various decay modes observed represent the decay of additional types of K-particles which are not identical to the τ or the θ .¹⁰⁵

En el 6è congrés Rochester (3–7 d'abril de 1956), Dalitz presenta l'anàlisi de 600 esdeveniments τ , 200 dels quals han estat obtinguts recentment en el bevatró de Berkeley. La incompatibilitat notada per l'autor és clara, però es fa difícil entendre com dues partícules diferents poden tenir algunes característiques tan similars:

Incidentally, the notation θ and τ , as far as most theoreticians use it, refers to the particles, and $K_{\pi 2}$, $K_{\pi 3}$, etc to the decay modes. Thus θ has the decay modes $K_{\pi 2}$, and possibly $K_{\mu 2}$, $K_{\mu 3}$, and $K_{e 3}$; τ has the decay modes $K_{\pi 3}$ and so on. This symmetry principle, assumed to govern strong interactions, allows the θ and τ , though they are different particles, to have the same mass and spin, but opposite parity.[...] The equality of τ and θ lifetimes is a “miracle”, not explained by this theory.¹⁰⁶

La comunitat, especialment la teòrica, és reticent a proposar que la solució correcta és que θ i τ són modes de desintegració del mateix mesó K, i que el que en realitat passa és que les interaccions febles violen paritat. La primera veu en aquest sentit serà la de R. Feynman en el mateix congrés i aviat es precipitaran els esdeveniments. Però això ja forma part d'una altra història més enllà d'estranyesa.

5.2 Que vénen els acceleradors!

Mais, nous devons aller vite, nous devons courir sans ralentir notre cadence: nous sommes poursuivis ... nous sommes poursuivis par les machines!

Leprince-Ringuet, al discurs de cloenda del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), 287.

5.2.1 El final del treball en raigs còsmics i el principi del treball en acceleradors

La cita que encapçala la secció és una mostra de la inquietud dels *cosmicists* davant la competència imminent i inafordable dels acceleradors. En aquest congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), sols dues de les vuitanta sessions presenten treballs en acceleradors. Dos anys més tard, al congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955), que en principi presenta els resultats en raigs còsmics del *G-stack*, mostra quinze de les setanta-cinc contribucions dedicades

¹⁰⁵Thompson, Burwell, Huggett (1956), 316.

¹⁰⁶Gell-Mann (1956a), VIII-24.

exclusivament als resultats en acceleradors. L'any següent, el 6è congrès Rochester (3–7 d'abril de 1956) conté 5 contribucions en raigs còsmics i 29 dedicades als acceleradors. El sentiment de Leprince-Ringuet a Bagnères es repetirà a Pisa, però ara amb més resignació:

Pour terminer je me demande où en sont les cosmiciens? A Bagnères, à la fin du Congrès, je les avais comparés à des montagnards grim pant rapidement une montagne très élevée dont le pied était progressivement envahi par une immense marée, celle des machines. Actuellement, ce n'est plus une marée, c'est un raz de marée et nous avons déjà les pieds dans l'eau. Pouvons-nous monter assez vite vers des énergies de plus en plus grandes pour ne pas être complètement noyés très rapidement? Il faut dire d'ailleurs que les responsables de ce raz de marée, à savoir les physiciens des grandes machines, sont pour nous d'une gentillesse extraordinaire et mettent à notre disposition tous les moyens pour nous sauver: nous avons déjà exprimé nos remerciements à Berkeley et à Brookhaven pour leur attitude extrêmement fraternelle et efficace, et cette attitude augmente encore non seulement les liens d'amitié qui existent entre nous, mais développe également le plus noble esprit scientifique. C'est une joie pour moi de dire cela.

Néanmoins, il est probable que si les cosmiciens sont capables de regarder les possibilités d'expériences nouvelles avec des techniques améliorées, ils pourront explorer de nouveaux domaines. Depuis 25 ans nous avons toujours préparé le travail des machines et nous avons dû, aussitôt leur arrivée, aller chercher plus loin notre inspiration en modifiant nos techniques. Je voudrais terminer par un point d'interrogation: combien de particules nouvelles seront, d'ici cinq ans, découvertes dans le rayonnement cosmique?¹⁰⁷

Si responem la qüestió de Leprince-Ringuet amb la perspectiva històrica, la resposta ens defineix el final de la recerca en radiació còsmica: cap més partícula no serà descoberta en aquesta font.¹⁰⁸

Però malgrat la resposta, molts laboratoris seguiran escrutant els raigs còsmics fins a finals de la dècada.¹⁰⁹ A Europa, la cambra de Manchester al Jungfraujoeh es posarà sota el control del CERN l'agost de 1955, tot i que el treball es donarà per acabat el 1958. La cambra de Manchester al Pic du Midi ja havia quedat obsoleta davant de les cambres més grans, en especial davant la doble cambra de l'EP que funcionava en el mateix indret. Com a conseqüència, el grup de Manchester deixarà la seva cambra i passarà a col·laborar en les investigacions de l'EP.¹¹⁰ A l'EP també havia anat W. B. Fretter l'any 1952–3 per estudiar el treball del grup de Leprince-Ringuet. De tornada a Berkeley, Fretter construirà

¹⁰⁷Leprince-Ringuet (1956b), 689.

¹⁰⁸A excepció, potser, de la interpretació, el 1958, del grup de l'EP que treballa al Pic du Midi, d'una fotografia que es podria correspondre al Ξ^0 predit en la teoria d'estranyesa. Amb tot, la verificació definitiva vindrà del bevatró de Berkeley (v. sec. 5.2.2).

Per a una cronologia dels descobriments en raigs còsmics i acceleradors vegeu l'apèndix C, p. 388–389.

¹⁰⁹Galison (1997, 316) coincideix cronològicament en situar el final del treball en raigs còsmics:

In particle physics, by the late 1950s, virtually all experiments were attached to accelerators, and the move from cosmic ray stations to accelerators laboratories marks one of the most significant long-term trends of the discipline.

¹¹⁰Gran part de la investigació en raigs còsmics a Europa serà absorbida pel CERN, Grégory i Lagarrigue, que havien estat *cosmiciens* il·lustres de l'EP, n'esdevindran directors.

una cambra de boira per investigar en radiació còsmica: “We continued to use this chamber for several years, until I made the decision to abandon cosmic rays for accelerators and bubble chambers, which I did in 1960.”¹¹¹ També, R. W. Thompson liderarà el 1959 un projecte a l’Argonne National Laboratory, a Illinois, per a la construcció d’una cambra de bombolles d’hidrogen. A començaments dels seixanta, la detecció de noves partícules en radiació còsmica es donarà per acabada i, alhora, quedaran antiquats els mètodes de detecció utilitzats.¹¹²

La transició de la font natural a la font artificial ocuparà la segona meitat de la dècada dels cinquanta. Cal destacar que en aquesta transició, els vells detectors —cambres i emulsions— s’aplicaran a la nova font i encara s’aconseguiran importants resultats sobre producció associada, desintegracions del mesó K o V^0 anòmals.¹¹³

Aquesta persistència dels vells mètodes de detecció i la vella font còsmica fins a finals de la dècada dels cinquanta pot venir influïda per la dificultat d’organitzar el treball al voltant dels acceleradors. La complexitat de les cambres de bombolles requerirà una organització més rígida: el nou detector no podrà manipular-se ni modificar-se en la forma com els vells físics feien amb les seves emulsions i cambres de boira. És la fi del romanticisme:¹¹⁴

This observation by Shutt’s group [al cosmotró de Brookhaven], the associated production of strange particles in the high-pressure diffusion cloud chamber, marked the beginning of the end of what I like to recall as the romantic era of particle physics, the period when cosmic rays were the only source of the new particles, the time when experimenters took their cloud chambers and arrays of Geiger counters and made their way up the tall mountains, the Pic-du-Midi, the Aiguille-du-Midi, the Jungfrau, and Mount Evans, and other experimenters flew emulsion stacks at the edge of the planet on giant balloons. Those were the romantic years.¹¹⁵

També el zel dels *cosmicciens* en la seva feina justifica la persistència dels vells mètodes. Potser no totes les noves partícules es poden produir en acceleradors, mentre que els raigs

¹¹¹Fretter (1982), 194.

¹¹²Hi ha una revifalla a finals dels seixanta amb la recerca dels quarks en el nucli de les ruixades dels raigs còsmics. Un petit mercat de noves cambres de boira s’inicia per a aquesta recerca i s’allargarà fins al clar reconeixement que els quarks no es poden detectar lliurement. Sobre aquesta recerca podeu veure: Jones, L. W. “The continuing search for quarks”, *Physics Today* 26 (5) (1973): 30–7; Jones, L. W. “A Review of Quark Search Experiments”, *Review of Modern Physics* 49 (1977): 717–52; McCusker, B. *The Quest for Quarks* (Cambridge: Cambridge University Press, 1983); Pickering, A. “The Hunting of the Quark”, *Isis* 72 (1981): 216–36; Pickering, A. *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics* (Chicago: University of Chicago Press, 1984).

¹¹³Restringint-nos a les investigacions referents a les noves partícules estranyes, Berkeley i Brookhaven seran els acceleradors que més hi contribuiran. En l’apèndix B, sec. B.4.4, es pot visualitzar com s’apliquen els diferents detectors en aquestes fonts artificials.

¹¹⁴Des del punt de vista dels instruments, P. Galison argumenta a *Image and Logic* (1997, 318) que el gran canvi es produeix quan els vells detectors de la radiació còsmica són substituïts en el seu treball en acceleradors pels nous detectors, en especial, la cambra de bombolles perquè aleshores “the experimenters could no longer build, operate, or modify the large detection devices on which their experiments depended without extensive collaborations among physicists and engineers.” Per a un estudi d’aquesta transició des del punt de vista del detector veure el capítol 5 del mateix llibre.

¹¹⁵Fitch (1989), 460.

còsmics sempre donaran l'energia suficient per detectar nous esdeveniments estranys. En l'època s'havia establert un límit considerat per a la producció de les noves partícules d'uns 30 GeV. Si totes les V es podien produir per sota aquests 30 GeV, els acceleradors serien capaços de donar tots els resultats necessaris. Això no obstant, davant la possibilitat d'energies superiors, l'esperança es trobava en els raigs còsmics. Ja el 1954, Blackett es referma en aquest argument:

Even if no new particles are produced at energies above the expected 30GeV of the big machine, the investigation of the dynamics of collisions of particles of greater energy will remain for long the province of the cosmic ray investigator, and so of the photographic emulsion and cloud chamber.¹¹⁶

Al mateix temps, però, els *cosmicciens* hauran d'aprofitar els avantatges que suposen les investigacions en acceleradors i s'establiran connexions entre ambdues fonts de detecció. En paraules de Powell: “Such an attack has been greatly facilitated by the generous way in which our American Colleagues at Brookhaven and Berkeley have assisted many of us to secure exposures of stacks of emulsions to the beams of fast protons, π and K-mesons, produced by accelerators.”¹¹⁷ Les cambres de boira també tindran una breu aplicació als acceleradors, incentivades pels seus creadors que pretenen jugar en els dos camps alhora:

Les grandes chambres de Wilson sont loin d'avoir épuisé leurs possibilités. Je suis persuadé que leur utilisation avec les faisceaux des grandes machines sera extrêmement fructueuse; mais je pense également que, bien étudiées pour les rayons cosmiques, elles n'ont pas encore dit leur dernier mot, loin de là, et peuvent nous réserver encore d'importantes découvertes.¹¹⁸

De fet, la cambra de boira de difusió i d'alta pressió va jugar un paper important en els primers experiments al cosmotró de Brookhaven, particularment per estudiar la producció de les partícules en l'hidrogen de la cambra. Això no obstant, a finals de la dècada dels cinquanta, la posta a punt de la cambra de bombolles desbancarà definitivament la cambra de boira com a detector aplicat als acceleradors.

Malgrat la pervivència a què estem fent esment, a partir del 1955 caurà en picat el nombre de resultats obtinguts en la vella font. Ja hem mencionat com al 6è congrés Rochester (3–7 d'abril de 1956) sols 5 de les 29 contribucions experimentals són aportacions dels raigs còsmics a les noves partícules, la resta ja és treball en acceleradors. Després d'una àrdua sessió dedicada a la producció i interacció dels mesons pesats i hiperons, presidida per C. C. Butler, es reserva un petit espai a la contribució de Caltech en raigs còsmics. La reacció de C. C. Butler, ja a l'*Imperial College* de Londres, i de R. B. Leighton, representant de Caltech, és significativa de com els ànims dels *cosmicciens* van refredant-se:

¹¹⁶Blackett (1954), 281.

¹¹⁷Powell (1956), 343.

¹¹⁸Leprince-Ringuet (1956a), 513.

Butler remarked now that it was a pleasure to have at least one cosmic ray paper in the session and then asked Leighton to give his report.

LEIGHTON then suggested that next year those people still studying strange particles using cosmic rays had better hold a rump session of the Rochester Conference somewhere else —that the machine work had been pretty hard on cosmic ray people.

Si bé hem d'esperar fins aquest 1956 perquè els acceleradors mostrin com han absorbit realment la investigació del nou camp, les primeres recerques es remunten al 1952, quan el ciclotró de Chicago es troba en plena efervescència sota el lideratge d'Enrico Fermi, amb els bons resultats obtinguts en el descobriment de la primera ressonància.¹¹⁹ Però aquests primers intents seran infructuosos, perquè l'energia del feix de protons disponible encara no serà suficient per detectar les noves partícules inestables en raigs còsmics.¹²⁰ Més profitosa per a la investigació de partícules estranyes serà la posada en marxa del cosmotró de Brookhaven el juny del 1952. En principi els protons podien accelerar-se fins als 2.3 GeV, i aconseguiran els 3 GeV a principis de 1954. Aquest 1954 el bevatró de Berkeley començarà a operar i ho farà amb protons de 5 GeV, que arribaran a 6.3 GeV el 1956. Cosmotró de Brookhaven i bevatró de Berkeley seran les dues fonts artificials que resultaran més útils per a la investigació de les noves partícules.¹²¹

De bon principi, els treballs en acceleradors s'enfocaran a aclarir els enigmes que els experiments en radiació còsmica encara no havien aconseguit desentrellar. En aquesta dependència amb la vella font destaquen els problemàtics modes de desintegració dels kaons, la confirmació definitiva de la producció associada, que des del món teòric s'havia proposat, la resolució de l'enigma θ - τ i, d'afegit, la detecció de noves partícules encara no detectades en radiació còsmica, com la Σ^0 i la Ξ^0 , que des del 1954 la teoria ja preveia.

Més endavant, els acceleradors demostraran que el control sobre les noves partícules, que els experiments amb acceleradors permeten, obre un nou camp molt més ampli de possibilitats que els oferts per la radiació còsmica. Serà aleshores quan s'inicia la investigació de les característiques més generals, propiciades per l'existència de feixos de kaons que començaran a col·limar-se a partir del 1955. Els experiments de dispersió i interacció nuclear començaran a fer-se amb les noves partícules kaòniques, en analogia a com es treballava des de feia anys amb les velles partícules, però això ja és una altra història més enllà del

¹¹⁹Vegeu cap. 4, sec. 4.1.

¹²⁰El sincrociclotró de Chicago es posarà en marxa el 1951 i en aquell moment serà l'accelerador que, en aconseguir protons de 450 MeV d'energia, serà capaç de produir feixos de pions carregats de prou intensitat i energia com per iniciar un programa d'investigació sobre la dispersió i absorció d'aquestes partícules per nuclis i nucleons. Per a la producció de partícules estranyes caldrà fer el salt a l'ordre dels GeV d'energia per als protons primaris.

¹²¹Altres acceleradors —com els de Stanford, Caltech, Cornell, Birmingham, Harwell— operaran per sota dels 2 GeV com a mínim fins el 1955. A més, cada grup s'especialitzarà en un tipus diferent de recerca, que inclourà altres camps més enllà de la detecció de les noves partícules, com els experiments d'interacció nuclear i de dispersió entre nucleons, nucleons i pions, deuterons, fotoproducció, detecció de neutrins i antiprotons, etc.

descobriments dels nous elements de què s'ocupa la tesi.¹²²

A partir del 1955, els estudis al bevatró de Berkeley es dispararan.¹²³ El tipus d'investigacions, que s'iniciaran amb emulsions com a detectors, variarà de les realitzades a Brookhaven amb cambra de boira. L'ús dels blocs d'emulsions i la fàcil disponibilitat de feixos de kaons faran del bevatró l'instrument ideal per a les investigacions de les propietats dels mesons K i dels seus modes de desintegració.

Aquests feixos de kaons eren produïts a partir dels feixos de protons de 5–7 GeV que colpejaven un fitó de coure.¹²⁴ Els kaons produïts artificialment, controlats per un camp magnètic, tenien el moment i l'abast molt ben definit en un punt determinat d'entrada en blocs d'emulsió, cosa que permetia avaluar el punt esperat on es pararien i buscar-los allà on estarien. Aleshores, els abastos dels kaons desintegrant-se en el mode τ , per als quals la massa estava millor definida, es podien comparar molt bé amb els abastos dels kaons desintegrant-se en altres modes. D'aquesta forma es podia arribar a una comparació molt sensible de la massa segons els diferents modes de desintegració a partir de la relació abast-energia. Els resultats, a partir del 1955, van mostrar com no hi havia cap diferència significativa de massa entre els kaons desintegrant-se en el mode τ i els kaons desintegrant-se en altres modes. Tot plegat precipitarà la necessitat de postular la violació de paritat per a les interaccions febles¹²⁵ i portarà a la unicitat dels mesons K. També ajudarà a aquesta unicitat els estudis de la vida mitjana dels diferents modes de desintegració i dels diferents *branching ratios*.

Diferents grups treballaran a Berkeley. Des de Chicago, M. Schein i D. M. Haskin investigaran blocs d'emulsions exposades al feix de π^- de 4.8 GeV i 3.0 GeV, i estudiaran la proporció de kaons negatius trobats i les seves propietats menys conegudes que pels kaons positius. El feix de protons de 5.7–6.2 GeV també serà molt útil en la recerca de les produccions associades per verificar el model d'estranyesa, especialment en la recerca

¹²²L'anàlisi de l'índex per matèries del *Physical Review* i del *Nuovo Cimento* s'ha mostrat força profitosa per adonar-se d'aquesta evolució en els experiments d'investigació de les noves partícules. Més enllà del descobriment, comença a ser possible la manipulació dels nous elements. Ho podeu veure a l'apèndix B, p. 353.

¹²³Aquesta tendència es pot observar en la base de dades: apèndix B, sec. B.4.4, p. 384. En general, els gràfics mostren com l'aparició dels acceleradors augmentarà el nombre d'articles publicats al *Phys. Rev.* i al *Nuovo Cimento* (v. apèndix B, sec. B.4.2 i sec. B.4.3), així com les col·laboracions entre diferents grups (v. apèndix B, sec. B.4.1).

¹²⁴En realitat, des del principi s'intentarà concentrar en feixos els mesons K. Ja el 1953, el feix de protons de 2.5 GeV de Brookhaven bombardejava fitons per sistematitzar la presència de mesons pesats, però amb resultats escassos. El primer feix de kaons consistent s'obtindrà al bevatró de Berkeley a partir d'un feix de protons de 5 GeV [Vegeu Kerth *et al.* (1955, 641)]. El feix correspon a K^+ , amb moment ben definit de 135 MeV, que enfocat sobre una emulsió nuclear en permet analitzar l'abast, la distribució espacial i els modes de desintegració presents.

¹²⁵Vegeu cap. 6, sec. 6.2.2. La possibilitat de disposar de feixos de kaons també permetia conèixer amb més detall les tres secundàries en la desintegració del mode τ . Els resultats obtinguts es comparaven aleshores amb els esperats dels suggeriments de Dalitz i precipitaran també la necessitat de justificar aquests diagrames de Dalitz.

d'interaccions K^- que es mostren en forma d'estrella amb nuclis:

$$K^- + (p, n, p, n) \rightarrow (\Lambda^0, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-) + \pi^0$$

$$K^- + (p, n, p) \rightarrow (\Sigma^+, \Lambda^0, \Sigma^0) + \pi^-$$

$$K^- + p \rightarrow \Sigma^- + \pi^+$$

El cosmotró de Brookhaven aplicarà més efusivament que Berkeley la vella tècnica de les cambres de boira.¹²⁶ De fet, R. P. Shutt veurà en la cambra de boira de difusió i alta pressió l'instrument ideal per aplicar al cosmotró. La construcció de dues cambres de difusió d'hidrogen a 20 atm aplicades als feixos del cosmotró contribuiran a la demostració de la producció associada i especialment a l'estudi de les V^0 anòmals que, intuïts experimentalment, trobaran explicació amb la teoria d'estranyesa que es va perfilant.

5.2.2 Per primer cop, la teoria per davant l'experiència: producció associada, K_L^0 , Σ^0 , Ξ^0

Les noves partícules inestables en raigs còsmics havien mostrat molt aviat un comportament estrany. La seva copiosa producció era difícil de combinar amb la seva llarga vida. D'entre les múltiples explicacions teòriques que es van proposar, la hipòtesi de la producció en parelles divulgada per A. Pais era de les més fàcils de comprovar experimentalment. No obstant això, els raigs còsmics es van mostrar poc efectius per evidenciar processos de creació de les noves partícules, i menys efectius encara per determinar si aquesta producció es feia de dos en dos. L'esperança era, doncs, la major controlabilitat dels experiments amb acceleradors.

En la recerca d'aquesta producció en parelles en els acceleradors, en especial al cosmotró de Brookhaven, apareixeran altres elements que aniran encaixant amb les prediccions teòriques de Gell-Mann–Nishijima (com la Σ^0 o la Ξ^0), i es clarificaran elements vagament intuïts dels experiments en raigs còsmics (com els V^0 anòmals o les K negatives) que encara no havien estat perfectament identificats. Als acceleradors se'ls reservarà també la tasca de definir en alguns casos, i de reafirmar en d'altres, les propietats d'aquestes noves partícules, com les seves característiques de spin-paritat, vida, seccions eficaces d'interacció, etc.

Pel temps en què la producció en parelles comença a mostrar-se com una hipòtesi seriosa a validar, es comencen a mostrar també els primers experiments en acceleradors dissenyats per detectar les noves partícules. En el congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), es presenten els resultats provinents del ciclotró de Chicago, que pretenen mostrar la producció de V^0 en blocs d'emulsió sotmesos al feix de pions de 227 MeV del ciclotró. La tria de l'emulsió com a detector rau en la pròpia natura de l'experiment que estan posant en marxa:

¹²⁶Vegeu apèndix B, sec. B.4.4, p. 386.

If they are produced by low energy pi's, then the V^0 energy will be low and they will have a short path length, therefore the photographic emulsion may be more useful than the cloud chamber for their detection.¹²⁷

Els propis investigadors són conscients de la dificultat de detectar partícules V amb aquesta baixa energia i, amb la idea de la producció associada en ment, la dificultat encara es fa més evident ja que “If they are produced in pairs, then the probability of observing them at low energies is small.”¹²⁸

Fins a Bagnères també arriben els resultats de les investigacions iniciades al cosmotró de Brookhaven pel que fa a la recerca de noves partícules. En aquest cas, el feix de π^- d'1.5 GeV, que impacta en l'hidrogen d'una cambra de boira de difusió d'alta pressió (18 atm) que farà de detector, promet ser més profitós per a la investigació dels nous elements. Però els resultats preliminars no permeten confirmar la hipòtesi de la producció en parelles. De fet, les discussions mostren una ferma reticència a creure-hi:

The production of V_1^0 's in pairs is rapidly losing probability. The energy is insufficient. If Schein's results are correct then V_1^0 's must be produced singly. The results presented by the cloud-chamber people are not inconsistent with the view that even V_2^0 's are not produced in pairs.¹²⁹

Pocs dies després d'aquest congrés, l'anàlisi de noves fotografies obtingudes a Brookhaven amb la cambra de boira de difusió d'alta pressió sembla mostrar dos exemples de producció associada. El més clar permet una acurada mesura dels moments que permet intuir la presència d'una segona partícula produïda, a més de la presència clara d'un típic esdeveniment V_1^0 .¹³⁰

The total energy of the V_1^0 is 1.26 BeV, and its momentum is 610 Mev/c. To conserve energy and momentum at least one other neutral particle must start at A. Assuming a single particle, its total energy would have to be 1.31 BeV and its momentum 1.11 BeV/c, leading to a mass of $1350 \pm 70 m_e$ for a kinetic energy of 1.5 BeV for the incident π^- [...] In any case, if only one other particle had been produced in addition to the V_1^0 , this would have to be a heavy meson.¹³¹

Malgrat els resultats es poden interpretar a partir de la producció en parelles, i històricament han estat considerats com els primers exemples clars de la demostració d'aquesta hipòtesi, el cert és que encara hi ha dubtes seriosos sobre la hipòtesi de Pais. En els experiments del cosmotró s'ha observat la producció en parelles, però molts altres experiments mostren habitualment una única nova partícula, o no és possible descartar la presència d'altres secundàries. En el mateix article del grup de Brookhaven, a sota mateix dels negatius de les fotografies que semblen mostrar la producció associada, els autors avisen d'aquestes possibilitats desfavorables:

¹²⁷Schein *et al.* (1953), 166.

¹²⁸Ibíd.

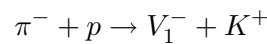
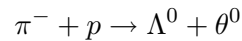
¹²⁹Fretter (1953b), 252.

¹³⁰Vegeu apèndix A, fig. A.14.

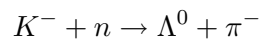
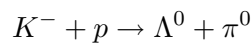
¹³¹Fowler *et al.* (1953b), 1287.

Of course, instead of one heavy particle several lighter ones (for instance two π^0 's, or a π^0 and a V_2^0) could originate from the events in addition to the V_1^0 .¹³²

Per tant, no es tracta d'una proclama clara de la verificació de la hipòtesi de producció associada. Caldrien noves investigacions i l'acumulació de resultats positius perquè la hipòtesi sigui definitivament acceptada. El grup de Brookhaven seguirà investigant la producció de noves partícules en la cambra de difusió plena d'hidrogen a alta pressió exposada al feix de pions negatius d'1.5 GeV. En un nou article del 1954 reafirmaran haver vist les reaccions de producció associada:

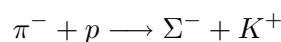


També els raigs còsmics semblaran mostrar resultats de producció associada. En particular, els experiments amb la multilàmines del MIT i la cambra de boira de Manchester,¹³³ mostraran casos produïts a través de la captura de K^- , en reaccions com:



Al congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954) Thorndike, del grup de Brookhaven, presenta els avantatges de la màquina per determinar reaccions permeses de producció de noves partícules. Amb els resultats, afegirà opinions com la següent: “These seem to indicate that Y and K are produced together, as is required to fit the theories of Pais, Gell-Mann, and others.”¹³⁴ Així, les hipòtesis teòriques començaran a influir en els experiments en acceleradors. S'establirà un intercanvi fluid d'informació entre teòrics i experimentals que confluirà a demostrar la supremacia de la teoria de Gell-Mann per sobre de la de Pais, ja que la primera prohibia unes determinades reaccions de producció associada que la segona permetia, i que els experiments en acceleradors van anar evidenciant.¹³⁵

Aquesta influència de la teoria sobre l'experimentació en acceleradors es va fent cada cop més evident quan alguns dels resultats obtinguts es van interpretar segons les partícules predites en el model de Gell-Mann. Ja el 1954, els primers experiments de producció associada a Brookhaven establiran l'existència del Σ^- com a producte de la reacció:



¹³²Ibíd.

¹³³La dificultat de detectar la producció associada en raigs còsmics venia lligada a la dificultat de detectar la θ^0 en emulsions, a causa de l'elevada energia amb què es produïa la desintegració que en dificultava la detecció en l'abast de les emulsions. A més, aquest abast també dificultava l'observació conjunta de les dues partícules participants en la producció associada, Λ^0 i θ^0 .

¹³⁴Thorndike (1955), 333.

¹³⁵Vegeu cap. 6, sec. 6.1, p. 248.

anomenat inicialment V_1^- o també Λ^- , però amb l'assignació correcta d'isospín i la determinació de la seva massa s'anirà perfilant com Σ^- .¹³⁶

A partir del 1955, la influència del model teòric per a la interpretació dels resultats obtinguts en acceleradors es fa encara més evident. Per exemple, el descobriment de la Σ^0 es pot entendre com un procés d'assimilació de la teoria per part dels experimentals a la llum de la qual interpretaran les traces obtingudes. Així, W. D. Walker, de la Universitat de Wisconsin, presenta els resultats obtinguts en el cosmotró sobre la producció de dues partícules Λ^0 produïdes en les col·lisions entre el feix de π^- a 1.11 GeV i els protons de la cambra de boira de difusió d'hidrogen. Els dos esdeveniments presenten característiques similars:

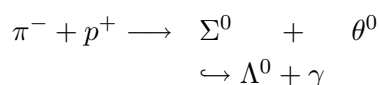
One of the V particles decays into two lightly ionizing particles, and the longer-lived one into two tracks with greater than minimum ionization. These two particles also have properties consistent with those of the θ^0 and Λ^0 respectively.¹³⁷

Hi ha, però, una possible explicació alternativa. Un balanç del moment de la desintegració permet la presència de fotons o neutrins associats a l'aparició de la Λ^0 . Això porta a pensar que:

It is possible that the Λ^0 is the product of decay of a heavier hyperon in one of the examples. The Σ^0 particle postulated by Gell-Mann and Pais fits the data very well.¹³⁸

L'article, doncs, mostra un possible primer esdeveniment $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$, que hagués passat desapercbut si els experimentals no haguessin assimilat el model teòric que el predeia, ja que aquesta partícula presenta la dificultat que s'ha de desintegrar ràpidament en dues secundàries neutres, que per aquesta característica de neutralitat, són difícils de detectar.

El gener de 1957 tres esdeveniments de producció associada semblants a aquests dos de Walker seran trobats de nou al cosmotró. Ara, però, la interpretació serà més clara i representarà la "Demonstration of the Existence of the Σ^0 Hyperon and a Measurement of its Mass", com diu el títol de l'article. Els esdeveniments són perfectament compatibles amb les reaccions:¹³⁹



Uns mesos abans, pel maig del 1956, el bevatró de Berkeley ja haurà mostrat les desintegracions de kaons negatius que tan cares eren de veure en els raigs còsmics a causa de la forta absorció nuclear que pateixen:

To study the decay modes of negative K-mesons it is thus necessary to observe decays in flight. In a study of negative K-meson interaction and lifetime, we have observed four

¹³⁶Fowler *et al.* (1954), 861-7.

¹³⁷Walker (1955), 1407.

¹³⁸Ibíd.

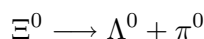
¹³⁹Vegeu apèndix A, fig. A.20.

decays in flight in nuclear emulsions. In two of these cases, it was possible to establish the nature of the decay scheme. In the other two, the secondary particles were emitted with large dip angles, and such an analysis was thus not possible. One of the two cases analyzed is consistent with the decay $K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$, and the other with the decay $K^- \rightarrow e^- + 2 \text{ neutral particles}$.¹⁴⁰

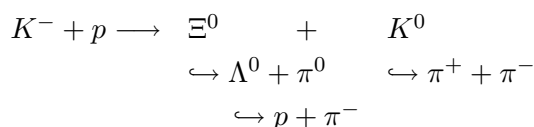
Per la mateixa època, al cosmotró de Brookhaven, un grup de col·laboració entre la Universitat de Columbia i el *Brookhaven National Laboratory* detectarà les V^0 anòmales, que s'interpretaran com mesons pesats per als quals la desintegració en dos pions és prohibida. Aquesta idea sorgeix també del model teòric de Gell-Mann i Pais que s'està imposant i correspondrà al K_L^0 (L per "Long-lived") de la *partícula mescla*. En aquest cas, és de nou la teoria que guia els experimentals:

These theoretical considerations have stimulated us to undertake a search for long-lived neutral particles. To this end, the Columbia 36-in. magnet cloud chamber was exposed to the neutral radiation emitted from a copper target at an angle of 68° to the 3-Bev external proton beam of the Brookhaven Cosmotron [...]. To date twenty-six V^0 events have been observed. All of these events have anomalous Q values for two-pion decay, all but one are noncoplanar with the line of flight, and all but one demand at least one neutral secondary to balance transverse momentum.¹⁴¹

Finalment, el Ξ^0 predit per la teoria de Gell-Mann–Nishijima no es detectarà experimentalment fins el 1958, quan el grup de l'EP que treballava al Pic-du-Midi presenta una fotografia que es pot interpretar com la desintegració d'un hiperó neutre:¹⁴²



El resultat és presentat el 1958 a la *International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy* com un dels darrers esforços de detecció en la vella font. Malgrat l'evidència anterior, fins al 1959 no s'observarà una reacció que pugui entendre's inequívocament com un Ξ^0 . Serà al bevatró de Berkeley amb la reacció:¹⁴³



A partir del 1955, doncs, el treball en acceleradors passarà a ser el més important i servirà per concretar les dades disponibles en raigs còsmics sobre les noves partícules. Més enllà del càlcul de massa o d'estimacions sobre la vida, els acceleradors permetran augmentar substancialment el nombre de col·lisions hadròniques interessants i estudiar paràmetres

¹⁴⁰Ekspog, Goldhaber (1956), 1187.

¹⁴¹Lande *et al.* (1956), 1901. Altres propostes sobre possibles modes de desintegració del mesó pesat neutre seran estudiades fermament a Brookhaven (v. cap. 6, sec. 6.2.1, p. 257).

¹⁴²Kaplon (1958), 161 (v. apèndix A, fig. A.21).

¹⁴³Vegeu apèndix A, fig. A.22.

addicionals, com seccions eficaces de producció i dispersió, característiques energètiques d'aquests fenòmens i dependències angulars en les dispersions, proporció dels diferents modes de desintegració, etc. Tot plegat permetrà comprovar les prediccions de noves partícules en el marc de la teoria d'estranyesa, fermament establerta al congrés de Pisa de 1955, i evolucionar cap a una teoria completa de les diferents interaccions que involucren els nous elements.

Capítol 6

Del model a la teoria: més enllà d'isospín

L'etapa anterior es tancava amb l'assignació correcta d'isospín per a les noves partícules, aconseguida per Nishijima i per Gell-Mann. Nishijima també arribava a donar-nos la llei que relaciona càrrega, isospín i nombre bariònic, a través de la qual s'aconsegueix atribuir un significat físic a la nova simetria que Gell-Mann batejarà com estranyesa. Però Nishijima treballa molt lluny dels focus d'investigació, bàsicament occidentals. Una font clara de difusió de les idees teòriques seran els congressos, on teòrics i experimentals intercanvien informació. Nishijima no hi participa, però Pais hi explica abastament la producció associada, així com Gell-Mann, que anirà imposant el seu model. El primer congrés analitzat és el de Glasgow (13–17 de juliol de 1954), amb la participació conjunta de Gell-Mann i Pais. Pais comença explicant la hipòtesi de producció associada. Tot seguit intercedeix en favor del model de Gell-Mann, amb l'assignació correcta d'isospín i el gran poder de predicció de noves partícules, com Σ^0 i Ξ^0 , i de reaccions encara no descobertes. La contribució acaba amb una possible generalització de Pais al model d'assignació d'isospín de Gell-Mann per intentar resoldre la limitació que encara hi és present. Malgrat l'assignació d'isospín és la correcta, i per tant hiperons i mesons pesats queden definits en multiplets, la simetria ulterior d'estranyesa no és del tot concretada. El problema resideix a entendre que els hiperons porten assignat un nombre bariònic, de manera que es pugui deduir la llei $Q=I_z+b/2+s/2$. A Glasgow (13–17 de juliol de 1954), Gell-Mann i Pais sols arriben a formular la simetria de les noves partícules com multiplets desplaçats de càrrega respecte els multiplets d'isospín de les velles partícules. En el 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955), Pais exposarà la teoria de Gell-Mann i insistirà en aquesta idea de multiplets desplaçats de càrrega. No serà fins el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955) que Gell-Mann explicitarà la llei $Q=I_z+b/2+s/2$, i definirà l'estranyesa com la propietat que caracteritza les partícules estranyes. Malgrat Nishijima ja havia introduït la llei en un article datat el 13 de juliol de 1954, Gell-Mann rebrà més protagonisme com a descobridor per diferents raons: el poder de la divulgació a Occident i la forma pràctica i predictiva com descriu les seves idees. D'entre les prediccions destaquen la Σ^0 i la Ξ^0 , per a les quals Gell-Mann proposa als experimentals les reaccions que han de buscar en les seves fotografies. Conseqüència del model és també la diferència entre K^0 ($S=1$) i la seva antipartícula \bar{K}^0 ($S=-1$), que justificarà l'observació de mesons pesats neutres amb dues vides diferents (K_L^0 i K_S^0). Finalment, més enllà del model teòric d'estranyesa es resoldrà l'enigma experimental θ - τ , acceptant la violació de paritat de les interaccions febles. La importància del model de Gell-Mann es veurà posteriorment augmentada quan d'altres teòrics el prenguin com a base per reformular la teoria de les partícules estranyes. D'entre aquestes reformulacions destacarem: Salam i Polkinghorne (1955), D'Espagnat i Prentki (1956), Sachs (1955), Goldhaber (1953) i (1956), i Sakata (1956).

6.1 Vers la completitud del model correcte: divulgació de les idees de M. Gell-Mann a través dels congressos

We have as yet no quantitative results to report, but in a field as confused as that of elementary particle physics qualitative remarks may possess some value, especially if they have experimentally verifiable consequences.

M. M. Levi i R. E. Marshak a Pàdua (1954), 253.

M. Gell-Mann i A. Pais propagaran les seves idees teòriques sobre les noves partícules en els congressos que les tracten, especialment a partir de 1954. Els grups experimentals que hi seran presents començaran a pensar com verificar la producció associada de Pais o les reaccions de producció més restrictives predites per Gell-Mann. La simplicitat d'aquestes idees teòriques permet establir una connexió senzilla amb els treballs experimentals: si s'arriba a detectar clarament la producció en parelles o les reaccions de Gell-Mann, s'explicarà el comportament estrany de producció abundant i llarga vida de les noves partícules. Aquest *feedback* s'estableix, més enllà de la publicació d'articles, a través d'un contacte més directe entre teòrics i experimentals. L'anàlisi dels congressos permet veure com el model de Gell-Mann evoluciona cap al concepte d'estranyesa i com el model de Pais queda superat.¹

Pais comença les seves intervencions sobre un model teòric per descriure les noves partícules al 2n congrés Rochester (11–12 de gener del 1952) i al congrés de Tokyo&Kyoto (setembre de 1953). L'any següent presentarà una contribució al congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954) junt a Murray Gell-Mann, que fins el moment no havia fet cap contribució teòrica en els congressos sobre el tema.²

Del 13 al 17 de juliol de 1954 té lloc a Glasgow la *International Conference on nuclear and meson physics*. Com el títol indica, es dedicarà quasi totalment a les forces nuclears i a les propietats dels nuclis i dels mesons π . Sols un petit espai de l'últim dia és reservat a les

¹Els gràfics sobre la base de dades *Revistes principals* mostra com la producció teòrica té una tendència creixent en tot el període, però *Physical Review* i *Nuovo Cimento* mostren com aquest creixement és especialment important a partir del 1954 (v. apèndix B, p. 373–376).

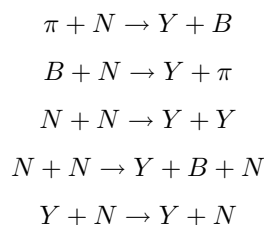
²Una revisió de la base de dades ens permet veure que Pais participa al 2n Rochester (1952), a Tokyo&Kyoto (1953), a Glasgow (1954) i al 5è Rochester (1955). Gell-Mann comença una mica més tard, amb la participació a Glasgow (1954), també participa a Pisa (1955) i al 6è Rochester (1956). Nishijima no intervindrà en cap dels congressos analitzats parlant de les noves partícules. Si tenim en compte que llevat del congrés de Tokyo&Kyoto (1953) tots es realitzen en el món occidental, es pot argumentar la difícil difusió de les idees de Nishijima en aquesta esfera. La revisió de les contribucions a les revistes principals també ens reforça aquest argument. Entre 1952 i 1956, Pais escriurà 5 articles sobre les noves partícules al *Physical Review* i un al *Progress of Theoretical Physics*. Gell-Mann escriurà 2 articles al *Physical Review*, començant el 1953. Finalment, Nishijima serà el més prolífic, amb 13 articles sobre les noves partícules començant l'any 1951, però tots al *Progress of Theoretical Physics*.

noves partícules sota la denominació de *Heavy Mesons and Hyperons*. Però en aquest petit espai apareix una contribució de gran interès, presentada per M. Gell-Mann i A. Pais: “Theoretical views on the new particles’ in which all ideas on the subject known to us were summarized”.³

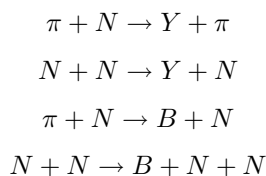
La contribució comença precisant l’enigma que envolta els nous descobriments —com conciliar la llarga vida amb la producció abundant en interaccions fortes— i se centra en la investigació de tres models possibles basats en regles de selecció que poden justificar aquest comportament.

El primer model correspon a la producció associada d’A. Pais, que utilitza la nomenclatura B , per indicar conjuntament el complicat grup dels mesons K i per donar rellevància al seu caràcter bosònic, i Y per designar el grup dels hiperons:⁴

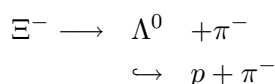
[...] the only consistent way known to us of decoupling production and decay requires “associated production” of the new particles. Only reactions like the following are allowed to be fast:



In each of these, more than one new particle is involved; that is what is meant by “associated production.” The following reactions, on the other hand, are required to be as weak as the decays of the new particles (and therefore insignificant as production mechanisms)



Però la teoria de Pais no havia aconseguit resoldre tots els problemes. D’una banda, la producció associada trigarà en demostrar-se experimentalment i quan s’aconsegueixi hi haurà reaccions que el model de Pais permetria, com $N + N \rightarrow \Lambda + \Lambda$, que malgrat buscar-se intensament no seran detectades. D’altra banda, hi havia la dificultat del model de Pais per explicar la partícula cascada:



Ja que en la desintegració hi apareixen dues partícules estranyes i per tant hauria de produir-se a través del mateix mecanisme de producció en parelles.

³Pais (1986), 520.

⁴Gell-Mann, Pais (1955b), 346.

El model, doncs, falla a l'hora d'explicar tota la informació experimental disponible i, en el congrés, M. Gell-Mann i A. Pais es mostraran d'acord en descartar-lo. Amb el rebuig al propi model, i l'adhesió a un segon model més en consonància amb les idees de Gell-Mann, Pais està afavorint l'acceptació de les idees de Gell-Mann.

Aquest segon model ja se centra en l'assignació d'isospín a les noves partícules en la forma com Nishijima i Gell-Mann havien anat proposant d'un temps ençà. Quan M. Gell-Mann comença a pensar en una llei per a les noves partícules se n'adona que cal eliminar la possibilitat que es desintegri electromagnèticament, és a dir, cal ésser més restrictius que la coneguda llei $\Delta I=0, \pm 1$ per a l'electromagnetisme. A partir d'aquí és quan s'atrevirà a fer l'agosarada proposta de suposar que Λ^0 és un fermió isobosó i per tant amb $I=1$. D'aquesta manera, la coneguda desintegració $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ no podrà tenir lloc fortament —perquè isospín no es conserva— ni tampoc electromagnèticament —perquè isospín no es conserva ni es verifica $\Delta I=0, \pm 1$.

En aquest congrés del 1954, però, ja hauran arribat les informacions experimentals que apunten que els hiperons diferents de la coneguda $V^0 \rightarrow p + \pi^-$ tenen una massa significativament major. Conseqüentment, M. Gell-Mann rectificarà i suposarà que V^0 (Λ^0) no forma part d'un triplet d'isospín ($I=1$), sinó que és un singlet ($I=0$). Al mateix temps, els hiperons detectats de massa més gran sí que poden ajustar-se a un triplet amb $I=1$, que Gell-Mann i Pais denominaran per primer cop en aquest congrés com Σ , i a un doblet amb $I=1/2$, que denominaran Ξ . Feta l'assignació, els autors presenten aquests hiperons en una taula, ordenats seguint els criteris de càrrega, massa i isospín.⁵ Amb aquest tipus de representació M. Gell-Mann pretén cridar l'atenció sobre els desplaçaments dels multiplets d'isospín respecte el seu valor de la càrrega. La clau es trobarà en entendre quines són les regularitats que segueixen aquests desplaçaments, tot i que de moment sols són capaços d'evidenciar-los.⁶

One relaxes, for the new particles, the usual connection between the charge Q and the Z -component I_z of isotopic spin for members of a charge multiplet. One preserves the conventional relations:

$$\begin{aligned} Q &= I_z + 1/2 && \text{for nucleons} && (I = 1/2, \text{doublet}), \\ Q &= I_z && \text{for pions} && (I = 1, \text{triplet}), \\ Q &= I_z - 1/2 && \text{for anti-nucleons} && (I = 1/2, \text{doublet}). \end{aligned}$$

For the hyperon, one makes the following assignments:

$$\begin{aligned} Q &= I_z && \text{for the } \Lambda^0 && (I = 0, \text{singlet}), \\ Q &= I_z && \text{for the } \Sigma^\pm \text{ and a hypothetical } \Sigma^0 && (I = 1, \text{triplet}), \\ Q &= I_z - 1/2 && \text{for the } \Xi^- \text{ and a hypothetical } \Xi^0 && (I = 1/2, \text{doublet}). \end{aligned}$$

⁵Vegeu apèndix A, fig. A.40 i fig. A.41.

⁶Ibíd., 348.

Recordem que la tria d'isospín es fa assumint independència de càrrega i per tant conservació d'isospín per a les reaccions de producció de les noves partícules, que són interaccions fortes, i conservació d' I_z per a les interaccions electromagnètiques. Les desintegracions d'hiperons, que tenen lloc feblement, violen aquesta conservació. D'afegit, quan M. Gell-Mann es fixa en aquestes desintegracions observa una pauta en la violació de la llei. Per exemple, de les desintegracions conegudes:

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-,$$

es pot inferir que I_z disminueix en $1/2$. Aleshores:

It appears, in fact, that in the model under discussion all observed decays obey the rules $\Delta I = \pm 1/2$, $\Delta I_z = \pm 1/2$. These rules are then presumably properties of the decay interaction."⁷

La generalització d'aquesta llei li permetrà proposar modes de desintegració esperats per a les partícules predites que encara no han estat detectades: per exemple, $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ podrà donar-se electromagnèticament ($\Delta I = \pm 1$), d'on caldrà esperar un temps de vida curt per a la Σ^0 ($\sim 10^{-20}$ s) que en farà difícil la seva detecció en les cambres i emulsions convencionals; en canvi, $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ s'esperarà que es doni feblement ($\Delta I = \pm 1/2$) i per tant amb un temps de vida major ($\sim 10^{-10}$ s).

Aquesta capacitat de predicció és un dels factors claus en l'acceptació de la teoria de Gell-Mann. La teoria no es limita a intentar explicar els esdeveniments ja coneguts, sinó que, al mateix temps, és capaç de predir nous fenòmens, i Gell-Mann està indicant als experimentals quines reaccions han de buscar en les fotografies que involucren nous esdeveniments.

Malgrat la previsió d'èxit d'aquest segon model, la classificació de Gell-Mann mostra un problema fonamental encara per resoldre. En la introducció a la contribució al congrés, Pais i Gell-Mann tracten la conservació del nombre bariònic com una llei absoluta, ja que la verifiquen totes les interaccions. Ara, però, Gell-Mann no sembla atribuir un nombre bariònic que caracteritzi als hiperons, perquè no modifica la regla que relaciona isospín i càrrega. La seva aproximació sols arriba a entendre les noves partícules com multiplets desplaçats de càrrega, però sense arribar a sistematitzar aquest desplaçament que el portaria a la llei d'estranyesa, coneguda més endavant com regla de Gell-Mann–Nishijima:

$$Q = I_z + b/2 + s/2$$

Per tant, malgrat haver aconseguit l'assignació correcta d'isospín per als nous elements i la predicció de noves partícules que resultarà certa, M. Gell-Mann té encara el problema

⁷Ibíd., 349.

fonamental que, junt amb Pais, confessa en el congrés:

In the present model, [...], each particle is labelled by three quantum numbers; here they are I , I_z , and Q . In the usual and more restricted picture of charge independence there are only two quantum numbers since Q and I_z are not then independent. We have not been able to find, in terms of an enlarged group of symmetry operations, any interpretation of the variation of $Q - I_z$ from multiplet to multiplet.⁸

Sembla, doncs, que, tot i la seguretat en l'existència d'aquesta simetria “més enllà d'isospín”, la formulació de la idea d'estranyesa encara no és present.

La confusió encara es fa més evident en el tercer i darrer model que Gell-Mann i Pais presenten al congrés. Aquest model atribuïble a Pais pretén fer una extensió de l'espai isotòpic de tres a quatre dimensions. Per això s'introdueix un isospín quadridimensional que es concreta en un parell d'isospins de la forma ordinària (I^+ i I^-). Quan les partícules tenen el parell (I^+ , I^-) igual formen un multiplet amb diferents valors d' I_z^+ i I_z^- . Per a les partícules tradicionals —nucleons i pions— I^+ es pot identificar amb l'isospín convencional i I^- es fa zero. En el cas dels hiperons les assignacions són:

For baryons in general one has $|I^+ - I^-| = 1/2$; we may thus put $Q = I_z^+ + I_z^- + 1/2$ and have integral eigenvalues of the charge guaranteed. We assign the quantum numbers (1/2, 0) to the nucleon; (0, 1/2) to the Λ , which then has a neutral and a positive form; (1, 1/2) to the Σ , which then has one negative, two neutral, two positive, and one doubly positive form; and (1/2, 1) to the Ξ which has six similarly distributed forms.⁹

Anàlogament, per als bosons:

For bosons we have the relation $Q = I_z^+ + I_z^-$. As regards specific assignments of quantum numbers, we have already used (1, 0) for the pion; for heavy bosons the important state is presumably (1/2, 1/2) with one positive, one negative, and two neutral components.¹⁰

⁸Ibíd., 350. Recordem en aquest punt el treball de K. Nishijima. En l'article arribat al *Progress of Theoretical Physics* el 13 de juliol de 1954, Nishijima ja presenta la llei correcta $q = I_3 + b/2 + \eta/2$, llei que M. Gell-Mann a Glasgow (13–17 de juliol de 1954), encara no sembla haver trobat. Recordem també que M. Gell-Mann en una revisió històrica dels esdeveniments, a París (1982, 399), explica com l'agost de 1953 ja havia arribat a la llei correcta:

Although I didn't use the word strangeness yet, I did have the quantity, which I called y , and in effect gave the formula $Q = I_z + N/2 + y/2$.

In fact, I described each particle as equivalent to N nucleons and $y\tau$ mesons, and I explained that “equivalent to” meant having the same difference between I_z and charge. Evidently N is the baryon number.

L'única font de comprovació que cita Gell-Mann és un preprint de l'agost de 1953 emès des de la Universitat de Chicago i titulat “*On the classification of Particles*”. L'anàlisi del preprint mostra la definició d'una certa quantitat y de la forma com explica, però no dona explícitament la llei $Q = I_z + N/2 + y/2$. Malgrat és clar que el preprint està a un pas d'arribar a la simetria d'estranyesa, encara no ho aconsegueix del tot, i és per aquesta raó que s'insisteix en l'argument dels multiplets desplaçats de càrrega, en els quals no es distingeix encara nombre bariònic del nombre d'estranyesa. Per justificar aquesta afirmació pot ser interessant la revisió directa del preprint que incloem en l'apèndix A.4 (p. 330–332).

Notem també per reforçar la nostra idea sobre la incompletitud de la llei que tampoc amb posterioritat a aquest preprint ni al 4t congrés Rochester (25–27 de gener de 1954), on assisteix el propi Gell-Mann, ni com hem vist a Glasgow apareix la llei ni la quantitat y tal i com la descriu Gell-Mann.

⁹Ibíd.

¹⁰Ibíd., 351.

La llei establerta a partir d'aquestes assignacions serà que I^+ i I^- s'han de conservar independentment per a les interaccions fortes, I_z^+ i I_z^- s'han de conservar per a fortes i electromagnètiques, i I_z^+ aparentment transferirà la quantitat $1/2$ a I_z^- en les interaccions febles.¹¹

El model, però, resulta artificiosament complicat i per tant de difícil comprensió i acceptació. Tot i que, a posteriori, la nova quantitat I^- podria fer-se equivalent a $S/2$ —amb S el modern nombre quàntic d'estranyesa—, l'analogia total amb isospín priva de veure la regla correcta. Seguint aquesta analogia amb isospín, els autors no poden pensar en la quantitat introduïda I^- més que com una magnitud vectorial, de manera que la seva tercera component I_z^- variarà per a cada membre del multiplet. A la pràctica, l'assignació suposa haver d'introduir un gran nombre d'estats addicionals, corresponents a partícules que s'haurien de detectar experimentalment: Λ formaria part d'un doblet, Σ i Ξ formarien sextuplets, etc.¹²

Sembla, doncs, que els dos darrers models tenen clara una certa idea de l'existència de multiplets desplaçats de càrrega, que relacionen dues quantitats que s'han de conservar: Q i I , però encara falta un pas per arribar a concretar la idea d'estranyesa i amb ella la llei de Gell-Mann–Nishijima.¹³

Després del congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954), el 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955) serà un nou focus de divulgació de les idees de Gell-Mann. Tot i que ell hi és present, A. Pais serà l'encarregat de donar la contribució teòrica lligada a les noves partícules. És curiós, però, com A. Pais emfatitza el valor del model de Gell-Mann “which seem to show promise”,¹⁴ pràcticament sense cap canvi des de la revisió de Glasgow. De nou, la taula presentada per classificar els barions és del tot equivalent a la de Glasgow, i per tant amb les mateixes limitacions. La novetat, però, és la presència d'una nova taula per caracteritzar els mesons pesats (mesó K).¹⁵ Amb aquestes representacions s'insisteix en la idea dels multiplets desplaçats de càrrega, sense fer referència en cap moment a la llei fonamental $Q = I_z + B/2 + S/2$, de la qual Gell-Mann ens diu que disposa a l'agost de 1953. Tampoc semblen mostrar el coneixement d'aquesta llei a través del treball de K. Nishijima (1954), ara ja publicat, i on apareix clarament la relació $q = I_3 + b/2 + \eta/2$, malgrat η rebí

¹¹Aquesta última afirmació vindrà donada en base a l'evidència de la desintegració feble de la partícula cascada Ξ^- .

¹²Vegeu apèndix A, fig. A.41.

¹³Les paraules de Pais [Ibíd, 352] en la discussió posterior a la contribució al congrés també són un indicatiu que encara no és clara la idea d'estranyesa:

H. A. Bethe: What does Pais think of the second scheme (BII) compared with the third (BIII)?

A. Pais: There are two factors to be conserved, Q and I . The third scheme gives these two in a natural way. But GELL-MANN's theory is at the moment that with the minimum number of superfluous states in it. Therefore it would be interesting to know if Λ^+ exists.

¹⁴Pais (1955), 134.

¹⁵V. apèndix A, fig. A.42.

el nom de *v-charge* i no d'estranyesa.

Caldrà esperar sis mesos més perquè el propi Gell-Mann, en el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955), presenti aquesta llei en la forma com finalment serà coneguda, junt amb una presentació completa de l'esquema global:

We abandon, however, the restriction given by equation (2.1) [$Q/e = I_z + n/2$] on the location of the center of charge of each multiplet. While retaining the principle that Q/e be given by $(I_z + \text{constant})$ for each multiplet, we do not require that the constant be $n/2$, but allow it to be arbitrary. We shall write this arbitrary constant, which specifies the center of charge of the multiplet, as $n/2 + S/2$, where S is integral. We have, then, in place of equation (2.1) the relation (3.1) [$Q/e = I_z + n/2 + S/2$], where S may vary from multiplet to multiplet.

Un cop trobada, la relació permet recuperar l'explicació en termes de multiplets desplaçats de càrrega i determinar la quantitat que realment es troba desplaçada aquesta càrrega:¹⁶

The ordinary particles are characterized, then, by having $S = 0$. A particle with $S \neq 0$ is a member of a “displaced” multiplet, with center of charge at a position different from that with which we are familiar among the ordinary particles. For example, we might find a baryon triplet consisting of a positive, a neutral, and a negative member. The center of charge is at zero rather than $\frac{1}{2}e$ as it is for the nucleon doublet. The corresponding value of S is -1 .

I finalment, cal donar un cert significat conceptual a la nova quantitat S definida:

We propose to identify all known hyperons and K -particles as members of displaced multiplets and to account for some of their properties in that way. Since we have $S = 0$ for ordinary particles and $S \neq 0$ for “strange” ones we refer to S as “strangeness”.¹⁷

L'“estranyesa” serà l'element distintiu de les noves “partícules estranyes”. A partir d'aquesta definició sembla que també es començarà a acceptar en la literatura el nom de “partícules estranyes”, nom que fins el moment havia estat considerat poc seriós.¹⁸ És plausible pensar que serà Gell-Mann qui a partir de definir precisament amb el nom d'estranyesa la qualitat de les noves partícules aconseguirà que la denominació “partícules estranyes” sigui acceptada.

¹⁶Vegeu apèndix A, fig. A.49.

¹⁷Gell-Mann (1956b), 852.

¹⁸Prova d'aquesta manca d'acceptació es troba en el següent comentari del 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955), p. 135:

At this point Pais interrupted his talk to make a plea not to use words like strange or peculiar (in referring to the new particles). For a theoretician, a proton ought to be just as peculiar as a hyperon. This is only terminology, but one should bear it in mind.

El comentari indica que, malgrat Pais intenti evitar aquest nom, fora de la literatura ja era conegut i usat. No obstant això, en la tradició escrita el nom de “partícules estranyes”, per designar les “noves partícules inestables en raigs còsmics” o “partícules V ”, apareix amb normalitat molt més tard, com ho mostra la revisió d'articles en revistes i congressos.

Finalment, C. N. Yang farà la contribució teòrica sobre les noves partícules al 6è congrés Rochester (3–7 d'abril de 1956). Malgrat la sessió teòrica dedicada a mesons pesats i hiperons es presenta amb el títol *Theoretical Interpretation of New Particles*, al llarg de l'exposició apareix ja el nom de partícules estranyes amb normalitat. També apareix amb normalitat el nou nombre quàntic d'estranyesa per caracteritzar les noves partícules, nombre que substituirà en la taula la presència del nombre quàntic d'isospín.¹⁹

[...] one could assign to each strange particle a strangeness quantum number and stipulate that in all fast interactions the strangeness is additively conserved, and that in all observed decays it is not.²⁰

L'estranyesa no és una teoria completa, però és l'opció més satisfactòria:

After being introduced to the (subnuclear) zoo last Wednesday (Ed: in a public lecture by Dr. Oppenheimer) we have taken excursions in it for two days. This morning, before we leave the zoo, we want to ask, what have we learned? I am supposed to present to you the theoretical arguments in this direction. What I shall tell you will not form a clear picture: a clear picture does not exist. But I do hope I can present to you an exciting and challenging picture that provokes further experiments and further speculations.

The past year has witnessed very interesting developments in our knowledge of the strange particles. Perhaps the most important of these is the firm establishment of the "strangeness" quantum number.²¹

Aquesta visió de la nova teoria s'anirà afermant quan les peces vagin encaixant en el nou model.²² Entre aquestes peces hi haurà el descobriment de les partícules predites per Gell-Mann i la resolució d'enigmes, com el θ - τ o la partícula mescla K_1^0 - K_2^0 .

¹⁹Vegeu apèndix A, fig. A.45.

²⁰Yang (1956a), VIII-2.

²¹Ibíd.

²²L'acceptació dels experimentals de la teoria serà important en aquest reconeixement. Per exemple, Powell (1956, 345) en reconeix la simplicitat:

One great virtue of the proposals is that they appear to provide us with simple working rules.

6.2 L'acceptació del model d'estranyesa: classificació, predicció i resolució d'enigmes

We spent a lot of time becoming familiar with Gell-Mann's strangeness rules, and I decided (after all, a group leader has to do something) that we would do our first experiment with stopping K^- mesons in hydrogen. From the theoretical and experimental standpoints, it appeared to be a potential gold mine, and from the sociological standpoint, it was also a real winner.

L. W. Alvarez a Fermilab (1989, 300).

El 1951 s'evidenciaven les “estranyes” propietats de les noves partícules. El 1955, Gell-Mann dotarà de significat intrínsec a aquest terme estrany definint-lo com un nou nombre quàntic característic de les noves partícules. Des del 1951 se succeeixen diferents intents teòrics per explicar les noves partícules, des de la inclusió en les velles teories mesòniques fins a solucions més qualitatives, que culminaran amb l'assignació d'un isospín als nous elements per la suposició d'independència de càrrega en les seves reaccions de producció (fortes). En base a aquesta hipòtesi de la independència de càrrega, que es tradueix en la conservació d'isospín, s'aconsegueix ampliar després d'algunes temptatives fallides el marc fenomenològic. La conservació o no d'isospín en les reaccions que involucren les noves partícules en permet una classificació, però el pas següent és la definició d'una nova simetria específica dels nous elements que es concretarà en un nou nombre quàntic additiu. Aquesta idea suposa una ampliació del marc teòric més enllà d'isospín.²³ Ara bé, la percepció d'aquesta ampliació més enllà d'isospín no serà immediata. Estranyesa serà, més que una teoria formal, un model de classificació dels descobriments experimentals. Junt amb aquest poder de classificació serà molt important la predicció de nous elements, que els experimentals s'apressaran a detectar. Classificació i predicció originaran nous enigmes pendents de resposta. Un dels enigmes resultants de la classificació apareixerà amb l'assignació d'isospín 1/2 als mesons pesats, perquè comportarà admetre l'existència de K^0 diferent de \bar{K}^0 .²⁴ Pel que fa a les prediccions, l'assumpció d'un triplet d'hiperons (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-) suposarà cercar

²³Michel (1982, 455) expressa el valor d'aquesta ampliació:

The true contribution was not to discover quantum numbers for known rules, isospin and charge conjugation, the true contribution was to go out of the classical frame of isotopic spin and find new quantum numbers like strangeness, as Gell-Mann and Nishijima did.

²⁴Un altre enigma sorgirà directament de les observacions experimentals, independentment d'aquest model teòric que s'intenta aplicar: el θ - τ , l'explicació del qual suposarà trencar amb la creença fermament establerta de la conservació de paritat per a qualsevol tipus d'interaccions.

experimentalment la neutra encara no observada. El mateix passarà amb la Ξ^0 , companya de la ben coneguda partícula cascada Ξ^- .

