

TESIS DOCTORAL

LA OBSERVACIÓN EN LA PALABRA

LA FUNCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS IMAGINARIOS EN EL DESARROLLO
DE LA FÍSICA CUÁNTICA

1927-1936

ALUMNO

EDUARDO MARTÍN RUIZ SOSA

DIRECTOR DE TESIS

CARL HOEFER

DOCTORADO EN HISTORIA DE LA CIENCIA

CENTRO DE ESTUDIOS DE HISTORIA DE LA CIENCIA

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA

SEPTIEMBRE DE 2012

*La tesis de la unidad de la ciencia no es requerimiento epistemológico.
Ni siquiera programa intelectual.
Sino espasmo de angustia ante el misterio*
Nicolás Gómez Dávila
Escolios a un Texto Implícito

NOTA PRELIMINAR

La presente investigación surgió como un extenso y ambicioso proyecto en el que se pretendía realizar una *historia total* de los experimentos imaginarios. Desde las paradojas de Zenón hasta las variaciones de EPR realizadas por Bohm, pasando por Stevin, Galileo y Newton, el centro de la investigación se dividiría en dos grandes partes: Relatividad y Cuántica. No pasó demasiado tiempo hasta que me di cuenta que el tema era monumental y que era necesario acotarlo. Poco a poco, la idea se delimitó hacia un periodo más preciso y por el cual sentía un interés particular. Finalmente, el periodo se estableció entre los años de 1927, publicación del artículo de Heisenberg sobre el Principio de Incertidumbre, y 1936, año de la publicación de *Physics and Reality*, el artículo en el que Einstein expone sus ideas más maduras en torno al estado de la mecánica cuántica. La intención ha sido la de elaborar una historiografía crítica de los experimentos imaginarios y encontrar las raíces del concepto de *entrelazamiento* en dichas formulaciones.

La investigación documental fue larga y difícil. Cada vez aparecían nuevos experimentos imaginarios para agregar a la larga lista que, al final de la redacción de este libro, suma 57 experimentos en total. Se llevaron a cabo, también, traducciones al español de cada uno de los experimentos imaginarios, y se proporciona, al pie de página, la versión original en inglés o alemán, según sea el caso. A pesar de que el tema en cuestión se ha tratado también desde la filosofía de la ciencia, la intención primordial ha sido abordarlo desde la historia y recurrir a la discusión filosófica lo menos posible.

Aunque la intención inicial apuntaba hacia la elaboración de una crónica histórica, una suerte de narración que cuidara más la prosa y la sucesión de hechos, el resultado final es un trabajo monográfico en el

que esa voluntad cronística deja paso al análisis y la labor historiográfica. Debo decir que, al llevar a cabo esta tesis, el trabajo con las bases de datos de revistas como *Physical Review*, *Science*, *Die Naturwissenschaften*, *Nature*, entre muchas otras, así como la revisión de los Archivos para la Historia de la Física Cuántica (AHQP) y otras fuentes como la correspondencia entre algunos de los científicos participantes en las polémicas sobre la física cuántica, me hizo sentir en carne propia el verdadero trabajo del historiador: sumergirse en el pasado y hacerlo aprehensible hoy. Quizá el resultado final de la investigación no sea muy parecido a aquella ambiciosa intención inicial; quizá la prosa y la narración no cumplen por completo mis expectativas originales porque el trabajo así lo requería; incluso, quizá en unos años, el resultado me parezca endeble y su lectura, difícil. Sin embargo, el proceso, el trabajo de estos cuatro años, la investigación y la escritura se mantendrán como una experiencia fundamental en la que tanto los aciertos como los errores son piedra angular de mi formación como historiador.

Creo que, a veces, enfrentarse a la historia requiere del valor para buscar lo que en aquel lejano entonces no pudimos o no quisimos ver. Creo también que si nos es posible ver, gracias al conocimiento de la historia, que en el pasado cerramos los ojos ante el presente y dejamos que el mundo siguiera su curso, hoy, viendo las consecuencias, nos atreveremos a ponernos de pie y a defender el futuro. Si antes había un atisbo de duda, ahora lo sé: la historia será mi porvenir.

Eduardo Ruiz Sosa
Verano de 2012

AGRADECIMIENTOS

A mis dos abuelas, Gloria y Manuela, por enseñarme que la memoria es lo que nos dice quiénes somos. A mis padres, Makamen y Rodolfo, que me ofrecieron los libros y la paciencia, el trabajo y la honestidad, y que han sabido soportar la distancia de un hijo de la manera más noble: ayudándome en el viaje. A mis hermanas Carolina y Paulina, por todos los años en que mi ausencia no me dejó verlas crecer. A Emma Luna y Gabo, que no saben qué es la distancia ni que tan grandes son los océanos y que siguen creyendo, gracias a la inocencia, que estoy ahí, con ellos. A mis primos y primas, hermanos de los campos de fútbol y las reuniones familiares. A toda la familia, que me sigue esperando. A mi primo Enrique Ruiz, Kiki, que un día me dijo que un viaje así tiene que cambiarle la vida a uno. Al Fer, como siempre. A los amigos y amigas del taller de escritura: Blanca Lilia, Ruth, Zenaida, Agustina, Jaime, Carmen, Miguel, Raquel, Guadalupe, que desde hace más de diez años creen en mí. A Armando Armenta, el Feo, que compartió conmigo la fabricación de juguetes en Tijuana. A la ciudad de Tijuana, que me enseñó que mi destino era otro, y a la ciudad de Culiacán, que debe aprender que su destino es otro. A Francisco Alcaráz, el Negro, que durante un viaje a Monterrey me recordó que tenía que emprender el la marcha y que Ítaca siempre estará esperando a la vuelta. A mis amigos Francisco Meza, Oscar Paúl Castro, Ricardo González Sáiz y Jesús Ramón Ibarra, que han compartido la palabra, la voluntad, el fútbol y la esperanza. A Marco Sanz, que generosamente debatió conmigo algunas de