6.2.1 K^0 i \overline{K}^0

Les consideracions sobre les interaccions, i les lleis de conservació associades, que involucren les noves partícules porten a definir un isospín semienter per al mesó pesat K^0 (bosònic). Si s'evita suposar l'existència de partícules de càrrega múltiple de la fonamental, l'assignació més simple és $I = 1/2$. Que K^0 tingui isospín $1/2$ significa que forma part d'un doblet d' $I_z = 1/2, -1/2$. Però els mesons pesats s'han observat amb els tres estats de càrrega possible (+, 0, -), la qual cosa obliga a admetre l'existència de dos multiplets separats (K^+, K^0) i (\overline{K}^0, K^-), cadascun antipartícula de l'altre.

L'assignació feta ajudarà a entendre un enigma experimental que s'havia plantejat des de les primeres observacions: la pràctica absència de la companya negativa del mesó pesat K^+ , que semblava contradir el principi de simetria de càrrega. La resposta a aquest dilema mitjançant la nova teoria serà:

K^+/K^- is very large (>50) at cosmotron energies. This was predicted on the strangeness scheme as due to the fact that K^- with $S = -1$ must be produced with a partner with $S = +1$, i. e., a partner with at least the excitation of K^+ mass ($= 965m_e$) while a K^+ with $S = +1$ is produced with a partner with $S = -1$, such as Λ^0 with an excitation of only $340m_e$. The large ratio K^+/K^- is therefore a threshold effect.²⁵

En realitat, però, en principi l'assignació causarà més polèmica que acceptació, perquè suposa admetre l'existència d'un bosó neutre diferent de la seva antipartícula.²⁶ Quan A. Pais i M. Gell-Mann preparen la seva col·laboració al congrés de Glasgow es troben amb el dilema d'intentar explicar l'assumpció. Especialment vista l'oposició d'E. Fermi, que els incita a trobar un mètode de comprovació experimental d'aquesta suposició. La discussió entre ambdós autors els suggereix noves idees que no explicaran al congrés, però que concretaran en un article a finals del mateix any 1954:

Some properties are discussed of the θ^0 , a heavy boson that is known to decay by the process $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. According to certain schemes proposed for the interpretation of hyperons and K particles, the θ^0 possesses an antiparticle $\bar{\theta}^0$ distinct from itself. Some theoretical implications of this situation are discussed with special reference to charge conjugation invariance.²⁷

Sota l'operació de conjugació de càrrega, cada partícula es transforma en la seva antipartícula: e^- en e^+ , π^+ en π^- , μ^+ en μ^- , p en \bar{p} ... El problema es planteja amb les partícules neutres, les quals fins el moment verificaven ser iguals a les seves antipartícules pel cas dels bosons coneguts (π^0 i γ), o diferents pel cas dels fermions coneguts (el neutró

²⁵Yang (1956a), VIII-4.

²⁶Vegeu cap. 4, sec. 4.3.2, p. 187.

²⁷Gell-Mann, Pais (1955a), 1387.

es diferencia de l'antineutró en el signe del seu moment magnètic). Però en aquest cas en què les partícules neutres són diferents de les seves corresponents antipartícules neutres, ha d'existir una llei rigorosa que prohibeixi les transicions virtuals entre l'estat de partícula i el d'antipartícula. Per al cas del neutró, l'únic conegut fins aleshores, la llei que invalida les transicions $N \rightleftharpoons \bar{N}$ és la conservació del nombre bariònic de la reacció. Però, a priori, no existeix cap llei que prohibeixi als mesons ser diferents dels seus antimessons (en el nostre cas $K^0 \neq \bar{K}^0$), o de manera més general, als bosons ser diferents dels corresponents antibosons. En vista, doncs, de la manca de prohibició, sota l'operació de conjugació de càrrega tenim que la reacció $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ es transforma en ella mateixa.²⁸ Però la reacció conjugada de càrrega de l'anterior és $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, en la qual l'estat final és el mateix que abans, però no l'estat inicial, que segons la nova teoria té $S = -1$, mentre el primer tenia $S = +1$. La polèmica està servida: és, doncs, la teoria errònia? Ho és conjugació de càrrega?

L'operació conjugació de càrrega no pot transformar l'estat inicial en un de diferent sempre que S sigui un bon nombre quàntic per a les interaccions fortes, però sí que ho pot fer en el cas de les interaccions febles que violen conservació d'estranyesa. Aleshores, és lícit suposar que mitjançant aquestes interaccions febles es poden induir transicions virtuals del tipus:

$$K^0 \longrightarrow \pi^+ + \pi^- \longrightarrow \bar{K}^0$$

de manera que sembla més lògic descriure la desintegració d'aquestes partícules com la mescla d'aquests dos estats.

Per fer efectiva la idea, Gell-Mann i Pais, seguint la nomenclatura de l'època, definiran dos nous estats, θ_1^0 i θ_2^0 , amb la següent característica:²⁹

While we have seen that the θ_1 and θ_2 may each be assigned a lifetime, this is evidently not true of the θ^0 or $\bar{\theta}^0$. Since we should properly reserve the word "particle" for an object with a unique lifetime, it is the θ_1^0 and θ_2^0 quanta that are the true "particles". The θ^0 and the $\bar{\theta}^0$ must, strictly speaking, be considered as "particle mixtures."³⁰

Com els estats θ_1 i θ_2 corresponen a diferents valors propis de l'operador conjugació de càrrega (± 1), seran partícules que portaran a diferents modes de desintegració. Així, el θ_1 pot desintegrar-se en dos pions amb $C = +1$, però no el θ_2 , que té valor propi de l'operador conjugació de càrrega $C = -1$, i per tant es pot desintegrar en tres pions.

²⁸L'estat no canvia quan π^+ es transforma en π^- perquè K^0 té spin 0, i per tant l'estat format pels dos pions té moment angular orbital zero.

²⁹La presència de les possibles transicions virtuals entre l'estat partícula i el d'antipartícula ens permet definir els nous estats com:

$$\begin{aligned} |K_1^0\rangle &= (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)\sqrt{2} \\ |K_2^0\rangle &= (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)\sqrt{2} \end{aligned}$$

Aquests dos nous estats que són propis de l'operador conjugació de càrrega, amb valors propis ± 1 , porten a esquemes de desintegració diferents, i tenen diferents vides mitges.

³⁰Ibíd., 1389.

L'observació experimental ens hauria de permetre comprovar si la teoria de la mescla de partícules era correcta. De fet, la proposta teòrica ajudarà a il·luminar el confús panorama experimental referent a les V^0 . Recordem que els experiments en raigs còsmics —en especial els treballs amb cambra a Manchester, Caltech i Indiana— havien definit la $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ (Λ^0) i la $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (θ^0) amb molta precisió, però restava tot un grup de V^0 , que es coneixeran amb el nom d'anòmals, per a les quals era clar el caràcter de mesó pesat, però es feia difícil de definir els modes de desintegració que contenien. La posada en marxa dels acceleradors de Brookhaven i de Berkeley, que aproximadament coincidirà amb la proposta teòrica de Gell-Mann i Pais, acabarà de determinar aquest grup de V^0 anòmals. La majoria dels V^0 detectats en la nova font s'identificaran amb el mesó pesat neutre de vida més llarga (K_L^0), tot i que una petita proporció correspondrà al mode de desintegració alternatiu del V_2^0 en dos pions neutres que, junt amb el propi V_2^0 , seran els modes de desintegració possibles del mesó pesat neutre de vida més curta (K_S^0).

El cosmotró de Brookhaven, amb cambra de boira com a detector, jugarà un paper molt important en aquestes determinacions.³¹ Però l'interès també arribarà als grups que treballen al bevatró de Berkeley. En una de les investigacions del grup de Wisconsin, enfocada a la recerca sistemàtica dels encara problemàtics K^- , semblen mostrar-se també aquestes V^0 de llarga vida que prediu la teoria:

These events can be explained by assuming that long-lived neutral K mesons were produced at the target with about the same frequency as the K^+ mesons. A small fraction of these neutral K mesons could have penetrated the shielding (about two feet of brass) between the plates and the target and then interacted in the pellicle stack. The lifetime of these particles must have been at least 10^{-8} sec. The existence of a long-lived neutral K meson was predicted by Gell-Mann and Pais.³²

L'any següent, una anàlisi de la reacció $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$, en una cambra de bombolles de propà al cosmotró, mostra que el 49% de la producció de K^0 es desintegra en dos pions, i no observen cap desintegració anòmala.³³ Aquests mateixos autors observaran un K_2^0 (K_L^0) que es desintegra amb una vida 10 cops més lenta que el K_1^0 (K_S^0).

To sum up, our picture of the θ^0 implies that it is a particle mixture exhibiting two distinct lifetimes, that each lifetime is associated with a different set of decay modes, and that *not more than half of all θ^0 's* can undergo the familiar decay into two pions.³⁴

Finalment, doncs, l'experimentació en acceleradors permetrà respondre la següent qüestió plantejada per Fermi:³⁵

³¹Vegeu cap. 5, sec. 5.2.2, p. 240. Vegeu també l'apèndix C (p. 388–389) on apareix la cronologia dels descobriments i es diferencien aquestes desintegracions K_S^0 i K_L^0 .

³²Fry, Schneps, Swami (1956), 1905.

³³Plano *et al.* (1957).

³⁴Eisler *et al.* (1958).

³⁵Pais (1989), 521.

—If K^0 ($S = 1$) and \overline{K}^0 ($S = -1$) are non-identical particles, how does one see that in the laboratory?

Mercès, però, a la predicció teòrica de Gell-Mann i Pais, que incita als experimentals a la seva comprovació.

6.2.2 De l'enigma θ - τ a la violació de paritat

El problema generat pels kaons neutres — K^0 i \overline{K}^0 — apareixia lligat a la determinació de l'isospín que calia assignar a les noves partícules, i per tant al desenvolupament del model d'estranyesa. Es tractava, doncs, d'una qüestió generada per la teoria i a la qual donarà resposta els experiments més sensibles en acceleradors. Hi ha altres qüestions per resoldre que es revelen directament de l'experimentació en raigs còsmics, al marge de les formulacions teòriques, com la asimetria K^+/K^- o l'enigma θ - τ . Ja hem vist com la resolució de la asimetria K^+/K^- es produeix finalment en el marc del model d'estranyesa. La resolució del θ - τ , però, transcendirà els límits d'aquest model i toparà amb un principi fonamental de la física: la conservació de paritat.³⁶

La conservació de la paritat o la invariància respecte inversions espacials de les lleis físiques que descriuen l'estructura i interacció de les partícules elementals era considerada certa des dels orígens de la mecànica quàntica. Ni QED, ni la teoria de Fermi per a la desintegració β , ni les teories mesòniques que pretenien explicar les interaccions fortes havien mostrat cap problema amb aquesta simetria. El descobriment dels diferents modes de desintegració del mesó K desembocarà en la dificultat per mantenir aquesta simetria per a les interaccions febles.

D'entre aquests modes de desintegració, el conegut mesó τ es desintegra en tres pions secundaris ($\tau \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$), mentre que existeix un mesó neutre θ que es desintegra en dos pions secundaris ($\theta \rightarrow \pi^+ + \pi^-$). De forma menys evident, els experiments en raigs còsmics aniran mostrant desintegracions alternatives que també involucren pions secundaris, per exemple les conegudes com τ' ($K_{\pi 3} \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$), θ^+ ($\chi \rightarrow \pi^+ + \pi^0$) i τ^0 ($K_{\pi 3}^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$). Els valors de massa de totes aquestes primàries, junt amb d'altres que es desintegren per altres vies, es van aproximant de forma que la nomenclatura comuna de mesons pesats K es va imposant per descriure tots els esdeveniments. El problema s'origina quan s'analitzen les característiques de spin i paritat d'aquests mesons K. De la mà de R. H. Dalitz s'imposarà el mètode gràfic que determinarà aquestes dues característiques intrínseques per a desintegracions a tres cossos a partir del coneixement experimental de les seves característiques d'energia-moment. Aplicat el mètode al ben conegut τ , s'infereix

³⁶Un equip de sociòlegs i científics de la Universitat de Cornell ha realitzat una anàlisi bibliomètrica sobre la formació del camp de les interaccions febles entre 1950 i 1975. Part d'aquests resultats són explicats al Fermilab (1989, 390–406), en especial, la investigació de l'emergència de l'enigma θ - τ , el descobriment de violació de paritat i la resolució oferta per la teoria V-A.

que la seva paritat ha de ser negativa, mentre que el mode θ la té positiva.³⁷

El punt àlgid de la polèmica es produirà durant el 6è congrés Rochester (3–7 d'abril de 1956), la visió conservadora suposarà que θ i τ no són la mateixa partícula:

However the situation is that Dalitz's argument strongly suggests that it is not likely that $K_{\pi 3}^+$ ($\equiv \tau^+$) and $K_{\pi 2}^+$ ($\equiv \theta^+$) are the same particle. I hope we may have some discussion of this point this morning.

"If θ and τ do not have the same spin and parity, one needs to explain (a) why the masses are so close to each other and (b) why the measured lifetimes are so close to each other."³⁸

Junt amb la idea més simple, que preveu que en realitat θ i τ són diferents i que per tant les similituds en massa i vida són accidentals, apareixen altres propostes més sofisticades. T. D. Lee i J. Orear proposen que ambdues partícules són diferents, però que es desintegren una en l'altra a través de transicions fotòniques de baixa energia com: $\tau \rightarrow \theta + \gamma + (\gamma)$. En aquesta situació θ es desintegraria en $\sim 10^{-10}$ s, més ràpidament que τ ($\sim 10^{-8}$ s), però experimentalment semblarien tenir la mateixa vida:

From the analysis of Dalitz it is becoming necessary to assume that the $K_{\pi 3}^{\pm}$ and $K_{\pi 2}^{\pm}$ are due to at least two different charged particles. Recent experimental evidence encourages the hypothesis that the observable lifetimes are exactly the same (at least after travel times $> 10^{-9}$ sec). As a solution to this possible dilemma we propose that there exist two heavy mesons, the θ^{\pm} and the τ^{\pm} , where $\theta^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^0$ and $\tau^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + 2\pi$. We propose further that the heavier of these two has a lifetime of 10^{-8} sec with a significant branching ratio for gamma decay to the lighter one. Finally, if we assign a lifetime of order 10^{-9} sec or less to the lighter one, we achieve a situation where both particles can have different lifetimes but in most experiments appear to have exactly the same lifetime.³⁹

Amb la predicció d'aquesta possible desintegració, ràpidament els experimentals, entre ells el grup de L. Alvarez al bevatró de Berkeley, dissenyen experiments per tal de detectar els fotons secundaris. El grup d'Alvarez no trobarà rastre d'aquests fotons secundaris i ho comunicarà en el 6è congrés Rochester (3–7 d'abril de 1956), on agosaradament ja es proposarà violació de paritat en les interaccions febles que permetria que θ i τ fossin la mateixa partícula.

Però l'avenç en els resultats experimentals planteja un altre problema a l'esquema de Lee i Orear. En el moment de la seva formulació, el 1955, les dades experimentals estableixen una diferència de masses entre θ i τ de com a mínim 5–10 MeV. L'any següent, aquesta diferència de masses ja s'escurça fins 1–2 MeV, cosa que deixa poc lloc a l'existència dels fotons de Lee i Orear.

Una altra proposta per justificar la diferència entre θ i τ la fan T. D. Lee i C. N. Yang amb un model basat en doblats de paritat. Ara, la idea és pensar que la identitat en la

³⁷Vegeu cap. 5, sec. 5.1.3, p. 226.

³⁸Yang (1956a), VIII-8.

³⁹Lee, Orear (1955), 932.

massa dels dos mesons no és accidental, sinó que algun principi d'invariància genèric pot explicar-la. L'efecte d'aquest principi és precisament que quan τ i θ s'intercanvien una amb l'altra, la massa roman constant. L'hamiltoniana ha de restar, doncs, invariant. Però aquesta hamiltoniana és la responsable d'interaccions com:

$$\pi + N \rightarrow \Lambda + \theta$$

I, la suposició feta, ha de portar també a:

$$\pi' + N' \rightarrow \Lambda' + \tau$$

I ambdues reaccions, per invariància postulada en l'hamiltoniana, han de tenir exactament les mateixes propietats (secció eficaç, distribució angular, dependència amb l'energia...); però això no és possible si $\pi = \pi'$, $N = N'$ i $\Lambda = \Lambda'$, ja que hem vist com θ i τ no són exactament iguals. Aleshores la solució és postular que les velles partícules no es modifiquen ($\pi = \pi'$ i $N = N'$), però les noves sí que ho fan. Així, (Λ, Λ') i (θ, τ) es poden entendre com doblats amb igual spin i de paritats oposades, $(\frac{1}{2}^{\pm})$ i (0^{\pm}) , respectivament. Aquesta proposta presenta, entre d'altres, el problema evident de la vida esperada per a la desintegració $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$. Aquesta coneguda desintegració s'hauria d'haver observat, segons aquest model, amb dues vides diferents. La Λ amb paritat positiva es desintegraria emetent un π^- en estat d'ona p , la Λ amb paritat negativa ho faria emetent el π^- en estat d'ona s . Amb una energia alliberada en la desintegració de tan sols 37 MeV, s'hauria d'observar clarament la diferència en les vides d'ambdós estats, diferència que experimentalment no es presenta.

Tanmateix, la proposta més agosarada de totes es presentarà en el 6è congrés Rochester (3-7 d'abril de 1956), de la veu de R. Feynman:⁴⁰

Pursuing the open mind approach, Feynman brought up a question of Block's: Could it be that the θ and τ are different parity states of the same particle which has no definite parity, i. e., that parity is not conserved.⁴¹

Aleshores, "Yang stated that he and Lee looked into this matter without arriving at any definite conclusions."⁴² Sembla que C. N. Yang i T. D. Lee van intentar respondre la pregunta formulada per Feynman, però la concreció clara de la violació de paritat com

⁴⁰Malgrat l'atreviment sembla presidir les possibles explicacions, cal notar que no tota la comunitat està d'acord en "complicar" la situació. Al mateix congrés Rochester, Marshak (1956, VIII-18) serà la veu de la convencionalitat:

MARSHAK reported briefly on an attempt to explain the apparent identity of θ and τ meson masses and lifetimes in terms of a single particle, even if one has to use a larger spin value. He felt that a last effort should be made in this direction, before introducing any startling new assumptions.

⁴¹Feynman (1956), VIII-27.

⁴²Yang (1956b), VIII-27.

alternativa a l'explicació del puzzle θ - τ no es farà fins a l'article que ambdós teòrics presenten el mes de juny:

Recent experimental data indicate closely identical masses and lifetimes of the θ^+ ($\equiv K_{\pi_2}^+$) and the τ^+ ($\equiv K_{\pi_3}^+$) mesons. On the other hand, analyses of the decay products of τ^+ strongly suggest on the grounds of angular momentum and parity conservation that the θ^+ and τ^+ are not the same particle. This poses a rather puzzling situation that has been extensively discussed.

One way out of the difficulty is to assume that parity is not strictly conserved, so that θ^+ and τ^+ are two different decay modes of the same particle, which necessarily has a single mass value and a single lifetime. We wish to analyze this possibility in the present paper against the background of the existing experimental evidence of parity conservation. It will become clear that existing experiments do indicate parity conservation in strong and electromagnetic interactions to a high degree of accuracy, but that for the weak interactions (*i. e.*, decay interactions for the mesons and hyperons, and various Fermi interactions) parity conservation is so far only an extrapolated hypothesis unsupported by experimental evidence. (One might even say that the present θ - τ puzzle may be taken as an indication that parity conservation is violated in weak interactions. This argument is, however, not to be taken seriously because of the paucity of our present knowledge concerning the nature of the strange particles. It supplies rather an incentive for an examination of the question of parity conservation.) To decide unequivocally whether parity is conserved in weak interactions, one must perform an experiment to determine whether weak interactions differentiate the right from the left.⁴³

El camí és obert per intentar descobrir si realment les interaccions febles violen o no paritat. Els mateixos Lee i Yang presenten en el seu article algunes idees de com es pot dur a terme la verificació experimental. Però la mateixa primavera de 1956, T. D. Lee presentarà personalment aquestes idees a C. S. Wu, física especialista en l'estudi experimental de la desintegració β , qui recorda:

I suddenly realized that I had to do the experiment immediately, before the rest of the Physics Community recognized the importance of this experiment and did it first. Although I felt that the chances of the parity conservation law being wrong were remote, I urgently wanted to make a clear-cut test.⁴⁴

Finalment, el grup de C. S. Wu amb la desintegració β i els grups de R. L. Garwin i de V. L. Telegdi amb la cadena de desintegració $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ confirmaran que les interaccions febles violen paritat, i per tant no són invariants sota inversions espacials. Curiosament, cap dels experiments de verificació de la hipòtesi teòrica involucrarà els nous kaons estranys que n'havien precipitat la seva realització.⁴⁵

⁴³Lee, Yang (1956b), 254.

⁴⁴Wu (1973), 104.

⁴⁵De fet es pot argumentar que els experiments mencionats simplement demostraven la violació de paritat pel cas d'interaccions febles que involucraven leptons. Però com Dalitz (1989, 454) explica:

It was not inconceivable that the parity-violation effects observed at that time might have been only a consequence of the nature of the neutrino. An explicit demonstration of parity nonconservation was still necessary for the nonleptonic decay interactions of the strange particles, but there was little real doubt about how this would turn out. The mental barriers against parity nonconservation had gone,

6.2.3 Prediccions de M. Gell-Mann: Σ^0 , Ξ^0 i altres possibilitats

El paper predictiu de la teoria de M. Gell-Mann serà un factor clau per a la seva acceptació. A través d'aquestes prediccions, Gell-Mann establirà una certa complicitat amb els experimentals, que redundarà en un major coneixement del seu model teòric:⁴⁶

Meanwhile the experimental labs had been sent copies of the preprints, even the ones that weren't published. They all knew of the predictions of Σ^0 , Ξ^0 and the second kind of neutral K particle, K_2^0 (K_1^0 was the θ^0 , which was very well known) and various experimentalists very kindly sent me beautiful signed photographs of the events in which these predicted particles were unambiguously found. Jack Steinberger was particularly nice about sending me such photos and in his published comments about the usefulness of my predictions. Later on, in another connection, he sent Feynman and me a photograph inscribed "You may stuff this and hang it".⁴⁷

L'origen de la predicció de la Σ^0 es pot establir a finals de 1953, quan després del congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953) sembla clar que els hiperons V^\pm presenten una massa clarament superior a la de la coneguda V^0 . Amb aquesta informació, M. Gell-Mann s'atreveix a discernir un estat triplet i un estat singlet, d'isospín $I = 1$ i $I = 0$, respectivament.

En aquest mateix congrés de Bagnères es fa el suggeriment d'assignar lletres gregues majúscules als hiperons i lletres gregues minúscules als mesons pesats. Serà a partir d'aquí que la V^0 invertirà el seu vèrtex per convertir-se en la Λ^0 . Però la resta d'hiperons, poc coneguts encara, seguiran anomenant-se genèricament H , o bé Y^- per al cas concret de la partícula cascada, o fins i tot $V^{*-} \rightarrow V_1^0 + \pi^-$. Seguint, doncs, el suggeriment de notació fet a Bagnères i les novetats experimentals, Gell-Mann i Pais al congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954) definiran el nou triplet d'hiperons amb el nom de Σ . Sembla que també la partícula cascada rebrà el nom Ξ en aquest moment:

After Gell-Mann and I had thought of the symbol Σ , we needed a name for the next higher state. At that point the name of the society $\Sigma\Xi$ came to my mind. That is how the cascade particle got its name.⁴⁸

A Glasgow, M. Gell-Mann explica com el seu esquema de multiplets necessita de la predicció de dos nous hiperons: Σ^0 i Ξ^0 i, a més, en prediu les seves reaccions de desintegració, cosa que facilita la tasca d'observació en la qual els experimentals s'han de centrar:

and the simplest interpretation was acceptable: that there was just one kind of K^+ meson, which was spinless and which decayed to both 2π and 3π final states through a weak interaction that violated parity conservation.

L'octubre de 1957, tres grups —Crawford *et al.* (1957); Eisler, Plano, Prodell *et al.* (1957); Leipuner *et al.* (1958)— presentaran resultats definitius sobre la violació de paritat en la desintegració $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, la qual cosa refermarà aquesta violació també per a desintegracions no leptòniques.

Per a una anàlisi més detallada de la violació de paritat en les interaccions febles, vegeu: Maglich (1973); Franklin, Allan D. (1979) "The Discovery and non Discovery of Parity Nonconservation", *Studies in the History and Philosophy of Science* 10: 201–57.

⁴⁶Una relació directa de la qual K. Nishijima sembla no disposar.

⁴⁷Gell-Mann (1982), 402.

⁴⁸Pais (1986), 514.

Let us note that for the Σ^0 a decay scheme exists ($\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$) in which the conservation of I_z is not violated. The Σ^0 -particle should therefore decay rapidly by this process (lifetime $\sim 10^{-20}$ sec). The Ξ^0 -particle, unlike the Σ^0 , should be metaestable, but slow decay should occur via the process $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ which is not easily observable.⁴⁹

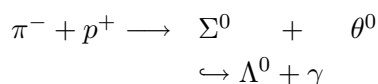
Les prediccions mouran els experimentals a buscar les noves reaccions. Sembla clar que la seva detecció resultaria un aport definitiu en favor del model de Gell-Mann. Però els possibles resultats positius referents a la detecció d'aquestes reaccions no esperaran la realització d'experiments especialment dissenyats. En el 5è congrés Rochester (31 de gener–2 de febrer de 1955), R. P. Shutt presenta els resultats del grup de cambra de boira del cosmotró de Brookhaven. En l'estudi de la reacció $\pi^- + p \rightarrow Y + K$ observen sis casos de producció associada amb ambdues secundàries neutres. En un dels casos la producció associada és clarament en $\Lambda^0 + K^0$. En els altres casos sembla aparèixer la Λ^0 , però no la seva companya de producció. Aleshores, a partir de la massa de la Λ^0 s'infereix la massa del mesó pesat K^0 que l'ha d'acompanyar. No obstant això, la correspondència no sempre és exacta i l'assignació de masses entre hiperons i mesons pesats admet una explicació alternativa, proporcionada a partir de l'assumpció del model de Gell-Mann:

A different explanation could be that the Λ^0 was not produced directly but first a Σ^0 was produced which decayed rapidly according to $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ (as predicted by Gell-Mann).⁵⁰

En el mateix congrés, W. D. Walker de la Universitat de Wisconsin analitza altres resultats trobats a la mateixa cambra de difusió d'hidrogen de Brookhaven. Els nous exemples mostren els dos esdeveniments més complets de producció associada que es coneixen fins el moment. D'afegit, un d'ells es presta fàcilment a la interpretació de la Λ^0 que hi és present com el producte de desintegració d'un hiperó més pesat, que s'ajusta a la predicció de la Σ^0 de Gell-Mann.

Ni la suposició de Shutt ni la de Walker es poden entendre com el descobriment experimental de la Σ^0 , però resulta significatiu perquè els experimentals ja pensen en termes de la nova teoria. Segurament les suposades observacions d'una neutra de curta vida (Σ^0) que es desintegra en dues secundàries també neutres ($\Lambda^0 + \gamma$) haurien passat desapercibudes si no hagués existit la predicció de Gell-Mann.

Les observacions definitives es produiran el gener de 1957. De nou la font serà el cosmotró de Brookhaven, però ara el detector serà una cambra de bombolles de propà. En la publicació dels resultats es presenten tres esdeveniments que s'ajusten a la cadena:



⁴⁹Gell-Mann, Pais (1955b), 349.

⁵⁰Shutt (1955), 101.

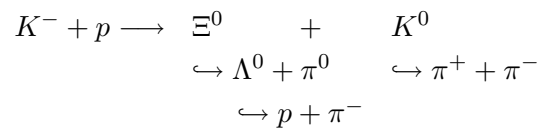
En dos dels quals la Λ^0 i el fotó queden perfectament determinats i s'exclouen altres explicacions alternatives.⁵¹

El descobriment de la $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ resultarà encara més complicat, perquè suposa detectar una Λ^0 secundària i, a més, la materialització fotònica del $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, de forma que no es pugui confondre amb un cas de Σ^0 . L'autoria del descobriment és compartida pels raigs còsmics i els acceleradors.

En raigs còsmics, el 1958 la doble cambra de l'EP al Pic du Midi fotografia un esdeveniment que es pot interpretar com la desintegració de l'hiperó $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$.⁵² Però no serà fins a l'any següent que s'observi una reacció que es pugui interpretar, inequívocament, amb la presència de la Ξ^0 .⁵³ Aquest cop, el mèrit és del grup del bevatró de Berkeley, amb L. W. Alvarez al capdavant, i amb un experiment especialment dissenyat per aconseguir el resultat desitjat:

The first experiment we did with the fifteen-inch chamber was designed as a test of the Gell-Mann–Nishijima strangeness rules that predicted the existence of a neutral cascade particle, the Ξ^0 .⁵⁴

En una única fotografia s'aconsegueix aplicar, com a reacció més probable, la cadena:



Així es considera que l'esdeveniment representa la producció i desintegració de la Ξ^0 , l'hiperó amb estranyesa -2 i massa comparable a la de la cascada de desintegració Ξ^- , coneguda des del 1953 dels experiments en raigs còsmics.

Des de la predicció feta per Gell-Mann i Pais al congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954) fins aquesta darrera detecció el 1959 que confirma el model s'haurà produït un canvi substancial en el camp de la física de les noves partícules. L'experimentació mitjançant cambres de boira i emulsions permet el descobriment de les noves partícules inestables en raigs còsmics, que s'aconseguiran classificar amb el model d'estranyesa. L'experimentació originarà aquesta teoria, però el seu paper predictiu redundarà de nou en el camp experimental, ara ja en els acceleradors.

⁵¹Vegeu apèndix A, fig. A.20.

⁵²Vegeu apèndix A, fig. A.21.

⁵³Vegeu apèndix A, fig. A.22. Cal precisar l'abús de llenguatge que pot ésser present en el terme "inequívocament". Els autors de l'observació, Alvarez *et al.* (1959, 218), presentaran el seu grau de certesa en la suposada observació Ξ^0 com:

A careful estimate shows that the probability of getting one such accidental event in the entire experiment is of the order of 10^{-5} . We have not been able to think of any more likely possibilities.

⁵⁴Alvarez (1989), 303.

Els descobriments de la Σ^0 i la Ξ^0 completen el model d'estranyesa. Cal notar, però, que aquestes no són les úniques prediccions que el model admet, com M. Gell-Mann proclama en el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955):

Can other particles be accomodated in the scheme?

One is tempted to ask whether, if more particles are discovered, they can fit into the picture that we have developed. Let us ask in particular what possibilities there are for more particles *without introducing multiple charges*.

Among baryons we have already a doublet with $S = 0$ (\mathcal{N}), a singlet and a triplet with $S = -1$ (Λ and Σ), and a doublet with $S = -2$ (Ξ). The only other possibilities are evidently a singlet with $S = -3$, which we may call Ω^- , and a singlet with $S = +1$, which we have considered briefly in the text and called Z^+ . In order to be metaestable, Z^+ must have a mass lower than the sum of the masses of \mathcal{N} and B ; similarly, the mass of Ω^- must be less than the sum of the masses of Ξ and \bar{B} . According to the rule $\Delta S = \pm 1$, the Z^+ would decay into a nucleon and a pion (or a proton and a γ -ray if there is not enough energy for a pion). The Ω^- would decay into a Ξ and a pion (or γ -ray). If there is enough energy, the Ω^- could also decay slowly into a \bar{B} and a Λ or Σ .⁵⁵

Les prediccions les segueix estenent al grup dels mesons, per al qual proposa que poden existir un parell de singlets amb $S = \pm 2$ que bateja com ω^+ i ω^- . El model, doncs, no representa una proposta perfectament tancada, a causa de la generació de noves partícules que es pot associar a la nova llei de violació d'estranyesa en $\Delta S = \pm 1$ per a les desintegracions (febles) d'aquests nous elements.

Tot i que les noves prediccions són especulatives, en el moment de formular-se ens mostren com el pas següent a la detecció d'estranyesa serà veure quina pauta permet agrupar els nous supermultiplets. El primitiu concepte d'isospín havia permès classificar les partícules en multiplets amb $2I + 1$ membres. L'avanç teòric s'aconsegueix a l'entendre aquest isospín com una simetria aproximada: les interaccions electromagnètiques de les velles partícules no conserven isospín. És precisament aquest trencament de la simetria el que ens permet explicar les diferències de masses entre els membres dels multiplets d'isospín.⁵⁶

El raonament següent serà pensar com es podrien agrupar aquests multiplets de diferent estranyesa en un supermultiplet, en analogia al protó i al neutró agrupats com nucleons. El 1961, la nova simetria portarà a la predicció de Y. Ne'eman i M. Gell-Mann del model matemàtic $SU(3)$, extensió de $SU(2)$ d'isospín, i la nova supersimetria es coneixerà com l'*Eightfold Way*. Segons $SU(3)$ les partícules, noves i velles, s'agrupen en famílies o supermultiplets amb el mateix spin i paritat, però diferent isospín i estranyesa. El model

⁵⁵Gell-Mann (1956b), 865.

⁵⁶En absència d'interacció electromagnètica protó i neutró són indistingibles i les seves interaccions es poden explicar com causades per una única partícula genèricament anomenada nucleó. En realitat, protó i neutró presenten una diferència de masses $m_n - m_p \simeq 1.29$ MeV que es pot atribuir precisament a la violació de la simetria d'isospín, i per tant a la interacció electromagnètica.

matemàtic ens dona, precisament, el nombre de partícules contingudes en aquestes famílies, i les figures geomètriques característiques que poden prendre, quan es grafiquen en eixos d'estranyesa (o hipercàrrega) i tercera component d'isospín.⁵⁷

Aquesta evolució de la teoria imposarà les restriccions necessàries a les prediccions agosarades que com hem vist fa M. Gell-Mann el 1955. En realitat, si ens centrem al cas de la Ω^- , la predicció és agosarada perquè no limita les associacions de barions amb igual spin i paritat. Amb la introducció de SU(3), els barions coneguts aquest 1955 s'agrupen en un octet (els dobles de nucleons, el singlet Λ , el triplet Σ i el doblet Ξ) amb spin i paritat coneguts $\frac{1}{2}^+$. La Ω^- serà novament predita per M. Gell-Mann en la conferència al CERN del 1962, ara en el marc de la nova proposta de SU(3), com l'últim membre a descobrir del decuplet de barions de spin i paritat $\frac{3}{2}^+$. Les seves característiques no diferiran, però, de la predicció d'aquest 1955. El descobriment oficial no es farà fins el 1964, en el cosmotró de Brookhaven.⁵⁸ El seu descobriment, però, ja no serà un triomf del model d'estranyesa, sinó que ho serà del model més genèric de l'*Eightfold Way*, sorgit a partir d'estranyesa.

6.3 Models equivalents: implantació d'estranyesa, triomf de M. Gell-Mann

There have been many theoretical papers written about schemes that do not differ essentially in their conclusions from the Gell-Mann–Nishijima scheme. The authors include M. Goldhaber, Sachs, Salam, d'Espagnat and others.

Yang a Rochester (1956, VIII–7).

There are a number of different ways of phrasing the “strangeness” concept, but they are all essentially equivalent to the Gell-Mann–Nishijima scheme.

J. D. Jackson a The Physics of Elementary Particles (1958).

⁵⁷Vegeu apèndix A, fig. A.52.

⁵⁸Caldria notar que alguns esdeveniments descoberts en dates molt anteriors a aquesta es poden explicar en base a la desintegració esperada per a l' Ω^- . De fet, en la predicció de Gell-Mann (1962, 805) ja crida l'atenció sobre que “Perhaps it would explain the old Eisenberg event.” Y. Eisenberg (1954) és l'autor d'aquest descobriment precursor que M. Gell-Mann té en ment, curiosament trobat no en acceleradors, sinó en un bloc d'emulsió exposat als raigs còsmics (v. apèndix A, fig. A.15). Dos exemples més, també detectats en raigs còsmics per Fry *et al.* (1955a, b) poden interpretar-se com la producció i posterior desintegració d'aquesta Ω^- .

L'any 1955 serà un any prolífic pel que fa en aquest tipus de reformulacions de què parla Yang a la citació del 6è congrés Rochester (3–7 d'abril de 1956). Els seus autors mostren conèixer majoritàriament la teoria de M. Gell-Mann. En especial, citen la contribució al congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954) que Gell-Mann realitza junt a A. Pais. En aquestes citacions apareix també, encara que en menys proporció, la teoria desenvolupada segons Nishijima. Però el tractament que fan en l'article parla essencialment de “model de Gell-Mann” o algun cop de “model de Gell-Mann i Pais”.

Model d'A. Salam i J. C. Polkinghorne

A principis de 1955, A. Salam i J. C. Polkinghorne, que treballen a Cambridge, presentaran unes modificacions al tercer model de Gell-Mann i Pais al congrés de Glasgow. Partint de la mateixa idea d'un espai de spin isotòpic quadridimensional,⁵⁹ Salam i Polkinghorne redefeixen els dos nombres quàntics introduïts (I^+ , I^-) per tal d'eliminar l'existència d'hiperons doblement carregats que venien predits segons el model de Gell-Mann i Pais. I^+ i I^- representaven dos isospins independents dintre d'aquest espai quadridimensional. De fet, I^+ es corresponia amb isospín, formalment i conceptual. I^- conservava la semblança formal amb isospín, que obligava a suposar degeneració en cada multiplet i per tant l'aparició d'estats múltiples de la càrrega fonamental. Conceptualment I^- significava la variació introduïda per explicar les noves partícules (I^- era zero per a nucleons i pions).

Seguint la formulació original, els barions, que eren fermions, havien de verificar:

$$Q = I_z^+ + I_z^- + 1/2.$$

En canvi, per ajustar aquesta relació de càrrega en el cas dels mesons pesats, que eren bosons, n'hi havia prou amb escriure:

$$Q = I_z^+ + I_z^-.$$

Segons Salam i Polkinghorne, sempre que la nova quantitat introduïda I_z^- sigui nul·la, s'eliminen els estats doblement degenerats del model de Pais. Per aconseguir-ho sols cal redefinir:

$$Q = \tau_3 + \mu_3,$$

per a totes les partícules. Ara “ τ_3 plays the same part as isotopic spin, and μ_3 the same part as ‘strangeness’ in the Gell-Mann scheme.”⁶⁰ En definitiva, Salam i Polkinghorne modificaran el caràcter vectorial d' I^- i el convertiran en la quantitat escalar μ_3 .⁶¹

Concretament per als barions, la nova formulació suposa les següents etiquetes:

⁵⁹Vegeu aquest capítol, sec. 6.1, p. 248.

⁶⁰Salam, Polkinghorne (1955), 687.

⁶¹Per aclarir equivalències, μ_3 no representa simplement estranyesa sinó la seva redefinició en hipercàrrega $\mu_3 = Y/2 = \frac{B+S}{2}$, amb B el nombre bariònic. Les equivalències entre els models Salam–Polkinghorne i Gell-

	τ_3	μ_3
N^+, N^0	1/2, -1/2	1/2
Ξ^0, Ξ^-	1/2, -1/2	-1/2
$\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$	1, 0, -1	0
Λ^0	0	0

Que elimina el problema de les multiplicitats de càrrega del model de Gell-Mann i Pais a Glasgow.

El nou esquema difereix, però, en el tractament dels mesons pesats coneguts. La diferència ve motivada per l'enigma encara no resolt de θ i τ . Quan a Glasgow (13–17 de juliol de 1954), Gell-Mann i Pais proposen l'assignació d'isospín per a aquests mesons pesats, parlen genèricament de dos doblets bosònics de spin isotòpic $\frac{1}{2}$ (B^+, B^0 i \overline{B}^0, B^-), però al final de la intervenció evidencien el problema existent per a aquests kaons:

Preliminary analysis of τ -meson decay seems to point to an even spin and a negative parity for the τ , while the 2π -decay mode of the θ^0 shows that this particle cannot have even spin and negative parity. If further evidence should substantiate these properties of the τ -meson, then the only way to reconcile this model with experiment would be to introduce two sets of four “ B -particles”: $\theta^0, \overline{\theta}^0, \theta^\pm$ and $\tau^0, \overline{\tau}^0, \tau^\pm$. These two multiplets would then be mysteriously degenerate.⁶²

La proposta de Salam i Polkinghorne serà diferenciar en el seu esquema θ i τ . Aquesta diferenciació apareix automàticament amb l'assignació de τ_3 i μ_3 que proposen. Els autors suposen l'existència d'un triplet per a la τ (τ^+, τ^0, τ^-) i de dos doblets per a la θ (θ^+, θ^0 i $\overline{\theta}^0, \theta^-$):

	τ_3	μ_3
π^+, π^0, π^-	1, 0, -1	0
τ^+, τ^0, τ^-	0	1, 0, -1
θ^+, θ^0	1/2, -1/2	1/2
$\overline{\theta}^0, \theta^-$	1/2, -1/2	-1/2

Caldrà esperar un any més perquè la violació de paritat permeti afirmar que θ i τ són la mateixa partícula, i que paritat ja no serà un bon nombre per diferenciar-les.⁶³

Mann–Pais seran:

$$\tau_3 = I_z = I_z^+$$

$$\mu_3 = \frac{Y}{2} = \frac{B+S}{2} = I_z^- + \begin{cases} 1/2 & \text{fermions (barions)} \\ 0 & \text{bosons (mesons)} \end{cases}$$

⁶²Gell-Mann, Pais (1955b), 350.

⁶³Vegeu aquest capítol, sec. 6.2.2, p. 260.

A. Salam i J. C. Polkinghorne arriben, doncs, al model d'estranyesa a través de la idea d'un espai quadridimensional com el presentat per Gell-Mann i Pais al congrés de Glasgow. Sense menysprear la contribució dels autors, sembla clar que el model es basa clarament en la teoria ja establerta per M. Gell-Mann amb el concepte d'estranyesa plenament definit, i en aquest sentit, la ratifica i li serveix de font de divulgació.

Model de B. D'Espagnat i J. Prentki

Una altra reformulació sorgeix també al continent europeu. Quan F. Bloch comença a reclutar membres per formar un grup de física teòrica al CERN, ja a la seu de Ginebra, dos dels primers seran B. D'Espagnat i J. Prentki, procedents del CNRS de París. Tot i que el seu treball anava essencialment enfocat al tractament de la producció i dispersió piònica, la formulació teòrica de les noves partícules els crida l'atenció, en especial després de la col·laboració de Gell-Mann i Pais a Glasgow. Com a teòrics, la principal preocupació que mostren a l'hora de tractar les noves partícules és la manca de fonament teòric de les regles de M. Gell-Mann:

Le modèle de Gell-Mann est essentiellement phénoménologique. L'espace isobarique est ici à trois dimensions, la relation $q(i_3)$ varie de particule à particule, enfin il peut exister des fermions de i entier comme des bosons de i demi-entier. On est conduit alors à postuler pour les diverses particules les propriétés données par la fig. 1 [v. fig. 6.1] et à supposer que les interactions fortes conservent i , i_3 et la charge, les électromagnétiques i_3 et la charge, les faibles uniquement la charge.⁶⁴

charge			particule	i	$q(i_3)$	
-1	0	1				
---	---	---	Ξ	$\frac{1}{2}$	$q = i_3 - \frac{1}{2}$	Fermions
---	---	---	Σ	1	$q = i_3$	
---	---	---	Λ	0	$q = i_3$	
---	---	---	Σ^0	$\frac{1}{2}$	$q = i_3 + \frac{1}{2}$	
$\downarrow \gamma$						
---	---	---	θ	$\frac{1}{2}$	$q = i_3 + \frac{1}{2}$	Bosons
---	---	---	π	1	$q = i_3$	

Figura 6.1: Hiperons i mesons de la teoria de Gell-Mann segons D'Espagnat i Prentki.

En un intent de formalitzar la teoria fenomenològica de Gell-Mann, D'Espagnat i Prentki parteixen d'assumir el lagrangiana genèric per a totes les interaccions fortes possibles entre partícules. Seguidament, postulen que respecte a aquestes interaccions fortes la teoria ha de ser invariant Lorentz, ha de conservar el nombre de barions i ha de ser invariant

⁶⁴D'Espagnat, Prentki (1956), 36.

sota rotacions i reflexions en l'espai de spin isotòpic. El lagrangiana resultant amb aquestes característiques és perfectament un escalar, cosa que ens permet limitar molt les possibilitats i deduir-ne tres constants del moviment: I_3 (tercera component d'isospín), N (nombre bariònic) i una nova constant U . Però encara no hem fet entrar en joc una constant fonamental dels quanta dels diferents camps que intervenen en la lagrangiana com és la seva càrrega elèctrica. Atenent a aquesta quantitat fonamental, les constants anteriors no són independents sinó que verifiquen la relació:

$$Q = I_3 + U/2$$

El valor d' U , ara deduït de la teoria, coincideix precisament amb la constant postulada en el model de Gell-Mann: U significa $N + S$, o equivalentment hipercàrrega. Partint de la formalització de la lagrangiana de les interaccions, D'Espagnat i Prentki pretenen haver dotat d'una base teòrica matemàtica al model d'estranyesa reduint el grau d'arbitrarietat del model original. La pèrdua d'arbitrarietat es concentra en el fet que ara U no es tria per a cada partícula segons les necessitats experimentals, sinó que es dedueix del formalisme general. En realitat, però, insisteixen en el poder fenomenològic del model:

Bien que le nombre de paramètres arbitraires soit élevé le modèle est très utile. Il a permis une classification rationnelle des faits connus et a conduit à la prédiction de certains phénomènes qui paraissent maintenant expérimentalement confirmés. Tels sont, par exemple, l'existence du Σ^0 (et sa probable instabilité γ), l'impossibilité des réactions du type $N + N \rightarrow 2\Lambda, \Sigma + \Lambda, 2\Sigma$, l'excès positif des mésons lourds.⁶⁵

La formulació teòrica del model fenomenològic d'estranyesa presentada per aquests autors serà reescrita diferents cops: en forma de *letter* al *Physical Review*, com a col·laboració en el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955) o com article molt complet al *Nuclear Physics*. En aquest darrer article detallat, els autors citen altres analogies fetes sobre el model de Gell-Mann. En especial l'aportació de R. G. Sachs des de Wisconsin.

Model de R. G. Sachs

A diferència de B. D'Espagnat i J. Prentki, R. G. Sachs no pretén fonamentar teòricament cap model anterior. La seva idea és introduir simplement un esquema anàleg per classificar les partícules fonamentals. Equivalentment a l'estranyesa, Sachs defineix un nou nombre quàntic que anomena "atribut".

L'atribut a , com a bon nombre quàntic, presentarà un valor definit per a cada partícula fonamental. Serà additiu, per tant l'atribut d'un conjunt de partícules serà la suma algebraica dels atributs corresponents a cada partícula. Es conservarà per a les interaccions fortes i es violarà en $\Delta a = \pm 1$ per a les febles. Tindrem, doncs, $a = 0$ per a pions i nucleons, $a = 1$ per a Λ^0 i $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$ i $a = 2$ per a Ξ^0, Ξ^- . Anàlogament, per als mesons pesats

⁶⁵Ibid.

cal distingir els K_1 amb $a = -1$ i els K_2 amb $a = 1$, atenent a les diferències entre θ i τ , respectivament. Una diferència essencial respecte el model de Gell-Mann–Nishijima serà que Sachs pretén estendre l'assignació del nou nombre quàntic a les partícules leptòniques: electró, muó, neutrí, i també als fotons. En aquest cas: $a_e = a_\nu = a_\mu = -1/2$ per als leptons i $a_\gamma = 0$.

L'assignació es fa en base a les evidències experimentals. Així, l'assignació $a_\gamma = 0$ es fa per explicar la desintegració ràpida de π^0 en fotons conservant l'atribut. Per fixar a en els leptons cal considerar les reaccions típiques de la desintegració β (6.1), la cascada de desintegració $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \nu$ (6.2) i les conegudes desintegracions muòniques dels kaons (6.3):

$$N^+ \rightarrow N^0 + e + \bar{\nu} \quad \text{i} \quad N^0 \rightarrow N^+ + \bar{e} + \nu \quad (6.1)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu + \bar{\nu}, \quad \pi^- \rightarrow \bar{\mu} + \nu \quad \text{i} \quad \mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu} \quad (6.2)$$

$$K_1^+ \rightarrow \mu + \nu \quad \text{i} \quad K_2^- \rightarrow \bar{\mu} + \bar{\nu} \quad (6.3)$$

Cal considerar també que les antipartícules verifiquen $\bar{a} = -a$.

Malgrat l'intent de generalització als leptons, la proposta de Sachs varia poc dels models coneguts anteriorment. Com ell mateix fa notar:

The most direct connection is with the theory of Gell-Mann and Nishijima who propose that the charge q of the particle is related to the I_3 component of isotopic spin by

$$q = e(I_3 - \frac{1}{2}a),$$

and a has just the properties assigned here to the attribute.⁶⁶

A més, la contribució de Sachs es limita en un punt important:

The classification is carried out in terms of a single quantum number called the “attribute” which is not given a specific physical interpretation.⁶⁷

El model, doncs, no introdueix cap element essencialment nou més que la classificació en multiplets d'isospín i la necessitat de recol·locar-los amb la nova constant. Recordem de nou que el triomf de M. Gell-Mann en aquest sentit serà trobar la interpretació física a la seva constant d'estranyesa. Amb base teòrica o sense, estranyesa serà la propietat que presenten les partícules estranyes. Aquesta idea, que sembla tan simple, dóna un sentit físic a la classificació dels nous elements.

Model de M. Goldhaber

El model proposat per M. Goldhaber potser resulta el més curiós d'entre els models equivalents per la pretensió de reprendre la hipòtesi de les partícules compostes:

⁶⁶Sachs (1955), 1574.

⁶⁷Ibíd., 1573.

Because of its great simplicity, this hypothesis appears to us worth pursuing as long as it holds out hope of a deeper theoretical approach; in the meantime, it is at least a help in classifying hyperons and processes involving hyperons and heavy mesons (production and absorption).⁶⁸

De fet, M. Goldhaber ja havia treballat sobre la hipòtesi dels compostos el 1953. En aquesta primera aproximació intenta unificar tots els esdeveniments coneguts com produïts a partir d'una sola partícula, que anomena η , i que identifica amb la coneguda fenomenològicament com V_2^0 (més endavant, θ^0):

$$\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 210MeV$$

Sobre aquesta partícula, considerada fonamental, se suposen un seguit de propietats. Es tracta del mesó fonamental en les interaccions nucleòniques, junt amb el conegut triplet piónic. A més, per tal de conciliar producció copiosa i llarga vida, η es produeix suposadament en parelles en les col·lisions nucleó-nucleó o nucleó-pió, seguint com ell mateix apunta les idees de Pais i dels japonesos. S'assumeix també que η té isospín 0 i que pot formar compostos amb nucleons o pions. De la unió d' η amb un neutró es forma la V_1^0 :

$$V_1^0 = n + \eta - W_1^0;$$

quan s'uneix a un protó es forma la V_1^+ :

$$V_1^+ = p + \eta - W_1^+,$$

on $W_1^0 \approx W_1^+ \approx 310$ MeV és l'energia de lligam, calculada a partir de l'energia alliberada en la desintegració d'aquestes $V_1^{0,+}$. Així s'explica que en la desintegració de la $V_1^{0,+}$ apareixerà aquesta $\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 210$ MeV amb l'absorció d'un dels π per un nucleó i l'emissió de l'altre:

$$V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37MeV$$

Similarment, hem d'esperar la desintegració en $V_1^+ \rightarrow n + \pi^+ + \sim 37$ MeV, que encara no és certa i segura experimentalment.

La τ^\pm la podem explicar com un compost de la η amb un π^\pm :

$$\tau^\pm = \eta + \pi^\pm - W_2^\pm$$

on la massa mesurada per a la τ de $975 m_e$ ens porta a una energia de lligam $W_2^\pm = 130$ MeV. La desintegració fonamental és un altre cop $\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, emetent un tercer π^\pm :

$$\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^+ + \pi^-$$

I, així, el model pot arribar a justificar la informació experimental disponible fins al 1953.

⁶⁸Goldhaber (1956), 433.

A principis de 1956, M. Goldhaber intenta modificar la formulació original per incloure les noves dades experimentals. Ara ja es fonamenta en el model d'estranyesa:

Most of the difficulties with which the hypothesis has met in its previous form can be traced back to the assumption of an isotopic spin $T = 0$ for the θ^0 particle. This assumption could not account for the fact that, while some kinds of associated production were observed (e. g., $\Lambda^0 + \theta^0$, $\Sigma^- + K^+$), others were not (e. g., $\Lambda^0 + \Lambda^0$, $\Sigma^+ + K^-$, $K^+ + K^+$). Also, it did not explain the preferential production of slow K^+ -mesons as compared with slow K^- -mesons by cosmic rays as well as at Cosmotron or Bevatron energies. If, however, we adopt the suggestion of Gell-Mann, of Nakano and Nishijima, and of Pais, elaborated further by Gell-Mann and Pais, that the θ mesons have isotopic spin $T = 1/2$ and that their antiparticles, $\bar{\theta}$ mesons, exist, we can modify the compound hypothesis in a very natural manner which apparently removes disagreement with the well-established facts. In its present form the hypothesis is closely related to various other classification schemes.⁶⁹

L'assignació d'isospín, doncs, difereix de la proposada per ell mateix el 1953 i és la mateixa que la proposada en el model de Gell-Mann. La diferència, però, és la introducció d'un nou nombre quàntic que anomena "diònic" i que defineix com $d = +1$ per als mesons θ i $d = -1$ per als $\bar{\theta}$. La regla de selecció per a les noves partícules suposarà la conservació d'aquest nombre per a les interaccions fortes ($\Delta d = 0$), mentre que per a les febles $\Delta d = \pm 1$. A més, l'autor suposa que existeix una interacció atractiva entre nucleons i mesons $\bar{\theta}$, suficientment forta com per produir la formació d'hiperons, que per tant seran compostos. En canvi, la interacció entre nucleons i mesons θ seria repulsiva o menys fortament atractiva.

Un "dió" servirà també per descriure la partícula formada en aquesta associació de dues a través de la interacció forta. La idea és que possiblement tots els hiperons i mesons pesats són dions. Per a la formació d'aquests hiperons se suposa que quan els nucleons ($T = 1/2$) estan lligats als mesons $\bar{\theta}$ ($T = 1/2$) es poden formar quatre estats que poden trobar una equivalència amb les partícules conegudes Λ^0 ($T = 0, d = -1$) i $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$ ($T = 1, d = -1$):

Λ^0	estats mescla de $n + \bar{\theta}^0$ i $p + \theta^-$
Σ^+	$p + \bar{\theta}^0$
Σ^0	estats mescla de $n + \bar{\theta}^0$ i $p + \theta^-$
Σ^-	$n + \theta^-$

El model proposat pot explicar la producció associada ($\Delta d = 0$) i la asimetria de càrrega trobada en la producció dels mesons pesats. La partícula cascada, que no apareix a la taula, es pot explicar de dues formes; o bé en un únic pas junt amb dues θ o bé en dos passos: primer es produeix la formació ràpida d'un Λ^0 o Σ i després aquest capta un segon $\bar{\theta}$, fent la Ξ^- junt amb dos θ lliures, un a cada pas. En cadascuna de les reaccions es té $\Delta d = 0$.

⁶⁹Goldhaber (1956), 433.

Les vides d'aquests hiperons vindran determinades per la vida de la θ . La desintegració fonamental serà $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, amb l'absorció d'un dels pions pel nucleó. Aquesta hipòtesi es correspon al resultat experimental, que dóna una vida per als hiperons que emeten pions de $\sim 10^{-10}$ s, com correspon al canal de desintegració més ràpid observat per a aquesta θ (K_S^0), que la dels altres kaons neutres (K_L^0). La vida més llarga per als θ^\pm lliures es pot justificar amb les regles de selecció d'isospín.

L'exposició seria completa si tots els mesons pesats, o kaons, poguessin considerar-se partícules θ . Però hi ha present la polèmica de la partícula τ que, de moment, difícilment es pot igualar a la θ . L'explicació possible proposada és considerar estats lligats de θ ($T = 1/2$) i π ($T = 1$) que formarien doblets isotòpics com (τ^0, τ^+) . A aquests mesons pesats els correspondria un nombre diònic $d = +1$ ($d = -1$ per a les corresponents antipartícules).

El model de Goldhaber utilitza les eines del model de Gell-Mann, però se'n desmarca a l'hora de fer una interpretació física més elemental. Segons Goldhaber, una teoria completa de les forces nuclears hauria d'incloure no sols l'intercanvi de mesons π , sinó també l'intercanvi d'aquests parells $\theta + \bar{\theta}$ entre nucleons. Es tracta d'un model que pretén seguir la via simplificadora de no considerar totes les noves observacions com partícules fonamentals, sinó com a compostos. Al mateix temps, Goldhaber, amb la proposta de dos mediadors de les interaccions nuclears, torna a la idea de les partícules mescla, que temps abans s'havia mostrat una hipòtesi possible per explicar els primers exemples de noves partícules, sense desmarcar-se de la teoria de camps de la interacció nuclear.

Model de S. Sakata

A través de la via de modelització proposada per Goldhaber s'intueix la necessitat ja no sols de classificar sinó també de simplificar, que d'una manera o altra persegueixen les teories físiques. Un pas més genèric en aquesta via la trobarem en l'article de S. Sakata del 1956.

Sakata considerarà que de totes les partícules disponibles sols sis són fonamentals: p , \bar{p} , n , \bar{n} , Λ i $\bar{\Lambda}$. A través d'elles i de les restriccions imposades per la teoria de Gell-Mann–Nishijima, es poden formar la resta de partícules conegudes.⁷⁰

Un dels punts interessants en la classificació de Sakata és la necessitat d'incloure la Λ (partícula estranya) com l'element fonamental inclòs en la resta de partícules estranyes, ara compostos. És a dir, s'estableix una diferència clara entre les velles partícules —formades únicament a través de nucleons— i les noves partícules —per a les quals és necessari introduir la Λ , que transportarà la qualitat d'estranyesa en les partícules així formades.

However, it should be stressed that the curious properties of the new particles could be reduced to those of Λ^0 , just like the mysterious properties of the atomic nuclei were reduced to those of the neutron. Hence our theory contains less arbitrary elements than was the case for original one of Nishijima and Gell-Mann.

⁷⁰Vegeu apèndix A, fig. A.46.

I com ell mateix diu, a partir de la regla de Gell-Mann–Nishijima, persegueix: “from the theoretical standpoint to find out a more profound meaning hidden behind this rule.”⁷¹ La necessitat d’aquesta recerca es pot entendre com el precedent més directa del primitiu model de quarks del 1964, en el qual les velles partícules vindran descrites pels quarks *up* i *down* i caldrà incloure el quark *strange* per justificar les característiques dels nous elements. Característiques previstes, macroscòpicament, pel model d’estranyesa. Finalment, les simetries observades trobaran amb el model de quarks el nivell més fonamental, si es vol, el generador.

Altres models equivalents apareixeran durant aquest període: Rayski (1954), Utiyama i Tobocman (1955), Case, Karplus i Yang (1956)... Les pautes que presenten ens permeten entendre millor el per què de l’aparició d’aquests models equivalents. Si bé sembla que la formulació de Gell-Mann es pot considerar com el model que millor interpreta les evidències experimentals, les formulacions equivalents surten com a resposta pel descontentament amb aquest model en quant a l’arbitrarietat aparent en la tria de la relació entre Q i I_3 per a les diferents noves partícules, relació difosa especialment a partir del congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954). La resposta intentarà salvar un doble escull: una formulació amb una base més teòrica i l’intent d’atribuir un significat físic a la nova constant que sembla que Gell-Mann no aconseguirà fins al 1955.

Les limitacions del model de M. Gell-Mann, doncs, ajuden a la proliferació de models equivalents, i el model original en surt beneficiat, perquè les citacions obtingudes suposen un factor essencial en el triomf de M. Gell-Mann i en l’implantació d’estranyesa.

Finalment, l’any 1957, M. Gell-Mann, que mai s’havia mostrat un productor d’articles massa prolífic, en presentarà quatre on aplegarà el conjunt d’idees que hauran culminat amb el model d’estranyesa i farà notar els avenços per transcendir cap a una teoria més completa, més enllà d’estranyesa:

We should like to know the laws of motion of the particles; to predict, among other things, how they will interact when they collide and how these interactions will deflect one particle when it collides with another. As this article is written a number of physicists are hard at work on theories which they hope may supply the laws. Time will be the judge.⁷²

⁷¹Sakata (1956), 688.

⁷²Cronològicament, el primer article (Gell-Mann, 1957) és rebut al *Physical Review* el març i en ell pretén ampliar el model amb una teoria de camps de les interaccions fortes que involucri les noves partícules. Després apareix Gell-Mann, Rosenbaum (1957), que és un article de divulgació científica a un nivell més elemental que el tercer (Gell-Mann, Rosenfeld, 1957), que també és clarament recopilatori. Finalment, Feynman, Gell-Mann (1958), que tracta de formalitzar les desintegracions febles de kaons i hiperons en el marc de la teoria de Fermi, és rebut al *Physical Review* el setembre de 1957, tot i que surt publicat el gener de 1958. Aquesta abundant producció literària, en el moment adequat, ajuda també a consagrar-lo com artífex de la teoria d’estranyesa.

Epíleg

Polèmica i col·laboració

L'articulació del descobriment de les partícules estranyes es pot entendre com un joc de polèmiques i col·laboracions en diferents fronts. A través d'aquests dos conceptes aparentment contraposats es poden entendre molts dels avenços i fracassos de les investigacions.

Si establim una successió cronològica, un primer punt de tensió pot ser la dificultat per acceptar els nous esdeveniments i els dos fronts que semblen crear-se, a favor i en contra de la seva existència. Des de la visió experimental trobàvem Leprince-Ringuet realitzant una tasca important de difusió de les primeres evidències i, en camp contrari, el teòric Bethe dedicant un article (1946) a argumentar com totes les observacions fins el moment es podien atribuir als ja existents protons o mesotrons. Poc després, l'aparició de les *forked tracks* canviarà aquesta situació i en farà menys problemàtica l'acceptació. La singularitat visual de les traces de Manchester juga un paper molt important en la seva acceptació: les traces forçades són desintegracions de primàries en els mesotrons coneguts i la seva massa es pot inferir de la coneguda per a aquests mesotrons secundaris. En les evidències prèvies, la singularitat de les traces no és un argument que es pugui explotar: l'exemple del 1944 de l'EP mostrava la traça d'una primària que, de forma poc habitual en les condicions de l'experiment, col·lionava amb un electró de la cambra. En les evidències posteriors de la mateixa EP (1945), la massa superior a la mesotrònica però inferior a la protònica s'inferia de l'estimació de la curvatura i la ionització sobre traces primàries sense desintegració, cosa que els convertia en casos poc fiables per les imprecisions en aquestes mesures. Pel que fa als varitrons, no tenien el recolzament de l'evidència visual, perquè es detecten amb muntatges de comptadors.

La manca d'un marc teòric que predigui les noves partícules incrementa la tensió sobre la seva acceptació. Els més optimistes intentaràn incloure-les en la teoria de mesons existent, que, fins el 1947, bregava per identificar els mesotrons de raigs còsmics amb el mediador de la interacció nuclear predit per la teoria de Yukawa. El 1947, aquest lligam teoricoexperimental pateix una reorganització quan s'admet l'existència de dos "mesons" de raigs còsmics: el pió, fortament interaccionant, es desintegra en el muó, feblement interaccionant. Cal admetre, doncs, una nova partícula de baixa interacció amb la matèria nuclear que, en principi, no era esperada pel marc teòric vigent. La teoria dels dos mesons explicarà la complexitat

experimental, però no desvetllarà la utilitat final del muó. Per tant, la idea de no admetre cap nou element que no vingui predit perd força davant la nova situació. En aquest moment, a finals de 1947, s'anuncia la trobada de les *forked tracks* a Manchester.

Tot i amb això, tampoc les traces forcades gaudeixen d'un reconeixement immediat i espectacular.⁷³ Podem dir que l'expectativa es manté a l'espera de confirmació de nous casos de característiques visuals similars (en forma de V invertida).

Aquest és un altre punt clar de tensió. La confirmació de les traces forcades no es produirà fins el 1950 i, malgrat els esforços del grup de Manchester, serà des de Caltech que s'anunciarà la repetició del fenomen, amb 34 exemples de traces forcades. La relació Manchester–Caltech, amb P. M. S. Blackett i C. D. Anderson com a caps visibles, serà d'una certa tensió per la confirmació dels esdeveniments, però també serà de complicitat i col·laboració davant les evidències prèvies. Així, Anderson escriurà a Blackett proposant de separar llurs evidències dels anomenats genèricament mesons τ , que Leprince-Ringuet, cap visible de l'EP, havia difós com evidències prèvies: “It may, of course, be possible that τ -mesons exist, but I think it would be unwise to confuse the forked-track experiments, which are rather clean-cut, with the confusion which now surrounds the τ -meson.”⁷⁴ Aviat, aquesta complicitat s'estableix per distingir les evidències en cambres de les evidències trobades en emulsions: “This result of yours suggests that the particles observed by Bristol and Imperial College of the decay of heavy mesons into three light mesons cannot refer to the same particles as you and we find.”⁷⁵ La tensió entre els dos detectors principals (cambres–emulsions) es mantindrà en tot el període de descobriment, amb una nomenclatura diferenciada: el grup de Bristol, amb C. F. Powell com a cap visible, introduirà lletres gregues minúscules per etiquetar els esdeveniments trobats en emulsions; els grups de Manchester i Caltech, després d'una fluida correspondència, acordaran parlar de partícules V per a les seves observacions en cambres de boira. A partir d'aquest moment s'obriran dues vies de treball lligades a l'instrument de detecció: la classificació dels esdeveniments V en cambres de boira, la polèmica de la V^0 i el desconeixement de les V^\pm , i la classificació dels mesons pesats carregats detectats en emulsions.⁷⁶

La tensió entre tècniques s'incrementarà a finals de la segona etapa amb l'aparició de

⁷³Recordem que, sovint, se citen com una gran revelació: “truly startling events” [Brown, Rechenberg (1996), 295]; “ce ne fut pas seulement l'émotion, mais l'excitation générale” [Kayas (1982), 154].

⁷⁴Anderson a Blackett, 13–6–1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

⁷⁵Blackett a Anderson, 21–4–1950 (Blackett Archive, Royal Society, London).

⁷⁶La nomenclatura τ proposada en el camp de les emulsions des de Bristol es pot entendre com una successió natural de la investigació predominant en aquest detector com és la distinció π - μ (i les seves vessants fenomenològiques en estrelles σ i ρ). Però hem vist com les primeres evidències que s'agrupen amb aquest nom τ són puntuals i més difícils de justificar que les traces forcades a Manchester. Per aquesta i altres raons, Manchester i Caltech intentaran diferenciar-se del *background* poc clar que existeix abans de les traces forcades i les anomenaran partícules V, nomenclatura molt descriptiva del fenomen visual, que no caracteritzava les evidències anteriors. Cal notar, però, que les emulsions proporcionaran nous exemples i definiran nous elements. El 1949, la nomenclatura τ acabarà aplicant-se exclusivament a la desintegració ben definida en emulsions $\tau \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, per les seves tres traces secundàries.

les multilàmines, especialment del MIT, i les dobles cambres, especialment de l'EP, que comencen a immiscir-se en el terreny dels mesons pesats, propi fins el moment del camp de les emulsions. Del treball en multilàmines del MIT sorgirà una nova nomenclatura en partícules S (*Stopped Particles*) que definirà el comportament dels esdeveniments de noves partícules que s'aturen a l'interior de la cambra.⁷⁷ Malgrat d'entrada la nova nomenclatura induirà un nou punt de tensió, ràpidament Rossi intentarà associar aquests esdeveniments amb els modes $\kappa \rightarrow \mu + \pi^0 + \nu$ i $\chi \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ de Bristol. Però les seves energies també seran compatibles amb les V^\pm trobades en cambres convencionals, cosa que portarà a la identificació progressiva dels tres fenòmens: mesons pesats d'emulsions, partícules S de multilàmines i V^\pm de cambres convencionals, que en el congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953) ja s'intentaran agrupar sota la nomenclatura comuna de mesons K.⁷⁸

El congrés de Bagnères (6–12 de juliol de 1953) serà un moment clau de col·laboració: s'intentarà adoptar una nomenclatura comuna, reflex de la necessitat d'unir l'estadística d'esdeveniments trobats en llocs diferents, amb detectors diferents i en condicions diferents. Això sols serà possible establint acords entre els diferents grups sobre els mètodes i les tècniques de detecció. Caldrà conciliar els resultats de les dues grans tècniques (cambres i emulsions), però fins i tot dins la mateixa tècnica caldrà conciliar les metodologies de treball dels diferents grups i les variacions en els muntatges experimentals, per tal que aquestes evidències puguin sumar-se en anàlisis comunes.⁷⁹ Lligat amb aquesta metodologia de treball, a Bagnères s'evidencia la dificultat de les cambres convencionals per mesurar acuradament la ionització, per controlar els corrents de convecció, la dispersió coulombiana, etc. Arran dels acords a què s'arriba, semblaran accentuar-se els intents de minimitzar els errors més controlables, com els corrents de convecció, i d'assajar muntatges nous, com les multilàmines, dobles cambres, cambres de difusió i d'alta pressió. Les multilàmines explotaran la mesura de l'abast i la major interacció de les partícules en el medi més dens. Les dobles cambres combinaran els beneficis de les multilàmines amb les mesures de la curvatura en la cambra convencional, així com la capacitat de gravar esdeveniments complets. La major densitat dels nous muntatges permetrà centrar els estudis en aquests mesons pesats carregats més energètics, que fins el moment havien estat camp de cultiu de les emulsions. En general, aquests experiments intentaran determinar la naturalesa de les

⁷⁷El treball en cambres ja no es limitarà a les desintegracions de partícules V, sinó que iniciarà la polèmica sobre les partícules S, que de fons definirà la polèmica de les desintegracions de mesons K més energètics, per als quals era necessari un major poder de parada que el de les cambres convencionals. Fins el moment aquest poder de parada l'oferien les emulsions, i per això no podien cedir el seu territori d'investigació més profitós com eren aquests mesons carregats, als quals havien vist néixer i havien batejat com τ , κ , χ ...

⁷⁸Recordem també que de Bagnères sortirà la nomenclatura H de *Heavy* o d'*Hyperons* per descriure les noves partícules més massives que els nucleons. Aquest grup contindrà la ben coneguda $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$, les cascades $V^- \rightarrow V_1^0 + \pi^-$ i les noves evidències de partícules J transprotòniques ($\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$ o $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$). Així es completa el coneixement de partícules estranyes al final de la segona etapa.

⁷⁹Paradigmàtic d'aquesta transferència d'importància del cas individual al còmput estadístic serà el creixent poder dels mètodes de tractament de dades, com el diagrama de Thompson o el *Dalitz Plot*, que tractarem en l'apartat següent.

secundàries dels mesons pesats carregats, per diferenciar-ne els modes de desintegració, i comparar-los en massa i altres propietats amb els exemples de les emulsions (τ , κ , χ), de les cambres convencionals (V^\pm) i de les multilàmines (partícules S). Un nou cas de pol·lèmica entre diferents grups ens l'ofereixen el grup d'emulsions de Bristol, la multilàmines del MIT i la doble cambra de l'EP, al voltant de la diferenciació dels modes $\kappa \rightarrow \mu + \pi^0 + \nu$ ($K_{\mu 3}$), $\eta \rightarrow \mu + \nu$ ($K_{\mu 2}$) i $\chi \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ($K_{\pi 2}$).

La necessitat de no quedar enrere de les emulsions respecte dels nous muntatges en cambres es traduirà en millores a través de la preparació de blocs que s'exposaven a la radiació de gran alçada en expedicions organitzades de forma conjunta per diferents universitats, de les quals hem destacat les expedicions a Sardenya i el *G-stack*; després de Bagnères, aquestes expedicions resultaran ser grans esforços de col·laboració entre diferents grups.⁸⁰

Les col·laboracions, però, no són exclusives de la tercera etapa. Molt lligat a les millores tècniques que permetran els nous descobriments hi ha tot un pòsit de col·laboracions: en la llunyana dècada dels trenta, les cambres de boira controlades per comptadors es desenvolupen amb l'esforç comú de Blackett (Manchester) i Occhialini (Florència); Rossi deixarà la seva empremta a Manchester treballant amb Blackett i Jánossy abans d'arribar als EUA; Brode farà el camí invers, des de Berkeley anirà a Londres per aprendre de Blackett la tècnica de la cambra de boira, etc. Ja en el període de descobriment de les noves partícules: Rossi, en el MIT, entrenarà R. W. Thompson, que formarà un potent grup de recerca en cambra de boira a la Universitat d'Indiana; Fretter des de Berkeley anirà a l'EP i començarà a treballar en una cambra de boira convencional; Grégory i Peyrou, de l'EP, col·laboraran amb el MIT quan es descobreixen les partícules S i, seguidament, amb la doble cambra de l'EP, iniciaran una discussió sobre la natura dels descobriments al MIT.

L'apèndix B (sec. B.4.1) ens dóna una mostra d'aquestes col·laboracions específiques sobre les partícules estranyes en el període de descobriment. Segons les bases de dades, el 1952 i 1953 MIT i EP es relacionen a través especialment de Peyrou. El 1953 també Manchester i Caltech col·laboren a través de C. M. York. El gràfic de 1954 mostra les primeres relacions al voltant d'aquests acceleradors, com és el cas de Rochester, MIT i BNL; i també les relacions europees al voltant de les expedicions amb emulsions, com les que uneixen els grups italians amb Bristol i Brussel·les. L'artífex organitzatiu d'aquests treballs a Europa serà C. F. Powell i, a Itàlia, el líder serà Edoardo Amaldi, que no abandonarà el país arran de la guerra.

⁸⁰Podem recordar que aquesta influència és clara fins el punt d'adequar les dimensions dels blocs d'emulsions pensant que si el μ secundari del mode K_μ , trobat en els experiments a l'EP i al MIT, creuava 75 g/cm^2 de coure abans d'aturar-se, comparativament aquest mesó es pararia en l'emulsió després de travessar 20 cm. Per tant, si s'esperava aturar aquests mesons a l'emulsió calia com a mínim tenir aquesta longitud. De fet, des d'un principi les emulsions es plantejaven la pèrdua d'esdeveniments per la fuga de traces més enllà del seu límit, a causa de la diferent orientació espacial i de ser massa primes. L'augment de volum, doncs, era una preocupació que ja portava molt de temps capficant els grups d'emulsions i que els nous blocs solucionaran. Conseqüentment, es millorarà l'estadística d'esdeveniments detectats amb aquest mètode que, davant les millores en cambres i la pressió dels nous experiments en acceleradors, els permetrà continuar en primera línia d'investigació.

El 1955 el gràfic de col·laboracions mostra com aquestes es multipliquen: d'una banda els grups americans s'uneixen al voltant dels experiments en acceleradors (Berkeley i BNL) i de l'altra, grups europeus s'uneixen al voltant de les expedicions amb emulsions. El 1956, les col·laboracions referides a les noves partícules semblen disminuir, especialment les de grups que treballen en raigs còsmics, mentre es mantenen les col·laboracions americanes al voltant dels acceleradors. La Universitat de Columbia es mostra molt activa a Brookhaven, i el MIT alterna investigacions amb els grups de Brookhaven i també de Berkeley.

A mitjan dels cinquanta, les cambres i emulsions aplicades als raigs còsmics hauran pràcticament acabat la seva tasca. La tensió entre fonts de detecció (raigs còsmics-acceleradors) era ja present des de Bagnères (6–12 de juliol de 1953), però redundarà en noves col·laboracions. Els vells *cosmicists* exposaran les seves cambres i emulsions als nous acceleradors que, a partir de 1955, disposaran de feixos de kaons. Les emulsions semblaran aplicar-se més efusivament als acceleradors, especialment a Berkeley, mentre que Brookhaven aprofitarà més les cambres de boira.⁸¹ Hi haurà un interludi en el qual les noves generacions de tècnics en la nova font es beneficiaran de l'experiència en raigs còsmics i dels vells detectors per donar resultats sobre les noves partícules. Aquesta col·laboració finirà a finals dels cinquanta, quan s'estructuri el treball més complex al voltant de les noves màquines i s'imposin les cambres de bombolles com a detectors. Amb això finirà també la detecció de noves partícules als raigs còsmics. Per als acceleradors quedarà la tasca de determinar les secundàries no carregades dels modes κ i K_β , l'esclariment de les V^0 anòmales, la confirmació definitiva de la producció associada, el descobriment dels hiperons Σ^0 i Ξ^0 , que la teoria predirà, o la resolució de l'enigma θ - τ amb la violació de paritat.

La definició del model teòric també es pot vertebrar en tensions i col·laboracions més enllà dels primers intents d'inclusió en el marc de les teories mesòniques que hem mencionat al principi. Afegit a la tensió pròpia dels teòrics per definir un marc que descriu els nous elements trobem la tensió que es percep per la dificultat de comunicació amb els experimentals. Recordem com, a Bagnères, Louis Michel mostra aquesta tensió: “Most of you are quite suspicious against theorists and prefer, to their advice, the answer of Nature. You are right.”⁸² L'altra cara del problema l'oferiran treballs com el de Dalitz que, malgrat també tracta teòricament el problema de l'assignació de spin i paritat a les noves partícules, és molt acceptat pels experimentals per la seva concreció en el *Dalitz Plot*, que permet encaixar les observacions experimentals i evidenciar la importància estadística dels esdeveniments.

Un altre exemple de profitosa col·laboració amb els experimentals és la de Pais i Gell-Mann. Els experimentals veuen en els models de Pais i Gell-Mann una guia que els concreta quines reaccions han de detectar i quines no prediu la teoria. El primer a través de la idea

⁸¹Vegeu apèndix B, sec. B.4.4, p. 386.

⁸²Michel (1953), 272.

de la producció en parelles, el segon a través de l'assignació d'isospín. Així, doncs, podem parlar d'una col·laboració profitosa entre Pais i Gell-Mann, a la vegada d'una col·laboració menys explícita d'ambdós teòrics amb el món experimental que aguditza els seus recursos per confirmar o desmentir els models.

Podríem parlar també d'una tensió mínima entre els dos models teòrics, en el moment que els experimentals intenten confirmar inequívocament la producció en parelles i topen amb reaccions amb un llindar energètic prou baix com per detectar-les quan en realitat no apareixen, cosa que confirma el model més restrictiu de Gell-Mann.⁸³ No obstant això, hem vist com Pais reconeix ràpidament el poder del model de Gell-Mann i n'inicia una defensa per davant de la seva producció en parelles. Clarament, aquesta col·laboració cristal·litza en la contribució al congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954) i es manté fins al final, consolidant Gell-Mann com el creador del model per descriure les partícules estranyes. Els experimentals acabaran de reafirmar el model de Gell-Mann quan interpretin les seves fotografies a partir de les prediccions teòriques d'aquest model. Recordem les paraules del propi Gell-Mann:

Meanwhile the experimental labs had been sent copies of the preprints, even the ones that weren't published. They all knew of the predictions of Σ^0 , Ξ^0 and the second kind of neutral K particle, K_2^0 (K_1^0 was the θ^0 , which was very well known) and various experimentalists very kindly sent me beautiful signed photographs of the events in which these predicted particles were unambiguously found.⁸⁴

Aquestes prediccions, però, ja es verificaran definitivament en els acceleradors.⁸⁵

La prioritat de la formulació del model d'estranyesa per descriure les partícules estranyes seria una altra tensió detectada en l'estudi històric. Ens referim al paper de K. Nishijima, que ja en l'article del 13 de juliol de 1954, demostra entendre la simetria existent a través de la llei $Q=I_z+b/2+\eta/2$, tot i que no li dóna el nom d'estranyesa. Hem notat també que M. Gell-Mann no presentarà aquesta llei, com a mínim oficialment, fins el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955). Aquesta tensió no és present a l'època perquè és clara la supremacia del paper de M. Gell-Mann, per molts factors que ja hem comentat: els derivats de l'associació amb Pais i les bones relacions amb els experimentals, el poder de la predicció de noves partícules i els seus modes de desintegració, el poder divulgatiu influït per la seva presència a Occident, etc. Aquestes constituïran raons suficients perquè, històricament, la prioritat del descobriment hagi estat atribuïda, majorment, a M. Gell-Mann.⁸⁶

⁸³Per exemple, amb la recerca de la reacció de producció $N+N \rightarrow \Lambda + \Lambda$ que la producció associada de Pais admet però el model més restrictiu de Gell-Mann, no.

⁸⁴Gell-Mann (1982), 402.

⁸⁵Hem vist com la interpretació de les fotografies per part dels experimentals en les quals es detecten la Σ^0 i la Ξ^0 es fa a la llum del model que les preduïu, a diferència dels descobriments més fortuïts que fins aleshores s'havien produït en raigs còsmics.

⁸⁶La importància del model de Gell-Mann es veurà encara més augmentada quan d'altres teòrics el prenguin com a base per reformular la teoria de les partícules estranyes i quan ell mateix, el 1957, es mostri prolífic publicant tres articles sobre el tema.

Importància de la detecció visual i dels mètodes estadístics

Al llarg de tota l'època de descobriment de les noves partícules, els instruments de detecció visual dominaran les investigacions i reservaran un espai ínfim als instruments lògics.⁸⁷ Aquesta tria del mètode de detecció és més que la continuació d'una tradició. Ben aviat queda clar el poder de l'evidència visual per estudiar les partícules estranyes i, consegüentment, en tot el període es van sofisticant les tècniques de detecció visual, fins arribar a la cambra de bombolles, que, nascuda per a la seva aplicació als raigs còsmics, mostrarà efectivitat màxima en els acceleradors.

Ja de bon principi la peculiaritat dels esdeveniments és essencial perquè es produeixi el descobriment dels nous elements no previstos.⁸⁸ Les primeres traces forçades del 1947 s'erigeixen en descobriment oficial de les partícules estranyes mercès a la peculiaritat de les seves traces en forma de V. El 1949, el mesó τ serà ràpidament reconegut i reconeixible en les emulsions per les traces visibles dels tres pions secundaris. L'any següent, quan Manchester proposa els dos modes de desintegració per a les V neutres (V_1^0 i V_2^0), Caltech dubta del mode V_2^0 perquè la diferència visual entre pions i muons secundaris no és apreciable, però la percepció visual de la ionització apreciablement major dels protons secundaris de la V_1^0 n'assegura l'existència. El mateix 1950, quan amb prou feines s'ha fet aquesta distinció entre les V^0 , es detecta la primera partícula "cascada" ($V^- \rightarrow V^0 + \text{mesó}$) i de nou la singularitat visual d'un únic esdeveniment és suficient per veure que es tracta d'un nou element, tot i que les secundàries no quedin perfectament definides.

En tots aquests casos l'evidència visual es mostra clarament, però sovint la seva importància és un xic més subtil, com en la determinació del mode $\kappa \rightarrow \mu^+ + \pi^0 + \nu$ en les emulsions de Bristol. Recordem que aquest mode es detecta en una investigació enfocada a la desintegració $\pi\text{-}\mu\text{-}e$ i malgrat la forma visual és molt similar mostra algun tret que la diferencia. En un cas l'energia del suposat electró secundari és més de 4 cops l'energia màxima detectada per electrons de desintegracions muòniques, i en el segon cas és l'abast del muó secundari el que és excepcional.

A partir del 1953, amb els acords aconseguits a Bagnères i les millores en cambres i emulsions que se'n derivaran, s'intentarà explotar al màxim l'aspecte visual dels nous esdeveniments. La nomenclatura anirà reflectint la importància de l'evidència visual (partícules V, partícules cascada, partícules J). Fins i tot, s'explotarà la interacció de les partícules amb la matèria de les cambres de manera que la seva natura es pugui inferir del comportament visual en les mateixes, d'aquí la definició de les partícules S en les multilàmines o el coneix-

⁸⁷L'anàlisi de la base de dades ens permet adonar-nos de com de disminuït és el paper dels comptadors en els descobriments de partícules estranyes.

⁸⁸Galison (1997, 23) parla de *golden events*:

The golden event was the exemplar of the image tradition: an individual instance so complete, so well defined, so "manifestly" free of distortion and background that no further data had to be invoked.

xement de les secundàries a partir del seu comportament amb la matèria que les envolta: els electrons provoquen cascades electròniques que visualment són fàcils de distingir, un π^0 es pot manifestar a través de la materialització en parells e^+e^- , els μ interaccionen menys que els π i en qualsevol cas, la cascada π - μ - e és fàcilment reconeixible pels experts en la matèria... Finalment, l'argument del major o menor abast de les secundàries en les multilàmines i les dobles cambres permetrà establir la natura d'aquestes secundàries i portarà a la distinció dels modes κ ($K_{\mu 3}$), η ($K_{\mu 2}$) i χ ($K_{\pi 2}$).

Malgrat tot, a mesura que el nombre de nous exemples creixi, el desconeixement de l'esdeveniment particular s'intentarà pal·liar amb les anàlisis estadístiques que els classifiquin en grups. Per tant, allà on no arribi la singularitat de la traça haurà d'arribar l'anàlisi quantitativa per diferenciar i agrupar els nous esdeveniments.

En el cas de les V neutres, recordem que aviat la V_1^0 quedarà visualment ben establerta, però altres casos en els quals l'estimació visual de la ionització no permet distingir pions de muons secundaris s'hauran de beneficiar de l'estadística per agrupar-los. Especialment importants seran les argumentacions de Manchester, Caltech i Indiana. Des de Manchester, el 1952 sorgirà una primera metodologia basada en el còmput de paràmetres deduïts de la cinemàtica dels esdeveniments (α , Q , p_t), que permetrà classificar els esdeveniments més problemàtics en dos grans grups V_1^0 ($Q=46\pm 6$ MeV) i V_2^0 ($Q=122\pm 13$ MeV). Quan des de Caltech s'oposin en aquesta classificació, invocaran també un tractament estadístic del conjunt de les seves dades, per a les quals la dispersió trobada en els valors de Q per al suposat mode V_1^0 permet proposar tres desintegracions en lloc de dues: $V^0 \rightarrow p + \pi^- + (35\pm 3)$ MeV, $V^0 \rightarrow p + \pi^- + (75\pm 5)$ MeV i $V^0 \rightarrow X^\pm + \pi^\mp + (\approx 60)$ MeV, sense descartar que hi pugui haver desintegracions a tres secundàries. Clau en la resolució de la polèmica serà el treball del grup d'Indiana, amb R. W. Thompson i la seva representació estadística de les dades en superfícies Q per classificar-les. Aquesta representació geomètrica intenta minimitzar la dependència dels resultats d'hipòtesis sobre la naturalesa de les secundàries i sobre quantitats difícils de determinar experimentalment. De resultes, a Bagnères es concretarà la classificació de les V^0 en dos modes ben determinats ($V_1^0 \rightarrow p + \pi^- + 37$ MeV i $V_4^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 214$ MeV), que a partir del congrés es rebatejaran com hiperó Λ i mesó pesat θ . Entremig dels dos es mantindran els casos anòmals presents en molts laboratoris, associats probablement a desintegracions a tres cossos.

Si bé en la polèmica de les V neutres en cambres l'estadística abundant d'aquests esdeveniments afavoreix les anàlisis, en el cas de les V carregades detectades en les mateixes cambres hi ha la dificultat afegida de la poca abundància d'aquests esdeveniments. A finals del 1952, el grup de Caltech analitzarà 18 exemples de V carregades junt amb 134 exemples de V neutres. Al Pic du Midi el grup de Manchester detectarà, fins a gener de 1951, 43 traces V , de les quals 36 són neutres i 7 carregades. En aquests exemples, doncs, l'estadística serà de poca utilitat. Tanmateix, cap al 1953 ja es veurà clar que les traces de V^\pm de les cambres de boira, les κ i χ de les emulsions i les noves partícules S de la multilàmines del

MIT són diferents manifestacions d'un mateix tipus de fenomen: els mesons pesats carregats desintegrant-se en una única secundària visible. La primera classificació visual distingirà aquells casos en què la primària es para en l'emulsió (κ i χ) o en la multilàmines (partícules S) abans de desintegrar-se i aquells casos en què la primària es desintegra en vol en les cambres de boira (V^\pm).

Tot plegat farà que el 1953 els modes de les desintegracions V^\pm en cambres estiguin encara per determinar. El cas de les emulsions no és tan crític. A part del visualment ben definit τ , existeix el mode κ que té ben definida la natura muònica de la secundària i es mostra amb energies molt diferents, cosa que porta a pensar en una desintegració a tres cossos. A més, l'estadística ja intervé en definir el mode $\chi^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$, en la investigació en emulsions a Bristol de 60 casos de mesons pesats primaris que es desintegren donant una única secundària carregada. D'entre aquests casos s'identifiquen muons secundaris que s'associen al mode κ , però l'aparició de pions secundaris obliga a proposar una nova desintegració, i, com l'estadística és compatible amb una energia única d'aquesta secundària visible, s'afavoreix la desintegració a dos cossos χ .

A finals del 1953 la cambra multilàmines del MIT mostrarà com les seves partícules S i les V^\pm podrien identificar-se a través de l'energia i l'abast de les seves secundàries amb el mode χ de Bristol. Però, en realitat, aquesta identificació és encara fortament especulativa, i supeditada a l'anàlisi estadística dels moments i abastos de les secundàries. Lligat amb aquesta equivalència, la importància de l'augment de l'estadística i el tractament conjunt de les dades serà també evident quan la multilàmines del MIT i la doble cambra de l'EP accentuïn els esforços per distingir els modes $\kappa \rightarrow \mu + \pi^0 + \nu$ ($K_{\mu 3}$), $\eta \rightarrow \mu + \nu$ ($K_{\mu 2}$) i $\chi \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ($K_{\pi 2}$). La polèmica en aquest cas se centrarà en la representació i comparació estadística dels abastos de les secundàries visibles d'aquests modes. La comparació dels casos computats permetrà establir els diferents modes, més enllà de l'evidència visual concreta que, en aquest cas en què una primària carregada es desintegra en una única secundària visible, és de poca utilitat.

Un darrer esforç per augmentar l'estadística en raigs còsmics, centrat precisament en aquests mesons pesats carregats, provindrà del *G-stack*, en el qual s'obtidran 300 exemples més. La seva anàlisi afegirà molta informació als modes coneguts (τ , τ' , κ , χ , K_μ , K_β) i permetrà un acostament del valor de les masses, que cada cop sembla més clar que pertanyin a un únic mesó K. Aquest acostament evidenciarà, però, la dificultat d'identificar el mesó $\tau \rightarrow 3\pi$ amb el mesó $\theta \rightarrow 2\pi$. En aquest cas, el problema l'evidenciarà també un tipus d'anàlisi estadística: el *Dalitz Plot*. El *Dalitz Plot* permetrà visualitzar les característiques de spin i paritat per a la partícula τ , però necessitarà d'una estadística elevada que s'anirà acumulant en tot el període de descobriment.⁸⁹ La conclusió en el congrés de Pisa de l'any 1955 és que θ i τ no poden ésser la mateixa partícula. La solució final vindrà del món teòric,

⁸⁹Els gràfics es poden visualitzar a l'apèndix A, fig. A.30–A.33.

quan es proposi que es tracta de dos estats de diferent paritat de la mateixa partícula i, per tant, s'estableixi la violació de paritat per a les interaccions febles.

Més enllà d'estranyesa: interaccions i elementarietat

El descobriment de les partícules estranyes i la construcció del model d'estranyesa no sembla representar un descobriment excepcional, ni en el moment en què es produeix ni en el tractament que d'ell n'ha donat la història.⁹⁰ La justificació d'aquesta manca d'entusiasme en el moment del descobriment es pot entendre per diferents factors, com l'associació amb els fenòmens mesònics que centraven l'atenció de la física de raigs còsmics, o el llarg període de temps existent entre els primers descobriments i la inclusió final en un quadre teòric que els justificués. De fet, fóra difícil copsar que a partir del descobriment dels nous elements sorgiria el concepte de quark, que modificaria l'elementarietat de noves i velles partícules, la redefinició de les interaccions forta i feble entre partícules elementals, o la modificació de propietats bàsiques, com la violació de paritat de les interaccions febles. D'aquí també que la seva importància quedi diluïda en el marc més general que inclourà velles i noves partícules.

Si ens centrem en el període de descobriment, a finals de 1956 es percep la fragilitat en què es troba la teoria de les partícules elementals. En el 6è congrés Rochester (3–7 d'abril de 1956), Yang fa la següent analogia:

Our first and major puzzle was to reconcile copious production of strange particles with slow and rather peculiar decay. This problem has reached a temporary kind of solution in the theory of strangeness. Perhaps, using an analogy, one may say that we are at a stage corresponding to the finding of the duplexity of atomic spectra, but not yet at the point of the discovery of electron spin, and certainly not at the stage of Dirac's theory of the electron.⁹¹

L'acceptació d'estranyesa es fa amb plena consciència de les seves limitacions com a model de classificació. La nova simetria permet catalogar les partícules aparegudes en raigs còsmics i predir-ne de noves que els acceleradors confirmaran. Però estranyesa no revelarà l'element generador de la simetria observable ni explicarà la dinàmica de les interaccions de les noves partícules.

Respecte l'element generador, el concepte de quarks no es farà present fins al 1964, modificant el concepte d'elementarietat. De fet, abans de les partícules estranyes, protons, neutrons, electrons, pions i muons eren considerats elementals.⁹² Amb el caos provocat per

⁹⁰Pel que fa al tractament històric, el descobriment de les partícules estranyes haurà de competir amb un gran nombre de descobriments que hauran fet del segle XX el segle de la ciència i que faran molt ampli el camp d'aquesta investigació. Malgrat tot, ens remetem als arguments ja exposats en el pròleg sobre la manca d'interès històric en aquests descobriments.

⁹¹Yang (1956a), VIII-1.

⁹²Malgrat les primeres associacions dels neutrons com a compostos protó-electró i un corrent minoritari favorable als compostos [v. Fermi, Yang (1949)].

la presència dels nous elements, hem vist com la primera reacció teòrica intentava associar-los a compostos o mesclades sense gaire èxit. Malgrat tot, el 1952 encara es dubta de la seva elementarietat. Així, per exemple, en el 2n congrés Rochester (11–12 de gener de 1952) les contribucions referents a les noves partícules s'agrupen amb el nom de *Megalomorphs* (V , v , τ , κ). Per justificar aquesta designació, Oppenheimer explica:

At Chicago Fermi said he had become bored with the name “elementary particles.” So the above name has been coined suggesting something with vast structure. There is no sharp logical order in which these particles should be discussed.⁹³

Fermi, i d'altres partidaris com ell d'entendre les partícules com compostos, veuran flaquejar el seu argument amb la dificultat de combinar la idea d'estat ressonant dels nucleons per a les noves partícules amb la seva relativament llarga vida i la varietat d'esdeveniments que no sempre es desintegren en nucleons. Curiosament, a mesura que l'assignació d'isospín es va imposant es van afermant com a partícules elementals. Quan el mateix 1952, Fermi descobreix la primera ressonància, no imagina que està contribuint en aquesta aplicació d'isospín als nous elements.⁹⁴ És a dir, malgrat en l'imaginari col·lectiu l'elementarietat d'unes i altres no sigui exactament equivalent, a efectes del model de $SU(3)$ que les modelitza sí que ho seran. Tota aquesta dissertació perd rellevància quan precisament la classificació anterior culmina en la idea de quarks, nou nivell d'elementarietat que permetrà entendre també a un nivell més profund les interaccions entre aquestes partícules.⁹⁵ Les partícules estranyes, doncs, contribuiran decisivament a redefinir el món de les partícules elementals i, també, el de les interaccions que les involucren.

D'entrada, el protagonisme de les lleis de conservació, per manca d'una teoria completa, portarà a descriure les interaccions en termes de simetries fenomenològicament comprovables. Les quantitats associades —com isospín, estranyesa o paritat— revelaran que algunes d'aquestes simetries són més absolutes que d'altres respecte al tipus d'interaccions a què s'apliquen. Aquest relativisme indueix una classificació jeràrquica de les interaccions:

The interactions amongst elementary particles seem also to have a natural classification. There are three types:

(i) The strong interactions, confined to baryons, antibaryons, and mesons. These are responsible for nuclear forces and the production of mesons and hyperons in high energy nuclear collisions.

(ii) The electromagnetic interaction, through which the photon is linked to all charged particles, real or virtual.

(iii) The weak interactions, responsible for β -decay, the slow decays of hyperons and K -particles, the absorption of negative muons in matter, and the decay of the muon.⁹⁶

⁹³Oppenheimer (1952a), 50.

⁹⁴Cal notar que, realment, el descobriment de la primera ressonància obre el camí a descobrir-ne d'altres, que es faran esperar fins els 60, i que finalment no es distingiran de les velles partícules ni de les partícules estranyes, i s'agruparan en multiplets equivalents d'hadrons.

⁹⁵Sobre aquesta polèmica vegeu la discussió a París (1982), 160–2.

⁹⁶Gell-Mann (1956b), 849.

De bon principi s'esperaria que les lleis de conservació formulades sobre les interaccions tinguessin caràcter absolut: conservació de la càrrega elèctrica, del nombre bariònic, del moment angular, de la paritat... Amb isospín aquesta percepció es modificarà. La nova quantitat vectorial no es conservava per a les interaccions electromagnètiques i les febles. A partir d'isospín es formularà la conservació d'estranyesa, que tampoc es mostrarà com una llei absoluta. De nou, sols les interaccions fortes semblen conservar perfectament el nombre quàntic escalar estrany. Finalment, també com una conseqüència dels nous descobriments, en particular dels kaons, fins i tot la conservació de la paritat, simetria que semblava absoluta des del nivell més bàsic del sentit comú, serà violada per les interaccions febles.⁹⁷ La jerarquia, doncs, s'estableix en funció de la permissibilitat de les interaccions per violar les diferents conservacions: les interaccions fortes seran les menys permissives, seguides per l'electromagnetisme, i finalment per les interaccions febles, que es mostren com les més permissives pel que fa a violació de lleis de conservació.

En la jerarquitització anterior de les interaccions hem vist com les partícules estranyes hi apareixen al mateix nivell que les velles partícules. Inevitablement, el fet que les noves partícules participessin d'una interacció forta en la producció i una interacció feble en les seves desintegracions comporta una redefinició d'aquestes interaccions. De fet, en realitat hauríem de parlar de definició, perquè la nomenclatura forta i feble s'origina durant aquesta etapa. Acompanyant aquesta definició s'intentarà l'ampliació cap a la perseguida formulació en teoria quàntica de camps que expliqui la dinàmica dels fenòmens, més enllà de les simetries evidents. El model exitós de QED per descriure els fenòmens que involucraven la interacció electromagnètica, ja feia molt temps que pressionava aquest tipus de formulació per a les altres interaccions. Ara, amb el coneixement de nous fenòmens que involucraven les partícules estranyes, una teoria completa de les interaccions feble i forta és més factible.

Respecte les interaccions febles, abans del descobriment de les partícules estranyes el seu coneixement es reduïa a la desintegració β i la cascada de desintegració $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$. Ja en aquest moment s'intenta unificar tots els fenòmens que semblen participar d'una interacció similar a la descrita per Fermi per a la desintegració β . Una primera idea d'ampliació la proposa Bruno Pontecorvo el 1947, davant dels recents resultats dels "mesons" de raigs còsmics (π i μ):

We assume that this is significant and wish to discuss the possibility of a fundamental analogy between β -processes and processes of emission or absorption of charged mesons."⁹⁸

Aquesta "Interacció Universal de Fermi" la representa G. Puppi el 1948 de forma molt

⁹⁷Aquest no és tampoc el final de la història de la conservació o violació de lleis físiques. Aviat es va mostrar com les interaccions febles també violaven conjugació de càrrega i per restaurar un cert ordre es va considerar la inversió conjunta CP . El 1964, però, CP es mostra violada precisament a partir del sistema (K^0 , \bar{K}^0). Consideracions sobre invariàncies superiors porten a la noció unificada amb el teorema CPT .

⁹⁸Pontecorvo (1947), 246.

gràfica. Un triangle permet visualitzar les interaccions a quatre fermions conegudes suposant la universalitat de la força (feble) que entre ells actua.⁹⁹

Quan Puppi proposa la seva representació triangular el 1948 té en ment que la constant d'acoblament de la interacció β és del mateix ordre que la de la desintegració i captura del muó. Amb l'aparició de les partícules estranyes, aquestes similituds també es mostren en els seus processos de desintegració:

It is surely remarkable that all the weak processes have the same strength, and it is probably significant. Nature is trying hard to tell us something, but so far we have been unable to decipher the message.¹⁰⁰

M. Gell-Mann i A. H. Rosenfeld (1957) proposaran l'ampliació del triangle de Puppi per tal que inclogui els nous elements. La figura adequada serà un tetràedre que contindrà els parells addicionals de barions estranys.¹⁰¹

Però l'aparició de les partícules estranyes portarà també a la violació de paritat de les interaccions febles que, junt amb la detecció del neutrí (1956), determinarà la “teoria V-A”:

The possibility of a universal four-fermion interaction has been reexamined in the light of the recent experimental results on the nonconservation of parity and charge conjugation in weak interactions. From measurements on beta, muon, pion and kaon decay and the assumptions of the two-component neutrino and the law of conservation of leptons, it is concluded that the only possible universal four-fermion interaction is an equal admixture of vector plus axial vector interaction.¹⁰²

Les partícules estranyes hauran contribuït, doncs, a la definició i ampliació d'una interacció feble de les partícules fonamentals.

Respecte de les interaccions fortes, les noves partícules participaran d'elles a través dels processos de producció i, més enllà de consideracions sobre conservació d'isospín, mouran a la construcció d'una teoria més general que l'aproximada interacció nuclear amb els pions com a mediadors. Les primeres temptatives intenten construir el lagrangiana que descriu la interacció forta entre les noves partícules. Però el problema més evident és l'arbitrarietat en les constants d'acoblament associades.¹⁰³ Per eliminar aquesta arbitrarietat, o si més no donar-li un cert significat físic, Schwinger (1956) i Gell-Mann (1957) fan un intent de “simetria global”. Algunes evidències, en especial de fotoproducció de mesons K , semblen mostrar

⁹⁹Vegeu apèndix A, fig. A.50. Els costats del triangle representaven les interaccions entre les partícules dels vèrtexs que unien. En la cara C la desintegració β , responsable dels processos: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ (desintegració β^- del neutró lliure o d'un neutró en un nucli), $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ (desintegració β^+ d'un protó en un nucli), $e^- + p \rightarrow n + \nu$ (captura d'un electró en un nucli) i $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ (detecció de l'antineutrí). En la cara D es representava la interacció anàloga a la desintegració β , però amb l'electró reemplaçat pel muó. Finalment la cara E indicava la desintegració muònica.

¹⁰⁰Gell-Mann, Rosenbaum (1957), 80.

¹⁰¹Vegeu apèndix A, fig. A.51.

¹⁰²Sudarshan, Marshak (1957), 118.

¹⁰³El suposat lagrangiana de la interacció forta es creia que consistia en acoblaments mesònics pseudoescalars (π , K , \bar{K}), amb vuit acoblaments diferents (g_1, \dots, g_8) per als vuit barions (p , n , Λ , Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Ξ^0 , Ξ^-) i els set mesons (π^+ , π^0 , π^- , K^+ , K^0 , \bar{K}^0 , K^-).

que l'acoblament fort entre barions és un ordre de magnitud menor que l'acoblament fort de pions amb nucleons. Aquest fet es pot interpretar considerant dues classes d'acoblements forts: el *MS* (*Medium Strong*) i el *VS* (*Very Strong*), i la idea és fer una analogia amb l'acoblament electromagnètic i l'acoblament fort, respectivament. La conservació d'isospín de la interacció forta ha permès classificar les partícules que la pateixen en multiplets. Quan actua l'electromagnetisme, aquesta simetria es trenca revelant els membres individuals dels multiplets (els diferents estats de càrrega). L'analogia consisteix en suposar que les interaccions *VS* tindrien una simetria superior que seria violada per les *MS*. Quan les *MS* actuen es revelarien els diferents multiplets bariònics (els diferents estats d'estranyesa o hipercàrrega). Per tant, tots els barions coneguts formarien part d'un supermultiplet que es desplegaria en els diferents multiplets coneguts (N , Λ , Σ , Ξ) quan actués la interacció *MS*.

Aquesta globalització perseguiria simplificar el nombre de constants d'acoblament involucrades en la descripció dinàmica de la interacció entre hadrons:

It is now very tempting to say that the pion couplings are *VS* and the *K*-particle couplings *MS*. All the baryons are symmetrically coupled to the pion field with a coupling constant ~ 15 . The *K* particles couplings are weaker and less symmetric in the baryons although still charge independent.¹⁰⁴

Malgrat que les evidències experimentals mostraran com la suposició respecte les constants d'acoblament de π i *K* eren incorrectes, la idea de globalització seguirà endavant.¹⁰⁵

The aim is to lump together more baryons, or mesons, than had already been grouped by isospin alone. If the symmetry were exactly valid then all particles in a given representation would have the same mass. This show that the higher symmetry is necessarily a broken symetry. That was not new, as witness isospin broken by electromagnetism. In the case of higher symmetry, the breaking must be due to another, stronger, cause, however.¹⁰⁶

Aquest intent de simetria aproximada per als hadrons es concretava en una àlgebra $SO(4)$, equivalent a $SU(2) \times SU(2)$. Però la simetria correcta, en forma d'un octet de $SU(3)$, no apareixerà fins el 1961, a través de formulacions independents de Gell-Mann, Ne'eman,

¹⁰⁴Gell-Mann (1957, 1299) concreta que la teoria porta a una fórmula per a les masses de l'octet de barions incorrecta:

If the mass differences are calculated in the lowest order of the *MS* couplings, it is found that $(m_N + m_\Xi)/2 = (3m_\Sigma + m_\Lambda)/4$. Experimentally, the first quantity is about 190 Mev above the nucleon mass, while the second is about 235 Mev above it. This discrepancy may be small enough to account for by higher order effects, even with *MS* coupling constants of the order of unity.

¹⁰⁵Vegeu cap. 6, sec. 6.2.3, en particular la predicció de la Ω^- , i sec. 6.3, en especial la reaparició dels models de compostos i l'intent de D'Espagnat i Prentki de fonamentar la teoria de Gell-Mann amb un lagrangiana de les interaccions fortes.

¹⁰⁶Pais (1986), 555.

Speiser i Tarski, que es coneixeran com l'*Eightfold Way*.¹⁰⁷ Finalment, el 1964, el model de quarks donarà significat físic a les regularitats introduïdes amb SU(3), donarà els candidats a generadors de les velles i noves simetries, i assentarà les bases per descriure les interaccions a un nivell més fonamental de quarks i leptons.

¹⁰⁷El primer èxit serà la classificació de l'octet de barions en un hexàgon amb $J^P = (1/2)^+$. En aquest cas concret, la fórmula de masses, coneguda com “regla de Gell-Mann–Okubo”, es mostrarà amb un alt grau d'exactitud:

$$(m_N + m_\Xi) = (3m_\Lambda + m_\Sigma)/2$$

Conclusions

El descobriment de les partícules estranyes i la concreció del model d'estranyesa, que permet avançar cap el model de quarks, ha estat poc tractat pels historiadors de la física, els quals han centrat els seus esforços en d'altres fites importants que competeixen en temps i espais amb el descobriment d'aquestes partícules: l'assentament de la QED, el descobriment del pió i la seva relació amb les forces nuclears, l'escalada energètica dels acceleradors... La historiografia parla copiosament del desenvolupament de la física nuclear en les dècades 30 i 40, del treball en els laboratoris i de l'estudi de la natura dels raigs còsmics. A partir d'aquí, però, es passa a la *Big Science*, al treball als grans acceleradors que en un primer moment s'inscriuen a la recerca nuclear i, tot seguit, a la física de partícules.¹⁰⁸

Aquesta tesi pretén començar a omplir aquest buit. L'estudi que ens ocupa, en ell mateix, ofereix a la història de la ciència un exemple de procés microhistòric de descobriments múltiples, mancats de predicció teòrica i que abasten una dècada sencera (1947-1957). Però més enllà de la seva singularitat, el procés de descobriment i teorització de les partícules estranyes pot servir de pont per entendre la transició dels laboratoris de radioactivitat i física nuclear del període d'entreguerres als laboratoris organitzats al voltant dels grans acceleradors, o la transició de la física nuclear a la física de partícules. És per tot això que creiem que no es pot menystenir la seva contribució i així ho pretenem reflectir en les conclusions que presentem a continuació.

L'estudi del descobriment de les partícules estranyes ajuda a entendre la transformació en la pràctica i organització de la física a mitjan segle XX.

En l'origen dels descobriments trobem uns grups, amb pressupostos reduïts, que pugen cambres de boira al Pic-du-Midi (EP), envolten avions amb emulsions (Caltech) o es desplacen al Mediterrani per enlairar globus amb un gran bloc de làmines d'emulsió (grups britànics i italians), però que ja el 1953 senten la pressió de les possibilitats del treball als

¹⁰⁸Pickering (1984, ix) proposa que després de la Segona Guerra Mundial el descobriment d'altres partícules més enllà de protó, neutró i electró fa néixer una nova especialitat: "The new speciality was known either as elementary-particle physics, after its subject matter, or as high-energy physics (HEP), after its primary experimental tool —the high-energy particle accelerator."

acceleradors americans de Berkeley i Brookhaven,¹⁰⁹ als quals aplicaran les seves cambres i emulsions fins que, a finals dels 50, nous detectors els tornin obsolets.

També és característic de la nova forma de fer ciència l'augment de les col·laboracions entre diferents grups i l'augment del nombre d'autors dels articles, per la creixent especialització dels científics que involucren els experiments i la complexificació dels mateixos.¹¹⁰ L'analisi dels congressos i revistes inclosos en la base de dades ens ho confirma, i ens permet comprovar com, al final, aquest treball conjunt convergeix al voltant dels acceleradors i es va desplaçant del vell continent cap als EUA.¹¹¹

Finalment, la transició de la física nuclear a una física de partícules s'intueix també a través de la classificació de les noves partícules en revistes, *Proceedings* de l'APS o participacions a congressos, que mostren com apareix progressivament el terme *Elementary Particles*, deslligat de *Cosmic Rays* o *Nuclear Reactions* i, curiosament, es comença a parlar d'*Elementary Particle Interactions* a mitjan 1953, i ja el 1954 apareix en el congrés de Glasgow la terminologia *High Energy Experimental Technique*,¹¹² molt abans del final de la dècada que marcarà el domini dels acceleradors i l'inici de la *Big Science*¹¹³ (Pròleg, Epíleg i Apèndix B).

Perquè les evidències de noves partícules assoleixin el nivell de descobriment cal vèncer dos esculls clars: la dificultat per reproduir el fenomen i la manca de predicció teòrica.

De bon principi, la reproductibilitat del fenomen es beneficia de la forma visual de les traces en forma de V invertida descobertes el 1947. Els exemples previs mostraven una sola traça difícil de distingir del fons de traces de raigs còsmics, i sols consideracions posteriors sobre la massa de la partícula n'inferien la novetat. Mentre l'evidència no fos concloent, doncs, el més raonable era explicar aquestes desviacions de la massa de mesons o protons com imprecisions experimentals. Les evidències sorgeixen en investigacions centrades en aquests "vells mesons", per tant en els mateixos instruments de detecció, la mateixa metodologia experimental, compartint les interaccions nuclears en què es creen, i desintegrant-se en aquests mesons menys pesats. No és estrany, doncs, que la manca d'un marc teòric propi

¹⁰⁹Val la pena recordar la cita de Leprince-Ringuet (1953a, 287) al congrés de Bagnères: "Mais, nous devons aller vite, nous devons courir sans ralentir notre cadence: nous sommes poursuivis... nous sommes poursuivis par les machines!"

¹¹⁰Galison (1997, 306) afirma que es produeix una redefinició de què vol dir ser físic. Els nous físics d'altres energies ja no seran físics teòrics i experimentals alhora. En lloc del físic artesà sorgeix una associació entre físics teòrics, experimentals, enginyers d'acceleradors, d'estructures i de sistemes elèctrics.

¹¹¹Aquest punt ja ha estat tractat per altres historiadors. En concret Kragh (1999, preface) parla de la transició d'una ciència en origen europea al domini dels físics americans, tot i que reconeix que l'estudi pot estar esbiaixat pel predomini d'historiadors americans.

¹¹²Vegeu l'apèndix B, p. 338 i p. 342.

¹¹³Pickering (1984, 21) generalitza aquesta situació dient que "HEP has always been Big Science", i que "HEP emerged as a recognisable scientific specialty shortly after the end of World War II and, with Europe devastated, the USA quickly took the lead."

que les predigui propiciï la idea que la teoria de mesons ha d'incloure-les. A partir del 1950, quan el fenomen es confirma, la seva reproductibilitat iniciarà l'observació de pautes de comportament comunes que permetran les primeres classificacions i mostraran la dificultat per explicar la llarga vida, amb un temps típic d'una interacció feble, i la producció abundant, amb seccions eficaces típiques de les interaccions nuclears (fortes). Els nous fenòmens es van deslligant de la teoria de mesons i comencen a analitzar-se independentment. És impossible que en aquest moment s'entrevegi la importància final del descobriment, l'aparició d'un nou sabor (estraný) i l'ampliació i definició de les interaccions forta i feble.

Malgrat tot, l'any 1947 es considera l'any del descobriment de les partícules estranyes. Aquest treball ens ha permès veure que en aquest moment encara queda un llarg camí per recórrer, tant teòric com experimental. Tenim, doncs, un clar exemple de com el relat històric es tendeix a simplificar en moments puntuals de fites teòriques i experimentals.¹¹⁴ En realitat, estem davant d'un procés molt complex, dilatat en el temps i amb diferents interaccions teoria i experiment que van configurant el producte final i un relat adjunt coherent que no reflecteix les dificultats del procés de descobriment (Capítol 1 i Epíleg).

L'adquisició del coneixement científic de les partícules estranyes es vertebrava a través de la interacció entre grups o institucions amb diferents compromisos metodològics. Aquesta interacció de vegades adopta forma de polèmica i d'altres, de col·laboració.

Les polèmiques.

En tot el procés de descobriment els diferents grups competeixen pel reconeixement a les seves investigacions. Aquesta competència està sovint relacionada amb diferents mètodes de detecció o dispositius experimentals.

De bon principi, la tensió es produirà entre l'EP i Manchester, de fet entre un cap de l'EP amb prestigi, com és Leprince-Ringuet, i uns, menys coneguts, Rochester i Butler que treballen a Manchester. A través dels congressos es pot veure com la comunitat va atribuint un pes diferent a les evidències en funció dels nous resultats obtinguts, però també de la capacitat de difusió dels mateixos. Quan el 1950 Caltech confirma els resultats de traces forcades de Manchester, la importància d'aquests *golden events*¹¹⁵ clou aquesta tensió EP-Manchester en favor de Manchester. Manchester i Caltech definiran la nova nomenclatura en partícules V per descriure les seves traces forcades i posaran la tècnica de la cambra de boira en primera línia. En la correspondència entre Blackett i Anderson es constata la tensió per diferenciar les traces forcades de la resta d'evidències, ara considerades poc fiables, i la negativa a utilitzar les lletres gregues, originàries del treball amb emulsions. La

¹¹⁴En el mateix sentit que afirma Roqué (1997, 115) "By so doing, these accounts belied that this coherence had taken time and effort to build up." En aquest cas fent referència als primers articles sobre el descobriment del positró.

¹¹⁵Segons definició de Galison (1997, 23).

tensió, doncs, transcendeix el nivell institucional i es converteix en una competència entre mètodes de detecció (cambres de boira-emulsions).

Posteriorment, els grups que treballen amb cambres remodelen els seus muntatges per aturar els mesons pesats més energètics que les emulsions detecten més fàcilment. El resultat d'aquesta nova tensió és l'aparició de la multilàmines del MIT i la doble cambra de l'EP, que les converteix en protagonistes per davant dels altres grups que treballen amb cambres i, al mateix temps, obliga els grups que treballen amb emulsions a intentar millorar l'estadística d'esdeveniments organitzant expedicions en les quals s'envolen grans blocs d'emulsions. La pressió és tal que les dimensions del bloc s'adeqüen per poder aturar mesons pesats amb la mateixa longitud de traça que la detectada en els experiments al MIT i a l'EP.

Els grups que treballen amb emulsions senten la pressió de les millores en cambres de boira. Tanmateix, uns i altres senten una pressió major respecte la font de detecció de noves partícules. A partir del 1953, els *cosmicciens* veuen l'arribada dels acceleradors que aconseguen treballar en el rang dels GeV, i que prometen una major estadística i control dels experiments que el que poden oferir els raigs còsmics.

Les col·laboracions.

Les col·laboracions que repercutiran en el descobriment de les partícules estranyes, es poden remuntar a la dècada dels trenta, quan les millores en els muntatges experimentals permetran avançar en el coneixement dels raigs còsmics. Així neixen les cambres controlades per comptadors, dels esforços conjunts de Blackett i Occhialini; Rossi, abans d'establir-se al MIT, col·laborarà amb Blackett i Jánossy a Manchester; Brode, des de Berkeley, també anirà a Londres per aprendre de Blackett la tècnica de la cambra de boira. . . Ja en el període que ens ocupa, R. W. Thompson, abans d'establir-se a la Universitat d'Indiana, treballarà amb Rossi; Anderson i Blackett col·laboraran per establir la nomenclatura en partícules V; Fretter, de Berkeley, anirà a l'EP; Grégory i Peyrou, de l'EP, col·laboraran amb el MIT en el descobriment de les partícules S. . . Però les col·laboracions també es donen a nivell institucional. A Europa, seran bàsiques les associacions de Bristol amb altres grups, especialment italians, que entre 1952 i 1954 treballaran en les grans expedicions amb emulsions. A partir del 1955, s'incrementarà el treball entre grups al voltant dels acceleradors de Berkeley i Brookhaven, i cal recordar, també, les col·laboracions entre vells *cosmicciens* i la nova font, on els vells detectors faran de fitons als feixos controlables de les màquines.

En l'àmbit teòric cal destacar la col·laboració entre Pais i Gell-Mann. La seva tasca conjunta trencarà la tensió amb els experimentals, avesats a analitzar traces en els seus detectors, i els teòrics, que parlen de conceptes més abstractes. La difusió conjunta de producció associada i model d'estranyesa permetrà que els experimentals col·laborin en determinar les reaccions i partícules predites per aquests models.

Els congressos començaran a prendre molta importància en aquesta època com a espais de participació i col·laboració. Seran un medi de comunicació molt més flexible i immediat que les revistes. En aquests congressos s'exposen i discuteixen els resultats, però també l'adquisició d'una metodologia de treball i una nomenclatura comunes que permeten fer sumatives les evidències de diferents grups i tècniques. És també als congressos que es percep la supremacia d'alguns grups de recerca en la investigació de les partícules estranyes i els caps que les guien: Leprince-Ringuet a l'EP, Blackett a Manchester, Anderson a Caltech, Powell a Bristol, Rossi al MIT, Thompson a Indiana... (Epíleg i Apèndix B).

La construcció del model d'estranyesa deriva del creixent coneixement experimental sobre les noves partícules, però també de la implantació més general d'una descripció teòrica més fenomenològica, lligada a simetries, resultat de la dificultat per descriure en teoria quàntica de camps les interaccions nuclears (fortes).

Les primeres hipòtesis teòriques referents a les noves partícules es manlleven de les teories mesòniques vigents. A mesura que experimentalment el nou camp va prenent forma pròpia, i augmenta la complexitat d'esdeveniments, no basten les especulacions anteriors i es va definint un marc propi per descriure-les. Les noves partícules es mostren de formes molt diferents en cambres i emulsions, però comparteixen dues propietats comunes aparentment irreconciliables: es produeixen en interaccions nuclears (fortes), però un cop creades semblen mostrar una interacció més aviat feble amb la matèria de les cambres i emulsions, i es manifesten amb llargues traces que indiquen una vida massa llarga per associar-la a processos d'interacció forta. El marc teòric, doncs, se centrarà en explicar aquestes propietats. La hipòtesi de la producció associada serà la que anirà guanyant protagonisme des del 1951. El 1952 es revaloritzarà la simetria d'isospín en interpretar la dispersió de pions com l'existència d'estats isobàrics dels nucleons fonamentals, en llenguatge actual ressonàncies. En aquest moment, més important que el descobriment de la ressonància serà l'ús de la conservació d'isospín per a les interaccions fortes, conseqüència de la independència de càrrega d'aquestes interaccions. Si isospín serveix per caracteritzar les interaccions entre pions i nucleons, el pas següent serà aplicar-lo a les noves partícules, que experimentalment s'observa com participen d'aquestes interaccions amb pions i nucleons. L'assignació correcta d'isospín a les noves partícules s'aconseguirà quan es combini la seva conservació en les reaccions de producció (fortes) amb la necessitat que no es conservi en les seves reaccions de desintegració (febles) i es vegi, també, la necessitat d'evitar la desintegració electromagnètica, més ràpida que la desintegració feble observada experimentalment. Nishijima i Gell-Mann aconseguiran arribar a l'assignació correcta. Aquest últim aconseguirà també guiar els experimentals a la recerca de noves partícules i reaccions predites a partir del model, que es confirmaran en els acceleradors, i desbancar el model de producció en parelles de Pais que s'havia imposat (Capítols 2, 4 i 6).

L'atribució de l'autoria del descobriment del model d'estranyesa a M. Gell-Mann no respon únicament a factors intrínsecament científics de construcció d'un model correcte, sinó que també hi intervenen altres factors, com trobar-se en el focus d'investigació, una bona relació amb els experimentals i una millor divulgació de les seves idees.

M. Gell-Mann treballa als EUA, té bons contactes amb els experimentals, col·labora amb A. Pais, la producció associada del qual és en primera línia per explicar les noves partícules, participa en els congressos i hi exposa les seves idees. La divulgació d'aquestes idees mou als experimentals a detectar les seves prediccions (Σ^0 i Ξ^0) i les reaccions permeses per la seva teoria, més restrictives que les reaccions de producció associada de Pais que els experimentals ja fa temps que investiguen. D'afegit, el 1955 Gell-Mann proposarà el nom d'estranyesa per descriure la propietat que presenten les noves partícules estranyes i, a partir d'aquí, la seva producció d'articles sobre el tema segueix augmentant. Tot això permet entendre que majoritàriament se li hagi atribuït l'autoria del model d'estranyesa.¹¹⁶ Ara bé, cal notar que si atenem únicament a la construcció del model correcte, K. Nishijima sembla avançar-se en la idea de reagrupar les partícules segons la seva estranyesa ja que, encara que amb el nom d' η , dóna la llei correcta $q=I_3 + 1/2 b + 1/2 \eta$ en un article del 13 de juliol de 1954. Aquest dia coincideix amb el començament del congrés de Glasgow (13–17 de juliol de 1954), en el qual Gell-Mann i Pais exposen les seves idees, encara obscures pel que fa a la simetria última que descriu les noves partícules. No serà fins el congrés de Pisa (12–18 de juny de 1955) que Gell-Mann explicitarà la llei ($q=I_3 + \frac{B+S}{2}$) i donarà el nom d'estranyesa que s'imposarà. És plausible pensar que fins a la definició d'estranyesa com la propietat que manifesten les partícules estranyes, que fa Gell-Mann en aquest congrés, aquesta denominació no serà definitivament acceptada (Capítol 6, Epíleg i Apèndix B).

¹¹⁶Com explica Krige (2001, 517) en el context de descobriment del bosó W: “Particular attention is paid to the role of trust, and of distrust, in the directorate’s planning of the experimental program and in their interpretation and promotion of its first results.”

Apèndix A

IL·LUSTRACIONS

A.1 Esdeveniments de partícules estranyes

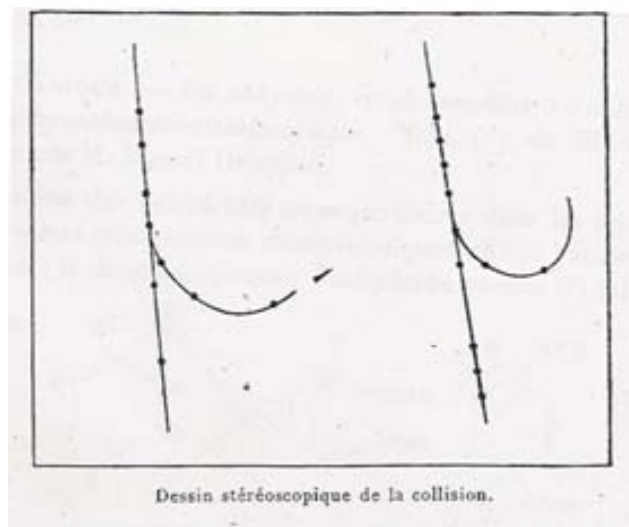


Figura A.1: (1944) Dibuix estereoscòpic de la col·lisió d'un electró amb un mesó pesat. La fórmula de la col·lisió elàstica dona per a la primària positiva una massa en repòs $990 \pm 12\%$. Primer exemple proposat per Leprince-Ringuet d'una nova partícula en la radiació còsmica.

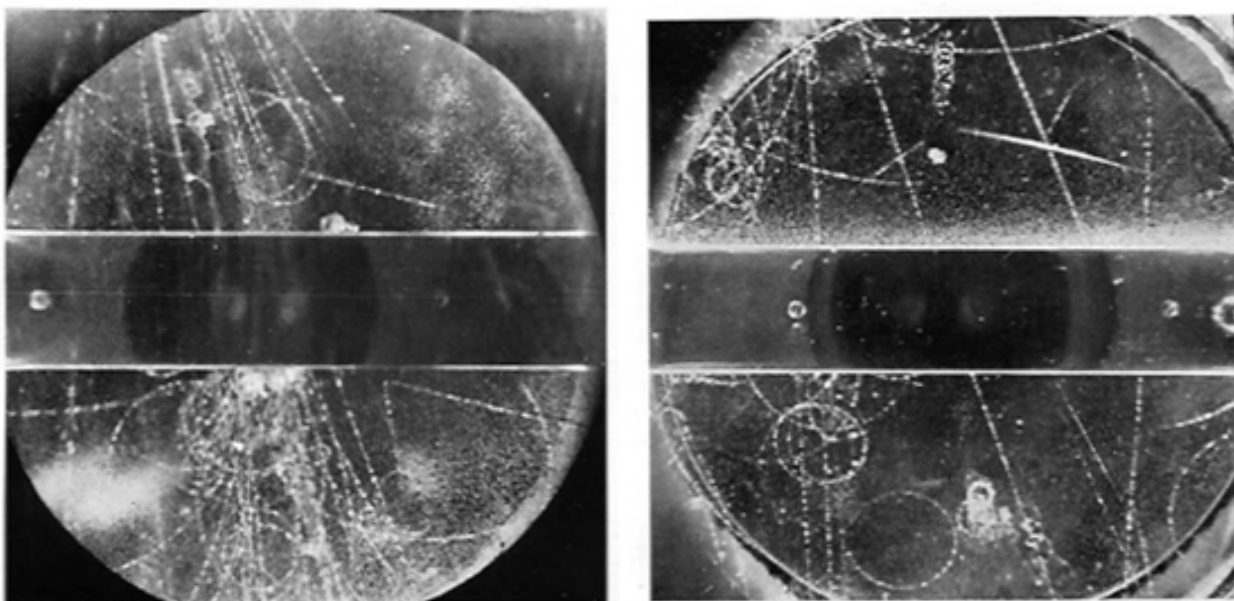


Figura A.2: (1947) Les dues primeres desintegracions V: (a) $V^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (a baix a la dreta) i (b) $V^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ (a dalt a la dreta), trobades per Rochester i Butler a Manchester en cambra de boira.

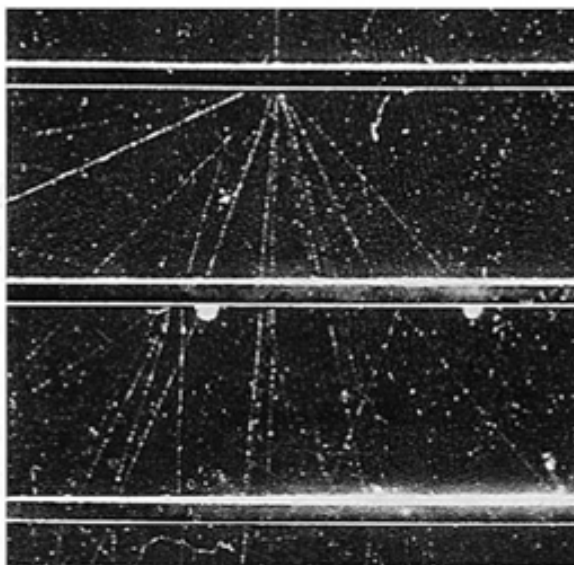


Figura A.3: Exemple de col·lisió nuclear d'alta energia en la qual es revela la presència d'una 'V' neutra desintegrant-se en dues carregades (a dalt a l'esquerra). A principis dels 50, aquest tipus de negatius mostrava que realment les noves partícules es creaven a través d'interaccions nuclears fortes.

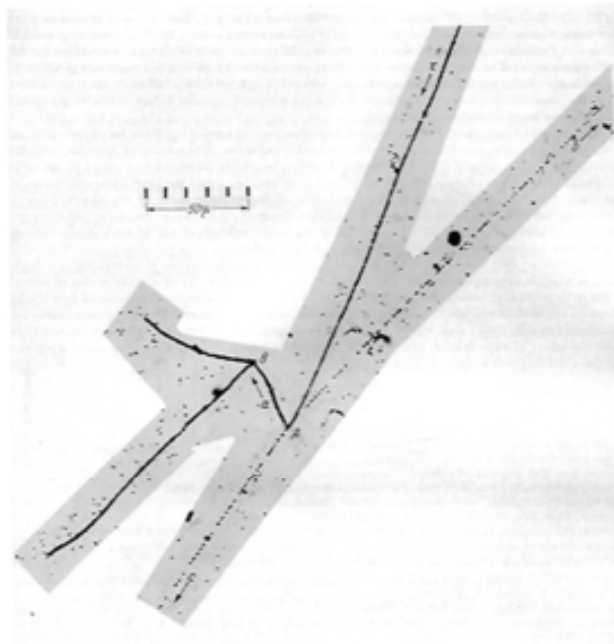


Figura A.4: (1949) Primer esdeveniment τ ($K_{\pi_3} \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$) trobat per Brown, del grup d'emulsions de Bristol. És la traça designada com τ (a dalt a la dreta), que es para a l'emulsió en el punt A i emet un π^- lent, que intervé en una desintegració nuclear al punt B amb emissió de dos protons. Les altres dues secundàries s'identifiquen amb dos π^+ més ràpids, que s'escapen de l'emulsió.

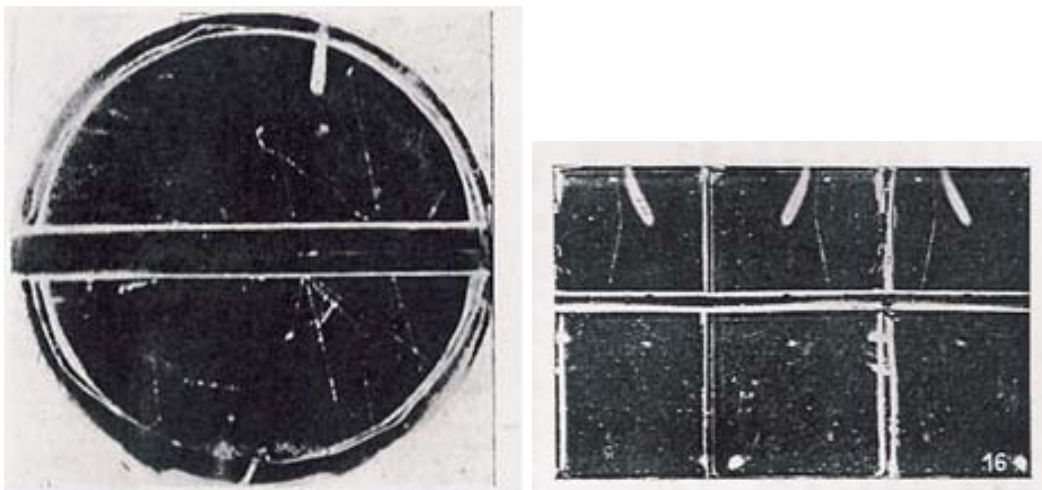


Figura A.5: Possibles exemples de *forked tracks* en negatius previs a Rochester i Butler (1947).

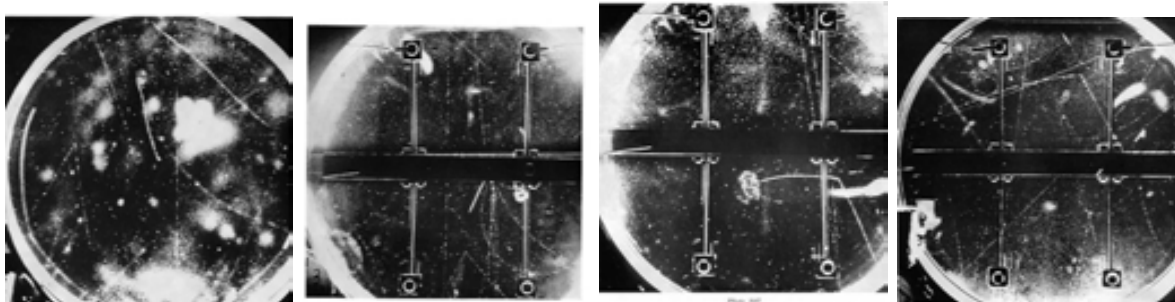


Figura A.6: (1950) Alguns dels negatius trobats pel grup del Caltech i no publicats que mostren la confirmació de les *forked tracks* de Manchester (1947).

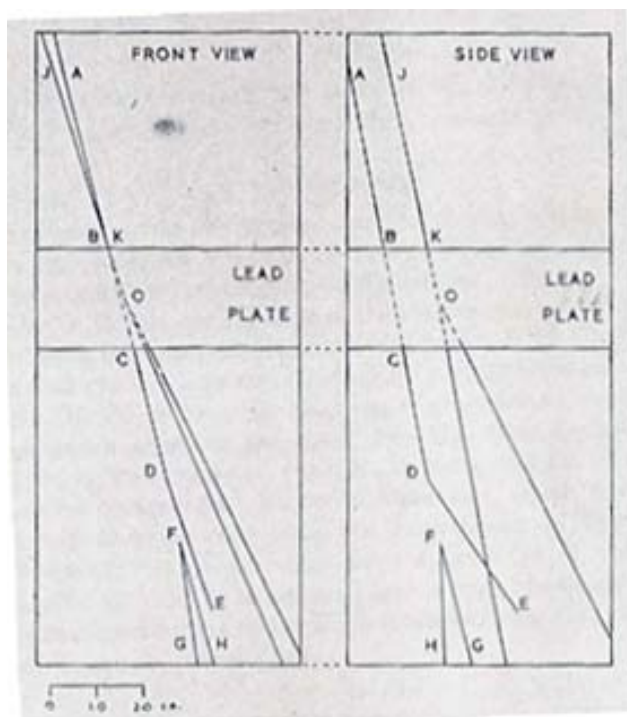


Figura A.7: (1950) Primer esdeveniment Ξ^- (o partícula cascada), descobert pel grup de Manchester al Pic du Midi en cambra de boira.

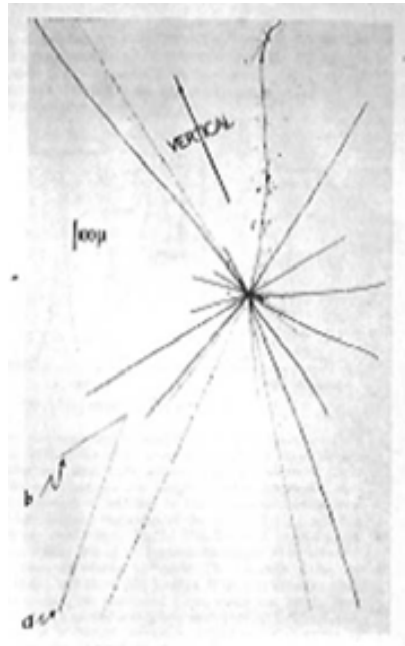


Figura A.8: (1950) Cas atípic de partícula $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ detectat en emulsió. Per primer cop s'identifiquen alhora les dues secundàries de la desintegració. El pla de la partícula V no coincideix amb el centre de la gran estrella. Per tant, es tracta de dos esdeveniments independents. La traça a correspon al mesó (π o μ) i la traça b al protó.

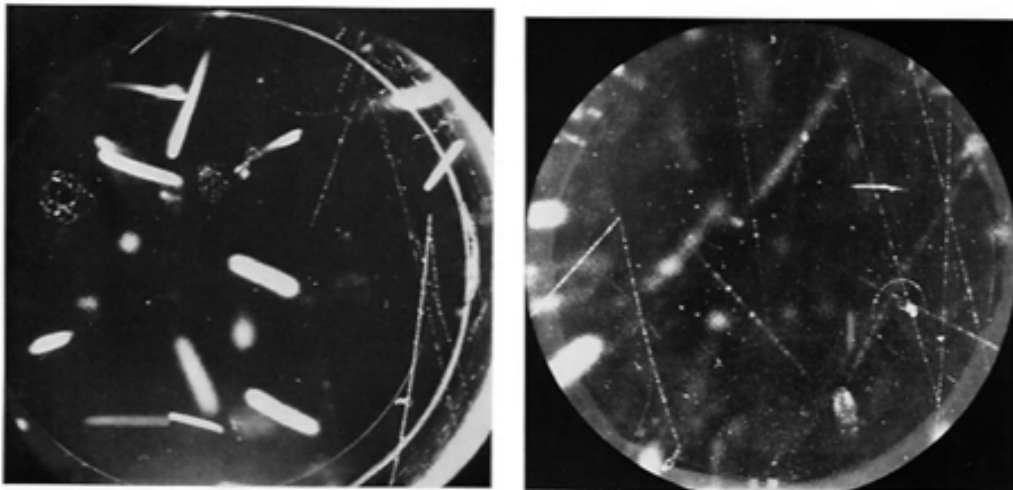


Figura A.9: (1951) Dos dels 4 primers exemples de partícula $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ trobats pel grup de Manchester al Pic du Midi en cambra de boira. S'identifiquen per la detecció clara del protó secundari, fortament ionitzant, en front de possibles pions.

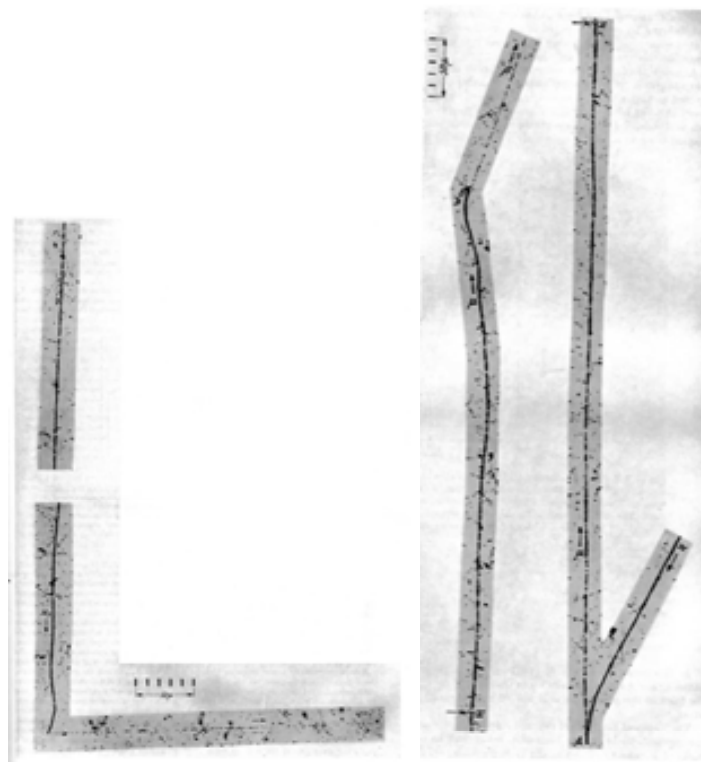


Figura A.10: (1951) O'Ceallaigh, de Bristol i del treball en emulsió, dóna les primeres evidències d'un muó secundari procedent de la desintegració d'un mesó pesat. Probablement ambdós casos corresponen a la desintegració $\kappa \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu$ (posteriorment $K_{\mu 3}^+$), tot i que no es pot descartar que el primer cas correspongui a un $K_{\mu 2}^+$ ($\eta \rightarrow \mu^+ + \nu$).

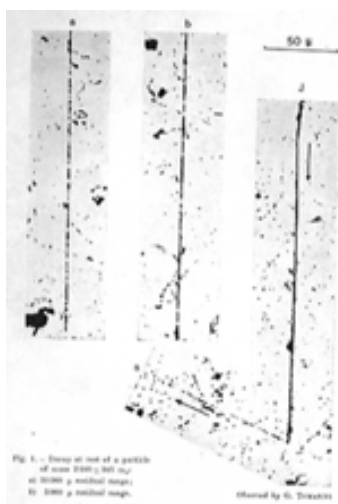


Figura A.11: (1953) Primer $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$ trobat en emulsió pels grups de Gènova i Milà. La traça està dividida en tres parts, en l'última (a la dreta) apareix el nom J i la secundària piónica visible (a baix).

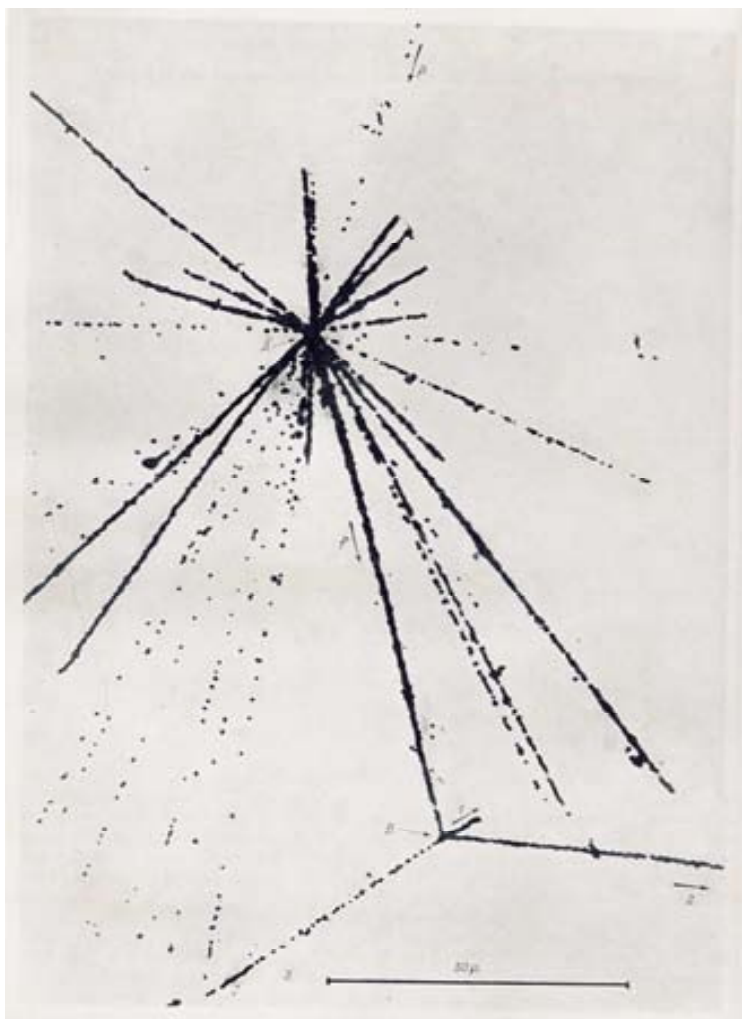


Figura A.12: (1953) Primer hiperfragment observat per Danysz i Pniewsky en emulsió.

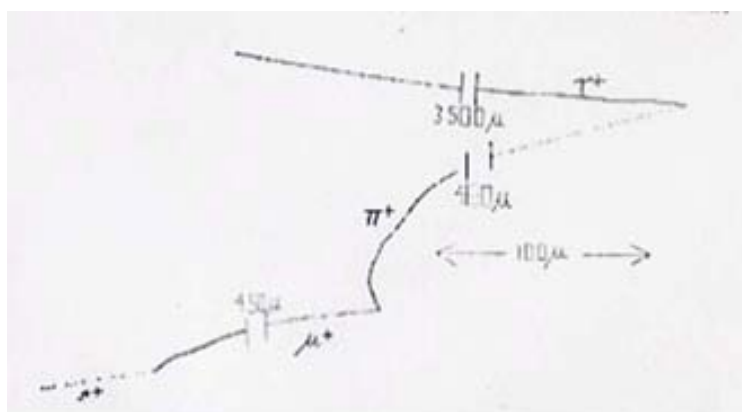


Figura A.13: (1953) Primer esdeveniment $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$, trobat en *stripped emulsion* per un grup de Rochester.

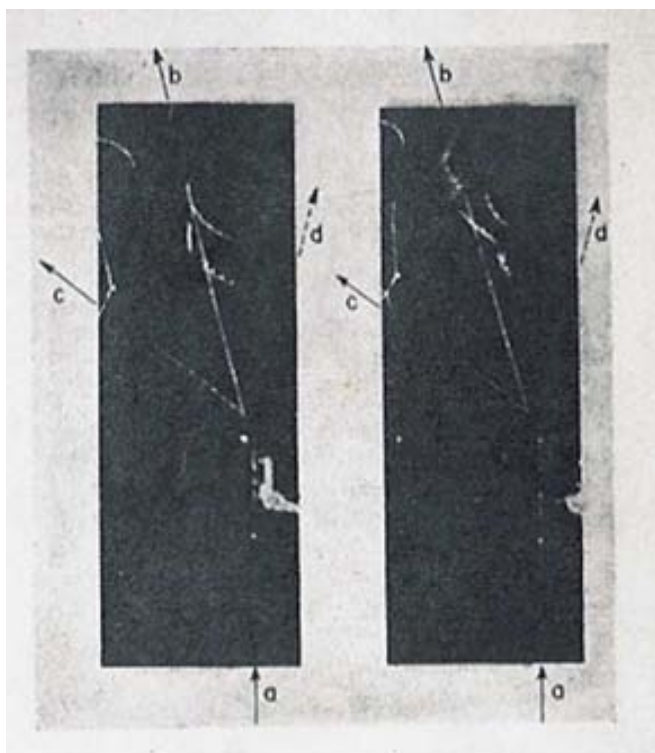


Figura A.14: (1953) Primers exemples de producció associada trobats al cosmotró de Brookhaven. Les traces *b* i *c* són les d'una V_1^0 produïda en hidrogen per un pió negatiu (traça *a*) d'energia 1.5 Bev. El mesó pesat associat a aquesta producció aniria en la direcció *d*.

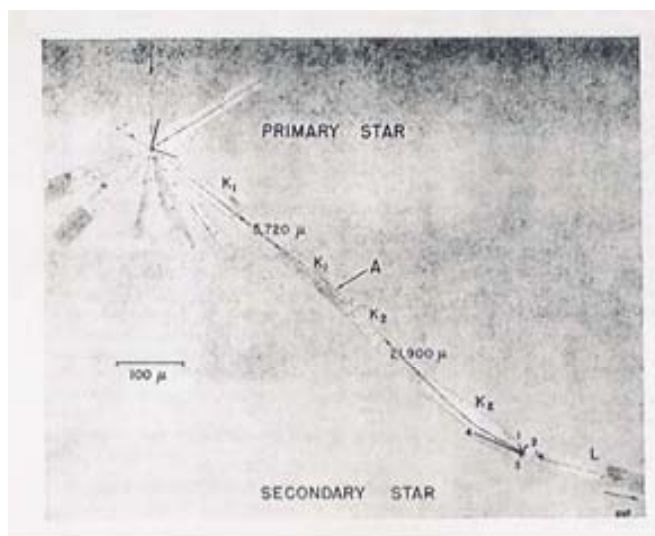


Figura A.15: (1954) Esdeveniment d'Eisenberg que representa possiblement el primer hiperó Ω^- observat en raigs còsmics en emulsió. Es produeix en una estrella primària i es desintegra al punt A en un K^- visible ($\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$).

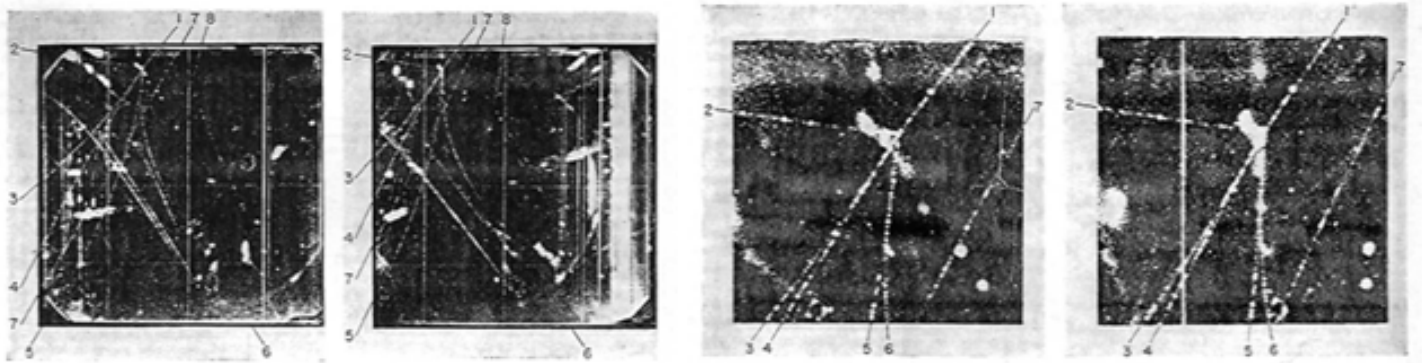


Figura A.16: (1954) Exemple de $K_{\pi 2} \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ (la primària és la traça 1 i el π^+ la traça 2) en el qual per primer cop s'observen clarament els 2 parells e^+e^- de la desintegració del π^0 (traces 3, 4, 5, 6; les traces 7 i 8 corresponen a dues partícules formades en la mateixa interacció nuclear que el $K_{\pi 2}$). Trobat per Hodson *et al.* de Princeton en doble cambra.

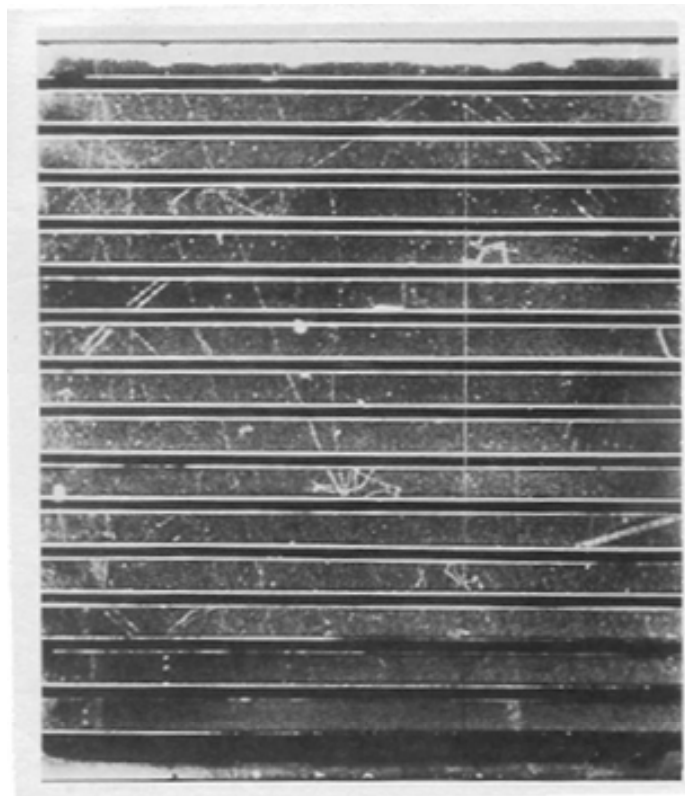


Figura A.17: (1954) Exemple de $K_{\mu 2} \rightarrow \mu^+ + \nu$, mode proposat per l'École Polytechnique a partir d'esdeveniments com aquest, trobats en la doble cambra del Pic du Midi. La primària entra per dalt a l'esquerra i es para en la làmina 10. La secundària és emesa cap amunt, travessa 6 làmines i s'atura en la tercera (per dalt).

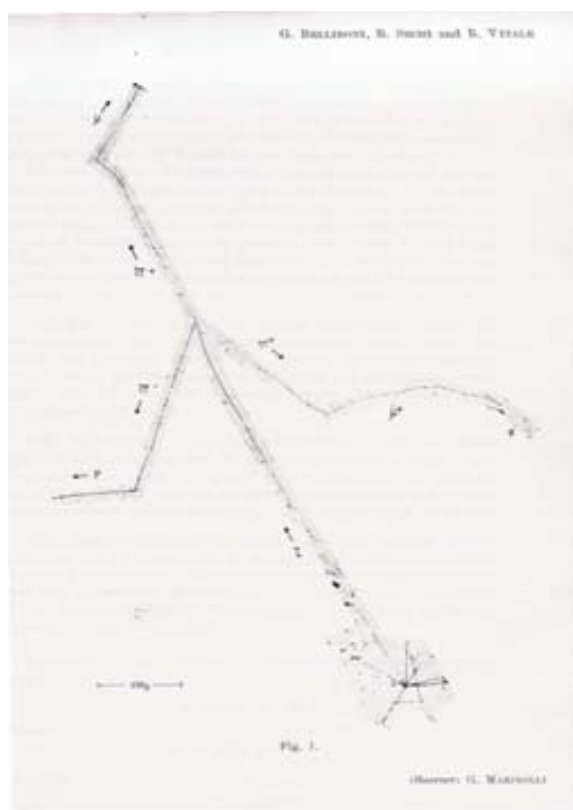


Figura A.18: (1954) Primer esdeveniment τ complet: els dos π^+ i el π^- es paren en l'emulsió. Trobat pel grup de Pàdua en les noves *stripped*.

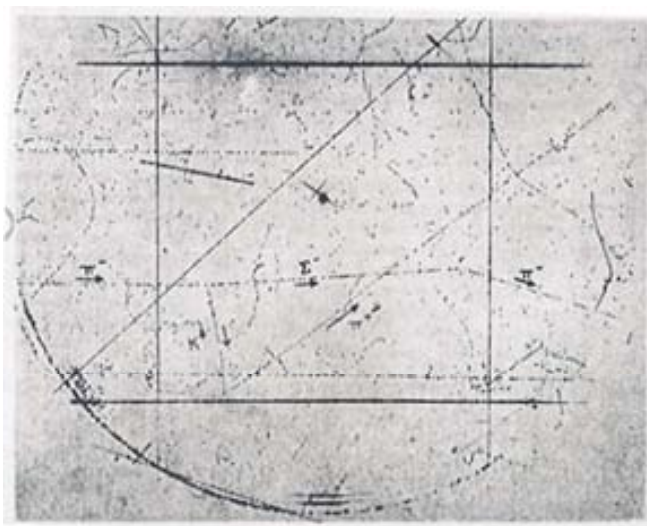


Figura A.19: (1956) Esdeveniment de producció associada $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K_{e3}^+$ observat a Columbia en cambra de bombolles. S'identifica la secundària del K^+ amb un electró per la seva ionització mínima i gran dispersió. L'electró és etiquetat erròniament com π^+ en el negatiu.

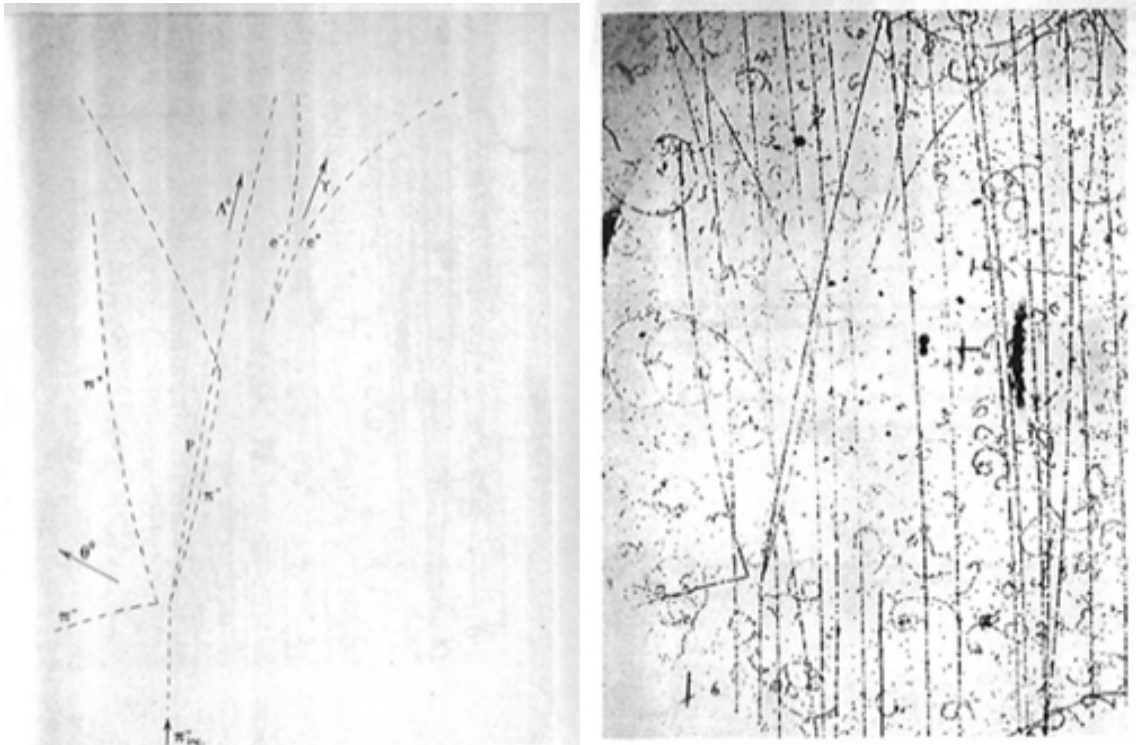


Figura A.20: (1957) Demostració de l'existència del Σ^0 a través de la reacció de producció associada $\pi^- + p \longrightarrow \Sigma^0 + \theta^0$. Esdeveniment trobat en el cosmotró de Brookhaven.

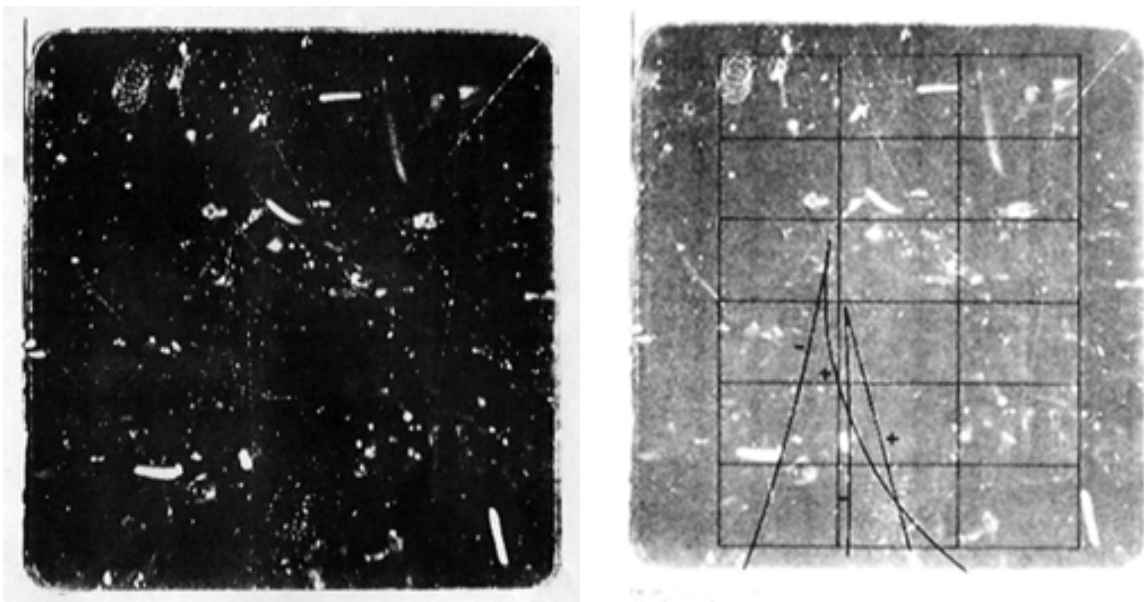


Figura A.21: (1958) Primera observació de $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ en la doble cambra de l'EP al Pic du Midi. En la reconstrucció, les traces +- de l'esquerra corresponen al $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ i les traces +- de la dreta a la $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$.

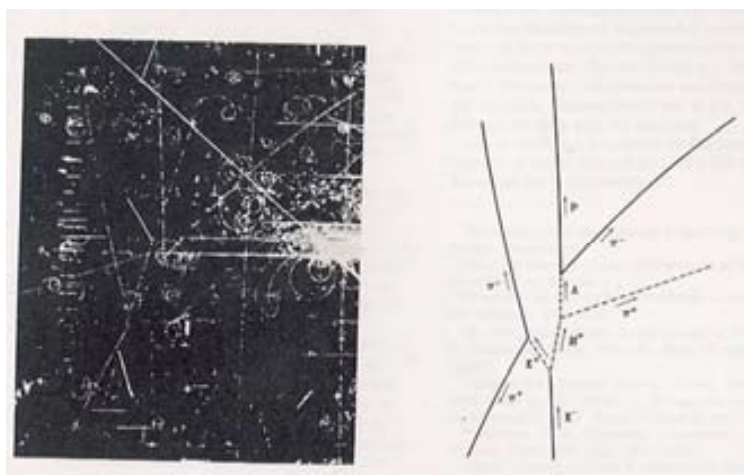


Figura A.22: (1959) Confirmació del $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ en el bevatró de Berkeley en cambra de bombolles.

A.2 Mètodes estadístics de representació de les dades experimentals

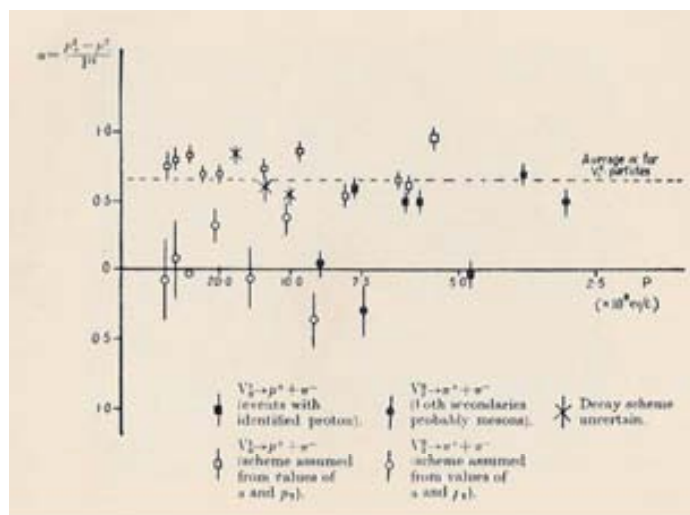


Figura A.23: (1951) Representació dels esdeveniments del grup de Manchester en una gràfica α vs $1/P$. S'observa una clara agrupació al voltant de dos valors: $\alpha = 0$ i $\alpha = 0.68$, típics valors de $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ i $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$, respectivament.

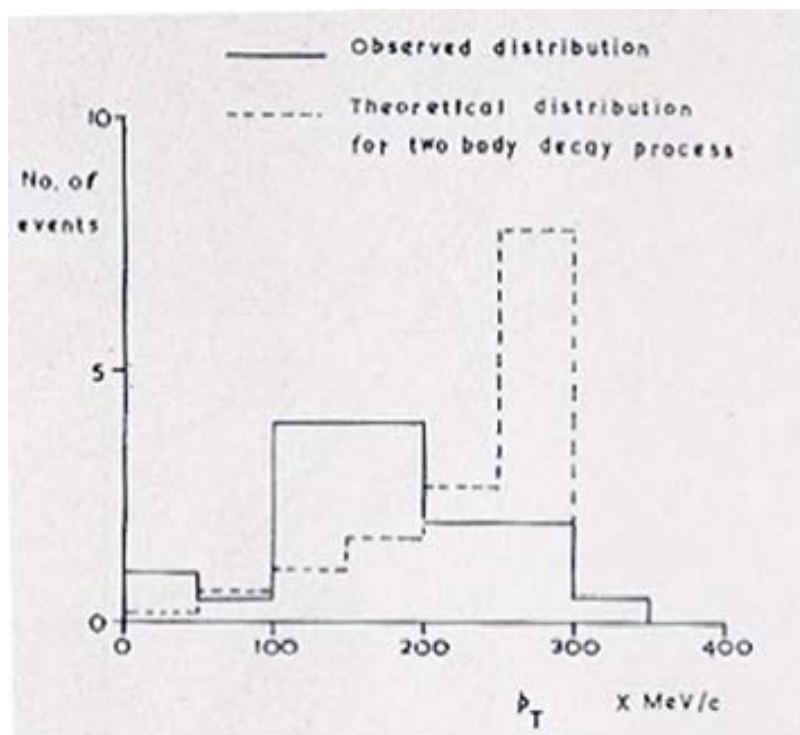


Figura A.24: (1952) Diagrama que mostra la divergència entre la distribució del nombre d'esdeveniments esperats per a una desintegració a dos cossos, a partir de l'anàlisi del moment transversal, i la distribució observada per a les desintegracions V carregades del grup de Manchester.

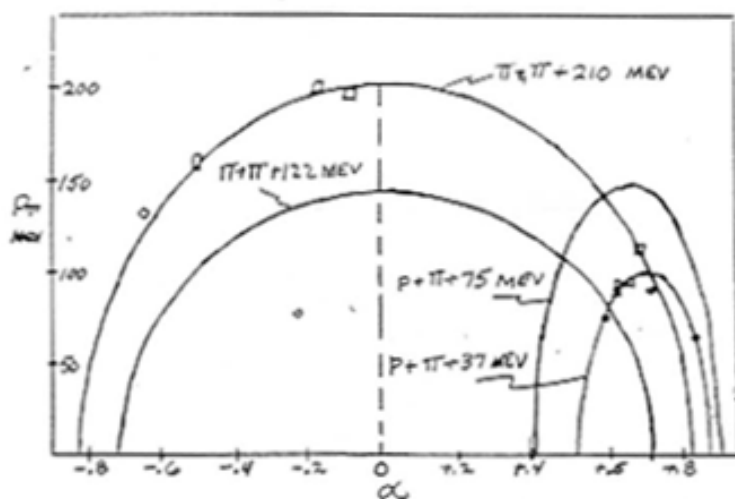


Figura A.25: (1952) Diagrama α - p_T de R. W. Thompson sobre les dades de què disposa al 3r congrés Rochester (1952).

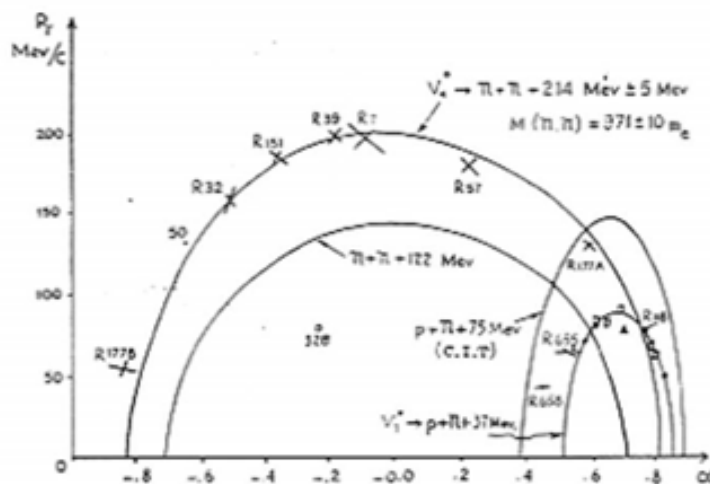


Figura A.26: (1953) Diagrama α - p_T de R. W. Thompson sobre les dades de què disposa al congrés de Bagnères (1953).

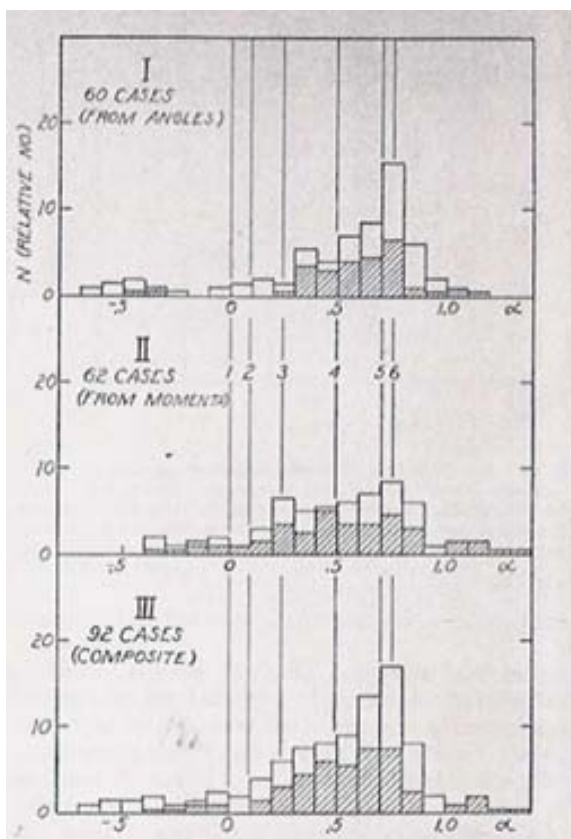


Figura A.27: (1953) Caltech: distribució dels valors d' α per a les desintegracions V^0 , suposades com a desintegracions en dues secundàries.

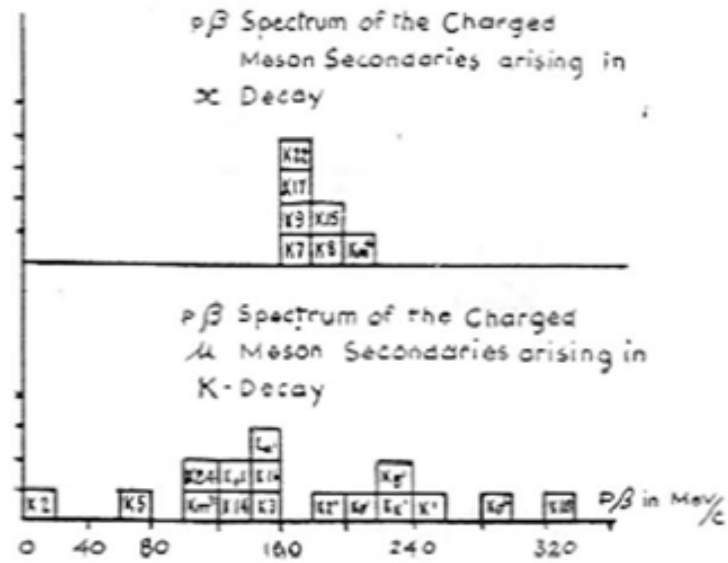


Figura A.28: (1953) Evidències presentades al congrés de Bagnères del mode χ ($K_{\pi_2} \rightarrow \pi^+ + \pi^0$) oposat al mode κ ($K_{\mu_3} \rightarrow \pi^0 + \mu + \nu$).

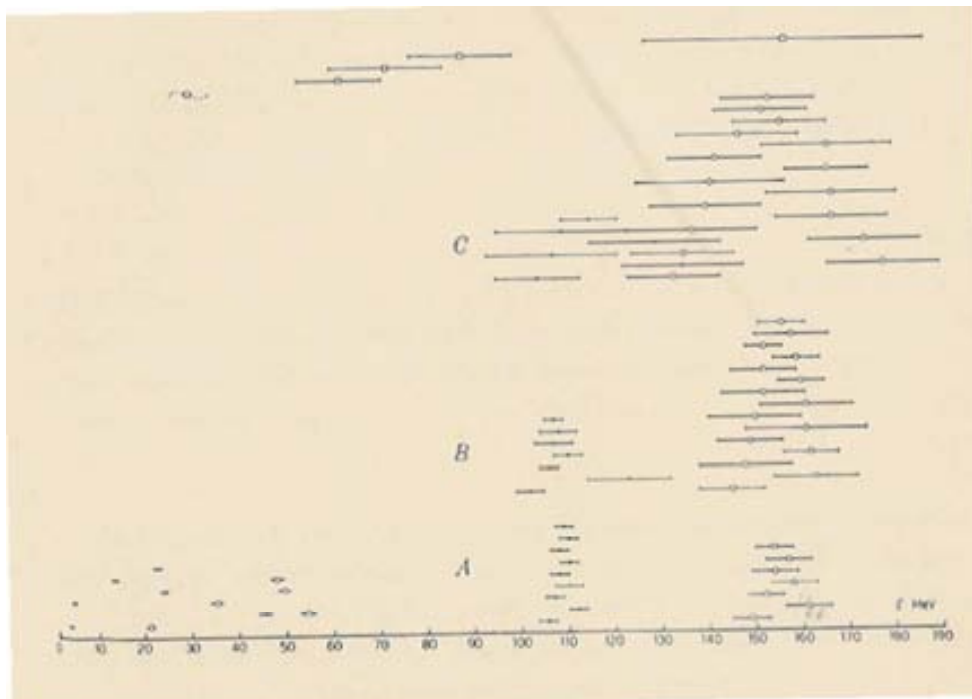


Figura A.29: (1955) Distribució energètica de l'emissió de secundàries de mesons K. (·) representa els π , (○) representa els μ i (□) representa els electrons. Resultats obtinguts del *G-stack*.

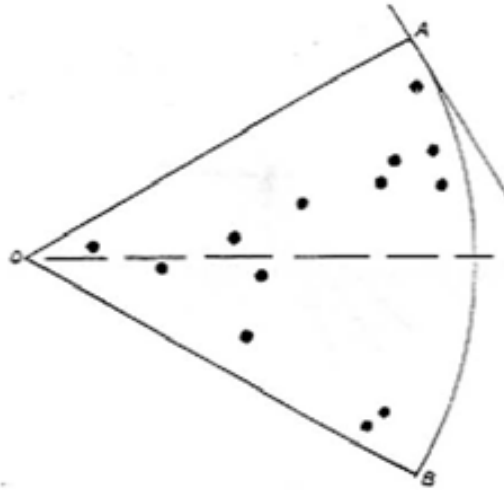


Figura A.30: (1953) *Dalitz Plot* dels 13 esdeveniments τ disponibles en el congrés de Bagnères.

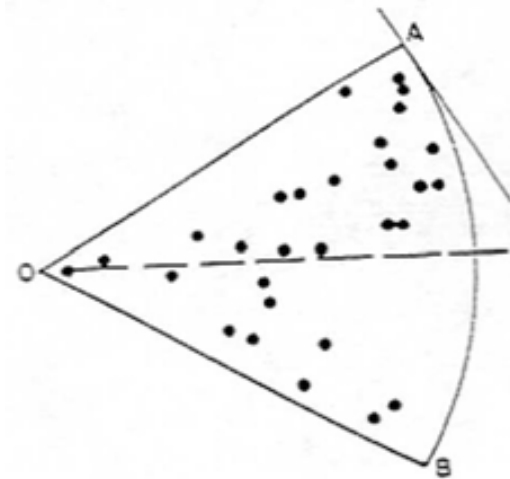


Figura A.31: (1954) *Dalitz Plot* dels 29 esdeveniments τ disponibles en el 4rt congrés Rochester.

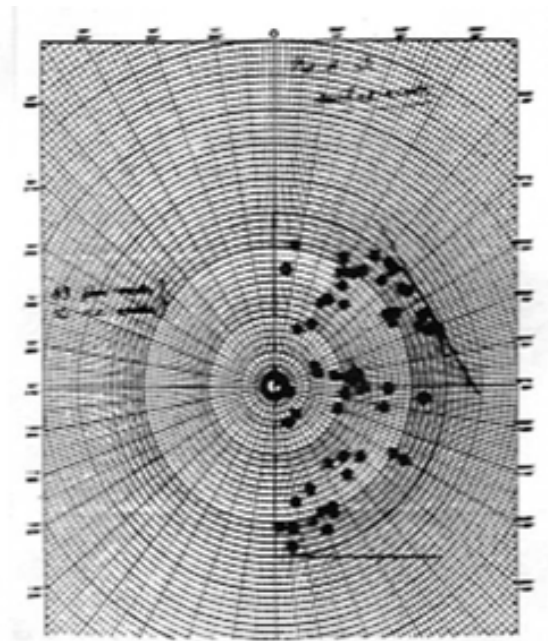


Figura A.32: (1955) *Dalitz Plot* dels 53 esdeveniments τ disponibles en el 5è congrés Rochester.

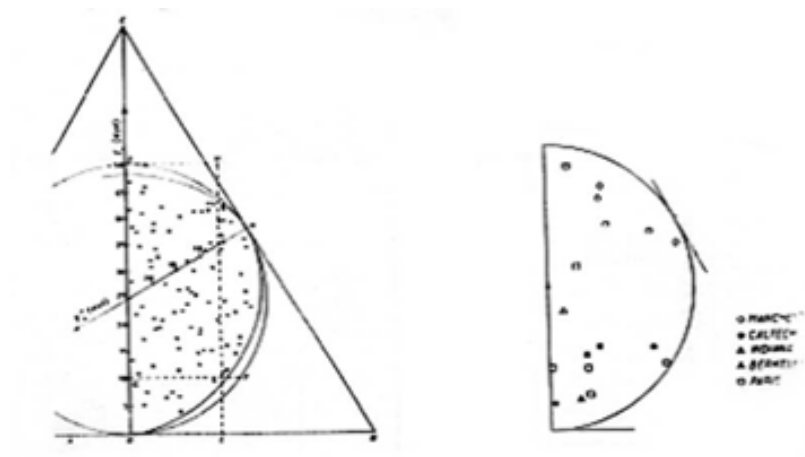


Figura A.33: (1955) *Dalitz Plot* dels 58 esdeveniments τ disponibles en el congrés de Pisa, del treball en emulsions, i dels 16 casos τ trobats en cambres de boira.

A.3 Evolució de les taules de partícules

"Elementary Particle" Families		
N_0 (nucleons) ($p = N_0^+$, $n = N_0^0$)	π_0 (pions) ($\pi^0 = \pi_0^0$, $\pi^\pm = \pi_0^\pm$)	e
N_1 (heavy V particle) ($V_1^0 = N_1^0$; $V_1^\pm = N_1^\pm$)	π_1 (light v particle) ($v_2^0 = \pi_1^0$; $v_1^\pm = \pi_1^\pm$)	μ
$(N_2?)$ ("resonance" in π -nucleon scattering)	?	?

Figura A.34: (1952) Classificació de partícules proposada per Pais al 2n congrés Rochester.

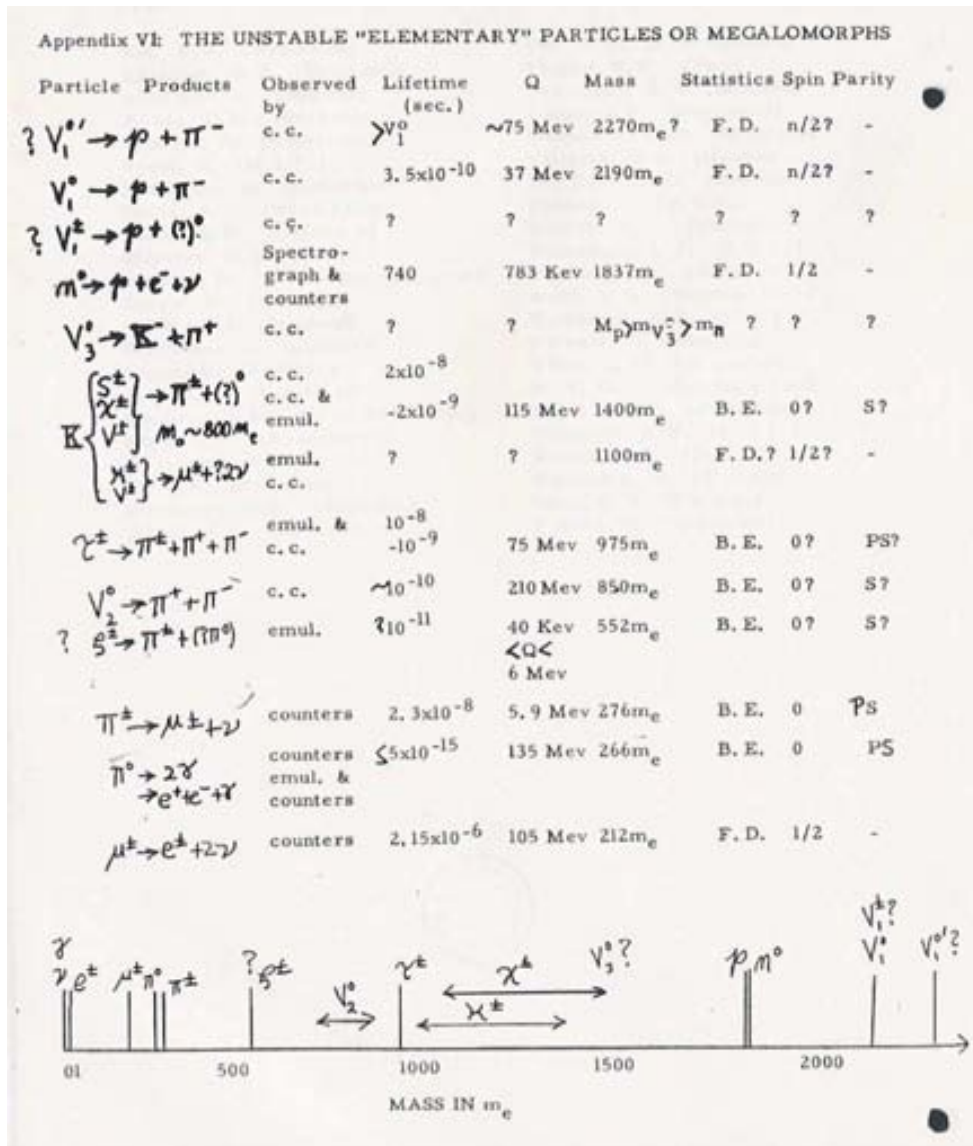


Figura A.35: (1952) Taula de partícules del 3r congrés Rochester. Notar la confusió que es presenta amb els modes de desintegració del mesó K .

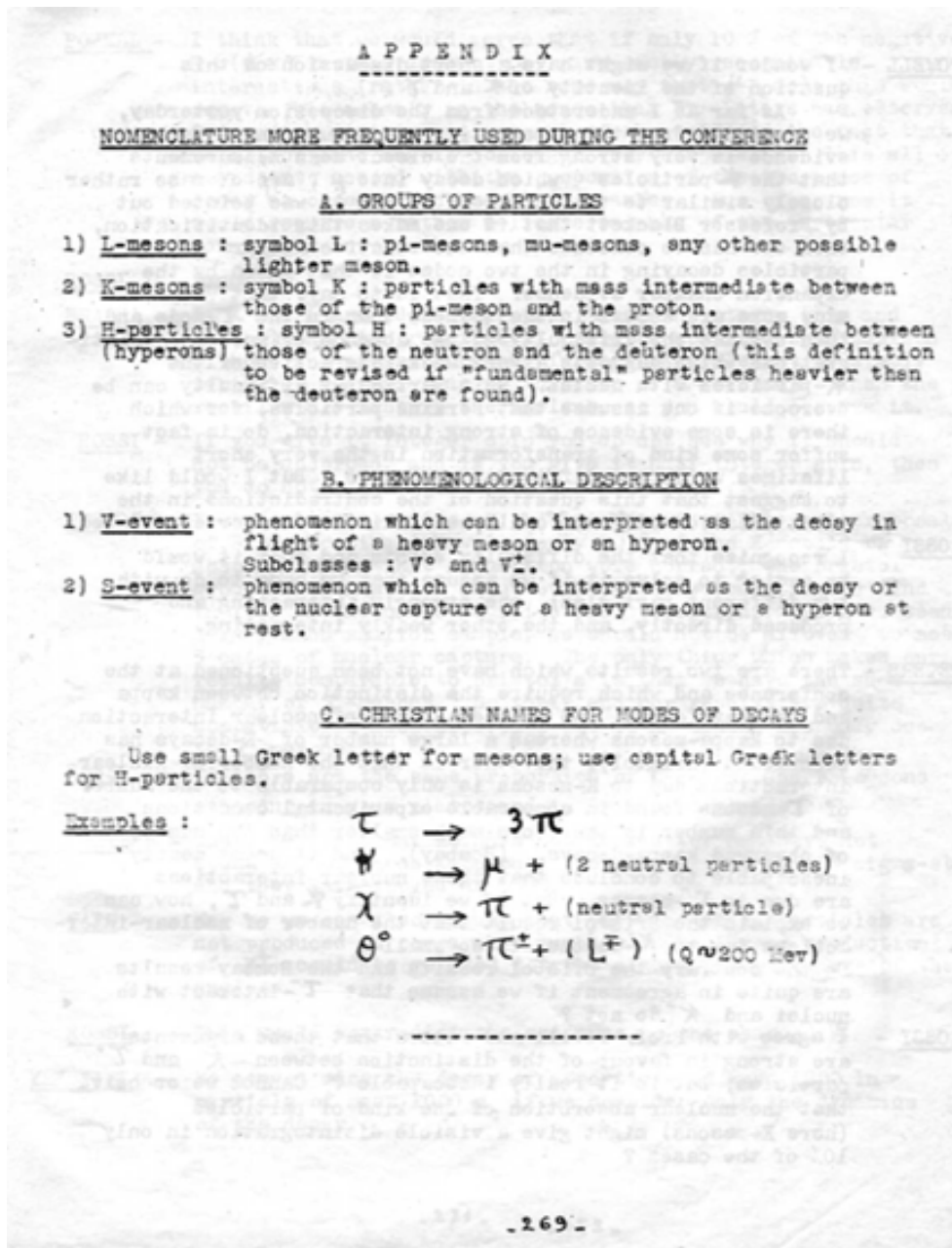


Figura A.36: (1953) Nomenclatura proposada al congrés de Bagnères.

News and views

Fundamental Particles

Symbols Proposed at Bagnères Congress

[The following proposal for a new set of symbols for fundamental particles was agreed upon as a result of discussions held during the International Cosmic-Ray Congress at Bagnères de Bigorre in the French Pyrenees, July 6-12, 1953. The Congress was organized by the University of Toulouse with the support of Unesco and of the Commission for Cosmic Rays of IUPAP. Co-Authors of the present note are E. Amaldi, C. D. Anderson, P. M. S. Blackett, W. B. Fretter, L. Leprince-Ringuet, B. Peters, C. F. Powell, G. D. Rochester, B. Rossi, and R. W. Thompson.]

Symbols for Fundamental Particles

In recent years we have witnessed startling developments in the field of fundamental particles. One of the consequences has been the appearance in the scientific literature of a new jargon and of a large number of new symbols. Some symbols (such as π , μ , τ) designate specific kinds of particles. Others (such as ρ , σ) have been used to describe merely a phenomenological behavior. Various authors have called the same particle by different names or have attached different meaning to the same symbol. Sometimes the meaning of a symbol has changed through the years. To give an example, the Greek letter κ was used initially to describe a heavy meson which stops in the emulsion and subsequently decays, giving rise to a single ionizing particle. Later the Latin letter K replaced the Greek letter κ as a code for the above phenomenological description, while the letter κ acquired a more definite physical meaning: that of a heavy meson which decays into one charged and two neutral particles. Sometimes, however, the letter K is also used to designate any charged particle heavier than a π -meson and lighter than a proton, whose mode of decay is unknown. As another example, the neutral particle of mass about $1000 m_e$, which decays into two π -mesons, has been variously named ν^0 , V_2^0 , V_4^0 , whereas some authors have used the letter V_2^0 to designate any V^0 -particle different from the so-called V_1^0 .

It seems to us that, in order to avoid confusion, the time has come to agree upon a coordination of the symbols used to indicate fundamental particles or groups of fundamental particles. Our specific suggestions are listed in the table to follow.

We propose first to subdivide fundamental particles into three groups according to their mass and to denote

each group by a Latin letter. We tentatively suggest the name *Hyperon* for a particle of mass intermediate between that of the neutron and the deuteron.

We then suggest the use of Greek letters to indicate specific particles (as opposed to groups of particles). We note that this procedure has been widely followed in the past (recall the symbols γ , μ , ν , π , τ). We do not propose, however, to change the accepted symbols for the proton (p) or the neutron (n).

We finally suggest to retain and make more precise the phenomenological classification already in use, based on the empirical features of the decay process (V -particles, S -particles).

CLASSIFICATION OF PARTICLES

A. Groups of Particles

Light mesons (L -mesons):
 π -mesons, μ -mesons, any other lighter meson which may be discovered.

Heavy mesons (K -mesons):
all particles heavier than π -mesons and lighter than protons.

Hyperons (V -particles):
all particles with mass intermediate between that of the neutron and the deuteron (this definition might be revised if fundamental particles heavier than deuterons are discovered).

B. "Christian Names"

Use capital Greek letters for hyperons and small Greek letters for mesons.

(1) *Hyperons*

Λ^0 : particle previously known as V_1^0 and characterized by the decay scheme $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$. If it turns out (as suggested by some results) that there are particles with this decay scheme and different Q -values, they could be designated by different subscripts.

Λ^+ : the positive counterpart of Λ^0 with the possible decay schemes:

$$\Lambda^+ \rightarrow n + \pi^+$$

$$\Lambda^+ \rightarrow p + \pi^0$$

The existence of these particles is indicated by recent experiments.

(2) *Heavy Mesons*

$\tau \rightarrow 3\pi$ (considered certain).

$\kappa \rightarrow \mu + 2$ neutral particles (considered very probable; however, the nature of the neutral products is still unknown).

$\chi \rightarrow \pi + 1$ neutral particle (considered as probable; nature of neutral particle unknown).

θ^0 : particle previously known as ν^0 , V_2^0 , V_4^0 , characterized by the decay scheme $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + (\pi^- \text{ or } \mu^-)$. If it turns out (as suggested by some results) that there are particles with this decay scheme and several Q -values, they could be designated by different subscripts.

PHYSICS TODAY

Figura A.37: (1953) Proposta de nomenclatura derivada del congrés de Bagnères.

The "Curious" Particles (1953)				
Decay	Daughters	Q	Lifetime	Remarks
K^+	$p + \pi^-$	$+ (25 \pm 2) \text{ MeV}$	$\sim 3 \times 10^{-10} \text{ sec.}$	Some evidence also for Q = 20 and Q = 75
K^+	$\pi^+ + \pi^+$	$+ 7.125 \text{ MeV}$		6 - 7 cases in existence
K^+	$p + \pi^0$	consistent with $(\pm) \times 10^{-10} \text{ sec.}$		Not universally accepted
K^+	$\pi^+ + \pi^0$	$+ (55 \pm 12) \text{ MeV}$		Explains some cascades (sometimes called K^+)
K^0	$(\pi^+) + \pi^0$	$+ 12 \text{ MeV}$		(π^+) is approximately of muonic mass but no evidence it is π^+
K^+	$\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$	$+ 70 \text{ MeV}$	$\sim 10^{-9} \text{ sec.}$	Only K^+ has been observed to decay (Interpretable as stars)
K^0	$\pi^+ + (\pi^+ \text{ or } \mu^+)$	$+ (210 \pm 5) \text{ MeV}$	$\sim 1.5 \times 10^{-10} \text{ sec.}$	Evidence favors π^+ and μ^+ over a μ^+ (Other Q values 50 - 150) could be a 3 body decay
K^0	$\pi^0 + (\pi^+ \text{ or } \mu^+) + (\pi^+ \text{ or } \mu^+)$	$+ (4 \pm 5) \text{ MeV}$		Existence sometimes questioned
K^+	$\pi^+ + \gamma^+$	$Q_{\pi^+} \sim 200 \text{ MeV/c}$	$\sim 10^{-9} \text{ sec.}$	
K^+	$\mu^+ + \gamma^+$	Q_{μ^+} sometimes exceeds 220 MeV/c		
K^+	$\mu^+ + \gamma^+$	$Q_{\mu^+} \sim 220 \text{ MeV/c}$	$\sim 10^{-9} \text{ sec.}$	May include many cases formerly called K_+ but not all.

Figura A.38: (1954) Taula de partícules del 4t congrés Rochester. Apareix K_{μ} .

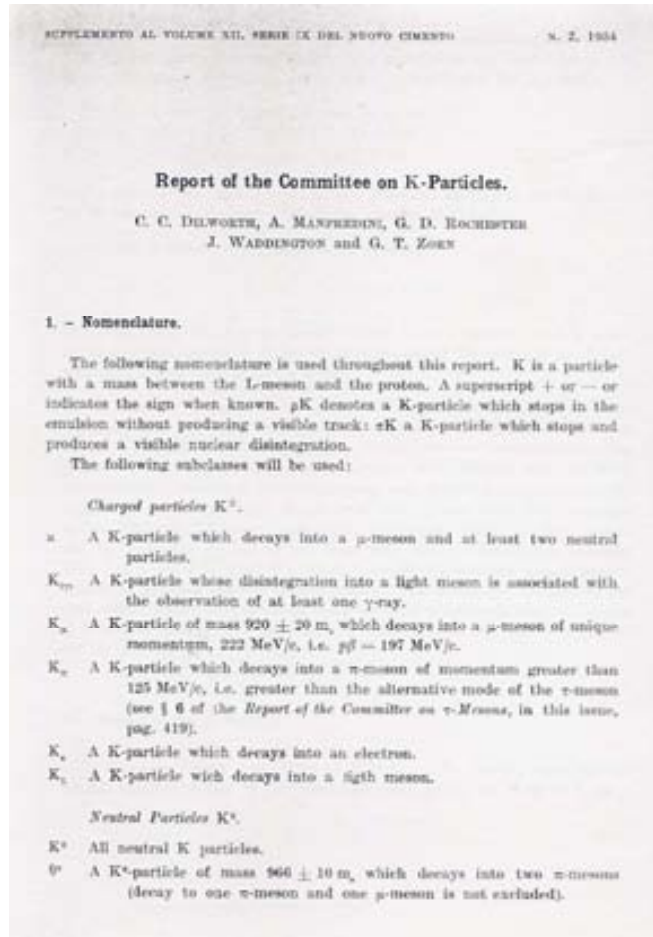


Figura A.39: (1954) Taula de partícules dels mesons pesats del congrés de Pàdua. Complexitat en els modes de desintegració que contenen electrons o possibles fotons.

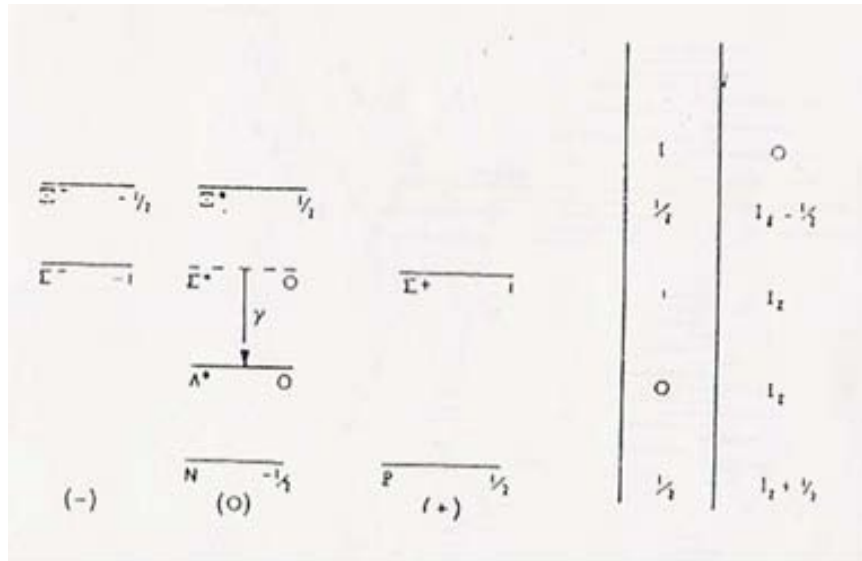


Figura A.40: (1954) Esquema dels multiplets del model II de Gell-Mann i Pais al congrés de Glasgow.

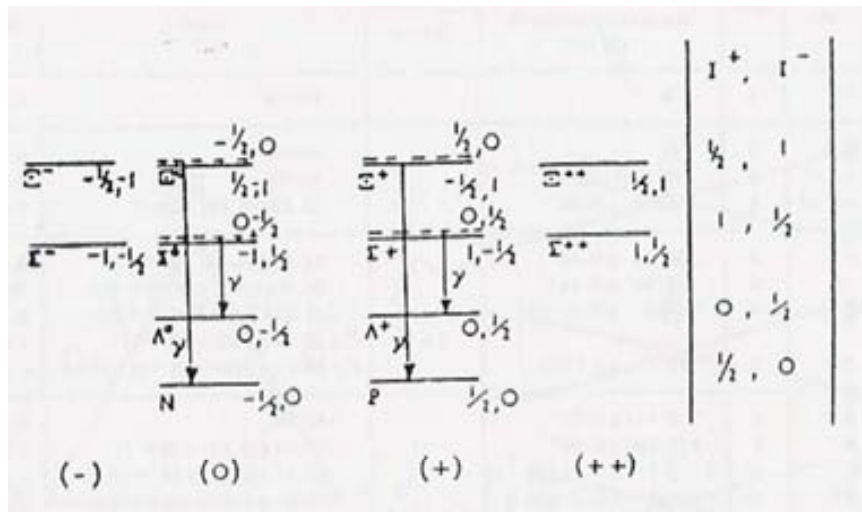


Figura A.41: (1954) Esquema dels multiplets del model III de Gell-Mann i Pais al congrés de Glasgow. De nou, les columnes indiquen partícules amb la mateixa càrrega. Cada nivell individual porta inclòs els seus valors d' I_z^+ , I_z^- .

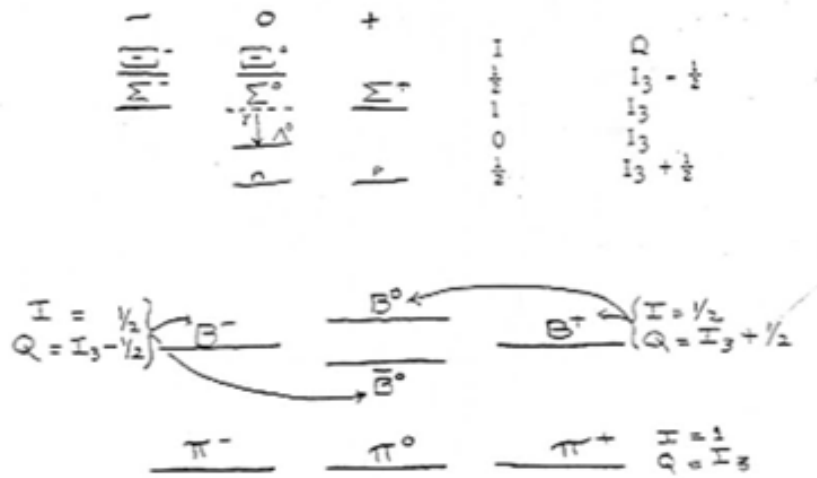


Figura A.42: (1955) Esquema dels multiplets del model de Gell-Mann explicat per Pais al 5è congrés Rochester.

Wednesday Morning: Elementary Particles; J.R. Oppenheimer presiding.

Hyperons:

Particle	Products	Q (Mev)	M (m_e)	Lifetime (sec)
Λ^0	$\rightarrow p + \pi^-$ $\rightarrow (p + \mu + \nu ??)$	37	2180	$3.8 \pm .5 \times 10^{-10}$
Σ^+	$\rightarrow p + \pi^0$ $\rightarrow n + \pi^+$	116 110	2327	$> 5 \times 10^{-10}$
Σ^-	$\rightarrow n + \pi^-$	110	2325	$\sim 5 \times 10^{-10}$
Ξ^-	$\rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$	60	2570	$\sim 10^{-10} ?$

K-Mesons:

τ	$\rightarrow 3\pi$ $\rightarrow \pi + 2\pi^0$ $\rightarrow 3\pi + \delta$	75	964	$\sim 5 \times 10^{-9}$
θ^0	$\rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $(\pi + \mu + \nu ??)$	214	963	1.5×10^{-10}
τ^0	$\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 ??$	747	965	$< 10^{-8}$
$(\chi, \theta^0) K_{F2}$	$\rightarrow \pi^\pm + \pi^0$	212	~ 952	$\sim 10^{-9} ??$
$K_{\mu 2}$	$\rightarrow \mu + \nu$	235-255	920-960	$\sim 10^{-8}$
$K_{\mu 3}$	$\rightarrow \mu + ? + ?$ $(K_{F2} \rightarrow \mu + \nu + \pi^0 ??)$			
K_{1400}	$\rightarrow ?$			

Figura A.43: (1955) Taula de partícules proposada per Oppenheimer al 5è congrés Rochester.

Particle	Mass (electron masses)	Decay scheme	Q (Mev)	ρ^* (Mev/c)
τ^\pm	965.5	$\pi^\pm + \pi^+ + \pi^-$	74.7	<125
		$\pi^\pm + 2\pi^0$	84.1	<133
θ^0	966	$\pi^+ + \pi^-$	214	204
θ^\pm	953	$\pi^\pm + \pi^0$	213	202
K_{μ_2}	930	$\mu^+ + \nu$	371	226
κ	~ 1000	$\mu^\pm + 2?$		$\lesssim 250$
K_e	~ 1000	$e^\pm + 2?$		$\lesssim 250$
Σ^\pm	2329	$p + \pi^0$	117	196
		$n + \pi^\pm$	111	190
Ξ^-	2583	$\Lambda^0 + \pi^-$	66	138

Figura A.44: (1955) Taula dels mesons K i dels hiperons carregats, proposada per Arnold *et al.* (1955), 296.

S = 0: ordinary particles (π , N, P, and γ)
S = +1: θ^0 , K^+
S = -1: Λ^0 , Σ^\pm , $\Sigma^0(?)$, K^- , $\bar{\theta}^0$
S = -2: Ξ^- .

Figura A.45: (1955) Taula de partícules proposada per C. N. Yang al 6è congrés Rochester. Notem l'aparició del nombre quàntic d'estranyesa, S.

Name	Model	Isotopic Spin	Strangeness	Ordinary Spin
\mathfrak{N}		1/2	0	1/2
$\bar{\mathfrak{N}}$		1/2	0	1/2
A		0	-1	1/2?
\bar{A}		0	1	1/2?
π	$\mathfrak{N} + \bar{\mathfrak{N}}$	1	0	0
$\theta(\tau)$	$\mathfrak{N} + \bar{A}$	1/2	1	0?
$\bar{\theta}(\tau)$	$\bar{\mathfrak{N}} + A$	1/2	-1	0?
Σ	$\mathfrak{N} + \bar{\mathfrak{N}} + A$	1	-1	1/2?
Ξ	$\bar{\mathfrak{N}} + A + A$	1/2	-2	1/2?

Figura A.46: (1956) Esquema del model de compostos de Sakata.

MASSES AND LIFETIMES OF ELEMENTARY PARTICLES

Particle	Spin	Mass (Fermis represent standard deviation) (MeV)	Mass difference (MeV)	Mean life (sec)	Decay rate (number per second)
Photons	1	0		stable	0.0
Leptons and antileptons	$\nu, \bar{\nu}$	0		stable	0.0
	e^-, e^+	0.510976*		stable	0.0
	μ^-, μ^+	105.70 ± 0.06*		(2.22 ± 0.02) × 10 ⁻⁶ *	0.45 × 10 ⁶
Mesons	π^\pm	139.63 ± 0.06*	4.6*	(2.56 ± 0.03) × 10 ⁻⁸ **	0.39 × 10 ⁴
	π^0	135.04 ± 0.16*		(0.0 < τ < 0.4) × 10 ⁻¹⁰ (O)	> 2.5 × 10 ¹⁰
	K^\pm	494.0 ± 0.20 (a)	1 ± 5	(1.224 ± 0.013) × 10 ⁻¹⁰ (b)	0.815 × 10 ⁴
	K^0	493 ± 5 (Th)		K_{S1} : (0.95 ± 0.08) × 10 ⁻¹⁰ (P) K_{S2} : (3 < τ < 100) × 10 ⁻¹⁰ (L)(P)	1.05 × 10 ⁴ (> 0.01 < 0.3) × 10 ⁶
Baryons†	p	938.213 ± 0.01*	7.1 ± 0.4 7.6 _{±0.4} **	stable	0.0
	n	939.560 ± 0.01*		(1.04 ± 0.13) × 10 ⁻¹⁰ *	0.96 × 10 ⁻¹⁰
	Λ	1115.2 ± 0.13 (H)		(2.77 ± 0.15) × 10 ⁻¹⁰ (d)	0.36 × 10 ¹⁰
	Σ^+	1189.3 ± 0.35 (H)		(0.78 ± 0.074) × 10 ⁻¹⁰ (e)	1.28 × 10 ¹⁰
	Σ^0	1196.4 ± 0.5 (H)		(1.58 ± 0.17) × 10 ⁻¹⁰ (f)	0.64 × 10 ¹⁰
	Σ^-	1188.8 _{±0.4} ** (g)		(< 0.1) × 10 ⁻¹⁰ (A)	> 10 × 10 ¹⁰
	Ξ^-	1321 ± 3.5*		theoretically ~ 10 ⁻¹⁰	theoretically ~ 10 ¹⁰
	Ξ^0	?		(4.6 < τ < 200) × 10 ⁻¹⁰ (Tr)	(> 0.005, < 0.2) × 10 ¹⁰

Figura A.47: (1957) Taula de les famílies de partícules de Gell-Mann–Rosenfeld.

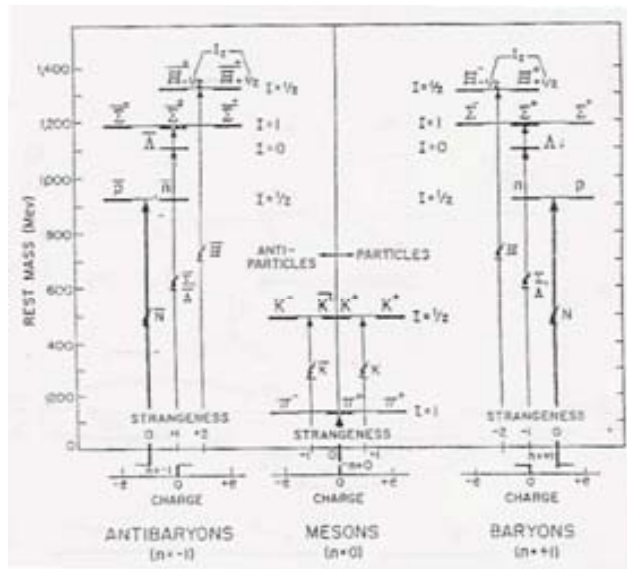


Figura A.48: (1957) Taula de les famílies de partícules fortament interaccionants de Gell-Mann–Rosenfeld.

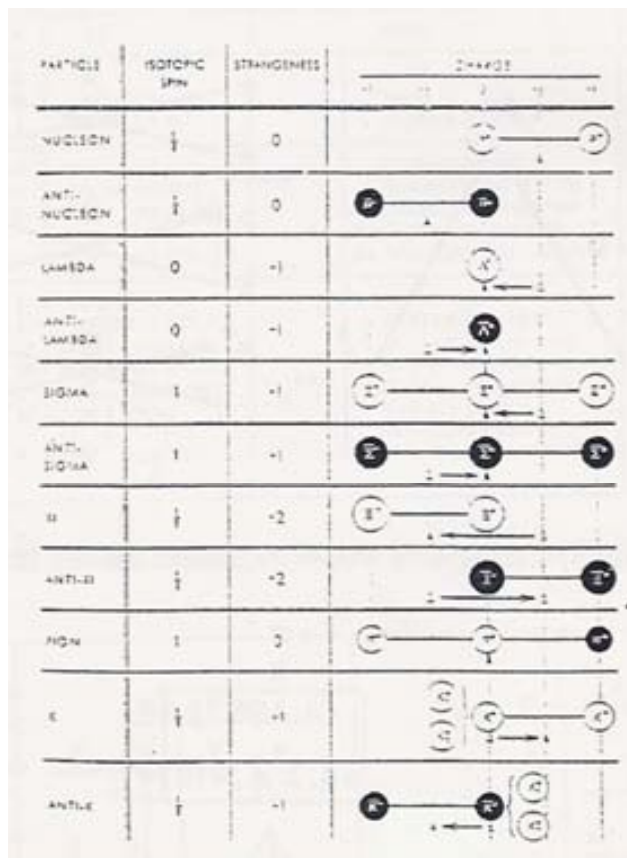


Figura A.49: (1957) Esquema dels multiplets desplaçats de càrrega, segons la idea d'estranyesa.

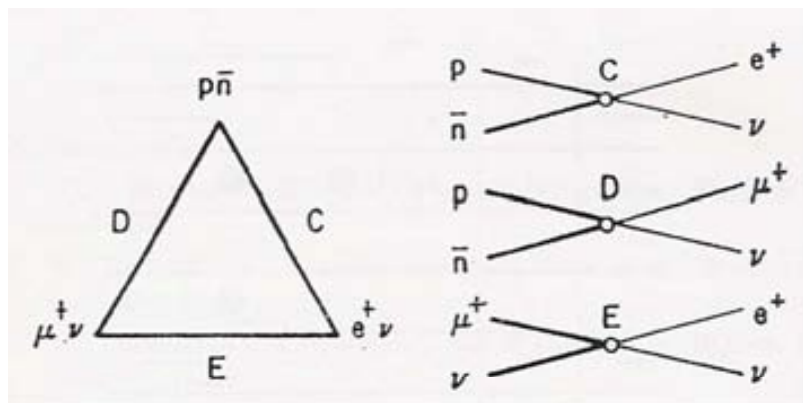


Figura A.50: (1948) Triangle de Pappus que representa les interaccions a quatre fermions.

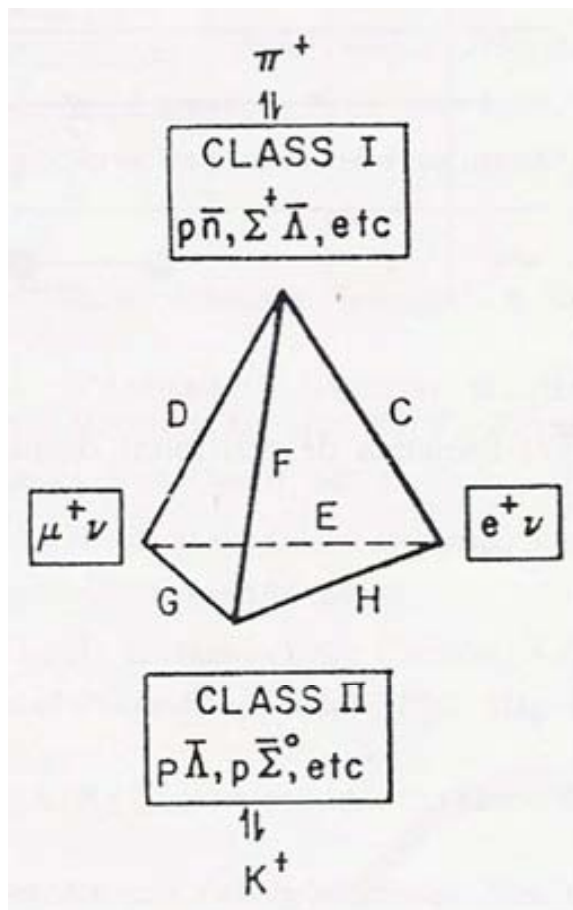


Figura A.51: (1957) Generalització del triangle de Pappus per tal d'incloure els nous fermions estranys.

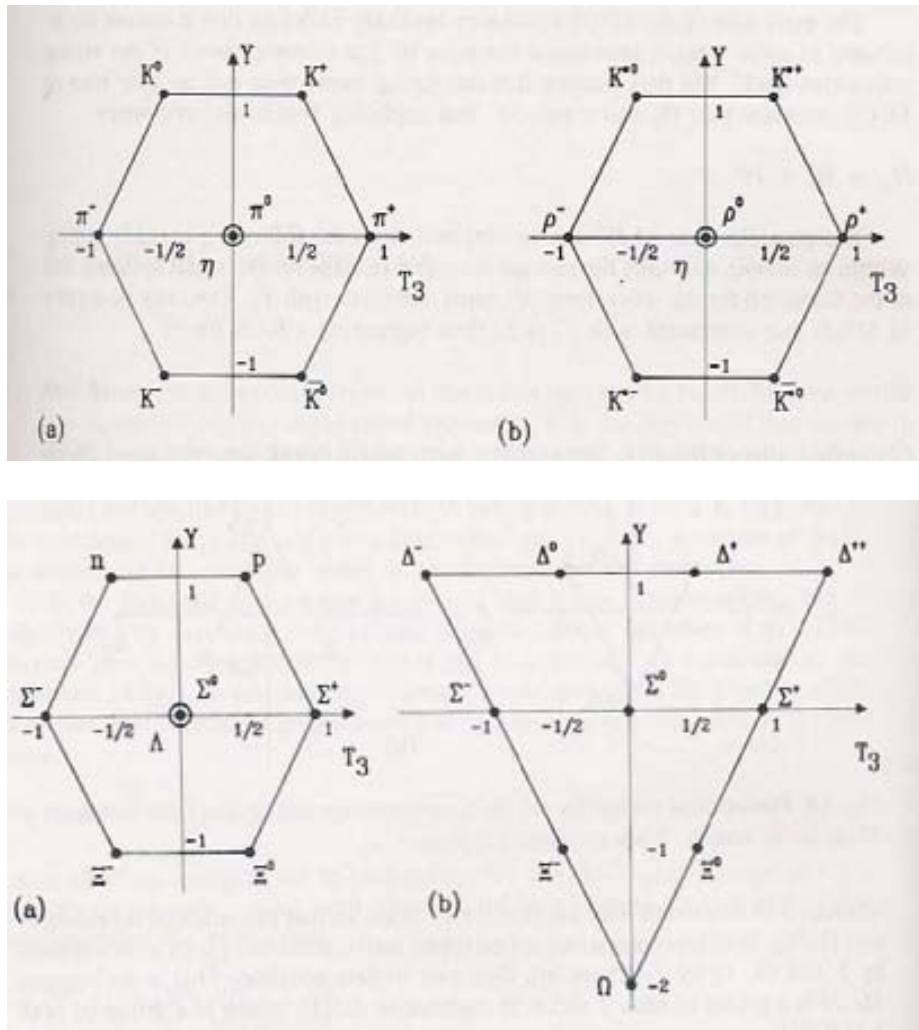
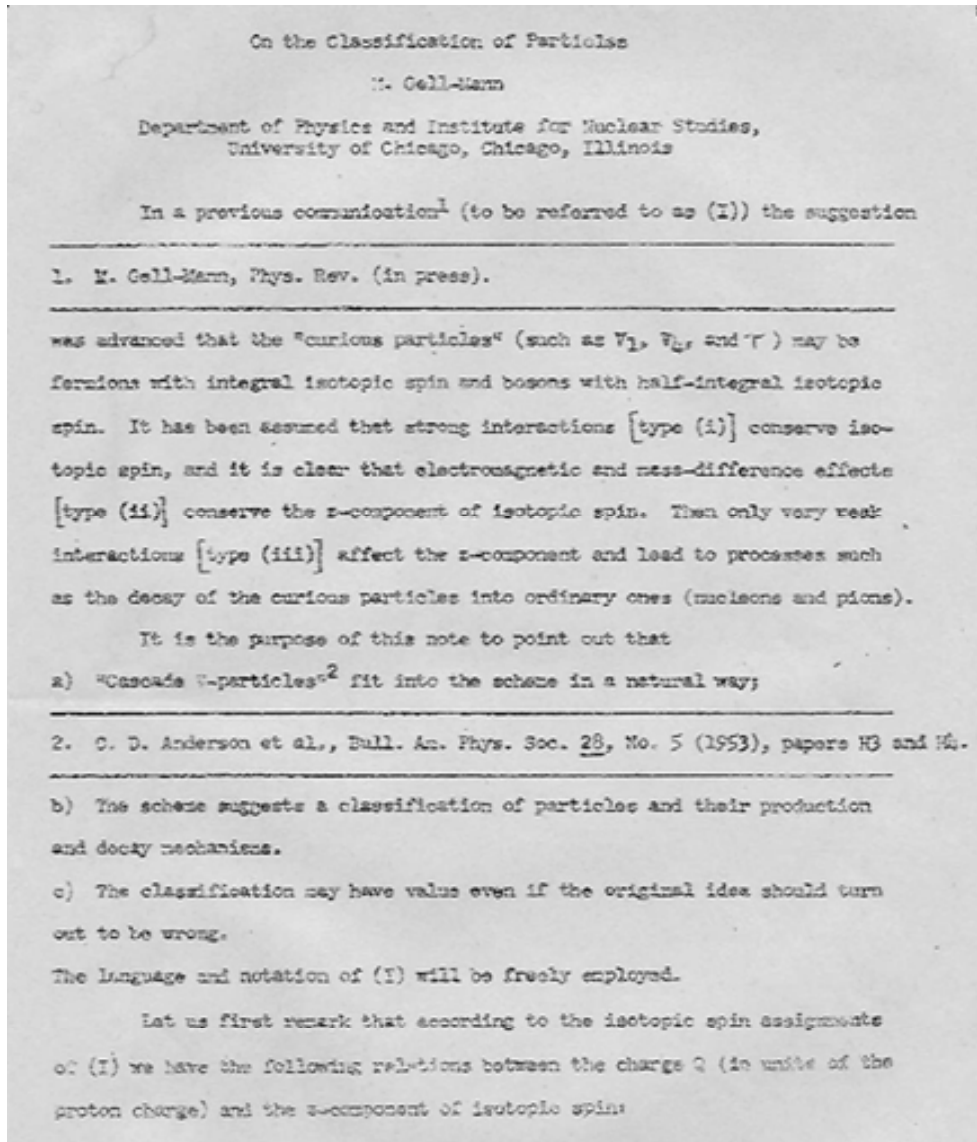


Figura A.52: Segons $SU(3)$ les partícules, noves i velles, s'agrupen en famílies o supermultiplets amb el mateix spin i paritat, però diferent isospín i estranyesa. El model matemàtic ens dóna, precisament, el nombre de partícules contingudes en aquestes famílies, i les figures característiques que poden prendre, quan es grafiquen en eixos d'estranyesa i tercera component d'isospín

A.4 Preprint no publicat de M. Gell-Mann: "*On the Classification of Particles*" (agost 1953)



- 2 -

pion ($\pi^{(+)}$, $\pi^{(0)}$, $\pi^{(-)}$):	$Q = I_2$
nucleon ($\mathcal{N}^{(+)}$, $\mathcal{N}^{(0)}$):	$Q = I_2 + \frac{1}{2}$
anti-nucleon ($\overline{\mathcal{N}}^{(+)}$, $\overline{\mathcal{N}}^{(0)}$):	$Q = I_2 - \frac{1}{2}$
($V_1^{(+)}$, $V_1^{(0)}$, $V_1^{(-)}$):	$Q = I_2$
($\overline{V}_1^{(+)}$, $\overline{V}_1^{(0)}$, $\overline{V}_1^{(-)}$):	$Q = I_2$
($\tau^{(+)}$, $\tau^{(0)}$):	$Q = I_2 + \frac{1}{2}$
($\overline{\tau}^{(+)}$, $\overline{\tau}^{(0)}$):	$Q = I_2 - \frac{1}{2}$

Only those reactions can take place which conserve both Q and I_2 , unless the weak interactions have time to intervene, as they do in the decay of the curious particles, when I_2 changes by $\pm \frac{1}{2}$.

The relation $Q = I_2$ characterizes both a V_1 -particle and a system consisting of $\mathcal{N} + \overline{\tau}$. In fact, whenever the production of a V_1 is allowed by our rules, so is that of $\mathcal{N} + \overline{\tau}$, and vice versa. In this sense we may say that V_1 is equivalent to $\mathcal{N} + \overline{\tau}$ and write $V_1 \sim \mathcal{N} + \overline{\tau}$. (In the same way $\mathcal{N} \sim \mathcal{N} + \pi$, $\pi \sim \mathcal{N} + \overline{\mathcal{N}}$, $\tau \sim \mathcal{N} + \overline{V}_1$, etc.)

Now suppose there is a particle Λ that is equivalent to $\mathcal{N} + 2\overline{\tau}$. Then Λ is characterized by $Q = I_2 - \frac{1}{2}$ and consequently cannot decay rapidly into either $\mathcal{N} + \text{pions}$ or $\overline{V}_1 + \text{pions}$. In fact, if the decay mechanism always changes I_2 by $\pm \frac{1}{2}$, then Λ will decay by cascade

$$\Lambda \rightarrow V_1 + \pi \text{ (slow), } V_1 \rightarrow \mathcal{N} + \pi \text{ (slow)}$$

provided its mass is sufficiently large. We may thus identify Λ with the "cascade V -particle" of Anderson and co-workers². Since $\Lambda \sim \mathcal{N} + 2\overline{\tau}$, we must assign to this particle a half-integral isotopic spin; if $I = \frac{1}{2}$, then there are $\Lambda^{(0)}$ and $\Lambda^{(-)}$ particles.

- 3 -

Corresponding to the fermion Λ there might exist a boson $\chi \sim 2\tau$ along with its anti-particle $\bar{\chi} \sim 2\bar{\tau}$. For χ we would have the relation $Q = I_z + 1$ and for $\bar{\chi}$ the relation $Q = I_z - 1$. If χ has a suitable mass it too would decay by cascade by the process

$$\chi \rightarrow \tau + \pi(\text{slow}), \quad \tau \rightarrow \text{pions (slow)}$$

and $\bar{\chi}$ would behave similarly. Both χ and $\bar{\chi}$ would have integral isotopic spin. If $I = 0$, then χ is positive and $\bar{\chi}$ negative.

Let us now represent each particle with which we are concerned as equivalent to a number of nucleons or anti-nucleons plus a number of τ 's or $\bar{\tau}$'s. If we treat an anti-nucleon as minus one nucleon and a $\bar{\tau}$ as minus one τ , then we may write relations of the form

$$\text{particle} \sim x \mathcal{N} + y \tau$$

and we may construct a table of particles as follows:

- 4 -

$\bar{\Lambda}$	$\chi(\frac{3}{2})$	
$(-1)\mathcal{N} + (2)\tau$	$(0)\mathcal{N} + (2)\tau$	$(1)\mathcal{N} + (2)\tau$
$Q = I_z + \frac{1}{2}$	$Q = I_z + 1$	$Q = I_z + 3/2$
$\bar{\nu}_2$	τ	
$(-1)\mathcal{N} + (1)\tau$	$(0)\mathcal{N} + (1)\tau$	$(1)\mathcal{N} + (1)\tau$
$Q = I_z$	$Q = I_z + \frac{1}{2}$	$Q = I_z + 1$
$\bar{\mathcal{N}}$	π	\mathcal{N}
$(-1)\mathcal{N} + (0)\tau$	$(0)\mathcal{N} + (0)\tau$	$(1)\mathcal{N} + (0)\tau$
$Q = I_z - \frac{1}{2}$	$Q = I_z$	$Q = I_z + \frac{1}{2}$
	$\bar{\tau}$	ν_2
$(-1)\mathcal{N} + (-1)\tau$	$(0)\mathcal{N} + (-1)\tau$	$(1)\mathcal{N} + (-1)\tau$
$Q = I_z - 1$	$Q = I_z - \frac{1}{2}$	$Q = I_z$
	$\bar{\chi}(\frac{3}{2})$	Λ
$(-1)\mathcal{N} + (-2)\tau$	$(0)\mathcal{N} + (-2)\tau$	$(1)\mathcal{N} + (2)\tau$
$Q = I_z - 3/2$	$Q = I_z - 1$	$Q = I_z - \frac{1}{2}$

Apèndix B

SOBRE LA BASE DE DADES

B.1 Aspectes formals

El descobriment de les partícules estranyes apareix com un procés de complexificació creixent en diferents àmbits de la seva investigació. Les noves partícules es manifestaran de formes diferents, a grups diversos, que treballaran amb diferents detectors i tècniques de detecció, cosa que en dificultarà la sistematització. Sols al final de l'època investigada, el nou camp tendirà a estructurar-se. La teoria proporcionarà un model de classificació a través d'estranyesa; però l'estructuració vindrà també del món experimental: amb la reorganització del treball dels diferents grups i l'establiment de col·laboracions, amb l'intercanvi d'informació que se'n deriva sobre les diferents tècniques i l'homogeneïtzació de criteris, i, finalment, a través de la superioritat estadística proporcionada pels acceleradors en front de la relativa fortuïtat dels esdeveniments detectats en raigs còsmics.

Tot plegat farà que plantejar-se una investigació del descobriment d'aquestes partícules suposi enfrontar-se a una allau d'informació present en revistes i congressos molt heterogènia, i que abasta un període de temps força ampli. És en aquest aspecte que una base de dades pot ser d'utilitat com a eina d'ajut addicional, que ens permeti sistematitzar aquest tipus d'informació i obtenir-ne una visió organitzada.

Per a la informació disponible en revistes el punt de partida va ser la publicació *A Bibliography on Heavy Mesons and Hyperons*, de Bruno Vitale (1960). En aquest llibret, Vitale recull tots els articles que ha aconseguit detectar i que estan dedicats al descobriment i estudi teòric de les partícules estranyes.

El treball de Vitale es divideix en dues etapes cronològiques que atenen, segons ell, a una primera fase de recerca, en la qual les partícules es caracteritzen pels seus modes de desintegració (1946–1956), i una segona fase en què es caracteritzen per les seves propietats de producció (1957–1958). Cada etapa es divideix a la vegada en *mesons pesats* i *hiperons*, els articles són separats en teòrics i experimentals i donats per ordre cronològic i alfabètic per revista i autor.

El nostre treball particular sobre la informació del Vitale consisteix en la construcció

d'una base de dades que recull la primera etapa del seu llibre (1946–1956), període d'estudi de la tesi. La informació així obtinguda ens permet una primera aproximació als articles. Del Vitale coneixem: el títol de l'article, la publicació que el contenia, l'any de publicació, si és teòric o experimental, el cognom del primer autor i els tipus de partícules estudiades. Amb aquesta informació, les fitxes ja permeten visualitzar les publicacions que més tracten les noves partícules, quines tracten més la problemàtica experimental i quines la teòrica, com es distribueixen al llarg dels anys els articles experimentals i teòrics, etc.

No obstant això, al nostre parer la bibliografia de Vitale patia d'alguns desavantatges. L'autor tradueix a l'anglès tots els títols dels articles, i cada títol apareix més d'una vegada si es pot incloure en diferents temes alhora.¹ D'altra banda, el títol de l'article apareix modificat segons a quin tema va inclòs, la qual cosa ens priva de saber com apareix originalment en la revista.² Finalment, Vitale mescla articles i *letters* amb contribucions procedents dels *Proceedings of the APS* i, en aquest darrer cas, n'obvia moltes participacions. Tot plegat ens obliga a fer una primera tria de la informació del llibre, per tal que la base de dades disposi d'una fitxa per a cada article, sense que es repeteixin i amb el títol original. D'altra banda, cal resoldre les possibles omissions d'articles, *letters* i contribucions a les reunions de l'APS i establir un criteri per distingir uns i altres. Aquests trets ens han obligat a realitzar un estudi més intensiu de la informació i a treballar directament sobre els originals.

A l'enfrontar-nos amb aquesta tasca, però, hem topat amb altres limitacions. Vitale presenta contribucions de publicacions molt variades i difícils de localitzar, algunes amb un nombre d'articles referents a les noves partícules exigü. En especial ens hem trobat amb la impossibilitat d'analitzar les revistes russes, per la llengua i per la dificultat de localitzar-les en els anys en qüestió.³

Consegüentment, ens hem plantejat una anàlisi més intensiva però reduïda a les quatre revistes que presenten un nombre major de contribucions referents a les noves partícules. Segons Vitale, aquestes són: *Physical Review* (251), *Nuovo Cimento* (265), *Progress of Theoretical Physics* (68), *Philosophical Magazine* (50),⁴ que poden representar una mostra de la producció publicada als quatre grans focus de treball en el camp: els EUA, el continent europeu, el Japó i la Gran Bretanya, respectivament.

Cal especificar, també, alguns convenis adoptats. D'entrada hem reduït la noció d'article que considera B. Vitale. Sota la denominació d'article considerem notes o *letters* a l'editorial junt amb els articles convencionals, però eliminem les contribucions que apareixen de forma

¹Per exemple, *Generalitats sobre hiperons* i *Hiperons neutres* són dues subdivisions que l'autor presenta i que contenen articles en comú.

²Per exemple, si una de les seves subdivisions parla sobre *El mesó tau* i una altra sobre *Hiperons carregats* podem trobar el mateix article amb dos títols diferents: "Report on Bristol group work on tau mesons" i "Report on Bristol group work on hyperons", a Vitale (1960), p. 39 i 74, respectivament.

³El *Journal of Experimental and Theoretical Physics* (JETP) no començarà a tenir una versió anglesa fins al 1955, el *Docl. Acad. Sci. (URSS)* al 1956, i la *Uspeki Phys. Sci. (URSS)* al 1958. Quedi constància, doncs, de la limitació de l'anàlisi a una física eminentment "occidental" i dominada per la llengua anglesa.

⁴Que sumen 634 contribucions del total de 796 presents en el llibre.

conjunta com a contribucions a congressos, simposis o reunions.⁵ En definitiva, la base de dades *Revistes principals* conté els següents articles: *Physical Review* (389), *Nuovo Cimento* (163), *Progress of Theoretical Physics* (86), *Philosophical Magazine* (50).⁶

Per justificar la distinció anterior adduim que el tractament de la informació en un article d'una revista és força diferent al tractament en una contribució a un congrés o en una reunió de l'APS.⁷ És per això que vam optar per analitzar les contribucions als principals congressos i les contribucions a les revistes principals en dues bases de dades diferents.⁸

Aquestes bases de dades s'han dissenyat mitjançant el suport informàtic FileMaker Pro. Tal i com mostren els models a continuació, hem definit uns camps contenidors de la informació considerada d'interès per a cada article de revista i per a cada contribució a congrés. Aquests camps són: títol, revista o congrés on apareix la informació, any, autors, tipus d'article o contribució, grup, font, detector, partícules estudiades i localització.

Breument, els criteris següents a l'hora de definir els camps en les fitxes de les bases de dades són els següents:

Congrés o Revista

Any

Localització Camp exclusiu per a les revistes. Ens indica en quin volum i pàgina de la revista apareix l'article en qüestió. Mostra també informació addicional a través dels següents codis: C (article a casa), L (*letter*), V (apareix ja en el llibre del Vitale).

Autors Es computen tots.

Títol De l'article o de la contribució al congrés.

⁵De fet, aquest criteri afecta únicament a les contribucions presents als suplementes del *Nuovo Cimento* del 1954 i el 1956, que constitueixen els congressos de Pàdua i Pisa, respectivament.

També cal notar que les reunions de l'*American Physical Society* (APS) que es publiquen al *Physical Review* s'han mantingut en la base de dades, però distingint-les dels articles convencionals amb un codi especial APS en el camp *Localització*. De les 389 contribucions, 145 corresponen a contribucions en reunions de l'APS. Aquestes reunions a l'APS s'analitzen separatament en la sec. B.3.1. Tot i així, sovint la referència que apareix al *Physical Review* sobre les reunions de l'APS es redueix a consignar el títol de la contribució a la reunió, sense especificar les dades mínimes desitjables per a la investigació.

⁶Per tant, al *Nuovo Cimento* les 265 contribucions del Vitale s'han reduït a 163 després d'eliminar els articles repetits i les contribucions als congressos de Pisa i de Pàdua, que hi sortiran publicats. Pel que fa al *Physical Review*, els 251 articles trobats per Vitale s'han ampliat a 389 després de la nostra revisió. També s'han ampliat el nombre d'articles trobats al *Progress of Theoretical Physics* i s'ha mantingut el mateix nombre de contribucions al *Philosophical Magazine*.

⁷La informació en congressos és presentada de manera molt més espontània, fins i tot poden aparèixer anècdotes sobre les exposicions, al marge de l'anàlisi científic *per se*. Es pot objectar sobre si els congressos publicats en revistes conserven el caràcter d'aportacions a congressos o s'assemblen més a articles de revista. La nostra opció ha estat considerar-los com a congressos. Els congressos de Pisa (12–18 de juny de 1955) i de Pàdua (12–15 d'abril de 1954), doncs, apareixen a la base de dades *Congressos*.

⁸Malgrat tot cal ser conscients del possible solapament d'ambdós camps (revistes i congressos), ja que, amb freqüència, de la contribució a un congrés en sorgirà un article i, a l'inrevés, moltes de les contribucions en congressos faran referència a resultats recentment publicats en revistes.

Revista	<input type="text"/>	Localització	<input type="text"/>
Any	<input type="text"/>		
Autors	<input type="text"/>		
Títol de l'article	<input type="text"/>		
TIPUS ARTICLE	<input type="text"/>		
GRUP	<input type="text"/>		
Font	<input type="text"/>		
Detector	<input type="text"/>		
Partícules estudiades	<input type="text"/>		

Figura B.1: Model de fitxes de la base de dades *Revistes principals*.

Congrés	<input type="text"/>
Any	<input type="text"/>
Autors	<input type="text"/>
Títol de la contribució	<input type="text"/>
TIPUS	<input type="text"/>
GRUP	<input type="text"/>
Font	<input type="text"/>
Detector	<input type="text"/>
Partícules estudiades	<input type="text"/>

Figura B.2: Model de fitxes de la base de dades *Congressos*.

Tipus d'article La classificació bàsica és en *teòrics* o *experimentals*. En alguns casos, però, hem matisat considerant *instrumental* (43 contribucions als congressos), *experimental-resum* (35 contribucions als congressos), *resum* (4 contribucions als congressos i 1 article en revista).⁹

Per al cas concret dels congressos cal notar que normalment tracten altres temes a més de les noves partícules. Aquestes contribucions a altres temes també s'han computat en la base de

⁹El qualificatiu *instrumental* s'atribueix a les contribucions que parlen del muntatge experimental, de les seves condicions de funcionament, dels mètodes de mesura, errors i calibratge del muntatge... sense prioritzar informació sobre dades experimentals explícites. La distinció instrumental, però, és poc representativa del paper de la instrumentació, perquè aquesta informació, o bé queda amagada en articles considerats experimentals que expliquen el muntatge juntament amb l'exposició dels resultats, o bé, simplement i en la majoria dels casos, forma part d'una literatura específica dedicada a la instrumentació.

El qualificatiu *experimental-resum* fa referència a contribucions que clarament no aporten resultats nous, sinó que es limiten a recopilar dades anteriors, per presentar l'estat de la qüestió. Quan es tracta de contribucions que ni tan sols exposen dades experimentals ni mètodes o hipòtesis teòriques les qualifiquem simplement de *resum*, com per exemple la cloenda de Leprince-Ringuet al congrés de Bagnères, on especula sobre l'arribada dels acceleradors.

dades, però sense investigar-les específicament. És a dir, cada contribució al congrés té la seva fitxa a la base de dades, independentment de si parla o no dels nous elements. Si no en parla, en el camp *tipus d'article* s'ha escrit el títol de la divisió genèrica sota la qual apareix en el congrés.¹⁰ Si la contribució tracta de les noves partícules, en el camp *tipus d'article* s'especifica si és teòric, experimental, instrumental, experimental-resum o resum.¹¹ D'aquesta manera, la informació anterior es pot utilitzar per visualitzar els temes que es tracten i el pes específic que tenen, d'afegit al que ens expliquen sobre les noves partícules.¹²

Grup Hem computat el nom del grup al qual es troba subscript l'autor o autors en el moment de realitzar l'article, tal i com apareix habitualment en els articles. Si l'article o contribució és signat per autors que pertanyen a diferents grups, hem especificat tots aquests grups. Així es pot obtenir una idea aproximada de les col·laboracions que s'establiran entre els diferents grups que treballen en partícules estranyes.¹³

Font Hi ha dues possibilitats: els raigs còsmics o els acceleradors. En el cas dels acceleradors, sempre que l'article ho especifica hem distingit de quin es tractava.

Detector Com a possibles detectors diferenciem clarament l'ús de les cambres de boira i de les emulsions fotogràfiques, amb una petita representació dels comptadors aplicats a la detecció de les noves partícules i una encara més petita representació de les cambres de bombolles que tot just comencen a donar fruits en aquest camp concret al final de l'etapa analitzada.

Partícules estudiades S'ha fet la distinció de kaons (mesó K en els seus múltiples modes de desintegració), hiperons i hiperfragments. Sovint, però, trobem l'assignació conjunta *kaons i hiperons* quan un mateix article tracta evidències d'ambdós tipus.

L'anàlisi dels diferents camps definits, combinats a voluntat, ens dóna informació sobre les fonts i les tècniques de detecció més usades, el desplaçament de l'interès dels raigs còsmics als acceleradors, els grups de treball principals, la proporció de contribucions teòriques i experimentals, etc. Sense oblidar que sols es reflecteix la informació que ens proporcionen les revistes principals i els congressos analitzats.

La tesi s'ha dividit en tres etapes genèriques, per a cadascuna d'elles es farà ús de la informació obtinguda de les bases de dades quan aquesta pugui ésser significativa. Remarquem, però, que el fil argumental del treball no se sosté en els resultats estadístics que es puguin obtenir d'aquesta anàlisi. Cal afegir, també, la informació obtinguda d'altres fonts primàries —com la correspondència o els llibres de text contemporanis— i de les fonts secundàries.

B.2 Dels Congressos

La definició de congrés s'entén en un sentit ampli, sinònim de conferència o simposi, amb la característica bàsica de contenir la participació de diferents grups que exposen els seus

¹⁰Per exemple, 15 de les 29 contribucions al Rochester (1952a) apareixen com sessions dedicades a *Interaction of π mesons*, i amb aquest nom s'han computat en el camp *tipus d'article*.

¹¹En alguns casos, el congrés no proporciona una divisió clara de les sessions. Aleshores, les contribucions que no tracten sobre les noves partícules apareixen amb el títol general del congrés. Per exemple, a Caltech (1948) totes les accepcions que no corresponen a teòric o experimental es troben amb el nom de raigs còsmics.

¹²Vegeu sec. B.2.1.

¹³Vegeu sec. B.4.1.

resultats sobre les noves partícules estranyes. El coneixement de la seva existència ha vingut marcat, en primer lloc, per l'anàlisi de les fonts secundàries i, posteriorment, per la pròpia citació en les fonts primàries. N'hem treballat una mostra que considerem representativa dels més importants pel que fa a les partícules estranyes, tot i que no constitueix una recerca completa.

Els congressos considerats són: Caltech (1948), Bristol (1948), Solvay (1948), Bombay (1950), Dublín (1951), 2n Rochester (1952a), 3r Rochester (1952b), Bagnères (1953), Kyoto&Tokyo (1953), 4t Rochester (1954), Pàdua (1954), Glasgow (1954), 5è Rochester (1955), Pisa (1955) i 6è Rochester (1956).¹⁴

B.2.1 Temàtiques presents en els congressos analitzats i proporció de contribucions dedicades a les noves partícules

Malgrat l'anàlisi de quinze congressos pugui semblar que comporta l'obtenció d'una gran quantitat d'informació sobre les noves partícules, cal notar que de les 967 contribucions que s'hi recullen sols 369 són referides en aquests elements. Aquesta dada pot ser significativa de la presència del nou camp en el conjunt de la "física de les partícules elementals". El descobriment de les partícules estranyes és un descobriment força dilatat en el temps, durant aproximadament una dècada, i eclipsat per altres camps de treball, com la física de pions o la QED. Aquest fenomen es pot precisar més amb la proporció de contribucions que apareixen a cada congrés dedicades a les noves partícules respecte el nombre total de contribucions, i a través dels diferents temes presents en aquests congressos. Detallem a continuació aquestes dades.

¹⁴Vegeu l'entrada CONGRESSOS a la bibliografia, p. 397. En la bibliografia, els congressos apareixen citats per ordre alfabètic. En canvi, a l'hora de citar-los conjuntament en el text n'hem prioritzat l'ordre cronològic.

congressos	índex	número de contribucions dedicades a les noves partícules	número de contribucions dedicades a altres temes	percentatge
Caltech (1948)	Cosmic Rays	2	22	8.3%
Bristol (1948)	Experiments on the Primary Radiation Explosive Disintegration of Nuclei by Cosmic Radiation Experiments on Cosmic Ray Mesons of Mass 200 Experiments on Mesons of Mass 300 Penetrating and Extensive Air Showers Present State of Meson Theory Technical Subjects Addenda	4	25	13.8%
Solvay (1948)	Particules élémentaires	7	20	25.9%
Bombay (1950)	Measurements in Quantum Electrodynamics Pure Mathematics Properties of Mesons Primary Cosmic Radiation V-particles and Cosmic Rays Relativistic Wave Equations Meson Theory Nucleons High Energy Nuclear Events Quantum Theory of Fields High Energy Nuclear Events Origin of Cosmic Rays	1	26	3.7%
Dublín (1951)	Cosmic Rays	2	7	22.2%
Bagnères (1953)	Rayonnement Cosmic	70	10	87.5%
Kyoto & Tokyo (1953)	PART I. FIELD THEORY AND ELEMENTARY PARTICLES Field Theory A—Non-Local Theory Field Theory B—Miscellaneous Problems Symposium on Cosmic Rays A—Time Variation of Cosmic-Ray Intensity Symposium on Cosmic Rays B—Miscellaneous Problems Cosmic Rays and V-Particles Pions Intermediate and Strong Coupling Theory Nuclear Forces Informal Meeting on V-Particles Informal Meeting on Field Theory PART II. NUCLEAR PHYSICS Nuclear Reaction Shell Structure and Beta-Decay	8	48	14.3%
Pàdua (1954)	Introduzione Mesoni τ Mesoni K Iperoni carichi e neutri Frammenti nucleari eccitati Osservazioni con camera di Wilson Getti e sciami penetranti Questioni tecniche Relazioni dei Comitati speciali Proposte di normalizzazione Appendice	62	9	87.3%
Glasgow (1954)	Nuclear Forces and Nucleon Scattering Nuclear Data and Nuclear Models Photodisintegration Beta and Gamma Ray Transitions π -Mesons Field Theory High Energy Experimental Technique Heavy Mesons and Hyperons	8	93	7.9%
Pisa (1955)	Particelle pesanti instabili Teoria quantistica dei campi e interazione tra mesone e nucleone Argomenti vari	87	80	52.1%

congressos Rochester	índex	número de contribucions dedicades a les noves partícules	número de contribucions dedicades a altres temes	percentatge
1950 1r Rochester (16 de desembre)	During the first Rochester conference (December 16, 1950) Oppenheimer suggested a discussion on τ -mesons. Nothing came of that, the day was spent on π -nucleon and muon physics (Pais 1986, 513).			
Rochester (1952a)	I. Interaction of π Mesons with Complex Nuclei II. Interaction of π mesons with hydrogen and deuterium III. Megalomorphs (V, v, K, τ) IV. Appendices	14	15	48.3%
Rochester (1952b)	I. Charge independence and the saturation of nuclear forces II. Pion production and pion-nucleon scattering III. V^0 particles IV. A. Superheavy mesons χ κ τ B. Theoretical approaches to the pion problem V. Pion-nucleon phase shifts; Megalomorphs VI. Theoretical calculations VII. Experimental Physics VIII. Appendices	16	41	28.1%
Rochester (1954)	I. Nucleon-nucleon scattering and polarization II. Theoretical session III. Experimental session IV. Cosmic rays V. Pion-nucleon scattering and photoproduction of pions VI. Analysis of pion scattering, multiple meson production VII. Appendices	18	63	22.2%
Rochester (1955)	I. Low energy pion phenomena II. High energy pion phenomena III. Theoretical session IV. Elementary particles-experimental V. Elementary particles VI. Elastic scattering of nucleons VII. Accelerator physics VIII. Summary session IX. Appendix	30	59	33.7%
Rochester (1956)	I. Classical pion physics II. Nucleon-nucleon scattering below 500 MeV III. Theoretical session IV. Pion-nucleon and nucleon-nucleon interactions above 500 MeV V. Properties of heavy mesons and hyperons VI. Production and interaction of heavy mesons and hyperons VII. Anti-nucleons VIII. Theoretical interpretation of new particles IX. Mesonic atoms, electron-nucleon and photon-nucleon scattering, and miscellaneous topics	40	80	33.3%

B.3 De les Revistes

Malgrat la reducció del nostre estudi a les quatre revistes que presenten un major nombre de contribucions, l'anàlisi inicial de la bibliografia del Vitale permet visualitzar el conjunt de revistes que, segons ell, s'ocupen de les partícules estranyes:

revista	número d'articles (1946–56)
Acta Phys. Pol.	2
Am. J. Phys.	1
Ann. Phys. (París)	1
Ann. Rev. Nucl. Sci.	2
Ark. Fys.	1
Atomic Sci. Journal	1
Bull. Polish Acad. Scien.	1
Bull. Res. C. Israel	1
Compt. Rend.	7
Docl. Acad. Sci. (URSS)	27
Docl. Arm. Acad. Sci. (URSS)	1
Helv. Phys. Acta	3
Isvestia Acad. Sci. (URSS)	1
JETP	48
Journal de Physique	2
K. Danske Vid. Selsk.	1
Nature	5
Nucl. Phys.	16
Nuovo Cimento	265
Phil. Mag.	50
Phys. Rev.	251
Physica	1
Proc. Indian Acad. Sci. A	7
Proc. Nat. Acad. Sci.	1
Proc. Phys. Soc.	6
Proc. Roy. Soc.	17
Prog. Theo. Phys.	68
Rend. Acad. Naz. Lincei	1
Rev. Mod. Phys.	2
Sci. and Cult.	1
Uspeki Phys. Sci. (URSS)	3
Z. Naturf.	2
Z. Phys.	2

Si ens centrem en les revistes principals, podem destacar la proporció de *letters* respecte articles:

revista	número d'articles	número de <i>letters</i>
Nuovo Cimento	161	2
Phil. Mag.	39	11
Phys. Rev.	270	119
Prog. Theo. Phys.	36	50

B.3.1 Les reunions de l'APS a través del *Physical Review*

A finals del segle XIX, es funden el *Physical Review* (1893) i l'APS (1899) els quals, segons Kevles, “gave the profession institutional instruments necessary to set standards of quality in research on a national scale.”¹⁵ Inicialment el *Physical Review* es constitueix com una revista independent que, a partir del 1903, inclourà els *Proceedings* de l'APS. A partir del 1912, però, la publicació serà gestionada per la pròpia institució.¹⁶

En la dècada que ens ocupa (1946–1956), el *Physical Review* apareix de forma bimensual i mostra, gairebé amb la mateixa regularitat, els *Proceedings* de l'APS que han tingut lloc la quinzena en qüestió.¹⁷

Els resums d'aquestes reunions sovint mostren divisions temàtiques útils per veure quins temes captaven l'atenció en aquell moment, i per veure com s'hi introdueixen les noves partícules.¹⁸

Les primeres referències a les noves partícules es troben a partir del segon volum del 1950 i, a partir d'aquest moment, les contribucions d'aquest tipus apareixeran en els *Proceedings* de l'APS més o menys regularment. Una transcripció completa d'aquestes reunions resultaria massa extensa, i segurament confusa pel que fa a l'objecte del nostre interès, per això ens restringim a les reunions en què es fa menció de les noves partícules. A continuació, doncs, resumim en títols els *Proceedings* de l'APS d'aquests anys en el *Physical Review*, indicant en negreta els que parlen de les noves partícules i afegint entre parèntesi el nombre total de contribucions de la reunió en qüestió, referents o no a les noves partícules. D'aquesta manera, pretenem tenir una estimació relativa de la dedicació prestada al nostre tema d'estudi. En una tercera columna especificuem, quan n'hi ha, la temàtica general en què s'inclouen les participacions referents al nou camp, el títol d'aquestes participacions, i el número de fitxa que li correspon en la base de dades, per a informacions addicionals sobre la contribució en qüestió.

¹⁵Kevles (1977), 79.

¹⁶En la dècada dels 50, l'AIP gestiona 9 publicacions: *Reviews of Modern Physics*, *Journal of the Optical Society of America*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, *American Journal of Physics*, *The Review of Scientific Instruments*, *The Journal of Chemical Physics*, *Journal of Applied Physics*, *Physics Today* i *The Physical Review*.

¹⁷A voltes els resums de les reunions apareixen també al *Bulletin of the American Physical Society* o al *Physics Today*.

¹⁸Així per exemple, el volum 76 (1949) presenta 6 reunions de l'APS, amb temàtiques tan diverses com: *Symposium on Spectroscopy and Molecular Structure*; *Symposium on Selected Topics in Nuclear Physics*; *Symposium on Atomic Frequency and Time Standards*; *Apparatus of Nuclear Physics*; *Gyromagnetic Ratios*; *Cosmic Rays*; *Heat and Cold*; *Reactions of Transmutation*; *Fluid Dynamics*; *X-Rays*; *Solid-State Physics*; *Mostly Semi-Conductors*; etc.

any	volum	Proceedings of the APS	Contribucions sobre noves partícules
1950	77	<ul style="list-style-type: none"> • Meeting of the New England Section • Meeting of the Division of Fluid Dynamics • 295th Meeting of the APS 	
	78	<ul style="list-style-type: none"> • 296th Meeting of the APS (74) 	Contributed Papers: <ul style="list-style-type: none"> • Mass Measurements of Cosmic Ray Particles (573) • Photographic Evidence for the Existence of a Meson of More than 450 Electron Masses (574)
		<ul style="list-style-type: none"> • Midwinter Meeting of the Ohio Section • 297th Meeting of the APS • Meeting of the Division of Electron Physics • Meeting of the Division of High-Polymer Physics • 298th Meeting of the APS (73) 	Papers on Various Topics: <ul style="list-style-type: none"> • The Meson Mass Spectrum (575)
	79	<ul style="list-style-type: none"> • 299th Meeting of the APS • Meeting of the Southeastern Section • 6th Meeting of the Division of Fluid Dynamics 	
	80	<ul style="list-style-type: none"> • 300th Meeting of the APS (116) 	Symposium on Cosmic Rays: <ul style="list-style-type: none"> • Some Properties of the New Unstable Cosmic Ray Particles (576)
		<ul style="list-style-type: none"> • Fall Meeting of the New York State Section 	

any	volum	Proceedings of the APS	Contribucions sobre noves partícules
1951	81	<ul style="list-style-type: none"> • 299th Meeting of the Ohio Section • 301st Meeting of the APS • 302nd Meeting of the APS (106) 	Invited Papers: <ul style="list-style-type: none"> • Unstable Particles in Penetrating Cosmic Ray Showers (577)
	82	<ul style="list-style-type: none"> • 35th Meeting of the New England Section • Midwinter Meeting of the Ohio Section • 303rd Meeting of the APS (291) 	Cosmic-Ray Particles; Nuclear Scattering: <ul style="list-style-type: none"> • Decay Processes Observed in a Multiple Plate Cloud Chamber at 10,600 Feet (578) • Some Observations on the New Unstable Cosmic Ray Particles (579)
	83	<ul style="list-style-type: none"> • 3rd Annual Conference on Gaseous Electronics • Meeting of the Division of Electron Physics • 304th Meeting of the APS • Joint Meeting of the New England Section and the New York State Section • 305th meeting of the APS (283) 	Cosmic Rays, Mainly Showers and Stars: <ul style="list-style-type: none"> • Cloud-Chamber Observations of Forked Tracks in Penetrating Showers (580) Invited Papers: <ul style="list-style-type: none"> • V-Particles and their Disintegration Products (581)
	84	<ul style="list-style-type: none"> • Meeting of the Southeastern Section • 307th Meeting of the APS • 308th Meeting of the APS (87) 	Contributed Papers: <ul style="list-style-type: none"> • Further Cloud Chamber Observations of V-Particles (582) • On the Mass of Neutral V-Particles (583) • Two Unstable V Mesons Observed in a Cloud Chamber at Sea Level (584)
	84	<ul style="list-style-type: none"> • Meeting of the Division of Fluid Dynamics • Meeting of the Division of Fluid Dynamics • Fourth Annual Conference on Gaseous Electronics • Autumn Meeting of the New York State Section 	

any	volum	Proceedings of the APS	Contribucions sobre noves partícules
1952	85	<ul style="list-style-type: none"> • Fall Meeting of the Ohio Section • Meeting of the Division of Electron Physics • Meeting at Chicago • Thanksgiving Meeting at Houston (63) • 310th Meeting of the APS (137) 	Invited Papers on Cosmic-Ray Phenomena: <ul style="list-style-type: none"> • Report on V-particles (572) • Angular Distribution of the Decay Tracks of Neutral V-particles (571)
	86	<ul style="list-style-type: none"> • Autumn Meeting of the New England Section • 311th Meeting of the APS (300) 	Cosmic-Ray Particles: <ul style="list-style-type: none"> • The Disintegration of V-Particles (585) Meson Theory: <ul style="list-style-type: none"> • Stability of Neutral Scalar Heavy Mesons (233) • Intrinsic Properties of τ-Mesons Derived from Conservation Laws (411)
	87	<ul style="list-style-type: none"> • March Meeting of the APS • 27th meeting of the New York State Section • Spring Meeting of the Ohio Section • 18th annual Meeting of the Southeastern Section • 313th Meeting of the APS (341) 	Stars and V-Particles: <ul style="list-style-type: none"> • On the Analysis of V^0-Disintegration in Flight (589) • Two Examples of V^0-Decay Observed in a Multiple Plate Cloud Chamber (590) • General Properties of V^0-Particle Decay (591) • Energy Release in V^0-Decays (588) • Production of V^0- Particles (592) Invited Papers on New Cosmic-Ray Particles: <ul style="list-style-type: none"> • Some Recent Studies of V-Particles (593) • V-Particles (594) • Report on Recent Work at Bristol University, England (595)
	88	<ul style="list-style-type: none"> • Meeting of the New England Section • 314th Meeting of the APS (127) 	Cosmic Rays: <ul style="list-style-type: none"> • Mass Determination of Fast Cosmic Ray Particles in Emulsions (596)
		<ul style="list-style-type: none"> • 28th Meeting of the New York State Section 	

any	volum	Proceedings of the APS	Contribuciones sobre novas particules
1953	89	<ul style="list-style-type: none"> • 5th Annual Conference on Gaseous Electronics • Autumn Meeting of the New England Section (7) • Meeting of the Ohio Section • Thanksgiving Meeting of the APS (157) 	<ul style="list-style-type: none"> • New Particles in Cosmic Rays (598)
	90	<ul style="list-style-type: none"> • Annual Meeting of the APS (310) 	<p>Cosmic Rays:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mass Measurements of Heavy Mesons (609) <p>Cosmic Rays:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimental Results on Neutral V Particles (6) • Families of Fundamental Particles (236) • Cloud Chamber Observations on the Unstable Heavy Charged Particles in Cosmic Rays (518) • Magnetic Field Cloud Chamber for Studying Nuclear Interactions in the Cosmic Radiation, II. Preliminary Results (519) • A New Magnet Chamber for the Study of V Particles (520)
	91	<ul style="list-style-type: none"> • Spring Meeting of the Ohio Section • March Meeting of the APS • Spring Meeting of the APS (387) 	<p>Cosmic Rays: Primary Particles, Showers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A Cloud Chamber Investigation of Nuclear Interactions (602) <p>Cosmic Rays: Stars, Curious Particles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Magnetic Cloud-Chamber Observations of V-Particles. I. Apparatus and Reduction of Data (603) • Magnetic Cloud-Chamber Observations of V-Particles. II. Neutral Particles (515) • Momenta of V^0 Particles (516) • A Speculation on V-Spin (445) • Charged Zeta-Mesons (321) • The Decay of Heavy Mesons in Nuclear Emulsions (517) <p>Cosmic Rays and Mesons:</p> <ul style="list-style-type: none"> • On Some Unusual Cases of Heavy Mesons (K and V_0) Observed in Photographic Emulsions (608)
	92	<ul style="list-style-type: none"> • Meeting of the Division of Fluid Dynamics • 316th Meeting of the APS (123) 	<p>Invited Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Some Theoretical Problems Presented by the V Particles (607) <p>Contributed Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • On the Mean Lifetime of V^0 Particles (158)
		<ul style="list-style-type: none"> • Spring Meeting of the APS • Summer Meeting of the APS • September Meeting of the APS (120) 	<p>Invited Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Some Recent Results on V Particles (606) <p>Contributed Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cascade Decay of V Particles, I (109) • Cascade Decay of V Particles, II (514) • Charged and Neutral V Particles (523) • Cloud-Chamber Observation of the Decay of a τ Meson (524)

any	volum	Proceedings of the APS	Contribucions sobre noves partícules
1954	93	<ul style="list-style-type: none"> • Autumn Meeting of the New York State Section • Autumn Meeting of the Ohio Section • Autumn Meeting of the New England Section • 6th Annual Conference on Gaseous Electronics • Thanksgiving Meeting held at Chicago (142) 	<p>Cosmic Rays; Particles Other Than Pi-Mesons:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Charged Particles Intermediate in Mass between Proton and Deuteron (172) • K^\pm Mesons from Fundamental Nuclear Collisions (329) • V_1^0 Particles as a High Angular States of Meson-Nucleon System (457) • Angular Correlations in τ-Meson Decay (415) <p>Invited Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reports on the Cosmic-Ray Conferences Held in July, 1953, at Bagnères-de-Bigorre (a) Conference on Intensity-Time Variations. (b) Conference on Fundamental Particles (663) • Evidence for the Existence of the V_4 Particle (664) • Theoretical Speculations about New Unstable Particles (665)
	94	<ul style="list-style-type: none"> • Winter Meeting of the APS • Annual Meeting of the APS (336) 	<p>Brookhaven-Nevis Symposium:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Heavy Unstable Particles and Multiple Meson Production Observed in a Cloud Chamber at the Cosmotron (605) <p>Theoretical Physics:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Possible Angular Correlations Involving V Particles (458) <p>Cosmic Rays and Diverse Particles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Properties of New V Particles (604) • Gamma Rays Associated with S Particle Decays (56) • Unstable Heavy Particles from the Cosmotron (55) • Kinematics of Λ^0 Production (561) • A Search for K Particles Using Cerenkov Counters (57) • Virtual States of Two Meson System (394)
	95	<ul style="list-style-type: none"> • Meeting at Austin, Texas • March Meeting of the APS • Spring Meeting of the New England Section • Meeting of the Southeastern Section (74) 	<p>Invited Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recent Results from the Study of Cosmic Rays with Nuclear Emulsions (630)
		<ul style="list-style-type: none"> • Spring Meeting of the New York State Section • Spring Meeting of the APS (406) 	<p>Strange Particles of the Cosmic Rays:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Observations on Unstable Particles in Photographic Emulsion (610) • Decay of a Heavy Neutral Particle (164) • Charged Heavy Mesons from Nuclear Collisions (62) • Magnetic Cloud Chamber Observations of V-Particles. I. Charged V-Particles (63) • Magnetic Cloud Chamber Observations of V-Particles. II. Status of Work on the θ^0 Meson (13) • Production of V^0 Particles in Copper (165) • Momentum of S-Particle Secondary (64) • Recent Results on S Particles (65) • An Unusual Cosmic-Ray Event (611)
	96	<ul style="list-style-type: none"> • Spring Meeting of the Ohio Section • June Meeting of the APS (144) 	<p>Cosmic Rays and Mesons:</p> <ul style="list-style-type: none"> • An Example of an Unstable Nuclear Fragment being Emitted from a Heavy Meson induced Star (136)
		<ul style="list-style-type: none"> • Summer Meeting of the APS (129) 	<p>Cosmic Rays and High Energy Physics:</p> <ul style="list-style-type: none"> • The Identification of Heavy Mesons (647) • Recent Results on V-Particles (648) • V-Particles with Neutral Secondaries (649) <p>Contributed Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unstable Cosmic-Ray Particles Observed in a Double Cloud Chamber Arrangement (639) • Cascade Decay of a Negative Hyperon (640)
		<ul style="list-style-type: none"> • Fall Meeting of the Ohio Section 	

any	volum	Proceedings of the APS	Contribuciones sobre novas partículas
1955	99	<ul style="list-style-type: none"> • Meeting of the Southeastern Section • June Meeting of the APS (194) 	<p>Cosmic Rays:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identification of Cosmic-Ray Shower Particles in Emulsions. I. Ionization-Scattering Method (622) • Identification of Cosmic-Ray Shower Particles in Emulsions. II. Range-Scattering Method (623)
		<ul style="list-style-type: none"> • Spring Meeting of the Ohio Section • Spring Meeting of the New York State Section • Spring Meeting of the APS (394) 	<p>Cosmic Rays:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identification of Cosmic-Ray Shower Particles in Emulsions (624) <p>Theoretical Physics, I; Meson Theory:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anomalous τ-Meson Decay (627) • The Λ^0-θ^0 Ratio in Pb and C (628) <p>Invited Papers on Photoproduction of Mesons and on Cosmic Rays:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recent Results concerning Hyperons and Heavy Mesons (631) • K-Mesons and Hyperons in the Cosmic Radiation (632) <p>Mostly Hyperons and Heavy Mesons:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Production of Heavy Mesons at the Bevatron (612) • β Decay of K-Mesons (613) • "V-Particles" in Nuclear Emulsion (614) • Comparison of Ionization-Range Methods of Mass Estimation (615) • Stopped K-Mesons Observed near the Geomagnetic Equator (616) • Recent Results on S-Particles (617) • Timing Measurements on Penetrating Cosmic Ray Showers (618) • Momentum and Ionization Measurements on Charged V-Particles (619) • Angular Correlations in V^0-Particle Decays (620) • Evidence for Charge Asymmetry of V^\pm-Particles (621)
	100	<ul style="list-style-type: none"> • 2nd Mexico Meeting of the APS (160) 	<p>Cosmic Rays; Elementary Particles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nonmesonic Decay of a Helium Hyperfragment (541) • Interactions of Negative K-particles at Rest (542) • Decay of an Anomalous Charged K Meson (543) • Evidence for the β Decay of Neutral V Particles (544) <p>Invited Papers on "Elementary" Particles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Charged K Mesons (658) • Photoplate Studies on the K-Meson Family (659) • Recent Studies of V Particle Production (660) • Heavy Mesons and Hyperons: A Progress Report (661)
		<ul style="list-style-type: none"> • Fall Meeting of the New York State Section • Fall Meeting of the Ohio Section • 8th Annual Gaseous Electronics Conference • Thanksgiving Meeting of the APS (198) 	<p>Invited Papers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Properties of Heavy Mesons Produced at the Bevatron (662) <p>Heavy Mesons and Hyperons:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Production of Hyperon and K-Mesons in the High Energy π^- Beam of the Berkeley Bevatron (679) • Hyperfragments in Light Elements Produced by the Berkeley Bevatron (680) • Analysis of Capture Stars of K^--Mesons from the Berkeley Bevatron (681) • Disintegration of Hyperfragments (682) • The Spin of the τ^+ Meson (683) • Effects of Angular Momentum on τ-Decay Schemes (684) • Production of Heavy Unstable Particles in π^--P Collisions at 1.0 BeV (685) • Double-Plate Cloud-Chamber Study of V^0-Particles. I. Classification (686) • Double-Plate Cloud-Chamber Study of V^0-Particles. II. Mean Decay Times of θ^0 and Λ^0 Particles (687) • K-Meson Lifetimes (688)
		<ul style="list-style-type: none"> • Fall Meeting of the New England Section • Winter Meeting of the APS 	

Destaquem que aproximadament una tercera part de les reunions de l'APS transcrits al *Physical Review* aquests anys mostren contribucions referents a les noves partícules. En aquests casos, molt rarament aquestes contribucions suposen més del 5% del nombre total de contribucions a la reunió. D'altra banda, la presència de contribucions del nou camp en els *Proceedings* augmenta amb els anys, però, respecte al total de contribucions, l'augment és poc significatiu.

Notem, també, el predomini del títol genèric *Cosmic Rays* per englobar les diferents participacions, tant als primers com als darrers anys del període. En un cas el títol és *V-Particles* (vol. 87, 1952), en un altre es parla de *Curious Particles* (vol. 91, 1953), també de *Particles Other Than Pi-Mesons* (vol. 93, 1954), *Diverse Particles* (vol. 94, 1954), *Strange Particles* (vol. 95, 1954). Però la nomenclatura “estranya” no sembla imposar-se i sí s'utilitza en canvi repetidament *Hyperons and Heavy Mesons* (vol. 98, 1955; vol. 99, 1955; vol. 100, 1955) i *Elementary Particles* (vol. 100, 1955).

Finalment cal precisar que el nombre de fitxes de la base de dades referides a articles en reunions de l'APS no és menystenible. Del total de 389 articles trobats en el *Physical Review* referents a les noves partícules, 145 corresponen a contribucions en aquestes reunions. En el gràfic B.3 visualitzem els grups que hi participen i la proporció d'articles teòrics i experimentals amb els anys. S'observa la participació destacada d'alguns grups: Berkeley (W) (21), Caltech (W) (19), Indiana (CE) (15), MIT (E) (16), NRL (E) (13), Princeton (E) (11), BNL (E) (9); amb participació mínima de grups de fora dels EUA: Londres (1), Bristol (1), Bombay (1), École Polytechnique (2) i Pàdua (1). Pel que fa al tipus d'article, s'observa un creixement del nombre d'articles experimentals amb els anys.¹⁹

¹⁹De les 145 participacions, però, 15 no tenen la temàtica determinada.

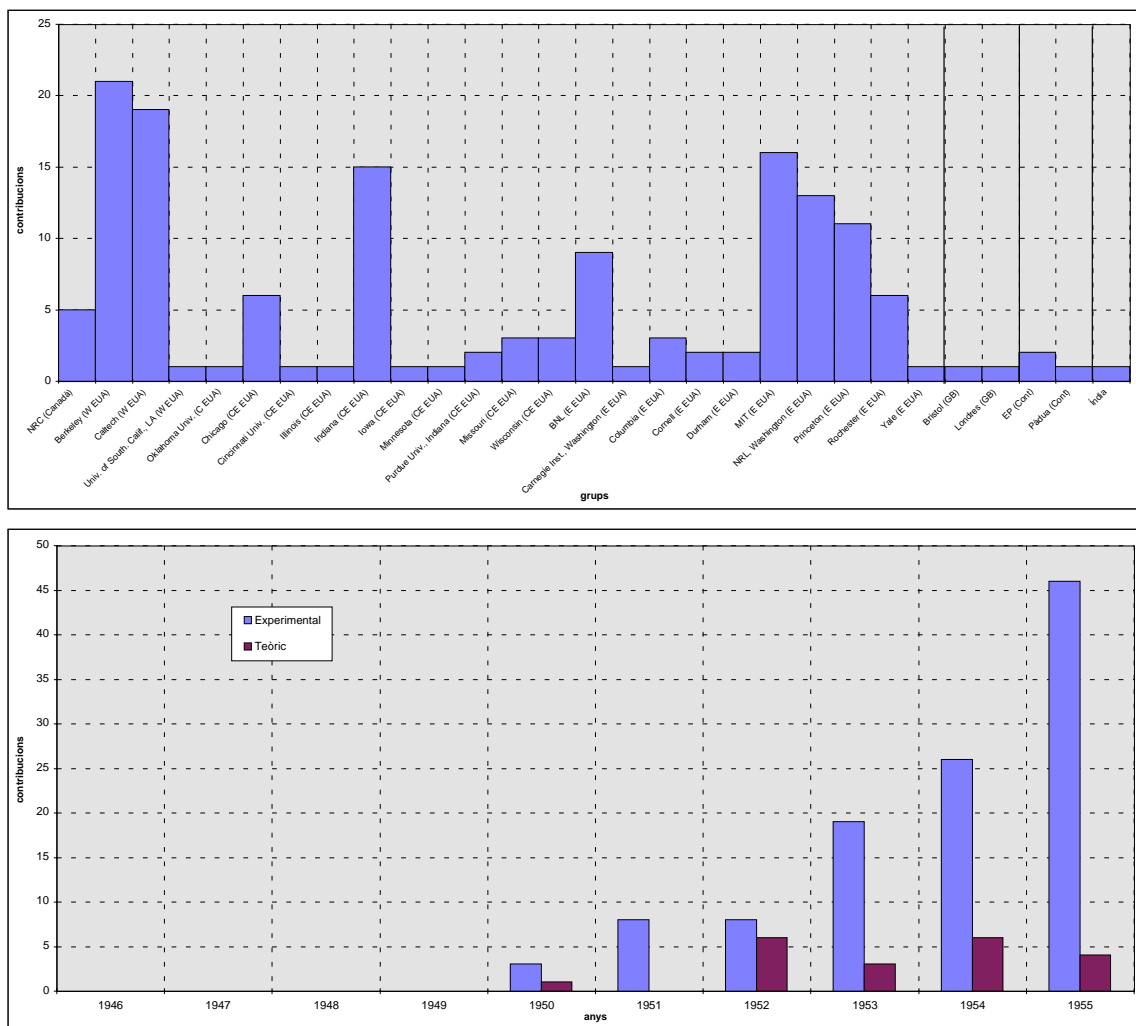


Figura B.3: Grups i temàtica (teòrica o experimental) a través de les reunions de l'APS presents en el *Physical Review*.

B.3.2 La classificació de les noves partícules a través dels índexs de les revistes

De les quatre revistes principals investigades, sols el *Physical Review* i el *Nuovo Cimento* mostren un índex per matèries.²⁰ Aquest tipus d'índex ens permet veure com les noves partícules es van fent un lloc en les revistes a mesura que passen els anys. A continuació transcrivim els títols dels índexs per matèries dels volums que contenen contribucions referents a les noves partícules:

1949	vol. 75	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 76	Cosmic Radiation Mesons
1950	vol. 77	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 78	Cosmic Radiation
	vol. 79	
	vol. 80	Mesons
1951	vol. 81	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 82	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 83	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 84	Cosmic Radiation Mesons
1952	vol. 85	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 86	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 87	Cosmic Radiation Mesons
	vol. 88	Cosmic Radiation Field Theory Mesons
1953	vol. 89	Cosmic Radiation Field Theory Mesons
	vol. 90	Cosmic Radiation Mesons Methods and Instruments
	vol. 91	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Field Theory Mesons Methods and Instruments
	vol. 92	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Mesons

²⁰A partir del 1957, el *Philosophical Magazine* inicia un índex per matèries en el qual les noves partícules apareixen en el tema genèric “mesons”.

1954	vol. 93	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Field Theory Mesons
	vol. 94	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Field Theory Mesons
	vol. 95	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Field Theory Mesons
	vol. 96	Cosmic Radiation Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons
1955	vol. 97	Elementary Particle Interactions Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons
	vol. 98	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons
	vol. 99	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Field Theory Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons Scattering of Mesons
	vol. 100	Cosmic Radiation Elementary Particle Interactions Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons and Hyperons Scattering of Mesons and Hyperons
1956	vol. 101	Elementary Particle Interactions Field Theory Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons and Hyperons Scattering of Mesons and Hyperons
	vol. 102	Field Theory Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons and Hyperons Scattering of Mesons and Hyperons
	vol. 103	Elementary Particle Interactions Field Theory Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons and Hyperons Scattering of Mesons and Hyperons
	vol. 104	Elementary Particle Interactions Field Theory Hyperons (see Mesons and Hyperons) Mesons and Hyperons Nuclear Reactions Induced by Mesons and Hyperons Scattering of Mesons and Hyperons

Observem que al *Physical Review* no apareix una denominació explícita per a les noves partícules fins al darrer volum de 1954. Tanmateix no es tracta de la definició d'un grup nou, sinó que s'inclou en el grup *Mesons* (mesons π i "mesons μ ") i afegeixen el distintiu *Hyperons*, necessari per reconèixer les noves partícules més massives que els nucleons. La denominació d'hiperons també apareix sola, però ens remet a la denominació conjunta *Mesons and Hyperons*. En anys anteriors, els articles sobre noves partícules quedaven absorbits en el grup de mesons o de raigs còsmics, amb alguna idea teòrica en el grup de teoria de camps. A finals de 1953 també comencen a aparèixer articles del tema en el camp *Elementary Particle Interactions*, fins el moment reservat a les "velles" partícules.

Un altre aspecte interessant es pot trobar en l'aparició progressiva en l'índex del conjunt de títols: *Nuclear Reactions, General, Nuclear Reactions Induced by α Particles and He^3 , Nuclear Reactions Induced by Deuterons and Tritons, Nuclear Reactions Induced by Mesons, Nuclear Reactions Induced by Neutrons, Nuclear Reactions Induced by Protons* i d'un altre conjunt com: *Scattering, General, Scattering of α Particles, Scattering of Deuterons, Scattering of Electrons and Positrons, Scattering of Mesons, Scattering of Neutrons, Scattering of Protons*, que es poden relacionar amb el perfeccionament de la tecnologia d'acceleradors que permet ampliar l'experimentació amb diferents partícules i energies més elevades. És important destacar que a partir del darrer volum del 1955 apareix la nova denominació *Nuclear Reactions Induced by Mesons and Hyperons* i *Scattering of Mesons and Hyperons*, indicativa del control sobre feixos de mesons K i d'una certa maduresa assolida en el camp, on l'atzar dels experiments inicials en raigs còsmics s'està substituint per la possibilitat de manipulació sistemàtica en acceleradors. Precisament la denominació *Cosmic Radiation* apareix per última vegada contenint treballs sobre les noves partícules en aquest mateix volum de 1955. Finalment, no serà fins el 1957 que l'índex per matèries del *Physical Review* mostrarà per primer cop la denominació *Strange Particles* (see *Elementary Particle Interactions*), remetent-nos, doncs, al tema d'interaccions de partícules elementals.

Un seguiment anàleg es pot fer a través de l'índex per matèries del *Nuovo Cimento*. En el cas del *Nuovo Cimento* són més precoços que el *Physical Review* a l'hora d'introduir una entrada específica per a les noves partícules. Així, el 1953 ja apareix, encara que entre parèntesi, la denominació *Mesoni* (*mesoni pesanti*), cosa que sembla obviar la presència de partícules hiperòniques. Malgrat que el nom d'hiperó és encunyat el mateix any en el congrés de Bagnères, no apareix com entrada en l'índex fins a finals del 1954. En aquest moment, també, se separa el camp dels mesons π , que continuaran essent *Mesoni*, del camp de noves partícules, que ja són *Mesoni pesanti e iperoni*. Igual com en el *Physical Review* sobta veure que el nom de partícules estranyes no serà present fins el 1957, conjuntament amb els noms anteriors *Mesoni pesanti, iperoni e particelle strane*.

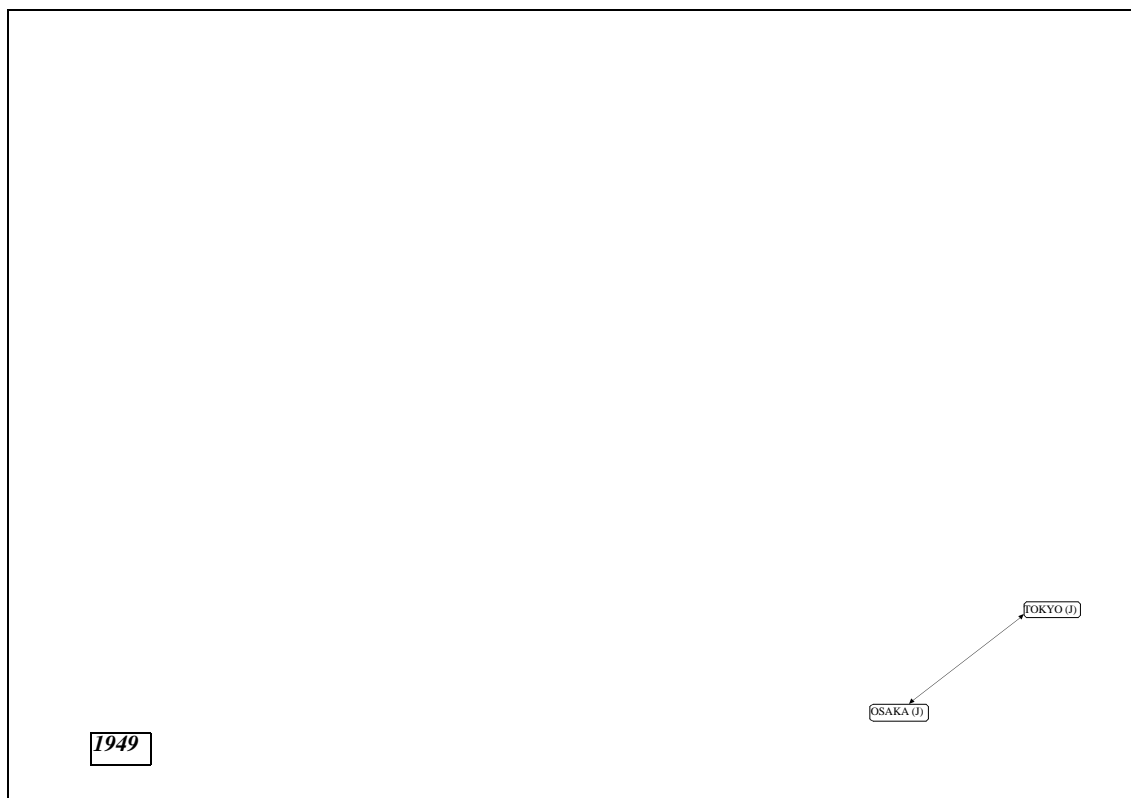
1948	sèrie IX vol. V	Cosmica (Radiazione) Mesone
1949	sèrie IX vol. VI	Cosmica (Radiazione) Mesone
1950	sèrie IX vol. VII	Cosmica (Radiazione) Mesone
1951	sèrie IX vol. VIII	Cosmica (Radiazione) Mesone Metodi ed Apparati
1952	sèrie IX vol. IX	Cosmica (Radiazione) Mesoni Metodi ed Apparati
1953	sèrie IX vol. X	Apparati e Strumenti Cosmica (Radiazione) Mesoni (Mesoni pesanti)
1954	sèrie IX vol. XI sèrie IX vol. XII	Mesoni (Mesoni pesanti) Nuclei (Fisica Nucleare-Lastre) Mesoni pesanti e iperoni
1955	sèrie X vol. I sèrie X vol. II	Mesoni pesanti e iperoni Mesoni pesanti e iperoni
1956	sèrie X vol. III sèrie X vol. IV	Mesoni pesanti e iperoni Mesoni pesanti e iperoni
1957	sèrie X vol. V sèrie X vol. VI	Mesoni pesanti, iperoni e particelle strane Eletrodinamica e teorie dei campi a) Questioni generali b) Campi elettromagnetici c) Campi mesonici e struttura del nucleone Mesoni pesanti, iperoni e particelle strane Scattering e ionizzazione

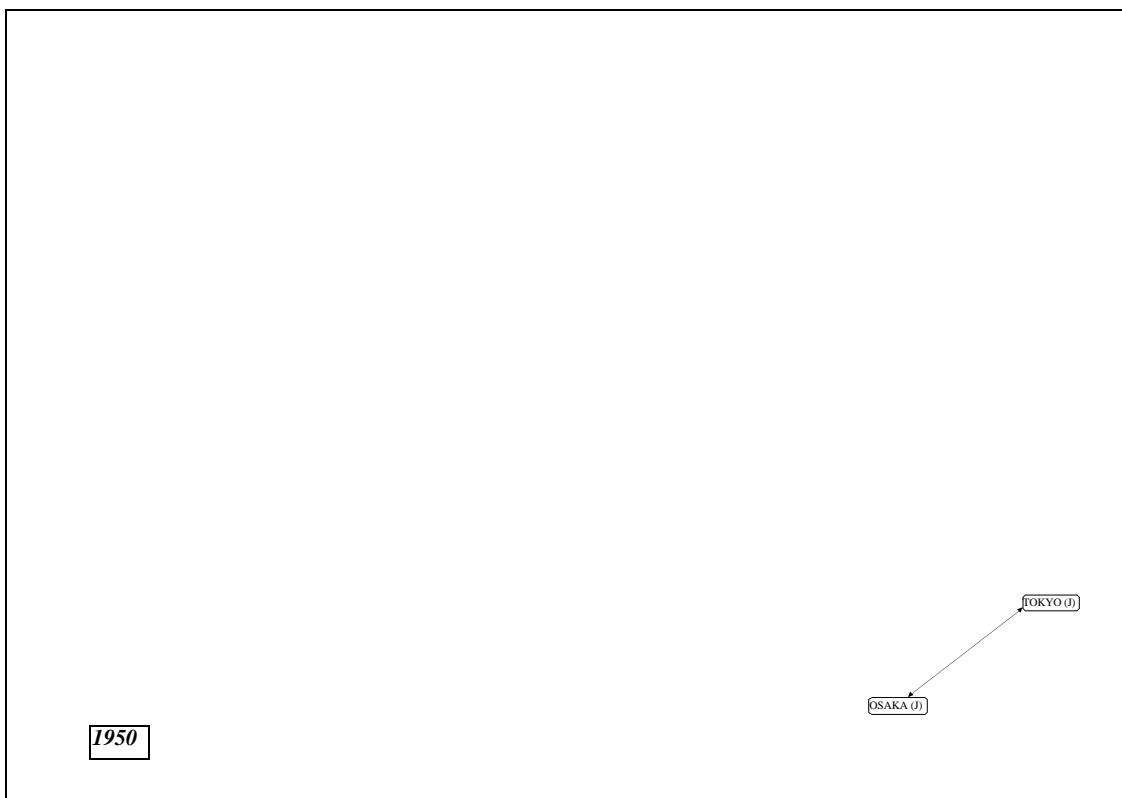
B.4 Resultats gràfics de la Base de dades

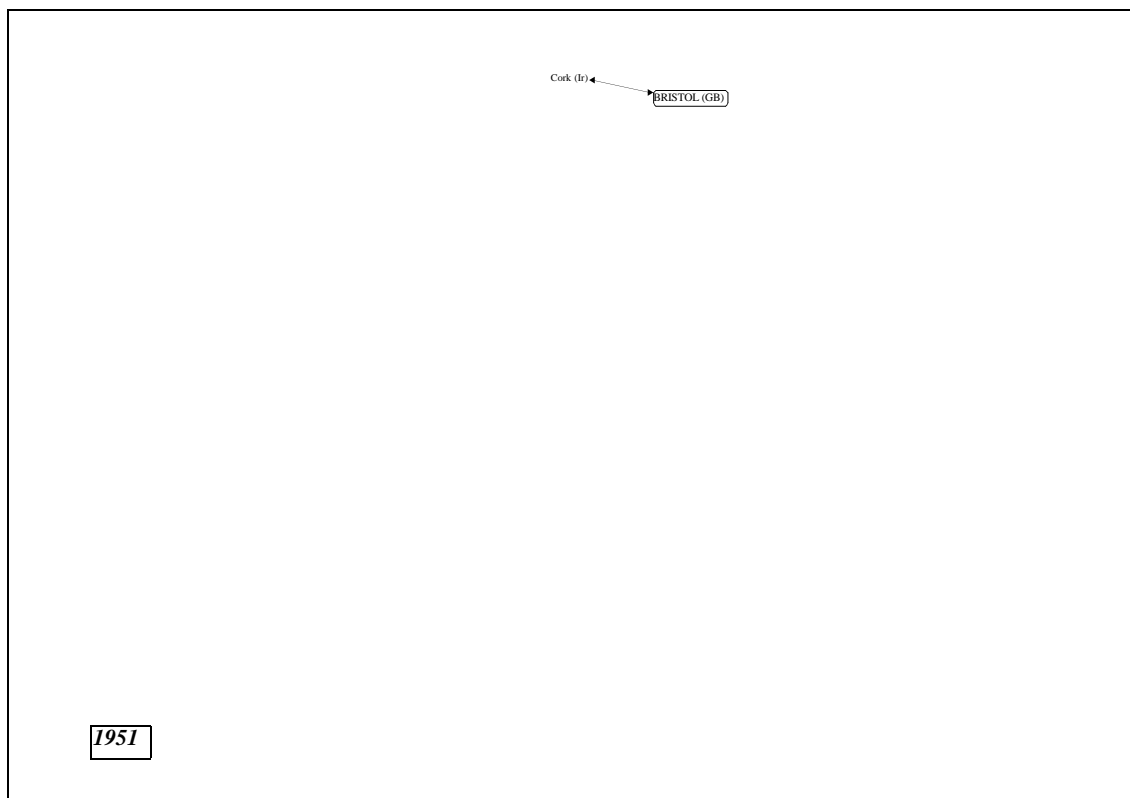
B.4.1 Col·laboracions dels diferents grups

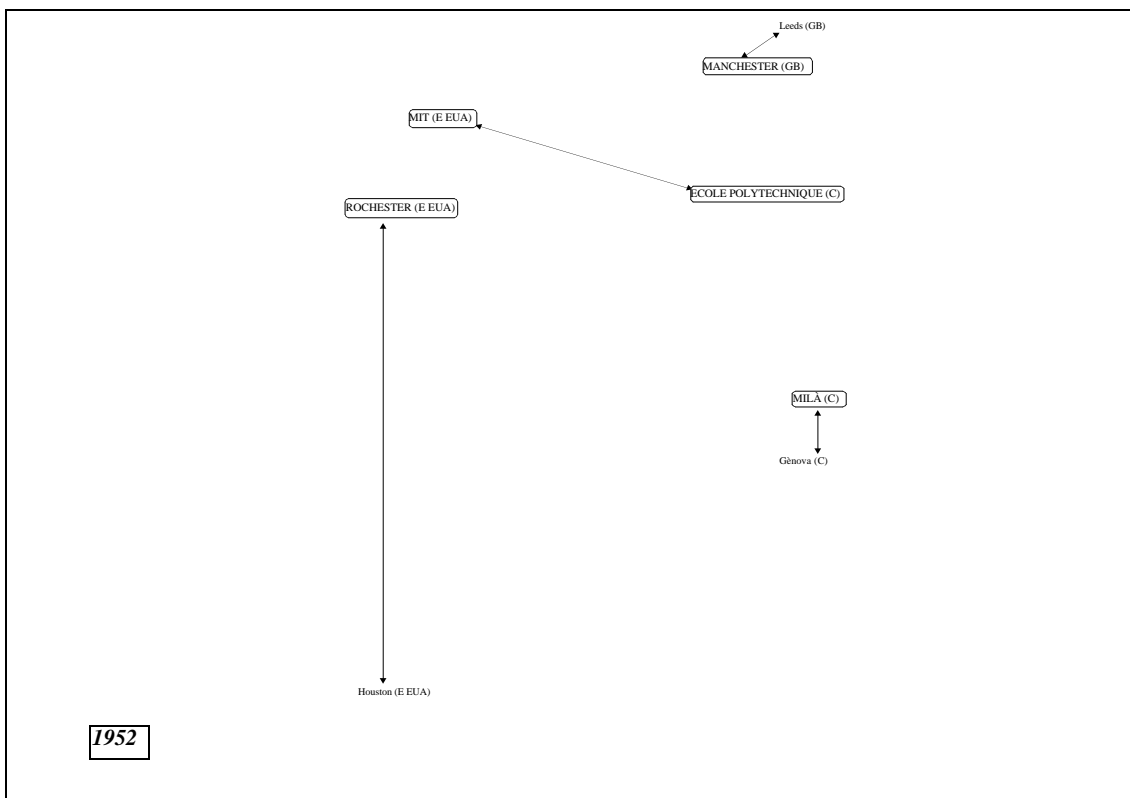
En tot el període estudiat, entre un 8% i un 9% dels articles de revistes i també de les contribucions a congressos apareixen signats per dos o més grups. Aquesta signatura en comú pot fer referència a la participació conjunta dels dos grups en un projecte, o bé a la participació puntual d'un o varis membres d'un grup en un altre. Computant els grups que col·laboren, en revistes o congressos, junt amb els anys en què es publica o presenta aquest treball conjunt, podem construir l'esquema relacional a continuació.

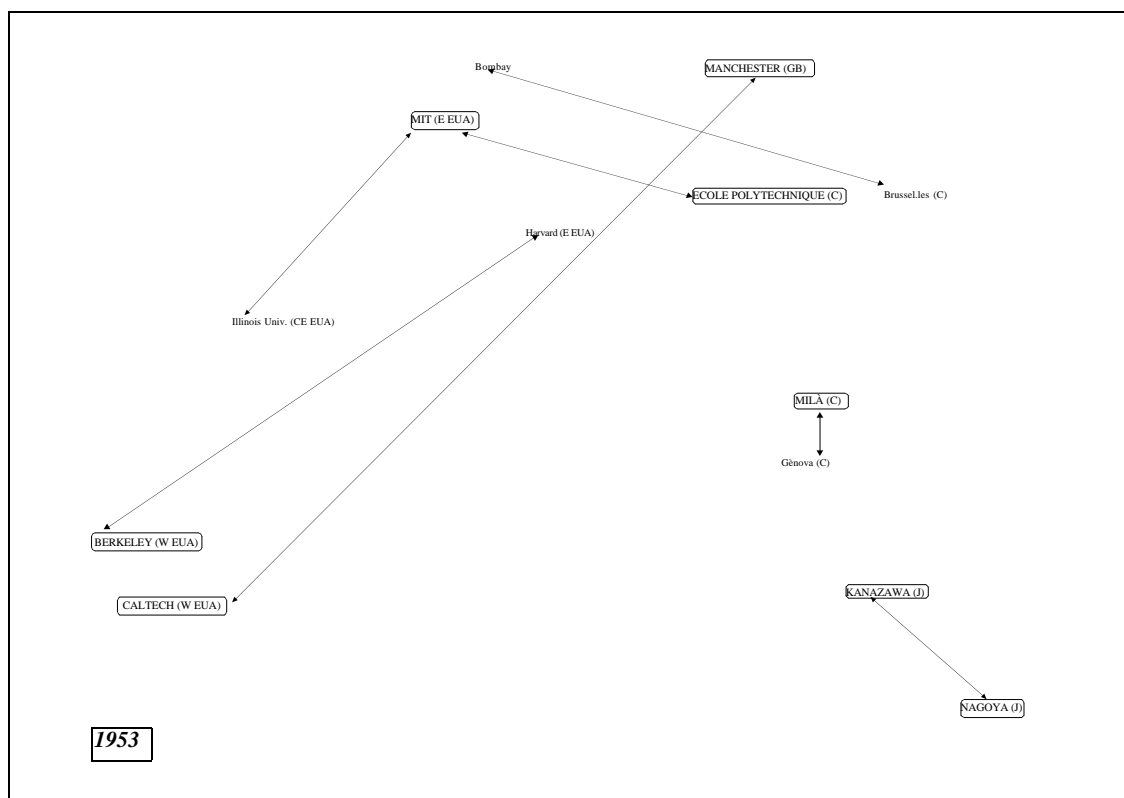
Notem que les col·laboracions s'accentuen en els darrers anys, fins i tot més el 1955 que el 1956. Aquests resultats es poden emmarcar en dos grans projectes. D'una banda, l'esforç final per sistematitzar la investigació en raigs còsmics, que es concreta en les grans expedicions amb emulsions, com el *G-stack*, que involucren grups europeus, especialment Itàlia, i grups de Gran Bretanya, especialment Bristol. D'altra banda hi ha el nou projecte dels acceleradors, focalitzat als EUA, en especial els grups de la Costa Est que col·laboren principalment al bevatró de Berkeley i al cosmotró de Brookhaven.

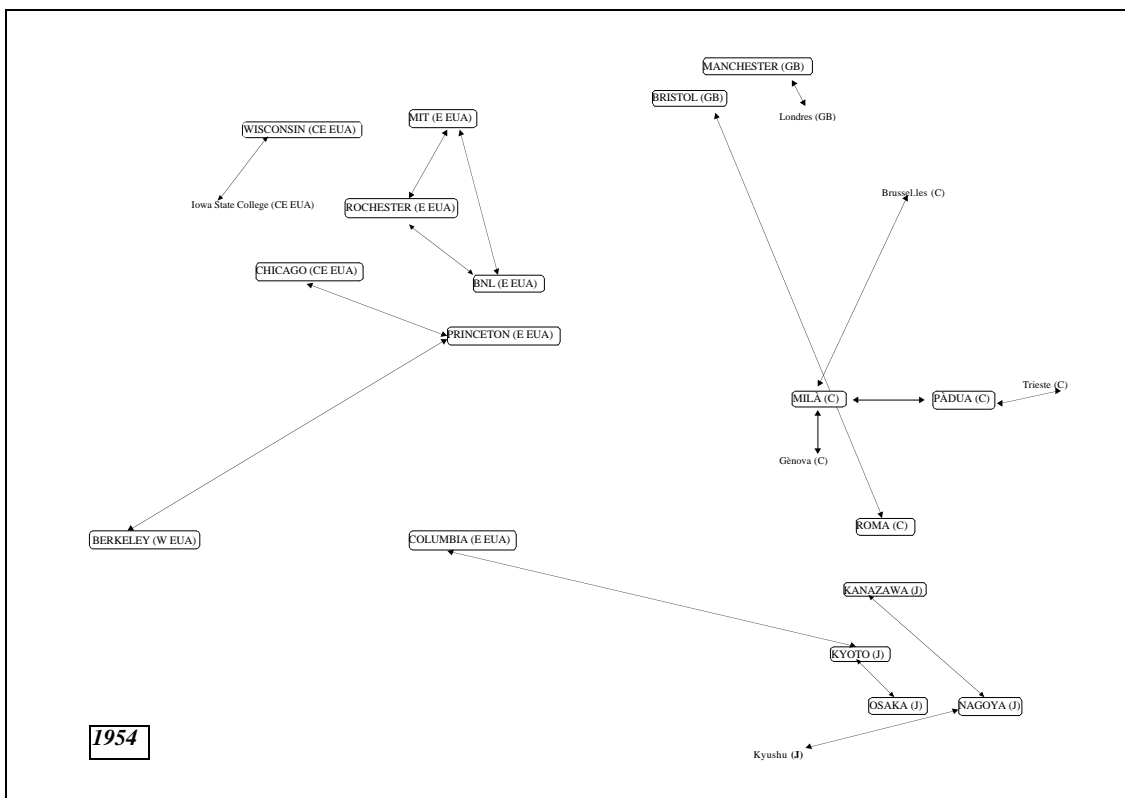


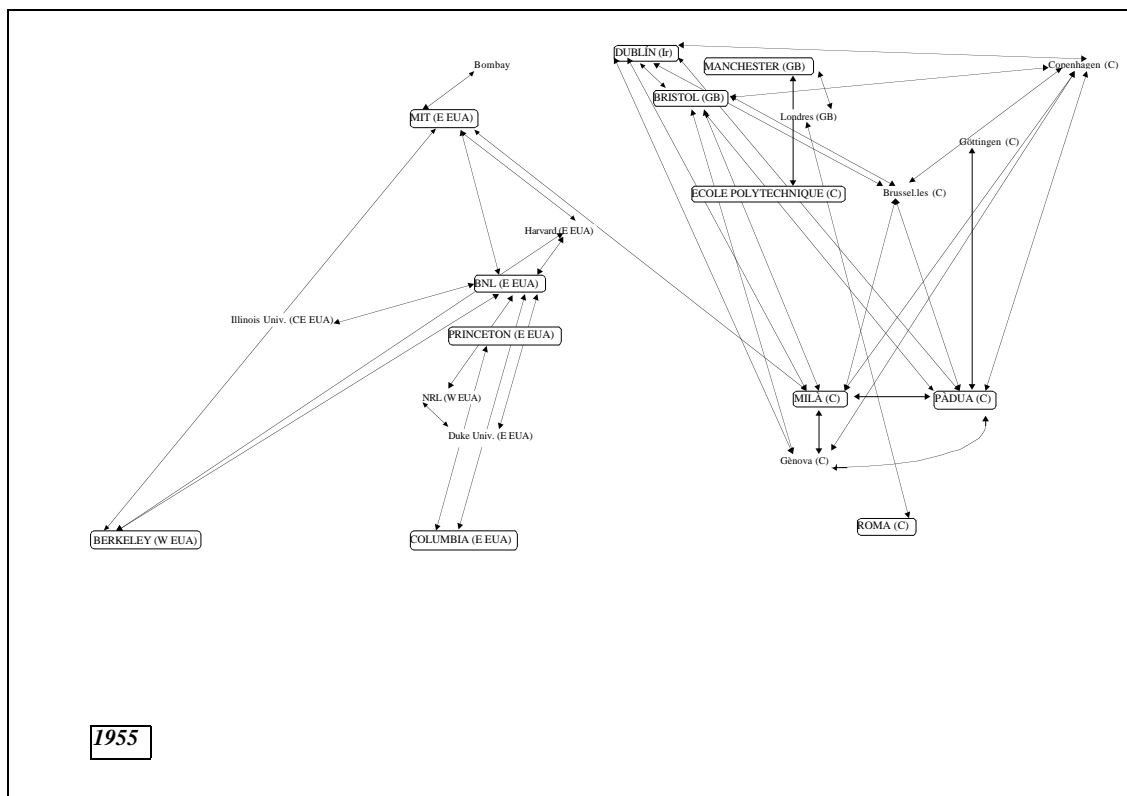


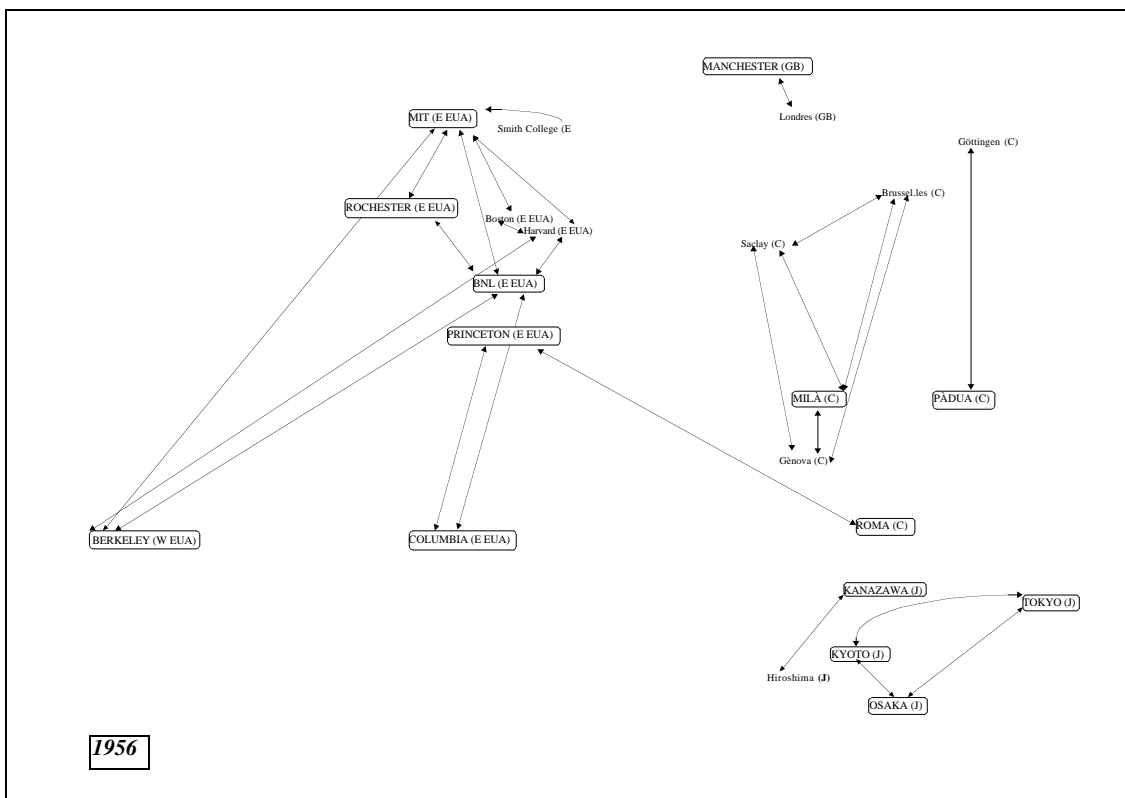












B.4.2 Grups que treballen en les noves partícules

Les figures B.4 i B.5 mostren els grups que participen en investigacions sobre partícules estranyes en congressos i revistes, respectivament. S'observa que alguns grups destaquen en nombre de participacions per davant d'altres: Berkeley, BNL, Bristol, Caltech, Chicago, Columbia, EP, Indiana, Manchester, Milà, MIT, Osaka, Pàdua, Princeton, Rochester, Roma, Tokyo i Wisconsin, destacats d'un total de 76 grups que en un moment o altre contribueixen al nou camp.²¹

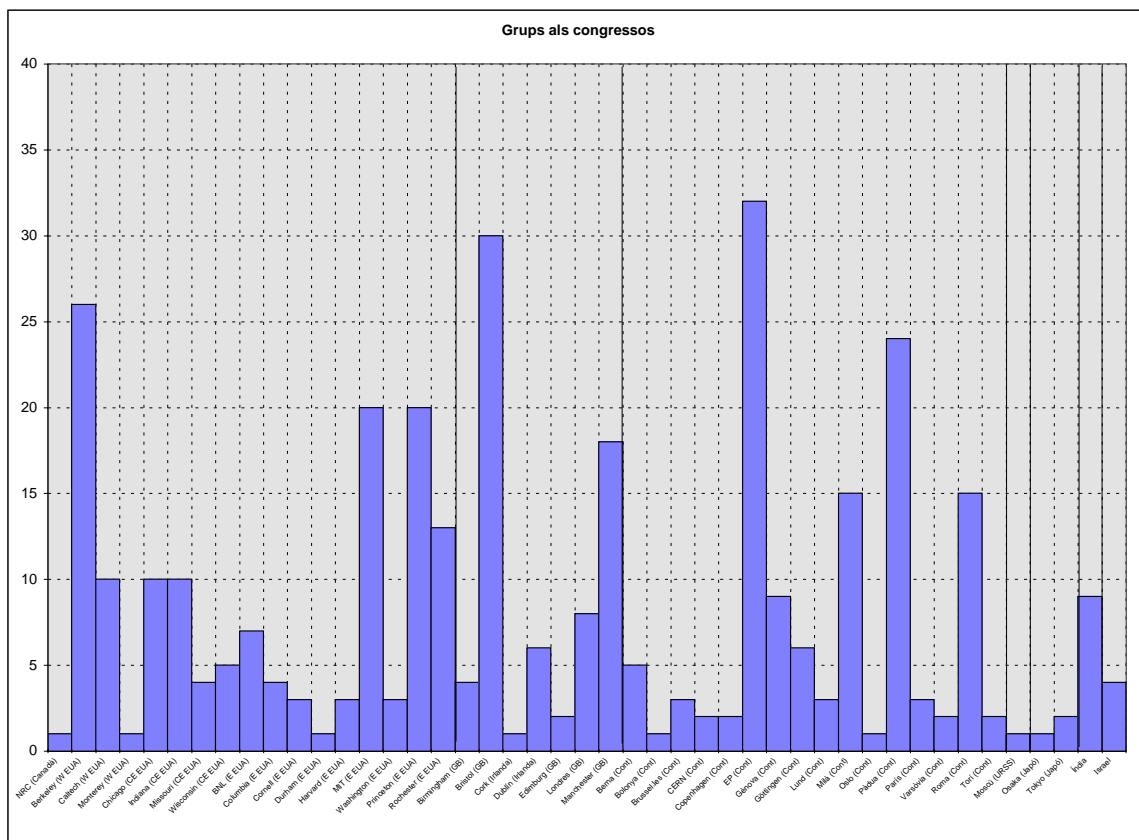


Figura B.4: Grups participants als congressos analitzats. Nombre total de contribucions.

Analizant les bases de dades podem destacar alguns trets d'aquests grups amb més participacions:

Berkeley La seva participació es mostra majoritàriament a través del *Physical Review*, tot i que els anys 1955 i 1956 també publica al *Nuovo Cimento* els treballs fets al Bevatró. Experimentalment mostra una progressió creixent de publicacions. El creixement es pot relacionar amb el

²¹El biaix s'ha establert en un nombre igual o superior a vint contribucions en total, ja sigui en revistes o en congressos.

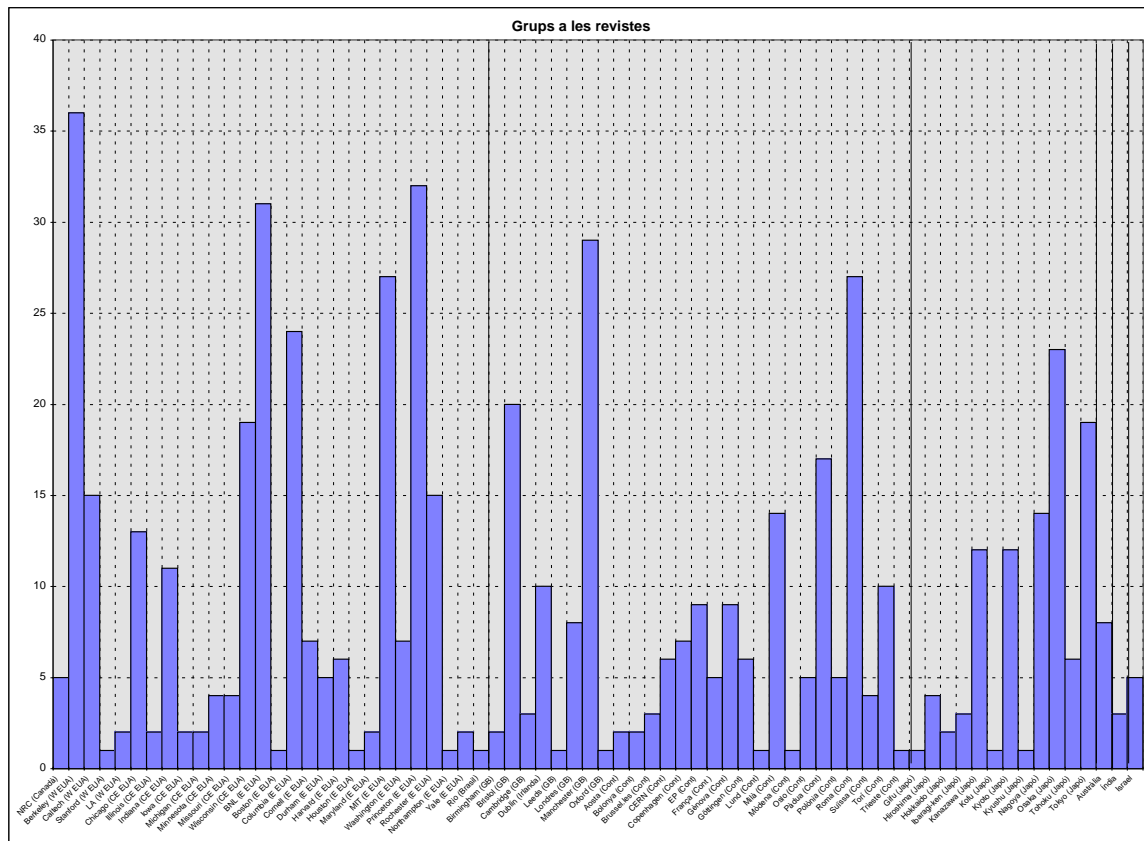


Figura B.5: Grups participants a les revistes analitzades. Nombre total d'articles.

pas d'un treball més discret en partícules estranyes fet en raigs còsmics per la vella generació, com J. G. Retallack, R. B. Brode fins a W. B. Fretter, amb cambra de boira com a detector, fins al treball posterior en accelerador on destaquen, S. Goldhaber, G. Goldhaber, i una petita participació de L. W. Alvarez. Pel que fa al treball teòric, es concentra especialment al 1956, amb les contribucions de K. M. Case, molt lligat al problema de les isòbares nucleòniques, C. N. Yang i D. C. Peaslee.

La tendència és similar pel que fa als congressos. A Solvay (1948) es parla ja de les possibles evidències de R. B. Brode trobades en cambra de boira, treball en raigs còsmics que continuarà W. B. Fretter amb les V^0 i apareixerà en el 2n Rochester (1952a). De nou, la participació mostra un important increment el 1955 i 1956 en els congressos Rochester i també en el congrés de Pisa (1955). Aquestes contribucions mostren el treball en l'accelerador, centrat en acabar de discernir els modes de desintegració dels kaons i en la verificació del model d'estranyesa.

BNL Majoritàriament, quan un grup publica abundantment en revistes la seva participació en congressos també és significativa. No obstant això, el *Brookhaven National Laboratory* mostra un nombre d'articles molt més elevat que la seva participació en congressos. Tots els articles pertanyen al *Physical Review* i pràcticament es restringeixen al treball al Cosmotró, obviant la radiació còsmica. Un grup estable de treball el formen W. B. Fowler, R. P. Shutt, A. M. Thorndike i W. L. Whittemore. Pel que fa a la producció teòrica, també es concentra el 1955 i el 1956, amb els treballs de M. Goldhaber, A. Pais i O. Piccioni, i T. D. Lee i C. N. Yang, que discuteixen les conseqüències d'estranyesa.

La reduïda participació en congressos es concentra a la presentació dels resultats experimentals

sobre la producció de kaons i hiperons al cosmotró, principalment en el 4t i 5è Rochester (1954, 1955), i amb una petita col·laboració a Glasgow (1954) i a Pisa (1955).

Bristol A diferència del grup anterior, Bristol participa més en congressos que no publica en les revistes analitzades. No hem detectat cap article teòric, ni cap article al *Physical Review*. Tot i amb això, participa abundantment al *Nuovo Cimento* i al *Philosophical Magazine*. La tendència pel que fa al nombre de publicacions és clarament diferent de la dels grups anteriors. Trobem un màxim d'articles el 1954 al *Philosophical Magazine* i el 1955 al *Nuovo Cimento*, corresponents al treball relacionat amb el *G-stack* i als projectes anteriors d'envolament de globus amb emulsions per exposar-les als raigs còsmics. La seva producció, però, cau en picat el 1956.

Pel que fa als congressos, el grup és present als EUA amb participacions als Rochester. Especialment important és la presència a Bagnères (1953), amb els treballs de M. G. K. Menon i C. O'Ceallaigh sobre mesons pesats, i amb la figura de C. F. Powell, encarregat de resumir el treball en emulsions. Una important participació apareix també a Pàdua (1954) i a Pisa (1955), relacionada, com ja hem notat, amb els esforços particulars d'aquest grup, en especial C. F. Powell, per mantenir viu el treball en raigs còsmics. Aquests esforços hem vist com es tradueixen en una xarxa de col·laboracions d'aquest grup amb grups italians.

Caltech El grup de C. D. Anderson, E. W. Cowan, A. J. Seriff, R. B. Leighton, etc. es mostra absolutament fidel al treball en cambra de boira i raigs còsmics, cosa que ens permet entendre com els seus articles, únicament al *Physical Review*, comencen a disminuir a partir del 1955, ja que el grup sembla no reconvertir-se als acceleradors.²² Notem també que el seguiment de les reunions de l'APS mostra com Caltech n'és un dels grups més participatius. Aquesta participació també és molt important en els congressos Rochester, però mínima pel que fa a participacions fora dels EUA, amb una única contribució experimental a Bagnères.

Chicago La producció en partícules estranyes del grup de Chicago se centra en uns primers intents de detecció poc reeixits en el sincrociclotró i un treball posterior al bevatró de Berkeley. Malgrat no presentar una producció molt copiosa ni en revistes ni en congressos trobem contribucions experimentals als Rochester, a Bagnères i a Pisa, al *Physical Review* i una al *Nuovo Cimento* del 1956, conseqüència de la contribució presentada a Pisa (1955). Experimentalment destaquen M. Schein, D. M. Haskin i R. G. Glasser. Des del punt de vista teòric, destaca M. Gell-Mann. Notem també que el treball en partícules estranyes d'aquest grup ha de competir amb el treball que al mateix Chicago realitza E. Fermi i el seu grup, i que tan important serà en el descobriment de les ressonàncies.²³

Columbia El grup experimental de Columbia participa en el 5è i 6è Rochester, resultat del treball al cosmotró de Brookhaven, que és una prolongació del treball més extens en dispersió i absorció de pions i en interaccions entre nucleons i nucleons i pions.²⁴ Destaquen J. Steinberger, L. M. Lederman, G. Harris i J. Orear, en el camp experimental, que publiquen de manera significativa al *Physical Review* els anys 1955 i 1956 i mostren una recerca totalment enfocada als nous acceleradors, que alterna el treball a Brookhaven amb el de Berkeley, en cambra de boira i en emulsió com a detectors.

Pel que fa a la teoria, Columbia és present principalment al *Physical Review*, amb D. C. Peaslee, H. Yukawa i H. Enatsu, a través del qual es farà present també al *Progress of Theoretical Physics*. La contribució teòrica es mostra especialment important el 1955, amb les

²²Aquesta disminució contrasta amb l'augment de Berkeley, l'altre grup important de la Costa Oest, i el seu treball en accelerador.

²³La dedicació del grup a altres temes diferents de les noves partícules es pot veure en la base de dades *Congressos*, que mostra 13 contribucions referents als nous elements davant de 33 corresponents a altres temes.

²⁴De nou la base de dades *Congressos* ens serveix d'indicatiu de la important participació d'aquest grup en altres temàtiques diferents als nous elements.

col·laboracions d'A. Pais amb M. Gell-Mann, T. D. Lee amb J. Orear i culminant amb T. D. Lee i C. N. Yang el 1956, amb la qüestió de la violació de paritat de les interaccions febles.

EP L'École Polytechnique és un dels grups que es mostra especialment prolífic en els congressos, amb incursions considerables als EUA: en el 3r, 4t, 5è i 6è Rochester, al Caltech (1948) i també amb articles al *Physical Review*. La seva presència és especialment important a Bagnères (1953) i a Pisa (1955), i al *Nuovo Cimento* de 1955 i 1956. La seva producció és experimental, amb un treball en raigs còsmics on s'alterna la cambra de boira i les emulsions i, fins i tot, alguna incursió en el treball en acceleradors a Berkeley. El desdoblament en diferents grups d'investigació: raigs còsmics-cambra de boira (R. Armenteros, B. Grégory, A. Lagarrigue, C. Peyrou, etc.), raigs còsmics-emulsions (J. Crussard, D. Morellet, L. Jauneau, etc.) amb un cap de grup indiscutible (L. Leprince-Ringuet) els ajudarà a mantenir la producció experimental i resistir els primers embats dels acceleradors. D'aquí la presència no menyspreable el 1955 i 1956, sorprenent tractant-se d'un grup enfocat a la investigació en raigs còsmics.

Indiana El grup d'Indiana, amb R. W. Thompson al capdavant, mostra contribucions únicament al *Physical Review* i, en una proporció molt elevada, a les reunions de l'APS. El seu treball es mostra exclusivament en raigs còsmics i cambra de boira, amb una clara disminució al final del període analitzat. La seva presència als congressos és mínima als Rochester i a Pisa (1955). Cap contribució al 6è Rochester (1956) ni cap article al *Physical Review* de 1956.

Manchester És un dels grups amb un major nombre de participacions total. Pel que fa a les revistes, apareix breument al *Physical Review* del 1953 i al *Nuovo Cimento* del 1949 i 1954. No obstant això, la seva participació a través del *Philosophical Magazine* és important, amb una disminució el 1956. El seu treball es restringirà a la radiació còsmica i a la cambra de boira com a detector, encara que realitzaran algun treball en emulsions, com el que apareix a Pàdua (1954). Respecte d'aquests congressos, apareix una petita participació als EUA amb el treball presentat per G. D. Rochester al Caltech (1948) i per C. C. Butler al 4t Rochester (1954). Cal destacar la participació significativa a Bagnères (1953) i la presència del grup al congrés de Pisa (1955).

Milà El grup de Milà publica al *Nuovo Cimento* el seu treball en raigs còsmics amb emulsions. Destaquem les figures d' A. Bonetti, R. Levi-Setti, M. Panetti i G. Tomasini. La seva producció sembla iniciar-se de forma tardana i mostra una col·laboració seguida amb altres grups europeus, en especial Gènova. Seran centrals en les expedicions a Sardenya i en el *G-stack*, que es tradueixen en una presència important a Pàdua (1954) i Pisa (1955), i que portaran a G. Occhialini a parlar en el 5è Rochester (1955) del treball fet a Brussel·les, Milà i Gènova. Després dels resultats anteriors el treball del grup es redueix. Al *Nuovo Cimento* passen de 4 articles el 1955 a un de sol el 1956, i aquest és una col·laboració entre diferents grups sobre un bloc d'emulsions exposat al bevatró de Berkeley.

MIT El MIT presenta una participació elevada en el *Physical Review* i també, en menor grau, en el *Nuovo Cimento*. Al principi es tracta d'un treball en raigs còsmics i amb cambra de boira, comandat per B. Rossi, amb H. Bridge i M. Annis, entre d'altres, i amb la col·laboració repetida de C. Peyrou, que dona importants resultats referents a les partícules S. A partir del 1955, un altre grup del MIT (A. Pevsner, D. M. Ritson, B. T. Feld, etc.) comença a publicar resultats procedents d'emulsions exposades a l'accelerador, especialment Berkeley. És així com la producció del grup es manté a un bon nivell en el *Physical Review* de 1956. Pel que fa als congressos, el MIT apareix en els Rochester, a Bagnères (1953) es parla del seu treball en radiació còsmica, i a Pisa (1955) apareix com molt més important la seva producció en l'accelerador de Berkeley.

Osaka El grup d'Osaka, com la resta de grups japonesos, és present per les abundants contribucions teòriques essencialment al *Progress of Theoretical Physics*. En el cas d'Osaka la publicació és constant, al principi en el marc de les teories mesòniques, a partir del 1953 destaquen T. Nakano i, sobretot, K. Nishijima amb aproximacions més properes al model d'estranyesa.

L'única contribució en congressos d'aquest grup és la realitzada al Kyoto&Tokyo (1953), cosa que, junt amb la publicació exclusiva al *Progress of Theoretical Physics*, corrobora l'aïllament del treball realitzat al Japó.

Pàdua Igual com el grup de Milà, el grup de Pàdua publica al *Nuovo Cimento* les seves investigacions en raigs còsmics i emulsió a partir del 1953. El grup mostra més articles el 1955 i contribucions a Pàdua (1954) i Pisa (1955), clarament relacionat amb les expedicions a Sardenya i el *G-stack*. Destaquen M. Ceccarelli, N. Dallaporta, M. Grilli, B. Sechi, B. Vitale, etc.

Princeton Mostra aproximadament el mateix nombre de contribucions experimentals i teòriques, pel que fa a les revistes, principalment *Physical Review*, i també als congressos. W. H. Arnold, J. Ballam, D. R. Harris, A. L. Hodson, S. B. Treiman i G. T. Reynolds destaquen com a grup experimental de la Universitat de Princeton amb el seu treball en raigs còsmics i doble cambra. Des del punt de vista teòric, destaquen les contribucions provinents de l'Institute for Advanced Study, amb A. Pais, R. H. Dalitz, C. N. Yang, amb la figura de J. R. Oppenheimer presidint les sessions teòriques als congressos Rochester. Habitualment, Princeton participa en aquests congressos Rochester i també es mou a nivell més internacional, amb participació a Bagnères (1953), Kyoto&Tokyo (1953) i Pisa (1955).

Rochester El treball d'aquest grup és enfocat a les emulsions, primerament en raigs còsmics i, a partir del 1954, alternant aquesta investigació amb l'exposició d'emulsions als acceleradors. Publica majoritàriament al *Physical Review*, on el 1956 ja sols apareix treball en acceleradors. Experimentalment destaquen J. Klarmann, M. F. Kaplon, G. Yekuteli, D. M. Ritson i J. Crussard. A nivell teòric destaquen R. E. Marshak, de bon principi, i E. C. G. Sudarshan el 1956. Pel que fa als congressos, clarament apareix l'avantatge de ser el grup de casa en els Rochester, mentre que en l'àmbit internacional la participació és mínima a Bagnères (1953), Glasgow (1954) i en una sessió al Solvay (1948), presentada per C. F. Powell, sobre possibles evidències trobades pel grup de Rochester.

Roma Com la resta de grups italians, Roma publica al *Nuovo Cimento* i també ho fa tardanament. En aquesta revista destaca el 1955 amb una important contribució en emulsions a raigs còsmics, dirigida per E. Amaldi, amb G. Baroni, C. Castagnoli, G. Cortini, A. Manfredini i altres. Les contribucions teòriques realitzades per E. Fabri, R. Gatto i G. Morpurgo són també nombroses. Pel que fa als congressos, llevat d'una petita participació d'Amaldi al 3r Rochester (1952) i de dues més a Bagnères (1953), les col·laboracions se centren a Pàdua (1954) i Pisa (1955), on presenten els resultats de les expedicions a Sardenya i del *G-stack*.

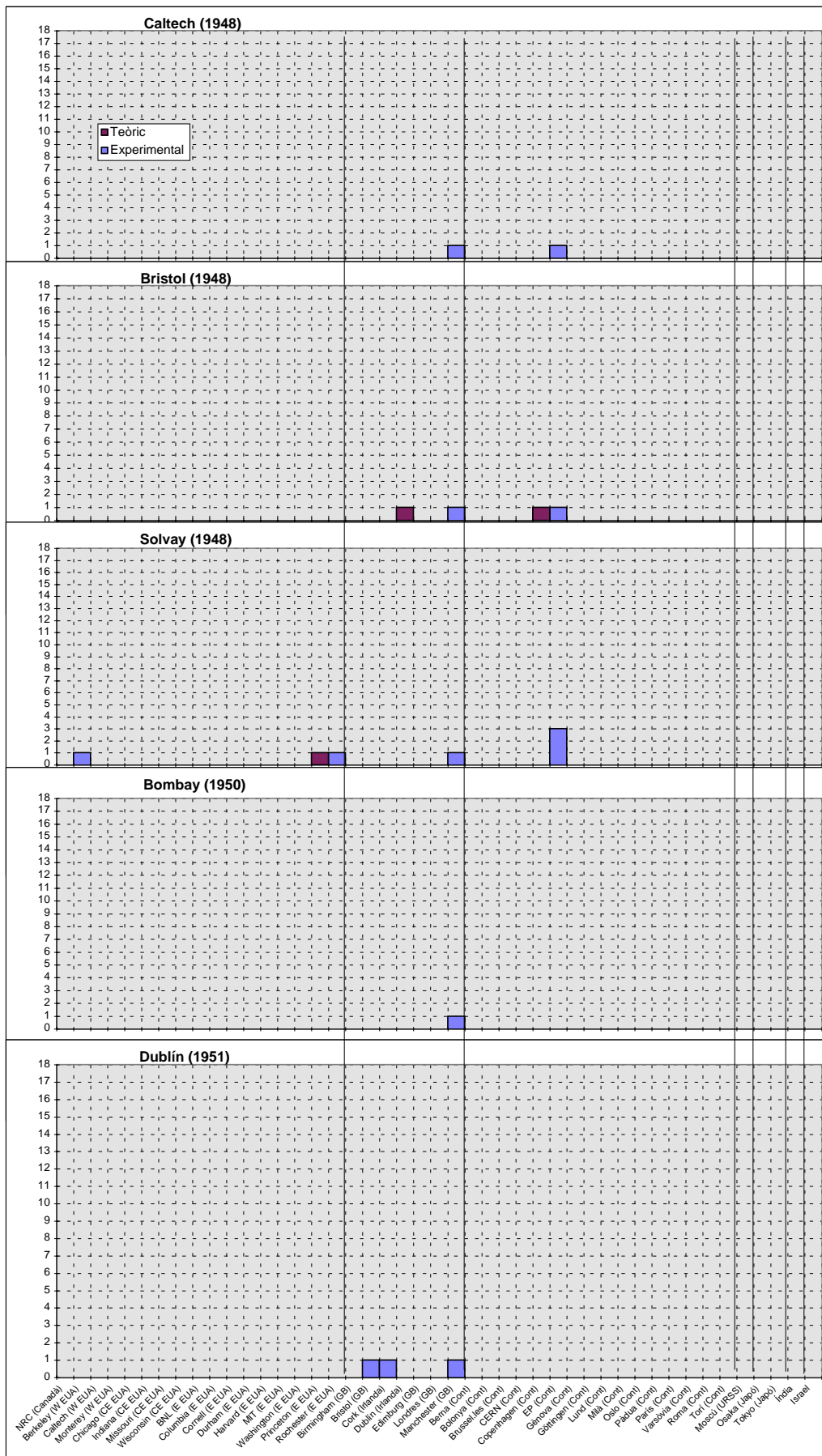
Tokyo Semblantment al grup d'Osaka, el grup de Tokyo publica de forma copiosa i exclusiva al *Progress of Theoretical Physics* sobre hipòtesis teòriques. La participació en congressos es redueix a Kyoto&Tokyo (1953), cosa que mostra de nou l'aïllament de les propostes japoneses.

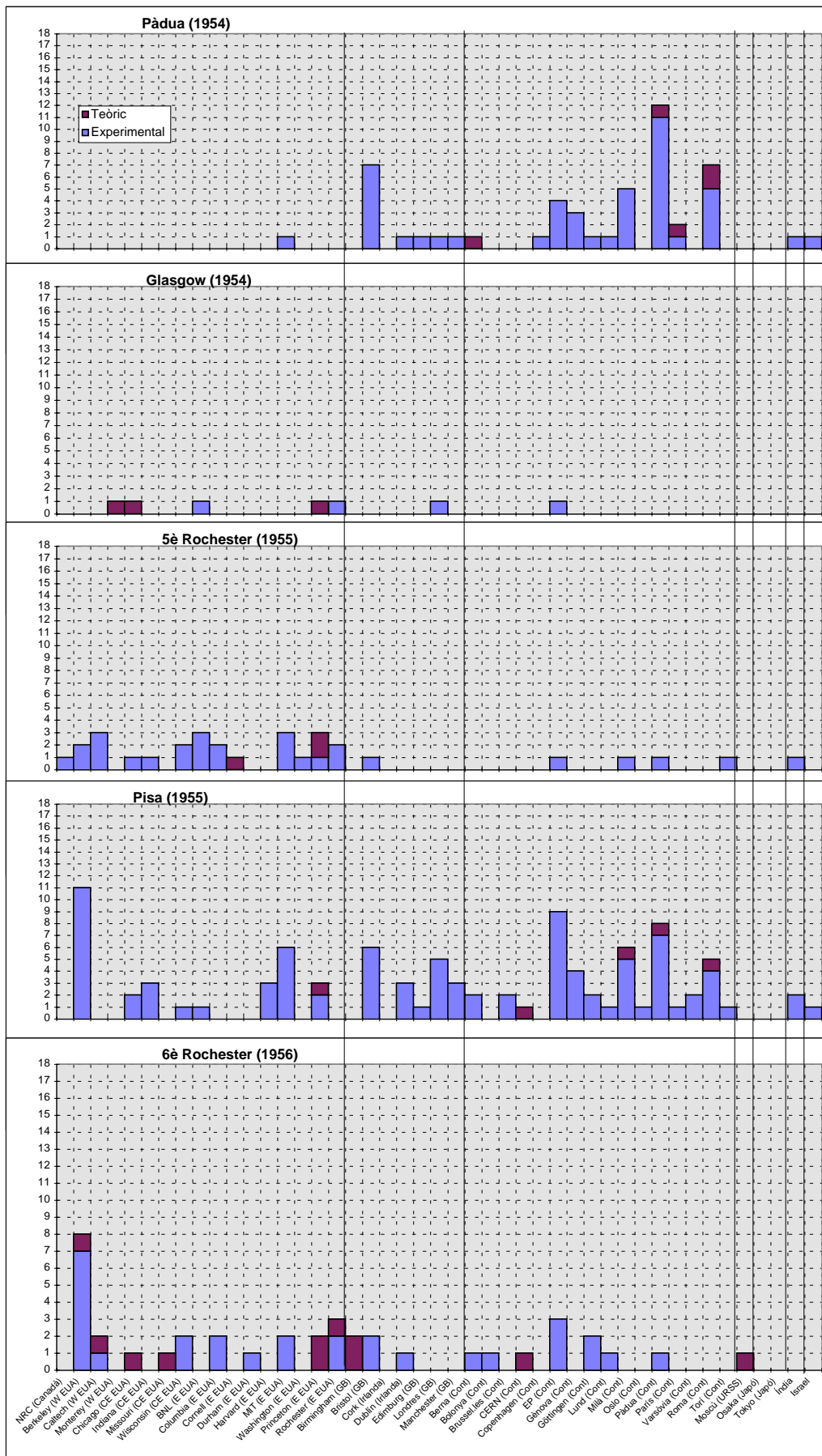
Wisconsin Era una universitat amb un grup de física fort ja abans de la guerra. Pel que fa al panorama d'investigació de les noves partícules, W. F. Fry, J. Schneps, G. A. Snow, M. S. Swami, etc., del grup experimental, apareixen tardanament i ho fan amb treballs en raigs còsmics i emulsions, però també sotmetent aquestes emulsions i una cambra de boira als acceleradors. Això fa que la seva producció es mantingui fins al 1956. Els seus resultats són publicats especialment al *Physical Review*, tot i que amb alguna incursió al *Nuovo Cimento*. Pel que fa a la participació en congressos, es realitza bàsicament a través del 5è i 6è Rochester i una participació a Pisa (1955). La participació teòrica és més reduïda, destaquen R. G. Sachs i S. B. Treiman.

A continuació desglossem la informació sobre els grups pels diferents congressos i les diferents revistes al llarg de període investigat (1946–1956). Cada gràfic conté els grups separats, aproximadament, per diferents zones geogràfiques (Est d'EUA, Oest d'EUA,

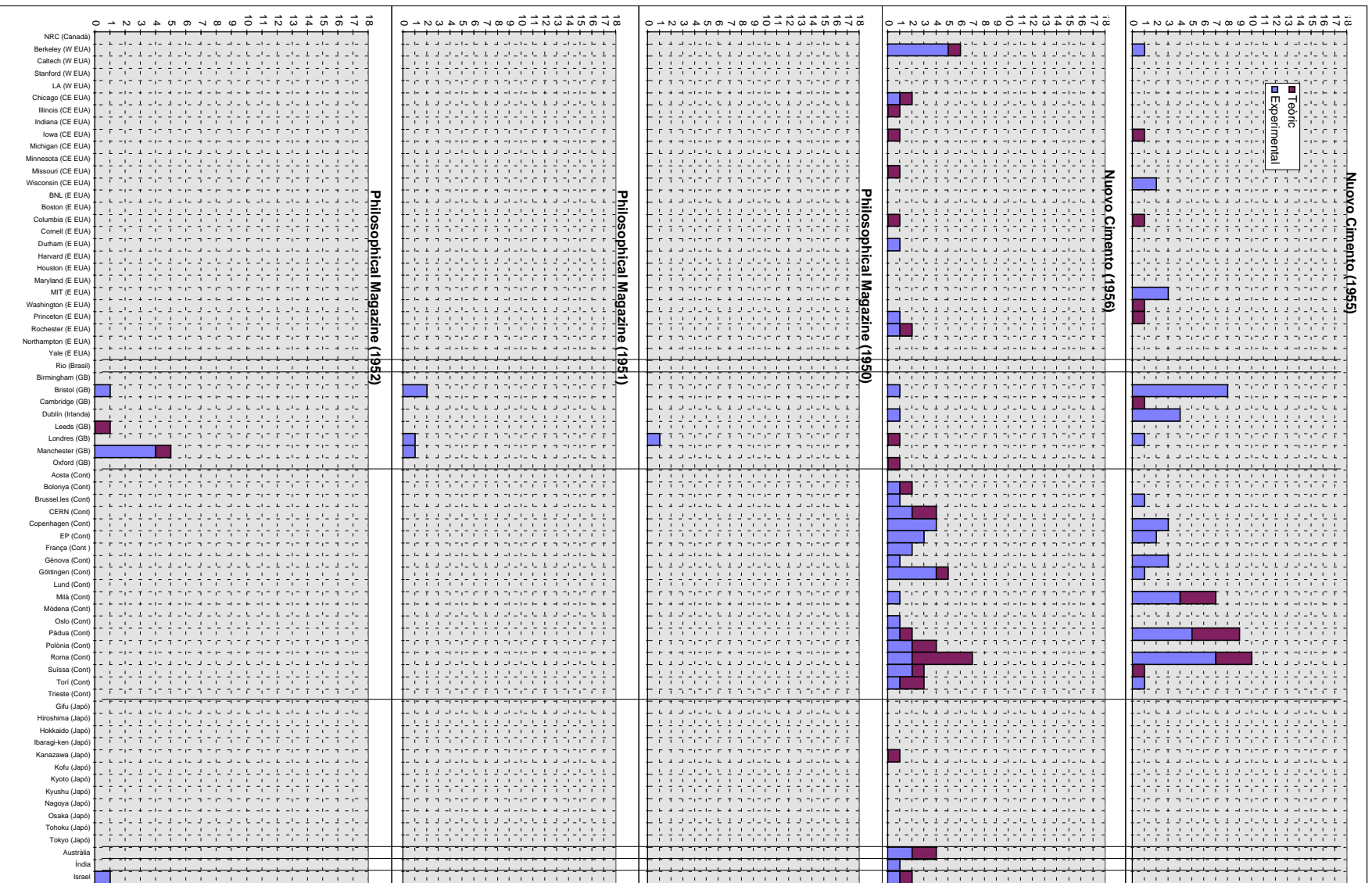
Centre-Est d'EUA, continent europeu, Gran Bretanya i arreu o altres), i per a cada grup es representen les contribucions teòriques i les contribucions experimentals.

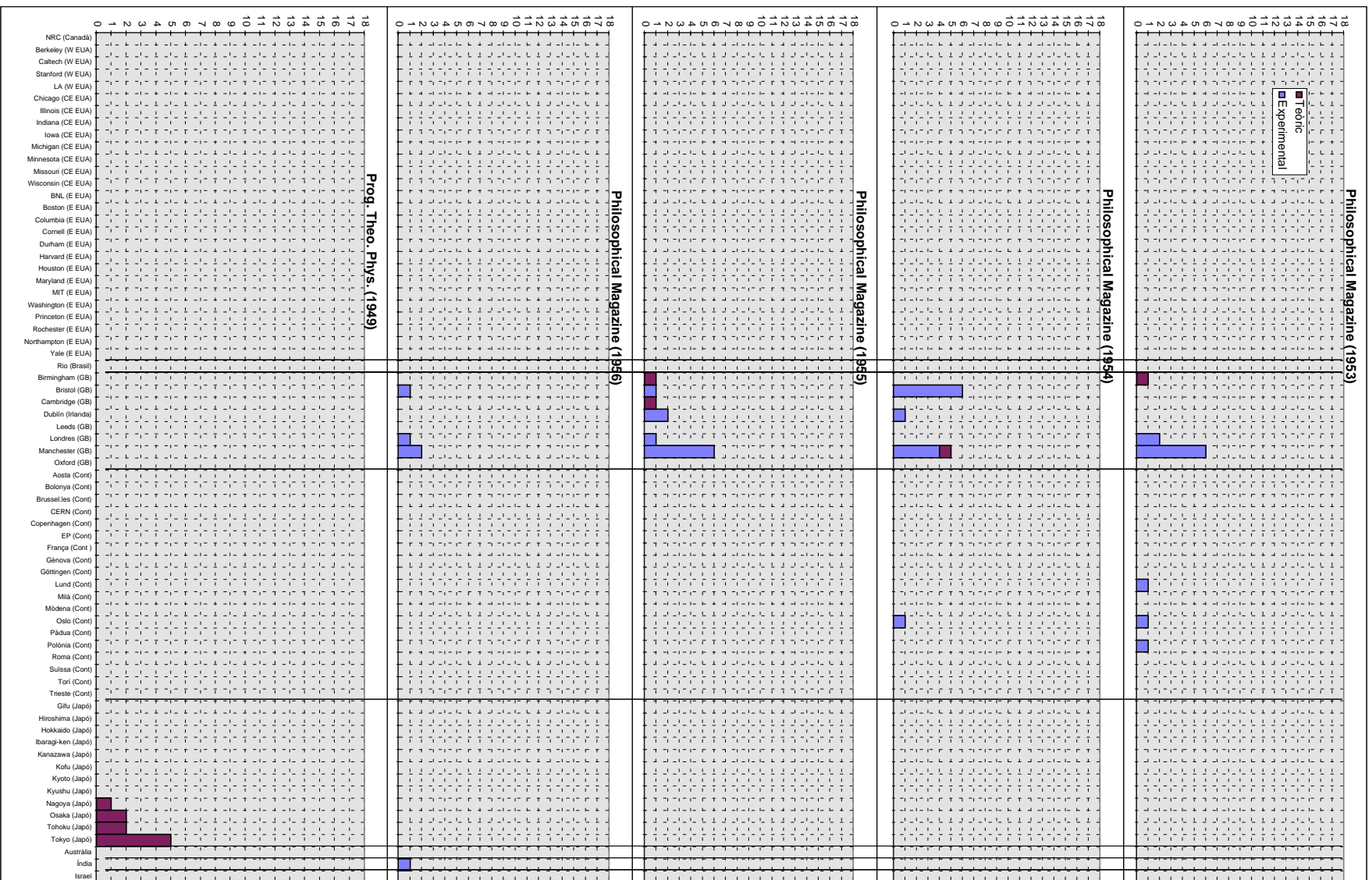
Grups als congressos

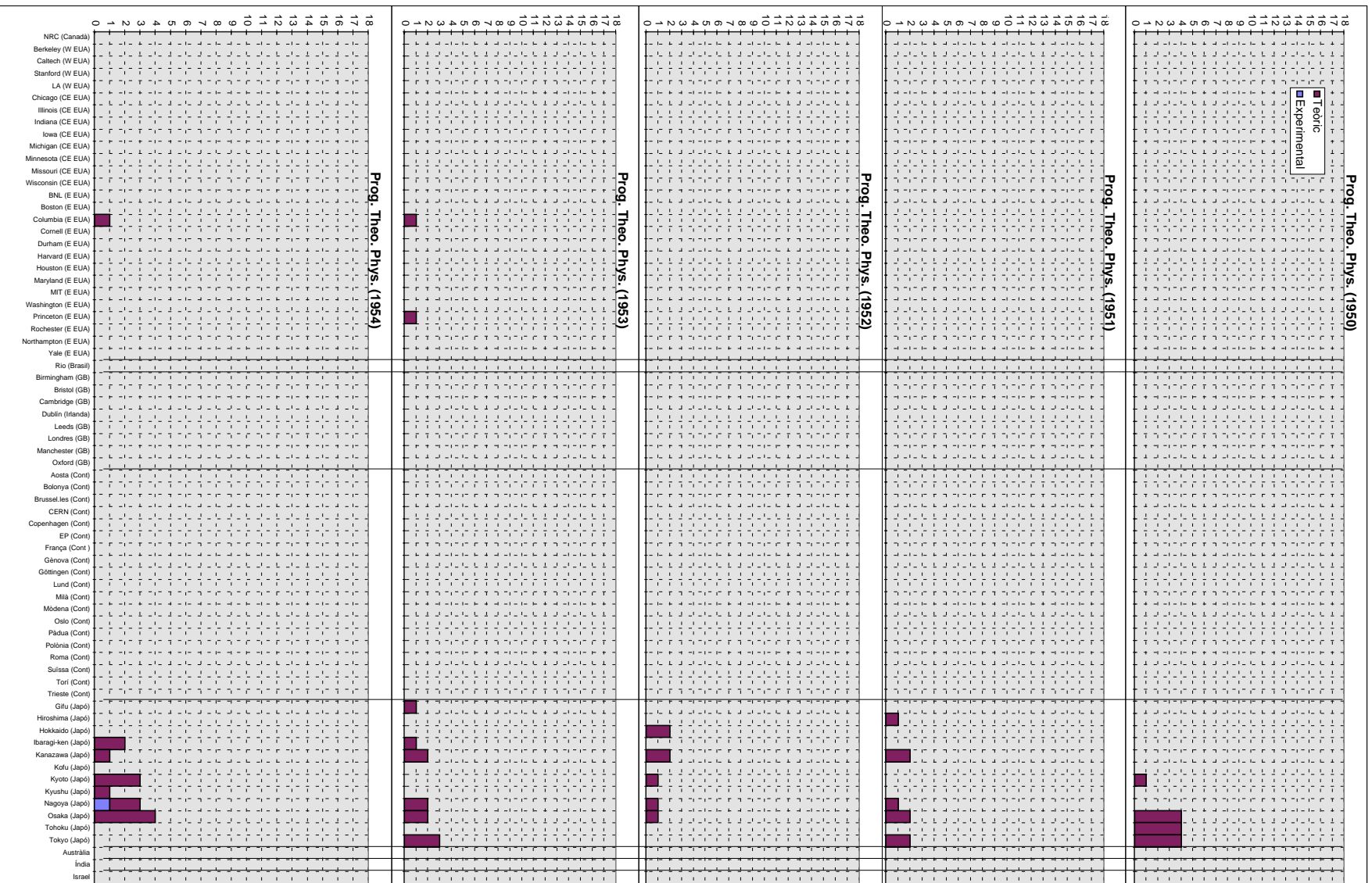


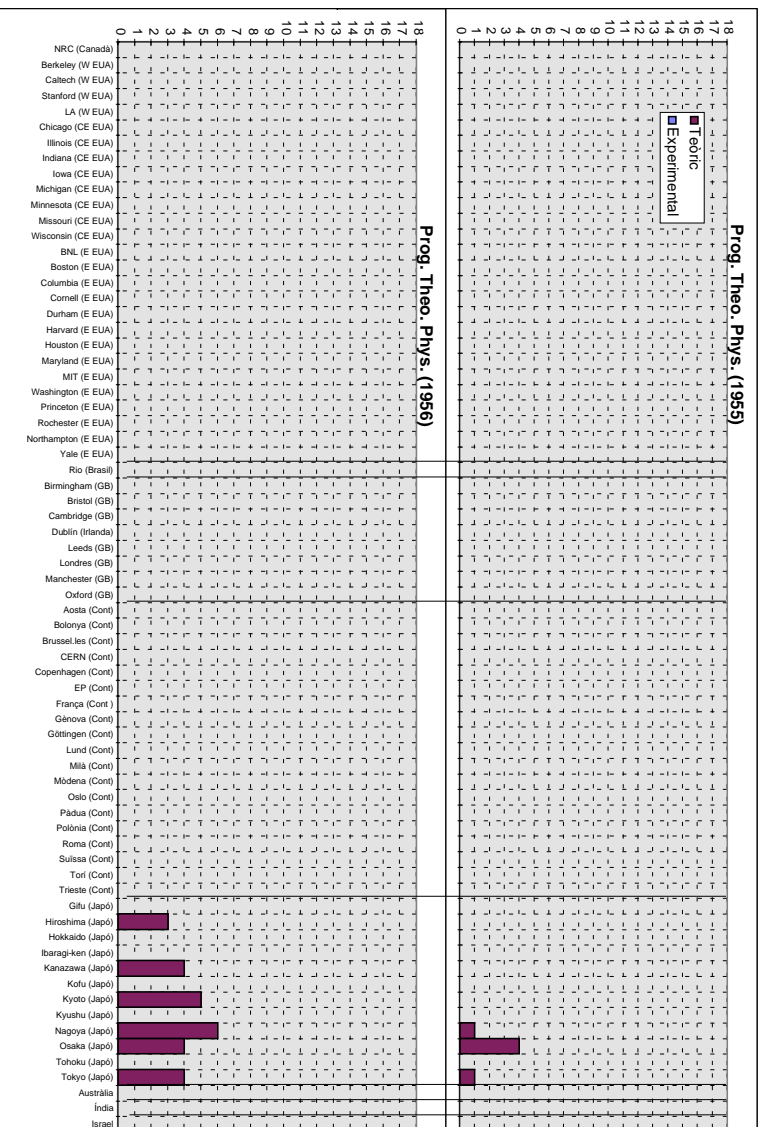


Grups a les revistes







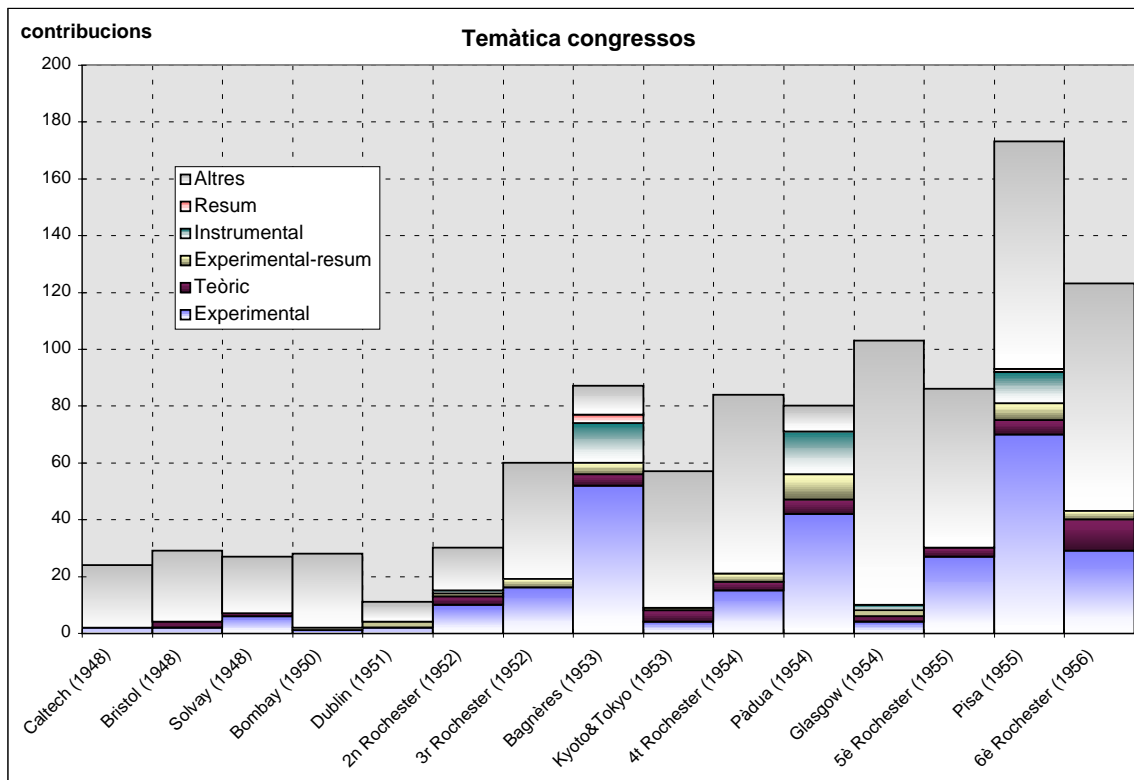


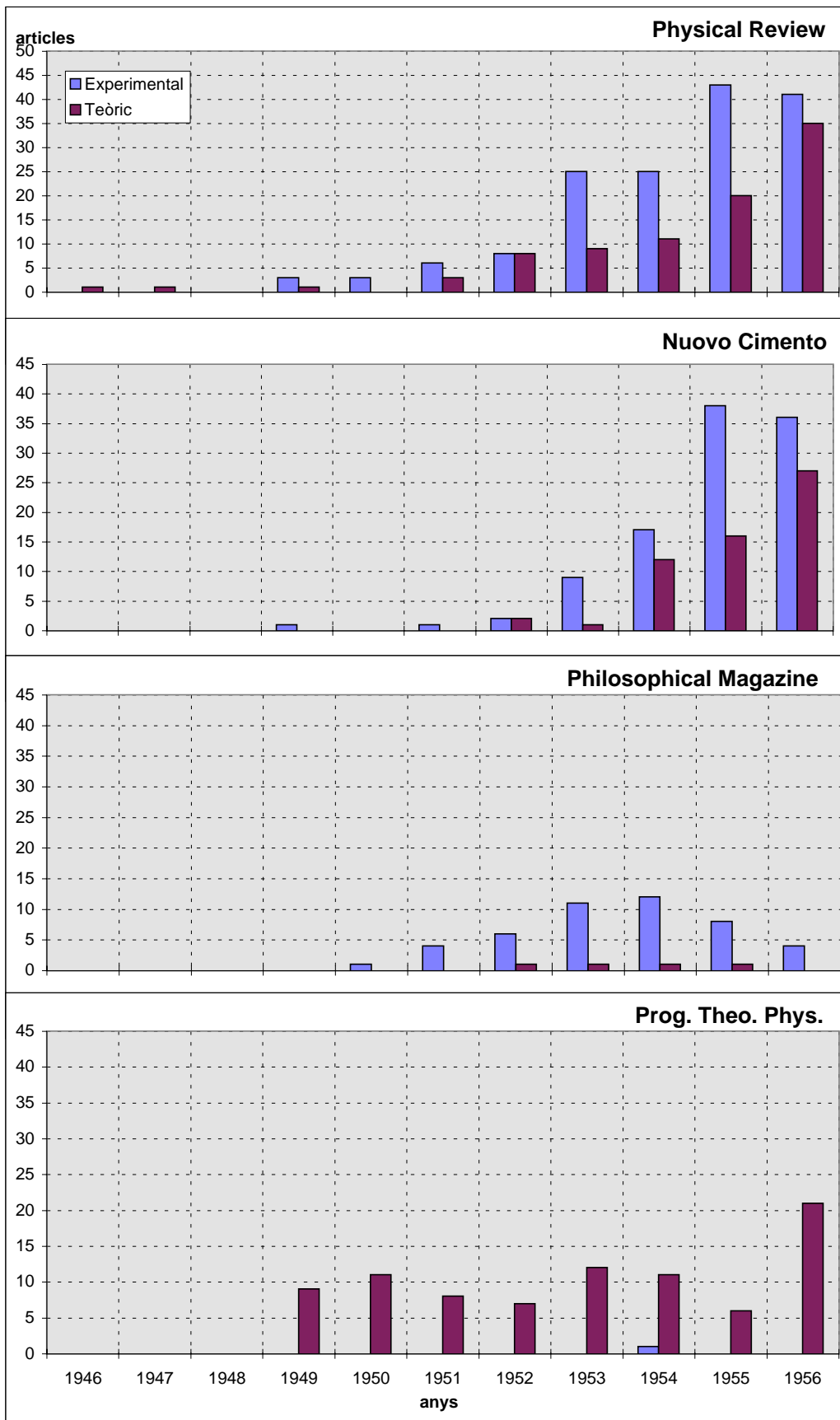
Les taules anteriors mostren el predomini de publicació de la Costa Est dels EUA, especialment en el *Physical Review*, però també present en el *Nuovo Cimento* i mínimament al *Progress of Theoretical Physics*.

En general, s'observa el predomini esperable dels grups dels EUA en la publicació al *Physical Review* i dels grups del continent europeu en el *Nuovo Cimento*. Això no obstant, la penetració de grups americans al *Nuovo Cimento* és força més elevada que la penetració de grups continentals al *Physical Review*. Aquesta penetració de grups americans, però, s'esdevé a partir del 1954. L'argument anterior també és vàlid pel cas del *Philosophical Magazine*, en què el 96% dels articles són de grups de la pròpia Gran Bretanya (força bipolaritzat entre Manchester i Bristol) i pel *Progress of Theoretical Physics*, on el 97% pertanyen a grups japonesos.

Pel que fa als congressos, els Rochester també es venen dominats per les contribucions dels grups nord-americans, però apareixen més permissius que el *Physical Review* respecte contribucions externes. La resta de congressos —Caltech (1948), Bristol (1948), Solvay (1948), Bombay (1950), Dublín (1951), Bagnères (1953), Kyoto&Tokyo (1953), Pàdua (1954), Glasgow (1954) i Pisa (1955)— mostren una participació variada de totes les zones, amb un predomini de les contribucions continentals.

B.4.3 Tipus d'article en revista o contribució en congrés





El *Physical Review* i el *Nuovo Cimento* semblen mostrar una tendència similar respecte teoria i experiment: predomini clar de la producció experimental per davant de la teòrica, amb un creixement aproximadament continu de la producció teòrica. L'any 1956 hi ha una disminució de la producció experimental que sembla atribuïble a l'abandonament dels experiments en radiació còsmica. Vist d'una altra manera, es pot argumentar que l'any 1955 conflueixen els darrers intents, força profitosos, de treball en raigs còsmics i, alhora, una producció provinent dels acceleradors que ja comença a ésser abundant. El 1956, en canvi, la producció experimental ja és producte, de forma quasi exclusiva, del camp dels acceleradors.²⁵ El fenomen es pot relacionar també amb la tendència present en el *Philosophical Magazine*: com que la revista britànica no conté cap treball en acceleradors, es fa evident la disminució de producció en els raigs còsmics, amb un màxim el 1954, producte dels esforços particulars fets amb emulsions.

El treball teòric del *Progress of Theoretical Physics* és del tot diferent. La revista japonesa és l'única de les quatre analitzades de caràcter exclusivament teòric. La seva producció teòrica en el nou camp és pràcticament constant, al principi en el marc de les teories mesòniques, posteriorment amb hipòtesis més fenomenològiques relacionades amb regles de selecció com la independència de càrrega, fins la teoria d'estranyesa, que porta a un augment de la producció teòrica un cop establert aquest marc. Ja hem notat que aquest augment també és present en el *Physical Review* i en el *Nuovo Cimento*.

Pel que fa als congressos, els gràfics mostren el domini general d'altres temes en aquests congressos que suposadament més s'ocupen del tractament de les noves partícules. Aquesta tendència només s'inverteix clarament en el cas de Bagnères (1953) i en el de Pàdua (1954). A través dels índexs dels congressos es poden visualitzar les temàtiques que es troben compreses en el camp *Altres* dels gràfics.²⁶

Referent a les noves partícules, la dedicació dels congressos mostra un caire molt més experimental que teòric. Es tracta de posar al corrent a la comunitat dels darrers resultats, per comparar-los, homogeneïtzar criteris, etc. L'elevada concentració de resultats experimentals a Bagnères (1953) ja fa pensar que es tracta d'un congrés paradigmàtic que marca una fita en la investigació. Pisa (1955) també presenta una elevada participació experimental. Entre ambdós congressos, però, hi ha una diferència clara: la producció en acceleradors a Pisa (1955), que a Bagnères (1953) és pràcticament nul·la. D'altra banda, tant a Pisa (1955) com a Pàdua (1954), la producció experimental es veu molt reforçada per les expedicions amb emulsions, darrers esforços per tal de millorar les estadístiques de nous esdeveniments en la radiació còsmica.²⁷

²⁵ Aquesta tendència la podem comprovar en el gràfic B.4.4.

²⁶ V. p. 338.

²⁷ De fet, el congrés de Pàdua (1954) és pensat específicament per fer públics els resultats de l'expedició a Sardenya del 1953, com Rostagni (1954, 167) explica:

L'idea di questo Congresso fu avanzata tra i partecipanti alla spedizione di Sardegna compiuta nell'estate 1953, per ricerche sul a radiazione cosmica in alta atmosfera, quando essi si riunirono,

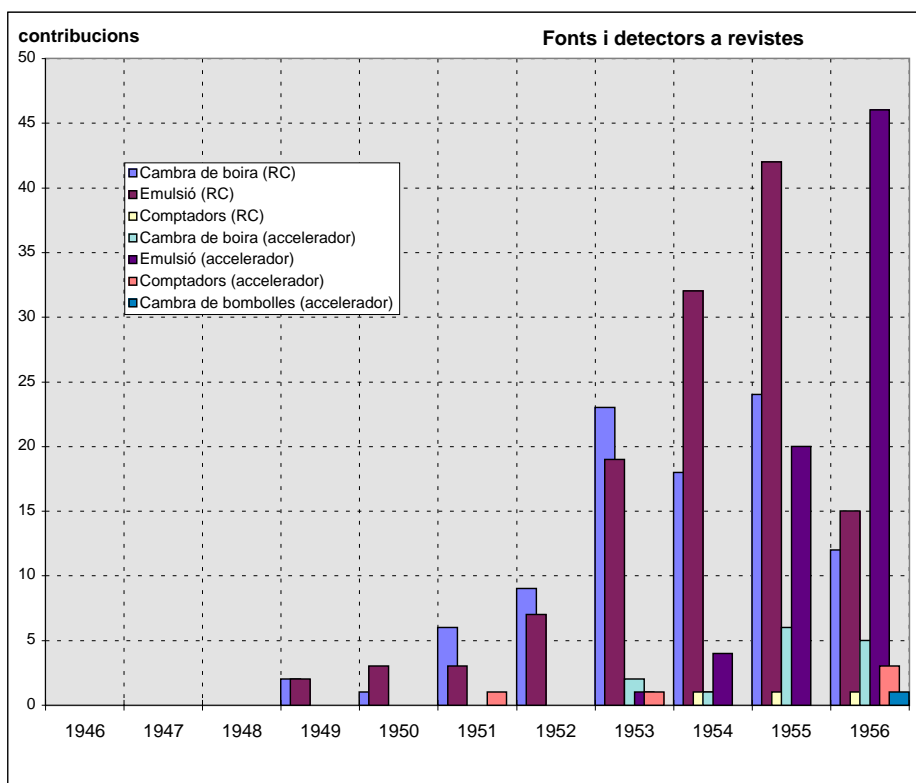
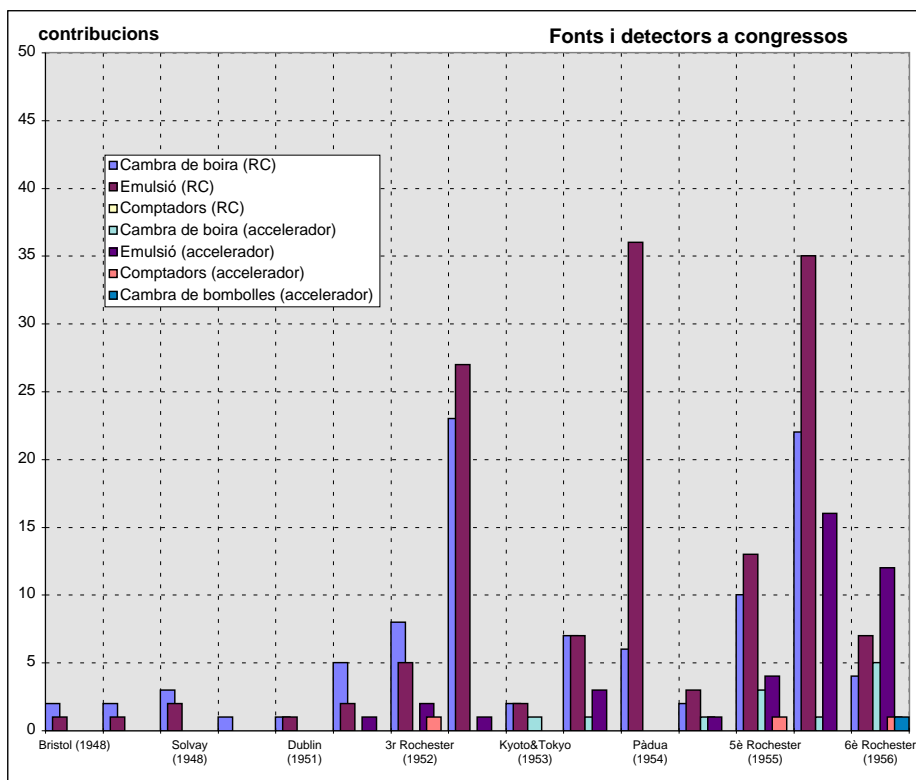
Finalment, revisant les contribucions catalogades com “experimental-resum” i “resum”, s’observa que els autors són figures claus de l’època: L. Leprince-Ringuet, C. F. Powell, P. M. S. Blackett, C. D. Anderson, J. R. Oppenheimer...

B.4.4 Tipus de fonts i detectors utilitzats

En els gràfics a continuació es diferencien les dues fonts de recerca de noves partícules presents en les contribucions analitzades: radiació còsmica i acceleradors. S’observa com a cadascuna d’aquestes fonts s’apliquen majoritàriament dos tipus de detectors: cambra de boira i emulsió fotogràfica, tot i que hi ha una petita presència de comptadors i de cambra de bombolles.

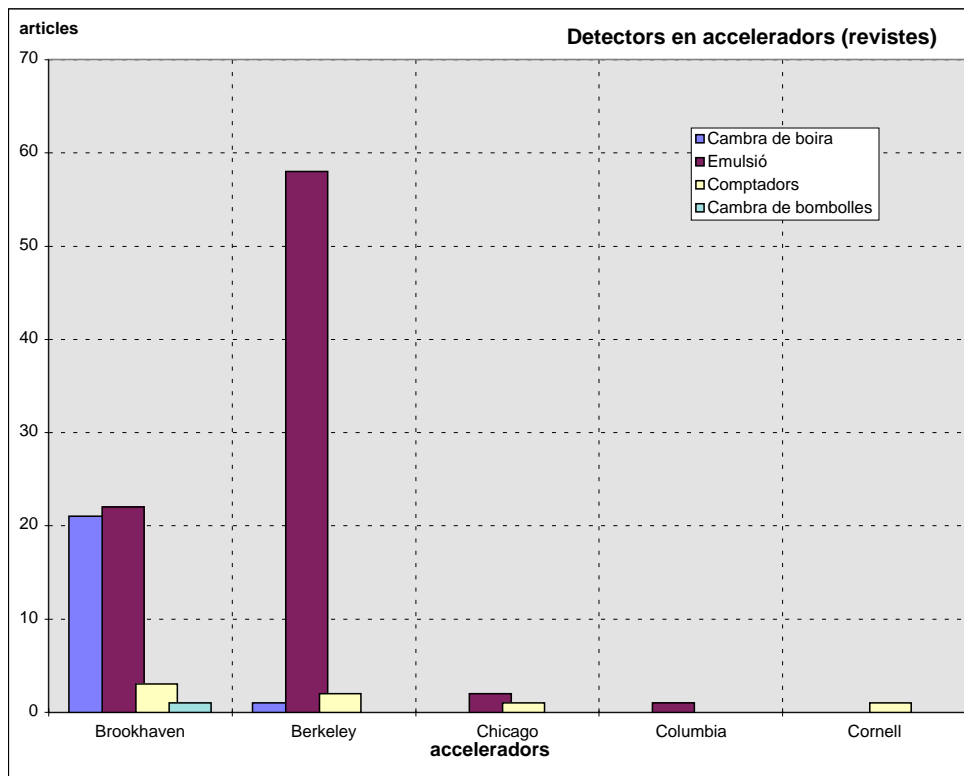
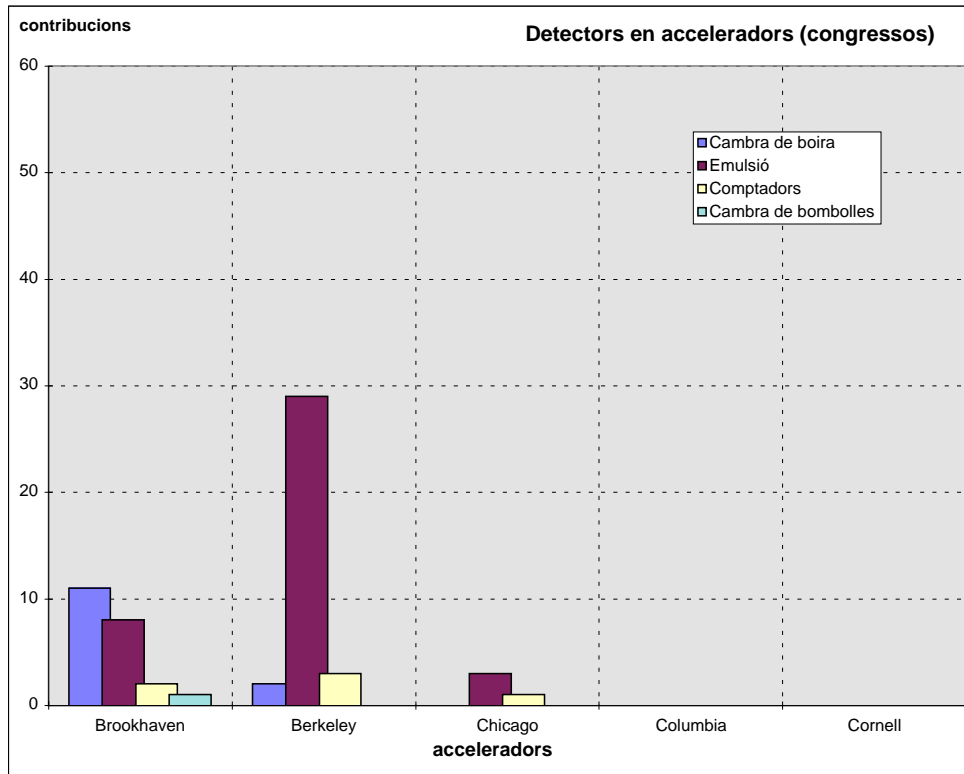
ai primi di Ottobre dell’anno scorso, a Berna per la ripartizione delle lastre. Dato che nella spedizione si era fatto uso principalmente della nuova tecnica della emulsioni libere (stripped), si pensò che potesse valere la pena di incontrarsi di nuovo dopo pochi mesi per porre a confronto i primi risultati e trarne eventuali conclusioni e, soprattutto, indicazioni utili ad una migliore organizzazione delle ricerche ulteriori.

Tot i que el congrés es complementa amb participacions d’altres grups que treballen en cambres de boira o altres emulsions exposades independentment de l’expedició a Sardenya.



S'observa un predomini clar de la detecció en raigs còsmics amb cambra de boira i emulsió. Això no obstant, a través dels congressos i del *Physical Review* es veu una entrada progressiva del treball en acceleradors, especialment amb emulsió com a detector. El 1956 aquesta producció es dispara en detriment de la producció en raigs còsmics. Destaca, també, el paper poc rellevant dels experiments amb comptadors en la detecció de les noves partícules, possiblement lligat a la necessitat de la tècnica visual per definir els nous elements, i la petita aparició, el 1956, de la cambra de bombolles aplicada en aquests descobriments que anirà prenent protagonisme a la resta de detectors visuals.

El treball en acceleradors comença a contribuir de forma significativa en els gràfics a partir del 1954. Els gràfics següents pretenen visualitzar de quins acceleradors es tracta. Sobresurten clarament el cosmotró de Brookhaven i, especialment a partir del 1955, el bevatró de Berkeley. En anys anteriors al 1954 es poden veure els intents de detecció fracassats a Chicago i Cornell.



Apèndix C

CRONOLOGIA DELS DESCOBRIMENTS

Descobriments oficials de mesons estranys							
nom actual	nom		desintegracions	any	autor (grup)	font	detector
	noms a l'època						
K^+	V^+ χ $K_{\pi 2}$ θ^+		$\pi^+ + \pi^0$ (21.2%)	1947 1953 1954	Rochester, Butler (Manchester) Menon, O'Ceallaigh (Bristol) Hodson <i>et al.</i> (Princeton, Echo Lake Colorado)	raigs còsmics raigs còsmics raigs còsmics	cambra de boira emulsió doble cambra
K^+	τ		$\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ (5.6%)	1949	Brown <i>et al.</i> (Bristol)	raigs còsmics	emulsió
K^+	V^+ η K_μ $K_{\mu 2}$		$\mu^+ + \nu$ (63.5%)	1947 1951 1954	Rochester, Butler (Manchester) O'Ceallaigh (Bristol) Grégory <i>et al.</i> (École Polytechnique)	raigs còsmics raigs còsmics raigs còsmics	cambra de boira emulsió doble cambra
K^+	κ $K_{\mu 3}$		$\mu^+ + \pi^0 + \nu$ (3.2%)	1951	O'Ceallaigh (Bristol)	raigs còsmics	emulsió
K^+	K_β K_{e3}		$e^+ + \pi^0 + \nu$ (4.8%)	1954	Friedlander <i>et al.</i> (Bristol)	raigs còsmics	emulsió
K^+	τ' $K_{\pi 3}$		$\pi^+ + \pi^0 + \pi^0$ (1.7%)	1954	Crussard <i>et al.</i> (Rochester)	raigs còsmics	emulsió
K_S^0	V^0 V_2^0 θ^0		$\pi^+ + \pi^-$ (68.6%)	1947 1951 1952	Rochester, Butler (Manchester) Armenteros <i>et al.</i> (Manchester) Thompson <i>et al.</i> (Indiana)	raigs còsmics raigs còsmics raigs còsmics	cambra de boira cambra de boira cambra de boira
K_S^0	θ^0 (mode alternatiu)		$\pi^0 + \pi^0$ (31.4%)	1955 1957	Gell-Mann, Pais (predicció) Eisler <i>et al.</i> (Columbia)	accelerador (Brookhaven)	cambra de bombolles
K_L^0	K_{e3}^0		$\pi^\pm + e^\mp + \nu$ (38.8%)	1955 1956	Gell-Mann, Pais (predicció) Landé <i>et al.</i> (Columbia)	accelerador (Brookhaven)	cambra de boira
K_L^0	θ^0 (mode alternatiu) $K_{\mu 3}^0$		$\pi^\pm + \mu^\mp + \nu$ (27.2%)	1954 1956	Van Lint <i>et al.</i> (Caltech) Landé <i>et al.</i> (Columbia)	raigs còsmics accelerador (Brookhaven)	cambra de boira cambra de boira
K_L^0			$\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ (21.1%)	1955 1957	Gell-Mann, Pais (predicció) Eisler <i>et al.</i> (Columbia)	accelerador (Brookhaven)	cambra de bombolles
K_L^0	τ^0 $K_{\pi 3}^0$		$\pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (12.6%)	1954 1956	Thompson (Indiana) Landé <i>et al.</i> (Columbia)	raigs còsmics accelerador (Brookhaven)	cambra de boira cambra de boira

Descobriments oficials de barions estranys						
nom		desintegracions	any	autor (grup)	font	detector
nom actual	noms a l'època					
Λ	V_1^0 Superneutró Λ^0 Y^0	$p + \pi^-$ (63.9%)	1951	Armenteros <i>et al.</i> (Manchester)	raigs còsmics	cambrada de boira
Λ	Superneutró (mode alternatiu) Λ^0 (mode alternatiu)	$n + \pi^0$ (35.8%)	1954	Ridgway, Collins (Brookhaven)	accelerador (Brookhaven)	comptadors
Σ^+	J Superprotó Hiperprotó Transprotó Y^+	$p + \pi^0$ (51.6%)	1953	Bonetti <i>et al.</i> (Milà)	raigs còsmics	emulsió
Σ^+	Y^+ (mode alternatiu)	$n + \pi^+$ (48.3%)	1953	Bonetti <i>et al.</i> (Milà)	raigs còsmics	emulsió
Σ^0		$\Lambda + \gamma$ (100%)	1954 1955	Gell-Mann, Pais (predicció) Walker <i>et al.</i> (Brookhaven)	accelerador (Brookhaven)	cambrada de boira de difusió d'alta pressió
Σ^-	Y^-	$n + \pi^-$ (99.9%)	1954	Fowler <i>et al.</i> (Brookhaven)	accelerador (Brookhaven)	cambrada de boira de difusió d'alta pressió
Ξ^-	Cascada Y^-	$\Lambda + \pi^-$ (99.9%)	1950	Armenteros <i>et al.</i> (Manchester, Pic du Midi)	raigs còsmics	cambrada de boira
Ξ^0		$\Lambda + \pi^0$ (99.5%)	1954 1958	Gell-Mann, Pais (predicció) Kaplan (École Polytechnique, Pic du Midi)	raigs còsmics	dobla cambrada
Ω^-		$\Lambda + K^-$ (67.8%)	1954	Eisenberg (Cornell)	raigs còsmics	emulsió

Bibliografia

ADAIR, R. K.

- (1952) “Conservation of Isotopic Spin in Nuclear Reactions”, *Phys. Rev.* **87**: 1041–3 [2-6-1952].

AIZU, K.; KINOSHITA, T.

- (1951) “On a Possible Model of the V-Particle”, *Prog. Theo. Phys.* **6**: 630–1 [15-7-1951].

ALICHANIAN, A. I.; ALICHANOW, A. I.

- (1949) “Concerning New Elementary Particles in Cosmic Rays”, *Nature* **163**: 761 [7-2-1949].

ALICHANIAN, A. I.; ALICHANOW, A. I.; WEISSENBERG, A.

- (1946) “Varytrons”, *Docladi of the Armenian Academy of Sciences (USSR)* **5**: 5, 129.
(1947) “Varytrons”, *J. Phys. Rad.* **11**: 97.

ALVAREZ, L. W.

- (1969) “Recent Developments in Particle Physics”, *Science* **165**: 1071-91.
(1989) “The hydrogen bubble chamber and the strange resonances”. A Fermilab (1989). P. 299–306.

ALVAREZ, L. W.; BRADNER, H.; FALK-VAIRANT, P.; GOW, J. D.; ROSENFELD, A. H.; SOLMITZ, F. T.; TRIPP, R. D.

- (1957) “ K^- Interactions in Hydrogen”, *Nuovo Cimento* **5**: 1026–46 [11-12-1956].

ALVAREZ, L. W.; EBERHARD, PH.; GOOD, L. M.; GRAZIANO, W.; TICHO, H. K.; WOJCICKI, S. G.

- (1959) “Neutral cascade hyperon event”, *Phys. Rev. Lett.* **2**: 215–9 [9-2-1959].

AMALDI, E.

- (1952) “ τ mesons”. A Congressos: Rochester (1952b). P. 50–1.
(1955) “Report on the τ -Mesons”. A Congressos: Pisa (1955). P. 179–215.

- (1988) “The beginning of particle physics: from cosmic rays to CERN accelerators”. A Bristol (1987). P. 109–19.
- AMALDI, E.; BARONI, G.; CORTINI, G.; FRANZINETTI, C.; MANFREDINI, A.
- (1954) “Contribution to the τ -Meson Investigation”. A Congressos: Pàdua (1954). P. 180–94.
- AMALDI, E.; FABRI, E.; HOANG, T. F.; LOCK, W. O.; SCARSI, L.; TOUSCHEK, B.; VITALE, B.
- (1954) “Report of the Committee on τ -Mesons”. A Congressos: Pàdua (1954). P. 419–32.
- ANDERSON, C. D.
- (1954) “Decay of Neutral Particles”. A Rochester (1954). P. 89–91.
- ANDERSON, C. D.; ANDERSON, H. L.
- (1983) “Unraveling the Particle Content of Cosmic Rays”. A Fermilab (1980). P. 131–54.
- ANDERSON, C. D.; COWAN, E. W.; LEIGHTON, R. B.; VAN LINT, V. A. G.
- (1953) “Cloud chamber observation of decay of a tau meson”, *Phys. Rev.* **92**: 1089.
- ANDERSON, H. L.
- (1952) “Scattering of π^+ and π^- Mesons in Hydrogen”. A Congressos: Rochester (1952a). P. 19–24.
- (1982) “Early History of Physics with accelerators”. A París (1982). P. C8-101–64.
- ARMENTEROS, R.
- (1953) “ V_1^0 Particles”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 16–21.
- ARMENTEROS, R.; ASTIER, A.; D’ANDLAU, C.; GRÉGORY, B.; HENDEL, A.; HENNESSY, J.; LAGARRIGUE, A.; LEPRINCE-RINGUET, L.; MULLER, F.; PEYROU, CH.; RAU, R. R.
- (1956a) “ V^+ Events”. A Congressos: Pisa (1955). P. 529–40.
- (1956b) “ V^- Events”. A Congressos: Pisa (1955). P. 541–51.
- ARMENTEROS, R.; BARKER, K. H.; BUTLER, C. C.; CACHON, A.
- (1951) “The Properties of Neutral V-Particles”, *Phil. Mag.* **42**: 1113–35 [15-8-1951].
- ARMENTEROS, R.; BARKER, K. H.; BUTLER, C. C.; CACHON, A.; CHAPMAN, A. M.
- (1951) “Decay of V particles”, *Nature* **167**: 501–3.
- ARMENTEROS, R.; BARKER, K. H.; BUTLER, C. C.; CACHON, A.; YORK, C. M.

- (1952) "The Properties of Charged V-particles", *Phil. Mag.* **43**: 597–612 [11-3-1952].
- ARMENTEROS, R.; GRÉGORY, B. P.; HENDEL, A.; LAGARRIGUE, A.; LEPRINCE-RINGUET, L.; MULLER, F.; PEYROU, C.
- (1956) "Results of the Study of S-Events in the Double Cloud-Chamber of the École Polytechnique". A Congressos: Pisa (1955). P. 520–8.
- ARMENTEROS, R.; GRÉGORY, B. P.; LAGARRIGUE, A.; LEPRINCE-RINGUET, L.; MULLER, F.; PEYROU, CH.
- (1954) "Résultats sur les particules V chargées". A Congressos: Pàdua (1954). P. 327–32.
- (1954) "Sur le signe de la particule K_μ ". A Congressos: Pàdua (1954). P. 324–7.
- ARNOLD, W. H.; BALLAM, J.; REYNOLDS, G. T.
- (1955) "Cloud Chamber Observations on Charged V Particles", *Phys. Rev.* **100**: 295–302 [20-6-1955].
- ARNOWITT, R.; DESER, S.
- (1953) "Solutions of the Meson-Nucleon Equation in the Adiabatic Limit", *Phys. Rev.* **92**: 1061 [7-7-1953].
- BARKER, K. H.
- (1953a) " V_2^0 and V_3^0 particles". A Congressos: Bagnères (1953). P. 35–40.
- (1953b) "Chambres de Wilson: récapitulation et discussion". A Congressos: Bagnères (1953). P. 240.
- BARNES, V. E.; CONNOLLY, P. L.; CRENNELL, D. J.; CULWICK, B. B.; DELANEY, W. C.; FOWLER, W. B.; HAGERTY, P. E.; HART, E. L.; HORWITZ, N.; HOUGH, P. V. C.; JENSEN, J. E.; KOPP, J. K.; LAI, K. W.; LEITNER, J.; LLOYD, J. L.; LONDON, G. W.; MORRIS, T. W.; OREN, Y.; PALMER, R. B.; PRODELL, A. G. RADOJICIC, D.; RAHM, D. C.; RICHARDSON, C. R.; SAMIOS, N. P.; SANFORD, J. R.; SHUTT, R. P.; SMITH, J. R.; STONEHILL, D. L.; STRAND, R. C.; THORNDIKE, A. M.; WEBSTER, M. S.; WILLIS, W. J.; YAMAMOTO, S. S.
- (1964) "Observation of a Hyperon with Strangeness minus three", *Phys. Rev. Lett.* **12**: 204-6 [11-2-1964].
- BECKER, J.; CHANSON, P.; NAGEOTTE, E.; PRICE, TH.; TREILLE, P.; WEST, D.
- (1953) "Mesures d'ionisation associées aux chambres de Wilson. Remontée de l'ionisation". A Congressos: Bagnères (1953). P. 11–4.
- BELLIBONI, G.; SECHI, B.; VITALE, B.
- (1954) "Analysis of some τ -Mesons". A Congressos: Pàdua (1954). P. 195–201.

BETHE, H. A.

- (1946) "Multiple Scattering and the Mass of the Meson", *Phys. Rev.* **70**: 821–31 [20-9-1946].

BETHE, H. A.; BACHER, R. F.

- (1936) "Nuclear Physics. A. Stationary States of Nuclei", *Rev. Mod. Phys.* **8**: 82–229.

BHABHA, H. J.

- (1949) "On the Postulational Basis of the Theory of Elementary Particles", *Rev. Mod. Phys.* **21**: 451–62.

BISWAS, S.; GEORGE, E. C.; LAL, D.; YASH PAL; PETERS, B.

- (1953) "Improvements in Photographic Emulsions Technique". A Congressos: Bagnères (1953). P. 67–9.

BLACKETT, P. M. S.

- (1948) "Cloud chamber researches in nuclear physics and cosmic radiation". A Nobel Lectures in Physics 1942-1962. P. 93–122.
- (1950) "Cloud Chamber Photographs of V-Particles". A Congressos: Bombay (1950). P. 65–8.
- (1953a) "Introduction". A Congressos: Bagnères (1953). P. 1.
- (1953b) "Closing Remarks". A Congressos: Bagnères (1953). P. 290–1.
- (1954) "V-particles and the Cloud Chamber". A Congressos: Varenna (1953). P. 264–89.

BONETTI, A.; LEVI-SETTI, R.; PANETTI, M.; TOMASINI, G.

- (1953a) "Observation of the decay at rest of a heavy particle", *Nuovo Cimento* **10**: 345–7 [28-1-1953].
- (1953b) "Observation on the decay of transprotonic mass particles in photographic emulsion". A Congressos: Bagnères (1953). P. 182–3.

BRIDGE, H.; COURANT, H.; DAYTON, B.; DESTAEBLER, H. C.; ROSSI, B.; SAFFORD, R.; WILLARD, D.

- (1954) "Recent Results on S-Particles", *Nuovo Cimento* **12**: 81–9 [7-5-1954].

BRIDGE, H.; DESTAEBLER, H. C.; ROSSI, B.; SREEKANTAN, B. V.

- (1955) "Evidence for Heavy Mesons with The Decay Processes $K_{\pi 2} \rightarrow \pi + \pi^0$ and $K_{\mu 2} \rightarrow \mu + \nu$ from Observations with a Multiplate Cloud Chamber", *Nuovo Cimento* **1**: 874–87 [18-3-1955].

BRIDGE, H.; ROSSI, B.

- (1953) "Observation on the New Unstable Particles with a Multiplate Cloud Chamber. Experimental Method. Results Concerning Neutral Particles". A Congressos: Bagnères (1953). P. 21–6.
- BRINK, D. M.
- (1965) *Nuclear Forces*. Oxford: Pergamon Press.
- BRISTOL (1987)
- (1988) *Proceedings of the International Conference to Celebrate the 40th Anniversary of the Discoveries of the π - and V -particles, held at the University of Bristol, 22-24 July 1987*, B. Foster, P. H. Fowler, editors. Bristol: Adam Hilger.
- BRODE, R. B.
- (1949) "The Multiplicity of Production and Mass Spectrum of Cosmic Ray Mesons", *Suppl. Nuo. Cim.* **3**: 465–74.
- BRODE, R. B.; STARR, B.
- (1938) "Nuclear Disintegrations Produced by Cosmic Rays", *Phys. Rev.* **53**: 3–5 [4-11-1937].
- BROWN, L. M.; DRESDEN, M.; HODDESON, L.
- (1989) "Pions to quarks: particle physics in the 1950s". A Fermilab (1985). P. 3–39.
- BROWN, L. M.; HODDESON, L.
- (1983) "The Birth of Elementary Particle Physics: 1930-1950". A Fermilab (1980). P. 3-36.
- BROWN, L. M.; PAIS, A.; PIPPARD, B.
- (1995) *Twentieth Century Physics*. Institute of Physics Publishing. Bristol&Philadelphia: American Institute of Physics Press. New York. Vols. 1 i 2.
- BROWN, L. M.; RECHENBERG, H.
- (1996) *The Origin of the Concept of Nuclear Forces*. Bristol&Philadelphia: Institute of Physics Publishing Ltd.
- BROWN, R.; CAMERINI, U.; FOWLER, P. H.; MUIRHEAD, H.; POWELL, C. F.; RITSON, D. M.
- (1949a) "Observations with electron-sensitive plates exposed to cosmic radiation: Part 1", *Nature* **163**: 47–51.
- (1949b) "Observations with electron-sensitive plates exposed to cosmic radiation: Part 2", *Nature* **163**: 82-7.
- BRUECKNER, K. A.

- (1952) “Meson-Nucleon Scattering and Nucleon Isobars”, *Phys. Rev.* **86**: 106–9 [17-12-1951].
- BUDDE, R.; CHRETIEN, M.; LEITNER, J.; SAMIOS, N. P.; SCHWARTZ, M.; STEINBERGER, J.
- (1956) “Properties of Heavy Unstable Particles Produced by 1.3-Bev π^- Mesons”, *Phys. Rev.* **103**: 1827–36 [15-6-1956].
- BURHOP, E. H. S.; LOCK, W. O.; MENON, M. G. K. (EDS.)
- (1972) *Selected Papers of Cecil Frank Powell*. Amsterdam&London: North-Holland Publishing Company.
- BUTLER, C. C.
- (1953) “Charged V-Particles”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 90–7.
- (1982) “Early cloud chamber experiments at the Pic-du-Midi”. A Paris (1982). P. C8-177–84.
- BUTLER, C. C.; ROSSER, W. G. V.; BARKER, K. H.
- (1950) “Some Properties of Penetrating Cosmic-Ray Showers and Star Phenomena seen in the Cloud Chamber”, *Proceedings of the Physical Society* **63A**: 145–64 [21-7-1949].
- CAHN, R. N.; GOLDHABER, G. (EDS.)
- (1989) *The Experimental Foundations of Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- CASE, K. M.; KARPLUS, R.; YANG, C. N.
- (1956) “Strange Particles and the Conservation of Isotopic Spin”, *Phys. Rev.* **101**: 874–6 [10-10-1955].
- CASSIDY, D. C.
- (1981) “Cosmic ray showers, high energy physics, and quantum field theories”, *Historical Studies in the Physical Sciences* **12**: 1–39.
- CERULUS, F.
- (1956) “Remarks on the classification of Fundamental Particles”, *Phys. Rev.* **87**: 871–5 [8-4-1956].
- CLOSE, F.; MARTEN, M.; SUTTON, C.
- (1987) *The Particle Explosion*. New York&Tokyo&Melbourne: Oxford University Press.
- COCCONI, G.

- (1954) "Strange Particles and Multiple Meson Production", *Phys. Rev.* **94**: 741–2 [15-3-1954].

CONGRESSOS

BAGNÈRES (1953)

- (1953) *Congrès International sur le Rayonnement Cosmique. Bagnères de Bigorre, 6-12 juillet 1953.* Toulouse: Université de Toulouse.

BOMBAY (1950)

- (1951) *Report of an International Conference on Elementary Particles, held at the Tata Institute of Fundamental Research, Bombay, on 14-22 December 1950.* Bombay: Tata Sons Ltd.

BRISTOL (1948)

- (1949) *Cosmic Radiation. Colston Papers based on a Symposium promoted by the Colston Research Society and the University of Bristol in September 1948.* London&New York: Butterworths Scientific Publications&Interscience Publishers Inc.

CALTECH (1948)

- (1949) *Symposium on Cosmic Rays, held at the California Institute of Technology on June 21-23, 1948.* Reimprè a *Rev. Mod. Phys.* (1949). **21**: 1-183.

CAMBRIDGE (1946)

- (1947) *Report on an International Conference on Fundamental Particles and Low Temperature, Cavendish Laboratory, Cambridge, 22-27 July 1946.* London: Taylor and Francis, Ltd.

CERN (1958)

- (1958) *Proceedings of the 1958 Annual International Conference on High Energy Physics, CERN.* Geneva: CERN.

DUBLÍN (1951)

- (1952) *Papers read at Cosmic Ray Colloquium, September, 1951.* Communications of the Dublin Institute for Advanced Studies. Series A, No. 10. Dublin: The Dublin Institute for Advanced Studies.

GLASGOW (1954)

- (1955) *International Conference on nuclear and meson physics held in Glasgow from the 13th to the 17th of July, 1954.* E. H. Bellamy, R. G. Moorhouse, editors. Nova York: Pergamon Press.

KYOTO&TOKYO (1953)

- (1953) *Proceedings of the International Conference of Theoretical Physics. Kyoto&Tokyo September, 1953.* Tokyo: Science Council of Japan.

PÀDUA (1954)

- (1954) *Rendiconti del Congresso Internazionale sulle particelle instabili pesanti e sugli eventi di alta energia nei raggi cosmici. Tenutosi a Padova nei giorni 12-15 aprile 1954.* Reimprès a Suppl. Nuo. Cim. (1954). **12**: 167-497.

PISA (1955)

- (1956) *Conferenza Internazionale sulle Particelle Elementari. Pisa, 12-18 giugno 1955.* Reimprès a Suppl. Nuo. Cim. (1956). **4**: 135-1078.

ROCHESTER

- (1952a) *Proceedings of the Second Annual Rochester Conference on Meson Physics, January 11-12, 1952.* A. M. L. Messiah, H. P. Noyes, editors. Nova York: University of Rochester.
- (1952b) *High Energy Nuclear Physics. Proceedings of the Third Annual Rochester Conference, December 18-20, 1952.* H. P. Noyes, M. Camac, W. D. Walker, editors. Nova York: University of Rochester.
- (1954) *High Energy Nuclear Physics. Proceedings of the Fourth Annual Rochester Conference, January 25-27, 1954.* H. P. Noyes, J. Klarmann, A. E. Woodruff, editors. Nova York: University of Rochester.
- (1955) *High Energy Nuclear Physics. Proceedings of the Fifth Annual Rochester Conference, January 31-February 2, 1955.* H. P. Noyes, E. M. Hafner, G. Yekutieli, B. J. Raz, editors. Nova York: University of Rochester.
- (1956) *High Energy Nuclear Physics. Proceedings of the Sixth Annual Rochester Conference, April 3-7, 1956.* H. J. Ballam, V. L. Fitch, T. Fulton, K. Huang, R. R. Rau, S. B. Treiman, editors. Nova York: University of Rochester.

SOLVAY (1948)

- (1948) *Les particules élémentaires. Huitième conseil de physique tenu à l'Université de Bruxelles du 27 septembre au 2 octobre 1948.* Bruxelles: R. Stoops éditeur.

VARENNA (1953)

- (1954) *Rendiconti del Corso tenuto nella Villa Monastero a Varenna dal 19 Agosto al 12 Settembre 1953.* Reimprès a Suppl. Nuo. Cim. (1954). **XI**: 141-450.

CONVERSI, M.; PANCINI, E.; PICCIONI, O.

- (1945) "On the decay Process of Positive and Negative Mesons", *Phys. Rev.* **68**: 232 [15-10-1945].
- (1947) "On the Disintegration of Negative Mesons", *Phys. Rev.* **71**: 209-10 [21-12-1946].

CORSON, D. R.; BRODE, R. B.

- (1938) "The Specific Ionization and Mass of Cosmic-Ray Particles", *Phys. Rev.* **53**: 773–7 [25-3-1938].

COURANT, M.

- (1955) "Associated Photons in K -Particle Decays Observed with a Multiplate Cloud Chamber", *Phys. Rev.* **99**: 282–7 [11-3-1955].

CRAWFORD, F. S.; CRESTI, M.; GOOD, M. L.; GOTTSTEIN, K.; LYMAN, E. M.; SOLMITZ, F. T.; STEVENSON, M. L.; TICHO, H. K.

- (1957) "Detection of Parity Nonconservation in Λ Decay", *Phys. Rev.* **108**: 1102–3 [8-10-1957].

CROWTHER, J. G.

- (1974) *The Cavendish Laboratory, 1874-1974*. New York: Science History Publications.

CRUSSARD, J.; JANEAU, L.; KAYAS, G.; LEPRINCE-RINGUET, L.; MABBOUX, C.; MORELLET, D.; ORKIN-LECOURTOIS, A.; TREMBLEY, J.

- (1953) "Observations sur les mesons K ". A Congressos: Bagnères (1953). P. 128-32.

CRUSSARD, J.; KAPLON, M. F.; KLARMANN, J.; NOON, J. H.

- (1954) "Observation of a New Decay Mode of a Heavy Meson", *Phys. Rev.* **93**: 253 [17-11-1953].

DALITZ, R. H.

- (1953a) "On the Analysis of τ -Meson Data and the Nature of the τ -Meson", *Phil. Mag.* **44**: 1068–80 [9-2-1954].
- (1953b) "The modes of decay of the τ meson". A Congressos: Bagnères (1953). P. 236–8.
- (1954) "Decay of τ Mesons of Known Charge", *Phys. Rev.* **94**: 1046–51 [9-2-1954].
- (1982) "Strange Particle Theory in the Cosmic Ray Period". A Paris (1982). P. C8-195–205.
- (1989) " K -meson decays and parity violation". A Fermilab (1985). P. 434–57.

DALLAPORTA, N.

- (1954) "The Study of Heavy Unstable Particles Using Stripped Emulsions. Introductory Remarks". A Congressos: Pàdua (1954). P. 173–80.
- (1955) "On the Mean Lives of Heavy Unstable Particles", *Nuovo Cimento* **1**: 962–5 [24-3-1955].

D'ANDLAU, C.; ARMENTEROS, R.; ASTIER, A.; DESTAEBLER, H. C.; GRÉGORY, B. P.;

LEPRINCE-RINGUET, L.; MULLER, F.; PEYROU, C.; TINLOT, J. H.

- (1956) "A V^0 -Decay with an Electron Secondary", *Nuovo Cimento* **4**: 917–21 [6-8-1956].

DANIEL, R. R.; FRIEDMANN, G.; LAL, D.; YASH PAL; PETERS, B.

- (1954) "On the Construction of Large Nuclear Emulsion Block Detectors", *Proceedings of the Indian Academy of Sciences* **40**: 151–7 [24-9-1954].

DANYSZ, M.; PNIEWSKY, J.

- (1953a) "Delayed Disintegration of a Heavy Fragment Emitted in Nuclear Explosion", *Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences* **Cl, III, 1**: 42–4 [20-11-1952].
- (1953b) "Delayed Disintegration of a Heavy Nuclear Fragment: I", *Phil. Mag.* **44**: 348–50 [1-12-1952].

DAS GUPTA, N. N.; GHOSH, S. K.

- (1946) "A Report on the Wilson Cloud Chamber and Its Applications in Physics", *Rev. Mod. Phys.* **18, 2**: 225–90.

DAUDIN, J.

- (1944) "Production et interaction nucléaire des mésotons", *Annales de Physique (Paris)* **19**: 110–6.
- (1953) "Les varytrons et les nouvelles mesures de masse", *J. Phys. Rad.* **14**: 419–23 [7-1-1953].

DAVIES, J.; FRANZINETTI, C.

- (1954) "Report on the Expedition to Sardinia, 1953". A Congressos: Pàdua (1954). P. 480-97.

DAVIES, J. H.; EVANS, D.; FOWLER, P. H.; FRANÇOIS, P. E.; FRIEDLANDER M. W.; HILLIER, R.; IREDALE, P.; KEEFE, D.; MENON, M. G. K.; PERKINS, D. H.; POWELL, C. F.; CRANE, L.; JOHNSTON, R. H. W.; O'CEALLAIGH, C.; ANDERSON, F.; LAWLOR, G.; NEVIN, T. E.; ALVIAL, G.; BONETTI, A.; DI CORATO, M.; DILWORTH, C.; LEVI SETTI, R.; MILONE, A.; OCCHIALINI, G.; SCARSI, L.; TOMASINI, G.; CECCARELLI, M.; GRILLI, M.; MERLIN, M.; SALANDIN, G.; SECHI, B.

- (1955) "Observations on Heavy Mesons Secondaries". A Congressos: Pisa (1955). P. 398-424.

DAVIES, J. H.; EVANS, D.; FRANÇOIS, P. E.; FRIEDLANDER M. W.; HILLIER, R.; IREDALE, P.; KEEFE, D.; MENON, M. G. K.; PERKINS, D. H.; POWELL, C. F.; BØGGILD, J.; BRENE, N.; FOWLER, P. H.; HOOPER, J.; ORTEL, W. C. G.; SCHARFF, M.; CRANE, L.; JOHNSTON, R. H. W.; O'CEALLAIGH, C.; ANDERSON, F.; LAWLOR, G.; NEVIN, T. E.; ALVIAL, G.; BONETTI, A.; DI CORATO, M.; DILWORTH, C.; LEVI SETTI, R.; MILONE, A.; OCCHIALINI, G.; SCARSI, L.; TOMASINI, G.; CECCARELLI, M.;

GRILLI, M.; MERLIN, M.; SALANDIN, G.; SECHI, B.

- (1955) “On the Masses and Modes of Decay of Heavy Mesons Produced by Cosmic Radiation (G-Stack Collaboration)”, *Nuovo Cimento* **2**: 1063–1103 [2-10-1955].

DE MARIA, M.; GRILLI, M.; SEBASTIANI, F. (EDS.)

- (1989) *The Restructuring of Physical Sciences in Europe and the United States 1945–1960*. Singapore: World Scientific.

D’ESPAGNAT, B.; PRENTKI, J.

- (1956) “Formulation Mathématique du Modèle de Gell-Mann”, *Nuc. Phys.* **1**: 33–53 [11-7-1955].

DONCEL, M. G.

- (1982) *Partículas, campos y simetrías. Historia de la física de altas energías de los años 30 a los 60*. Bellaterra: Publicacions UAB.

EISENBERG, Y.

- (1954) “Possible Existence of a New Hyperon”, *Phys. Rev.* **96**: 541–3 [26-8-1954].

EISLER, F.; PLANO, R.; SAMIOS, N.; SCHWARTZ, M.; STEINBERGER, J.

- (1957) “Systematics of Λ^0 and θ^0 Decay”, *Nuovo Cimento* **5**: 1700–15 [17-4-1957].
(1958) “Associated Production of Σ^0 and θ_2^0 ; Mass of the Σ^0 ”, *Phys. Rev.* **110**: 226–7 [3-12-1957].

EISLER, F.; PLANO, R.; PRODELL, A.; SAMIOS, N.; SCHWARTZ, M.; STEINBERGER, J.; BASSI, P.; BORELLI, V.; PUPPI, G.; TANAKA, G.; WOLOSCHKE, P.; ZOBOLI, V.; CONVERSI, M.; FRANZINI, P.; MANNELLI, I.; SANTANGELO, R.; SILVESTRINI, V.; GLASER, D. A.; GRAVES, C.; PERL, M. L.

- (1957) “Demonstration of Parity Nonconservation in Hyperon Decay”, *Phys. Rev.* **108**: 1353–5 [21-10-1957].

EKSPONG, A. G.; GOLDHABER, G.

- (1956) “Decay Modes of Negative K -Mesons”, *Phys. Rev.* **102**: 1187–8 [26-3-1956].

EZHELA, V. V. *et al.* (EDS.)

- (1996) *Particle Physics. One Hundred Years of Discoveries. An Annotated Chronological Bibliography*. New York: American Institute of Physics.

FERMI, E.

- (1950) “High Energy Nuclear Events”, *Prog. Theo. Phys.* **5**: 570–83 [30-6-1950].
(1951) *Elementary Particles*. New Haven: Yale University Press.
(1952) “Discussion of these results”. A Congressos: Rochester (1952a). P. 24–6.

FERMI, E.; YANG, C. N.

- (1949) “Are Mesons Elementary Particles?”, *Phys. Rev.* **76**: 1739–43 [24-8-1949].

FERMILAB (1980)

- (1983) *The birth of particle physics. “Based on the lectures and round-table discussion of the International Symposium on the History of Particle Physics, held at Fermilab in May 1980”*, L. M. Brown, L. Hoddeson, editors. Cambridge: Cambridge University Press.

FERMILAB (1985)

- (1989) *Pions to quarks: particle physics in the 1950s. “Based on the lectures and discussions of historians and physicists at the Second International Symposium on the History of Particle Physics, held at Fermilab on May 1-4, 1985”*, L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, M. West, editors. Cambridge: Cambridge University Press.

FEYNMAN, R. P.

- (1951) High energy phenomena and meson theories, notes of lectures given at Caltech, January-March 1951, no publicat. Pasadena, California: Caltech Archives.
(1956) “Discussion”. A Congressos: Rochester (1956). P. VIII-27.

FEYNMAN, R. P.; GELL-MANN, M.

- (1958) “Theory of the Fermi Interaction”, *Phys. Rev.* **109**: 193–8 [16-9-1957].

FINKELSTEIN, R. J.

- (1952) “The V -Particle and the Composite Pion”, *Phys. Rev.* **88**: 555–8 [30-6-1952].

FITCH, V. L.

- (1989) “The τ - θ puzzle: an experimentalist’s perspective”. A Fermilab (1985). P. 458–63.

FITCH, V. L.; ROSNER, J. L.

- (1995a) *Twentieth Century Physics*. L. M. Brown, A. Pais, B. Pippard, editors. Vol. 2. Bristol: Institute of Physics Publishing.
(1995b) “Elementary Particle Physics in the second half of the twentieth century”. A *Twentieth Century Physics*. Vol. 2. P. 635–780.

FOWLER, P. H.; MENON, M. G. K.; POWELL, C. F.; ROCHAT, O.

- (1951) “Masses and Modes of Decay of Heavy Mesons. Part II. τ -Particles”, *Phil. Mag.* **42**: 1040–9 [15-7-1951].

FOWLER, W. B.; SHUTT, R. P.; THORNDIKE, A. M.; WHITTEMORE, W. L.

- (1953a) “Observation of V^0 Particles Produced at the Cosmotron”, *Phys. Rev.* **90**: 1126–7 [29-4-1953].
- (1953b) “Production of V_1^0 Particles by Negative Pions in Hydrogen”, *Phys. Rev.* **91**: 1287 [16-7-1953].
- (1954) “Production of Heavy Unstable Particles by Negative Pions”, *Phys. Rev.* **93**: 861–7 [10-11-1953].

FRETTER, W. B.

- (1946) “The Mass of Cosmic-Ray Mesotrons”, *Phys. Rev.* **70**: 625–32 [13-8-1946].
- (1952a) “Fretter’s Data on V particles—Fretter’s Report of Leighton’s Data”. A Congressos: Rochester (1952a). P. 52–8.
- (1952b) “Further report on Leighton’s experiments—Abstract of V particle data from Manchester”. A Congressos: Rochester (1952a). P. 69–73.
- (1953a) “Chambres de Wilson: récapitulation et discussion”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 241.
- (1953b) “Pair Production”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 252.
- (1982) “Cosmic Rays and Particle Physics at Berkeley”. A París (1982). P. C8-191–4.

FRETTER, W. B.; GRÉGORY, B. P.; JOHNSTON, R.; LAGARRIGUE, A.; MEYER, H.; MULLER, F.; PEYROU, C.

- (1953) “Mesures de masses de mesons-S par moment-parcours”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 113-7.

FRETTER, W. B.; MAY, M. M.; NAKADA, M. P.

- (1953) “A Study of Neutral V Particles”, *Phys. Rev.* **89**: 168–80 [15-9-1952].

FRIEDLANDER, M. W.

- (1988) “Round table”. A Bristol (1987). P. 97–103.

FRIEDLANDER, M. W.; KEEFE, D.; MENON, M. G. K.; VAN ROSSUM, L.

- (1954) “Evidence for the β -Decay of a K-Meson”, *Phil. Mag.* **45**: 1043–9 [8-7-1954].

FRY, W. F.; SCHNEPS, J.; SNOW, G. A.; SWAMI, M. S.; WOLD, D. C.

- (1956) “Mass Difference between the Σ^+ and Σ^- Hyperons and the Mass of the K^- Meson”, *Phys. Rev.* **104**: 270–1 [13-8-1956].

FRY, W. F.; SCHNEPS, J.; SWAMI, M. S.

- (1955a) “Further Evidence for the Existence of a Heavy K-Meson or Heavy Hyperon”, *Nuovo Cimento* **2**: 346–7 [7-7-1955].

- (1955b) “K-Mesonic Decay of a Slow Secondary Particles”, *Phys. Rev.* **97**: 1189 [27-12-1954].
- (1956) “Evidence for a Long-Lived Neutral Unstable Particle”, *Phys. Rev.* **97**: 1904–5 [19-7-1956].

FUKUDA, H.; MIYAMOTO, Y.

- (1949a) “On the γ -Decay of Neutral Meson”, *Prog. Theo. Phys.* **4**: 347–57 [16-5-1949].
- (1949b) “Selection Rule for Meson Problem”, *Prog. Theo. Phys.* **4**: 389–91 [17-7-1949].
- (1949c) “The three Quanta Disintegration of the Neutral Meson”, *Prog. Theo. Phys.* **4**: 392–4 [17-7-1949].

FUKUDA, H.; HAYAKAWA, S.; MIYAMOTO, Y.

- (1950a) “On the Nature of τ -Mesons. I”, *Prog. Theo. Phys.* **5**: 283–304 [28-1-1950].
- (1950b) “On the Nature of τ -Mesons. II”, *Prog. Theo. Phys.* **5**: 352–72 [28-1-1950].

GALISON, P.

- (1983) “The discovery of the muon and the failed revolution against quantum electrodynamics”, *Centaurus* **26**: 262–316.
- (1997) *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*. Chicago: The University of Chicago Press.

GARDNER, M.

- (1993) *El Universo ambidiestro*. Barcelona: RBA Editores.

GARWIN, R. L.

- (1953) “A Search for V^0 Particles Produced by 450-Mev Protons”, *Phys. Rev.* **90**: 274–8 [28-11-1952].

GASIOROWICZ, S.

- (1966) *Elementary Particle Physics*. New York: Wiley.

GELL-MANN, M.

- (1953a) *On the Classification of Particles*. Unpublished preprint. Department of Physics and Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois: Agost de 1953, 4 pàgines.
- (1953b) “Isotopic Spin and New Unstable Particles”, *Phys. Rev.* **92**: 833–5 [21-8-1953].
- (1956a) “Minimal e.m. interaction in the τ - θ case; weak interactions”. A Congressos: Rochester (1956). P. VIII-23–7.

- (1956b) “The Interpretation of the New Particles as Displaced Charge Multiplets”. A Congressos: Pisa (1955). P. 848–866.
- (1957) “Model of the Strong Couplings”, *Phys. Rev.* **106**: 1296–1300 [4-3-1957].
- (1961) *The Eightfold Way: A Theory of Strong Interactions Symmetry*. Caltech Synchrotron Laboratory Report CTSL-20: Reimprès a: Gell-Mann i Ne’eman (1964), P. 11–57.
- (1962) *Strange Particle Physics. Strong Interactions*. Proceedings of the International Conference on High Energy Physics. Ginebra: CERN: 805.
- (1982) “Strangeness”. A París (1982). P. C8-395–408.
- (1983) “Particle Theory from S-Matrix to Quarks”. A Sant Feliu (1983). P. 473–97.
- GELL-MANN, M.; NE’EMAN, Y. (EDS.)
- (1964) *The Eightfold Way*. New York/Amsterdam: W. A. Benjamin.
- GELL-MANN, M.; PAIS, A.
- (1955a) “Behavior of Neutral Particles under Charge Conjugation”, *Phys. Rev.* **97**: 1387–9 [1-11-1954].
- (1955b) “Theoretical views on the new particles”. A Congressos: Glasgow (1954). P. 342–52.
- GELL-MANN, M.; ROSENBAUM, E. P.
- (1957) “Elementary Particles”, *Sci. Amer.* **197**: 72–88.
- GELL-MANN, M.; ROSENFELD, A. H.
- (1957) “Hyperons and Heavy Mesons (Systematics and Decay)”, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **7**: 407–78.
- GELL-MANN, M.; WATSON, K. M.
- (1954) “The Interactions between π -Mesons and Nucleons”, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **4**: 219–70.
- GOLDHABER, M.
- (1953) “A Hypothesis Concerning the Relations among the “New Unstable Particles””, *Phys. Rev.* **92**: 1279–81 [17-8-1953].
- (1956) “Compound Hypothesis for the Heavy Unstable Particles.II.”, *Phys. Rev.* **101**: 433–8 [19-8-1955].
- GOODING, D.; PINCH, T.; SCHAFFER, S. (EDS.)
- (1989) *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- GRÉGORY, B.; LAGARRIGUE, A.; LEPRINCE-RINGUET, L.; MULLER, F.; PEYROU, CH.

- (1954) “Étude des mésons K chargés, au moyen de deux chambres de Wilson superposées”, *Nuovo Cimento* **11**: 292–309 [30-1-1954].

HARDING, J. B.

- (1950) “Further Evidence for the Existence of τ -Mesons”, *Phil. Mag.* **41**: 405–9 [15-2-1950].

HAYAKAWA, S.

- (1950) “Note on Varitrons”, *Prog. Theo. Phys.* **5**: 145–6 [3-11-1949].
(1953) “Informal Meeting on V Particles. A. Discussions mainly on Experiments”. A Congressos: Kyoto&Tokyo (1953). P. 263–71.

HEITLER, W.

- (1949a) “Cosmic Ray Mesons and Meson Theory”. A Congressos: Bristol (1948). P. 119–33.
(1949b) “Theory of Meson Production”. A Congressos: Caltech (1948). P. 113–21.

HERMANN, A.; KRIGE, J.; MERSITS, U.; PESTRE, D. (EDS.)

- (1987) *History of CERN. Volume I*. Amsterdam: North-Holland.

HODSON, A. L.; BALLAM, J.; ARNOLD, W. H.; HARRIS, D. R.; RAU, R. R.; REYNOLDS, G. T.; TREIMAN, S. B.

- (1954) “Cloud-Chamber Evidence for a Charged Counterpart of the θ^0 Particle”, *Phys. Rev.* **96**: 1089–95 [11-8-1954].

HOPPER, V. D.; BISWAS, S.

- (1950) “Evidence Concerning the Existence of the New Unstable Elementary Neutral Particle”, *Phys. Rev.* **80**: 1099–1100 [30-10-1950].

HUGHES, I. S.

- (1991) *Elementary particles*. Cambridge: Cambridge University Press.

JACKSON, J. D.

- (1958) *The Physics of Elementary Particles*. Princeton: Princeton University Press.

JÁNOSSY, L.; ROCHESTER, G. D.; BROADBENT, D.

- (1945) “Extensive Penetrating Showers”, *Nature* **155**: 142–3 [12-12-1944].

KABIR, P. K.

- (1963) *The development of weak interaction theory*. Nova York: Gordon&Breach.

KAPLON, M. F.

- (1958) "Strange particle production". A Congressos: CERN (1958). P. 161.
- KAYAS, G. J.
- (1982) *Les Particules Elementaires de Thales à Gell-Mann*. Palaiseau: École Polytechnique.
- KEMMER, N.; POLKINGHORNE, J. C.; PURSEY, D. L.
- (1959) "Invariance in Elementary Particle Physics", *Rep. Progr. Phys.* **22**: 368–432.
- KERTH, L. T.; STORK, D. H.; BIRGE, R. W.; HADDOCK, R. P.; WHITEHEAD, M. N.
- (1955) "Production of Heavy Mesons at the Bevatron", *Phys. Rev.* **99**: 641.
- KEVLES, D.
- (1977) *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America*. New York: Knopf.
- KRAGH, H.
- (1999) *Quantum Generations. A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton: Princeton University Press.
- KRIGE, J.
- (2001) "Distrust and Discovery. The Case of the Heavy Bosons at CERN", *Isis* **92**: 517–40.
- KUHN, T. S.; HEILBRON, J. L.; FORMAN, P.; ALLEN, L.
- (1967) *Sources for History of Quantum Physics. An inventory and report*. Philadelphia: The American Philosophical Society.
- LABERRIGUE-FROLOW, J.
- (1990) *La Physique des Particules Élémentaires, de sa naissance à sa maturité, 1930-1960*. Paris: Masson.
- LANDE, K.; BOOTH, E. T.; IMPEDUGLIA, J.; LEDERMAN, L. M.; CHINOWSKY, W.
- (1956) "Observation of Long-Lived Neutral V Particles", *Phys. Rev.* **97**: 1901–4 [30-7-1956].
- LATTES, C. M. G.; MUIRHEAD, H.; OCCHIALINI, G. P. S.; POWELL, C. F.
- (1947) "Processes Involving Charged Mesons", *Nature* **159**: 694–7.
- LEE, T. D.; OREAR, J.
- (1955) "Speculations on Heavy Mesons", *Phys. Rev.* **100**: 932–3 [22-8-1955].
- LEE, T. D.; YANG, C. N.

- (1956a) “Mass Degeneracy of the Heavy Mesons”, *Phys. Rev.* **102**: 290–1 [29-12-1955].
- (1956b) “Question of Parity Conservation in Weak Interactions”, *Phys. Rev.* **104**: 254–8 [22-6-1956].

LEIGHTON, R. B.

- (1953) “Recent Measurements on charged V-particles and heavy mesons in Pasadena”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 97–101.

LEIGHTON, R. B.; WANLASS, S. D.; ANDERSON, C. D.

- (1953) “The Decay of V^0 Particles”, *Phys. Rev.* **89**: 148–67 [15-9-1952].

LEIPUNER, L. B.; ADAIR, R. K.

- (1958) “Production of Strange Particles by $\pi^- - p$ Interactions near Threshold”, *Phys. Rev.* **109**: 1358–63 [11-10-1957].

LEPRINCE-RINGUET, L.

- (1946) “Mass measurements of mesons by the method of elastic collision”. A Congressos: Cambridge. P. 43–6.
- (1949) “Photographic Evidence for the Existence of a Very Heavy Meson”. A Congressos: Caltech (1948). P. 42–3.
- (1953a) “Discours de clôture par L. Leprince-Ringuet”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 287-90.
- (1953b) “Mesons and Heavy Unstable Particles in Cosmic Rays”, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **3**: 39–66.
- (1956a) “Les mésons lourds chargés observés par les chambres de Wilson. Événements S et V”. A Congressos: Pisa (1955). P. 502–13.
- (1956b) “Allocution finale des travaux de la Section A”. A Congressos: Pisa (1955). P. 687–9.
- (1957) *Des Atomes et des Hommes*. Paris: Librairie Arthème Fayard.
- (1982) “Les Rayons Cosmiques et la Physique des Particules a l'École”. A Paris (1982). P. C8-165–8.

LEPRINCE-RINGUET, L.; HOANG TCHANG FONG; JAUNEAU, L.; MORELLET, D.

- (1948) “Observation probable d'un méson 1000 donnant naissance à une étoile cosmique”, *Comptes Rendus* **226**: 1897–9 [7-6-1948].

LEPRINCE-RINGUET, L.; LHÉRITIER, M.

- (1944) “Existence probable d'une particule de masse $990m_e$ dans le rayonnement cosmique”, *Comptes Rendus* **219**: 618–20 [17-6-1944].

- (1946) “Existence probable d’une particule de masse $(990 \pm 12 \text{ pour } 100) m_0$ dans le rayonnement cosmique”, *J. Phys. Rad.* **7**: 65–9 [18-1-1946].

LEPRINCE-RINGUET, L.; LHÉRITIER, M.; RICHARD-FOY, R.

- (1945) “Observation de particules remarquables autres que des protons dans la partie pénétrante du rayonnement cosmique”, *Comptes Rendus* **221**: 465–7 [22-10-1945].

LEPRINCE-RINGUET, L.; ROSSI, B.

- (1953) “A Summary of *K*-Meson Data”, *Phys. Rev.* **92**: 722–3 [3-8-1953].

MCCUSKER, C. B. A; MILLAR, D. D.

- (1951) “A Note on the *V* Particle”, *Nuovo Cimento* **8**: 289–91 [12-3-1951].

MAGLICH, B. (ED.)

- (1973) *Adventures in Experimental Physics. Volume γ* . Princeton, New Jersey: World Science Education.
(1976) *Adventures in Experimental Physics. Volume ϵ* . Princeton, New Jersey: World Science Education.

MARSHAK, R. E.

- (1952) *Meson Physics*. Nova York: McGraw-Hill.
(1956) “Identity of θ and τ on the assumption of complex structure”. A Congressos: Rochester (1956). P. 18–9.
(1983) “Particle physics in rapid transition: 1947–1952”. A Fermilab (1980). P. 376–401.
(1989) “Scientific impact of the first decade of the Rochester conferences (1950-1960)”. A Fermilab (1985). P. 645–67.

MARSHAK, R. E.; BETHE, H. A.

- (1947) “On the two-meson hypothesis”, *Phys. Rev.* **72**: 506–9 [29-7-1947].

MASSEY, H. S. W.

- (1956) “Mesones, hiperones y antiprotones”, *Endeavour* **7**: 117–27.

MATEOS GONZÁLEZ, GISELA T.

- (2001) *De herramienta teórica a invariancia física: El establecimiento del isospín como simetría interna de las partículas*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona. Tesi doctoral.

MENON, M. G. K.; O’CEALLAIGH, C.

- (1953) “Observations on the mass and energy of secondary particles produced in the decay of heavy mesons”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 118-24.
- (1954) “Observations on the Decay of Heavy Mesons in Photographic Emulsions”, *Proc. Roy. Soc.* **A221**: 292–318 [27-1-1954].
- MICHEL, L.
- (1953) “Absolute Selection Rules for Decay Processes”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 272–80.
- (1982) “Discussion”. A París (1982). P. C8-455.
- MIYAZAWA, H.
- (1951) “A Model for V-Particles”, *Prog. Theo. Phys.* **6**: 631–3 [15-7-1951].
- MUIRHEAD, H.
- (1965) *The Physics of Elementary Particles*. Oxford: Pergamon Press.
- MUKHERJI, V.
- (1974) “A History of the Meson Theory of Nuclear Forces from 1935 to 1952”, *Arch. Hist. Exact Sci.* **13**: 27-102.
- NAKANO, T.; NISHIJIMA, K.
- (1953) “Charge Independence for V-particles”, *Prog. Theo. Phys.* **10**: 581–2 [16-11-1953].
- NAMBU, Y.; NISHIJIMA, K.; YAMAGUCHI, Y.
- (1951a) “On the Nature of V-Particles, I”, *Prog. Theo. Phys.* **6**: 615–9 [19-6-1951].
- (1951b) “On the Nature of V-Particles, II”, *Prog. Theo. Phys.* **6**: 619–22 [31-7-1951].
- NAVARRO I VIVES, J.
- (1998) *Cap al naixement d’una nova disciplina. El descobriment de noves partícules elementals i la seva contextualització abans de la II Guerra Mundial (1932-1939)*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona. Tesi doctoral.
- NEDDERMEYER, S. H.; ANDERSON, C. D.
- (1937) “Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles”, *Phys. Rev.* **51**: 884–6 [30-3-1937].
- (1938) “Cosmic-Ray Particles of Intermediate Mass”, *Phys. Rev.* **54**: 88–9 [16-6-1938].
- NEWTN, J. A.
- (1953) “Frequency of Fast Neutral V Particles”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 57–60.

- (1954) "Comments on the Design and Operation of Magnet Cloud Chambers". A Congressos: Varenna (1953). P. 297–308.

NISHIJIMA, K.

- (1953) "Models of V-particles", *Prog. Theo. Phys.* **9**: 414–30 [24-3-1953].
- (1954) "Some Remarks on the Even-odd Rule", *Prog. Theo. Phys.* **12**: 107–8 [13-7-1954].
- (1955) "Charge Independence Theory of V Particles", *Prog. Theo. Phys.* **13**: 285–304 [11-2-1955].
- (1964) *Fundamental Particles*. New York: W. A. Benjamin, Inc.

O'CEALLAIGH, C.

- (1951) "Masses and Modes of Decay of Heavy Mesons. Part I. κ -Particles", *Phil. Mag.* **42**: 1032–9 [15-7-1951].
- (1953) "Determination of the Mass of Slow Heavy Mesons". A Congressos: Bagnères (1953). P. 124–8.
- (1982) "A contribution to the history of C.F. Powell's group in the University of Bristol (1949–65)". A Paris (1982). P. C8-185–9.

ÔNEDA, S.

- (1951) "Note on the Theory of V-Particles and τ -Mesons", *Prog. Theo. Phys.* **6**: 633–5 [16-7-1951].

OPPENHEIMER, J. R.

- (1948) "Dernière discussion". A Congressos: Solvay (1948). P. 363–76.
- (1949) "Concluding Remarks to Cosmic-Ray Symposium". A Congressos: Caltech (1948). P. 181–3.
- (1952a) "Introductory remarks". A Congressos: Rochester (1952a). P. 50–2.
- (1952b) "Introduction to theoretical discussion of the heavy particles". A Congressos: Rochester (1952a). P. 85–7.

OREAR, J.; HARRIS, G.; TAYLOR, S.

- (1956) "Spin and Parity Analysis of Bevatron τ Mesons", *Phys. Rev.* **102**: 1676–84 [5-3-1956].

OZAKI, S.

- (1950) "On the Decay of a Heavy Meson into Lighter Mesons", *Prog. Theo. Phys.* **5**: 373–9 [2-1-1950].

OZAKI, S.; ÔNEDA, S.; SASAKI, S.

- (1949) “On the Decay of Heavy Mesons. I.”, *Prog. Theo. Phys.* **4**: 524–31 [15-8-1949].

PAIS, A.

- (1952a) “An Ordering Principle for a Megalomorphian Zoology”. A Congressos: Rochester (1952a). P. 87-93.
- (1952b) “Some Remarks on the V -Particles”, *Phys. Rev.* **86**: 663–72 [22-1-1952].
- (1953a) “Isotopic Spin and Mass Quantization”, *Physica* **19**: 869–87.
- (1953b) “ ω -Space Theory”. A Congressos: Kyoto&Tokyo (1953). P. 156–63.
- (1953c) “On the Baryon-meson-photon System”, *Prog. Theo. Phys.* **10**: 457–69 [28-9-1953].
- (1955) “Source of stability of new particles”. A Congressos: Rochester (1955). P. 131–9.
- (1986) *Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford/New York: Oxford University Press.
- (1989) “From the 1940s into the 1950s”. A Fermilab (1985). P. 348–58.

PAIS, A.; JOST, R.

- (1952) “Selection Rules Imposed by Charge Conjugation and Charge Symmetry”, *Phys. Rev.* **87**: 871–5 [8-4-1952].

PAIS, A.; PICCIONI, O.

- (1955) “Note on the Decay and Absorption of the θ^0 ”, *Phys. Rev.* **100**: 1487–9 [5-7-1955].

PAIS, A.; UHLENBECK, G. E.

- (1950) “On Field Theories with Non-Localized Action”, *Phys. Rev.* **79**: 145–65 [14-2-1950].

PARÍS (1982)

- (1982) *Colloque International sur l’Histoire de la Physique des Particules*. Journal de Physique (supplément au n 12, Tome 43). Paris: les éditions de physique.

PAULI, W.

- (1946) *Meson Theory of Nuclear Forces*. New York: Interscience Publishers.
- (1993) *Wissenschaftlicher Briefwechsel*. Vol. 3. K. von Meyenn (ed.). Berlin: Springer.

PEASLEE, D. C.

- (1952) “ V^0 Particles and Isotopic Spin”, *Phys. Rev.* **86**: 127–8 [12-2-1952].
- (1953a) “A Speculation on V -Spin”, *Phys. Rev.* **91**: 446.

- (1953b) "A Speculation on V -Spin", *Prog. Theo. Phys.* **10**: 227–30 [10-6-1953].
- (1954) " Λ^0 Excited State", *Nuovo Cimento* **12**: 943–4 [26-10-1954].
- PERKINS, D. H.
- (1947) "Nuclear disintegration by meson capture", *Nature* **159**: 126–7 [8-1-1947].
- (1987) *Introduction to High Energy Physics*. Menlo Park, California: Addison-Wesley.
- (1988) "Concluding remarks". A Bristol (1987). P. 189–93.
- PETERS, B.
- (1953) "Récapitulation et discussion sur les mésons lourds chargés". A Bagnères (1953). P. 229.
- PEYROU, C.
- (1982) "The role of cosmic rays in the development of particle physics". A Paris (1982). P. C8-7–67.
- (1988) "Discussion". A Bristol (1987). P. 152–3.
- PICKERING, A.
- (1984) *Constructing Quarks. A Sociological History of Particle Physics*. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- PLANO, R.; SAMIOS, N.; SCHWARTZ, M.; STEINBERGER, J.
- (1957) "Demonstration of the Existence of the Σ^0 Hyperon and a Measurement of its Mass", *Nuovo Cimento* **5**: 216–9 [12-11-1956].
- PNIEWSKY, J.
- (1985) "Discovery of hypernuclei: The beginnings". A Sekido, Y.; Elliot, H. (eds.) (1985). P. 323-337.
- (1988) "Discussion". A Bristol (1987). P. 93–6.
- PONTECORVO, B.
- (1947) "Nuclear Capture of Mesons and the Meson Decay", *Phys. Rev.* **72**: 246–7 [21-6-1947].
- POWELL, C. F.
- (1948) "Observations on the Properties of Mesons of the Cosmic Radiation. Communication-Addenda". A Congressos: Solvay (1948). P. 111–9.
- (1949) "Concerning New Elementary Particles in Cosmic Rays", *Nature* **163**: 761–2.
- (1953a) "Photographic-post-discussion". A Congressos: Bagnères (1953). P. 233–5.

- (1953b) “Récapitulation et discussion sur les mésons lourds chargés”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 221–4.
- (1954) “V-Particles and Heavy Mesons”, *Proc. Roy. Soc.* **A221**: 278–91 [27-1-1954].
- (1956) “Recent Advances in our Knowledge of Heavy Mesons and Hyperons”. A Congressos: Pisa (1955). P. 337–50.
- POWELL, C. F.; FOWLER, P. H.; PERKINS, D. H.
- (1959) *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method*. London&New York&Paris&Los Angeles: Pergamon Press.
- POWER, S.
- (1949) “Decay of a Heavy τ -Meson into Three Lighter Mesons”, *Phys. Rev.* **86**: 865–6 [29-7-1949].
- RAYSKI, J.
- (1954) “On a Systematization of Heavy Mesons and Hyperons”, *Nuovo Cimento* **12**: 945–7 [3-11-1954].
- RESTALLACK, J. G.; BRODE, R. B.
- (1949) “The Mass of Cosmic-Ray Mesotrons”, *Phys. Rev.* **75**: 1716–21 [14-2-1949].
- REYNOLDS, G. T.
- (1953) “Chambres de Wilson: récapitulation et discussion”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 248.
- RIDGWAY, S. L.; COLLINS, G. B.
- (1955) “Evidence for Gamma Rays from Hyperons or Heavy Mesons Produced by Cosmotron Protons”, *Phys. Rev.* **98**: 247 [2-4-1955].
- ROCHESTER, G. D.
- (1948) “The Penetrating Particles in Cosmic-Ray Showers”. A Congressos: Caltech (1948). P. 20–6.
- (1952) “Heavy Unstable Particles”. A Congressos: Dublin (1951). P. 3–28.
- (1982) “Observations on the Discovery of the Strange Particles”. A Paris (1982). P. C8-169–75.
- (1985) “The Early History of the Strange Particles”. A Sekido, Y.; Elliot, H. (eds.) (1985). P. 299-321.
- (1988a) “The discovery of the V-particles”. A Bristol (1987). P. 121–31.
- (1988b) “Discussion”. A Bristol (1987). P. 152–3.
- (1989) “Cosmic-ray cloud-chamber contributions to the discovery of the strange particles in the decade 1947-1957”. A Fermilab (1985). P. 57–88.

ROCHESTER, G. D.; BUTLER, C. C.

- (1947) "Evidence for the existence of new unstable elementary particles", *Nature* **160**: 855–7.

ROCHESTER, G. D.; WILSON, J. G.

- (1952) *Cloud Chamber Photographs of the Cosmic Radiation*. London: Pergamon Press Ltd.

ROQUÉ, X.

- (1997) "The Manufacture of the Positron", *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* **28**: 73–129.

RÖSCH, J.

- (1982) "La venue au Pic-du-Midi du groupe Blackett et du groupe Leprince-Ringuet". A Paris (1982). P. C8-215–8.

ROSENFELD, A. H.; TREIMAN, S. B.

- (1953) "Search for V Particles Produced by 430-Mev Protons", *Phys. Rev.* **92**: 727–9 [23-7-1953].

ROSSI, B.

- (1952a) "Report on the work of Bridge and Annis". A Congressos: Rochester (1952a). P. 79–82.
- (1952b) "Evidence indicating identity between some S , V and χ particles". A Congressos: Rochester (1952b). P. 65–9.
- (1953) "Texte de la Conference du Prof. B. Rossi à la séance de cloture". A Congressos: Bagnères (1953). P. 259–69.
- (1955a) "S events". A Congressos: Rochester (1955). P. 87–9.
- (1955b) "Summary of cosmic ray sessions". A Congressos: Rochester (1955). P. 125–31.
- (1990) *Moments in the life of a scientist*. Cambridge: Cambridge University Press.

ROSSI, B.; BRIDGE, H.

- (1953) "Observations on the New Unstable Particles with a Multiplate Cloud Chamber. Results concerning Charged Particles". A Congressos: Bagnères (1953). P. 107–13.

ROSTAGNI, A.

- (1954) "Prefazione". A Congressos: Pàdua (1954). P. 167–9.

SACHS, R. G.

- (1955) "Classification of the Fundamental Particles", *Phys. Rev.* **99**: 1573–80 [2-5-1955].

SAKATA, S.

- (1956) “On a Composite Model for the New Particles”, *Prog. Theo. Phys.* **16**: 686–8 [3-9-1956].

SAKATA, S.; INOUE, T.

- (1946) “On the Correlations between Mesons and Yukawa Particles”, *Prog. Theo. Phys.* **1**: 143–50 [18-9-1946].

SALAM, A.; POLKINGHORNE, J. C.

- (1955) “On the Classification of Fundamental Particles”, *Nuovo Cimento* **2**: 685–90 [18-6-1955].

SANT FELIU (1983)

- (1987) *Symmetries in Physics (1600-1980): proceedings of the 1st International Meeting on the History of Scientific Ideas held at Sant Feliu de Guíxols, Catalonia, Spain: september 20-26, 1983*, M. G. Doncel, A. Hermann, L. Michel, A. Pais, editors. Bellaterra: Servei de Publicacions, UAB.

SARD, K.

- (1952) “Discussion”. A Congressos: Rochester (1952b). P. 40.

SCHEIN, M.; HASKIN, D.; GLASSER, R.; FAINBERG, F.; BROWN, K.

- (1953) “On the Artificial Production of V^0 Particles by 227 MeV Pi-Mesons generated in the Chicago Cyclotron”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 166–8.

SCHEIN, M.; JESSE, W. P.; WOLLAN, E. O.

- (1941) “The Nature of the Primary Cosmic Radiation and the Origin of the Mesotron”, *Phys. Rev.* **59**: 615 [13-3-1941].

SEGRÈ, E.

- (1966) “Physics in the last twenty years”, *Science* **151**: 1052–5.

SEKIDO, Y.; ELLIOT, H. (EDS.)

- (1985) *Early History of Cosmic Ray Studies. Personal Reminiscences with Old Photographs*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

SERBER, R.

- (1948) “Artificial Mesons. Discussion”. A Congressos: Solvay (1948). P. 89–109.

SERIFF, A. J.; LEIGHTON, R. B.; HSIAO, C.; COWAN, E. W.; ANDERSON, C. D.

- (1950) “Cloud-Chamber Observations of the New Unstable Cosmic-Ray Particles”, *Phys. Rev.* **78**: 290–1 [6-3-1950].

SHUTT, R. P.

- (1955) “ $\pi^- + P \rightarrow Y + K$ at 1.4 BeV”. A Congressos: Rochester (1955). P. 100–2.

SORRELS, J. D.; LEIGHTON, R. B.; ANDERSON, C. D.

- (1955) “Associated Production of Ξ^- with Two θ^0 Particles”, *Phys. Rev.* **100**: 1457–9 [11-7-1955].

STEINBERGER, J.

- (1949) “On the Use of Substraction Fields and the Lifetimes of Some Types of Meson Decay”, *Phys. Rev.* **76**: 1180–6 [13-6-1949].

- (1989) “A particular view of particle physics in the fifties”. A Fermilab (1985). P. 307-30.

STREET, J. C.; STEVENSON, E. C.

- (1937) “New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron”, *Phys. Rev.* **52**: 1003–4 [6-10-1937].

STUEWER, R. H. (ED.)

- (1979) *Nuclear Physics in Retrospect. Proceedings of a Symposium on the 1930s.* Minneapolis: University of Minnesota Press.

SUDARSHAN, E. C. G.; MARSHAK, R. E.

- (1957) *The nature of the four-fermion interaction. Proceedings of the Padua-Venice Conference on Mesons and Recently discovered Particles, 22-27 de settembre de 1957.* P. V-14-22: Reimprès a: Kabir (1963). P. 118-27.

THOMPSON, R. W.

- (1948) “Cloud-Chamber Study of Meson Disintegration”, *Phys. Rev.* **74**: 490–1 [21-6-1948].

- (1952a) “V particles”. A Congressos: Rochester (1952a). P. 73-9.

- (1952b) “ V_1^0 and V_2^0 measured in a new magnetic field cloud chamber”. A Congressos: Rochester (1952b). P. 40.

- (1953) “Chambres de Wilson: récapitulation et discussion”. A Congressos: Bagnères (1953). P. 240.

- (1954) “Disintegration of V-particles”. A Congressos: Rochester (1954). P. 75–9.

- (1956a) “Decay Processes of Heavy Unstable Neutral Particles”. A *Progress in Cosmic Ray Physics*. Vol. 3. Amsterdam: North-Holland Publishing Company. P. 253-337.

- (1956b) “The Properties of the Heavy Unstable Particles”. A Congressos: Pisa (1955). P. 642–86.

THOMPSON, R. W.; BURWELL, J. R.; HUGGETT, R. W.

- (1956) "The θ^0 -Meson". A Congressos: Pisa (1955). P. 286–318.
- THOMPSON, R. W.; BURWELL, J. R.; HUGGETT, R. W.; KARZMARK, C. J.
- (1954) "Evidence for Double Production of V^0 Particles", *Phys. Rev.* **95**: 1576–9 [7-6-1954].
- THOMPSON, R. W.; BUSKIRK, A. V.; COHN, H. O.; KARZMARK, C. F.
- (1953) "Remarks on the measurement of curvature, angles and ionization in the magnetic Wilson chamber". A Congressos: Bagnères (1953). P. 4–7.
- THOMPSON, R. W.; BUSKIRK, A. V.; COHN, H. O.; KARZMARK, C. F.; REDIKER, R. H.
- (1953) "The Disintegration Schemes of Neutral V Particles". A Congressos: Bagnères (1953). P. 30–5.
- THOMPSON, R. W.; COHN, H. O.; FLUM, R. S.
- (1951) "Cloud-Chamber Observations of the Neutral V-Particle Disintegration", *Phys. Rev.* **83**: 175 [10-5-1951].
- THORNDIKE, A. M.
- (1955) "Cosmotron production of heavy mesons". A Congressos: Glasgow (1954). P. 331–5.
- TOMONAGA, S.; ARAKI, G.
- (1940) "Effect of the Nuclear Coulomb Field on the Capture of Slow Mesons", *Phys. Rev.* **58**: 90–1 [24-5-1940].
- TREIMAN, S. B.; SACHS, R. G.
- (1956) "Alternate Modes of Decay of Neutral K Mesons", *Phys. Rev.* **103**: 1545–9 [18-5-1956].
- TRILLING, G. H.; LEIGHTON, R. B.
- (1955) "Cloud-Chamber Investigation of Charged V Particles", *Phys. Rev.* **100**: 1468–75 [11-7-1955].
- UTIYAMA, R.; TOBOCMAN, W.
- (1955) "Conservation of Parity and the New Particles", *Phys. Rev.* **98**: 780–2 [19-1-1955].
- VAN LINT, V. A. J.; ANDERSON, C. D.; COWAN, E. W.; LEIGHTON, R. B.; YORK, C. M.
- (1954) "Cloud-Chamber Observations of Some Unusual Neutral V Particles Having Light Secondaries", *Phys. Rev.* **94**: 1732–5 [15-3-1954].

VAN ROSSUM, L.

- (1955) “Détermination de la masse des mésons lourds et des hyperons par photométrie des traces dans les émulsions nucléaires”, *Annales de Physique (Paris)* **10**: 643–87.

VERNOV, DOBROTIN, ZATZEPIN

- (1951) “Varytrons”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP) (USSR)* **9**: 1045.

VITALE, B.

- (1960) *A Bibliography on Heavy Mesons and Hyperons*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.

WAGNER, N.; COOPER, D.

- (1949) “The τ -Meson”, *Phys. Rev.* **76**: 449–50 [13-6-1949].

WALKER, W. D.

- (1955) “ $\Lambda^0 - \theta^0$ Production in π^- -P Collisions at 1 Bev”, *Phys. Rev.* **98**: 1407–10 [14-2-1955].

WEINBERG, S.

- (1983) *The Discovery of Subatomic Particles*. New York: Scientific American Books.

WENTZEL, G.

- (1947) “Recent Research in Meson Theory”, *Rev. Mod. Phys.* **19**: 1–18.

WIGNER, E. P.

- (1949) “Invariance in Physical Theory”, *Proceedings of the American Philosophical Society* **93**: 521.
- (1952) “On the law of conservation of heavy particles”, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* **38**: 449.

WILSON, J. G.

- (1946) “Problems concerning the measurement of mass of mesons”. A Congressos: Cambridge. P. 73–6.
- (1951) *The Principles of Cloud-Chamber Technique*. Cambridge Monographs in Physics. Cambridge: Cambridge University Press.

WU, C. S.

- (1973) “Discovery of Parity Violation in Weak Interactions. Discovery Story I: One Researcher’s Personal Account”. A Maglich (1973). P. 101–23.

WU, C. S.; AMBLER, E.; HAYWARD, R. W.; HOPES, D. D.; HODSON, R. P.

- (1957) “Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay”, *Phys. Rev.* **105**: 1413–5 [15-1-1957].

YANG, C. N.

- (1953) “Report on Cosmotron Experiments”. A Congressos: Kyoto&Tokyo (1953). P. 137–40.
- (1956a) “Introductory survey”. A Congressos: Rochester (1956). P. VIII-1–15.
- (1956b) “Discussion”. A Congressos: Rochester (1956). P. VIII-27.
- (1957) “Present Knowledge About the New Particles”, *Rev. Mod. Phys.* **29**: 231–5.
- (1961) *Elementary Particles. A short history of some discoveries in atomic physics.* Princeton: Princeton University Press.
- (1982) “Discussion”. A París (1982). P. C8-407.

YUKAWA, H.

- (1935) “On the Interaction of Elementary Particles. I.”, *Proc. Phys. and Math. Soc. Japan* **17**: 48–57 [30-11-1934].
- (1949) “Models and Methods in the Meson Theory”, *Rev. Mod. Phys.* **21**: 474–9.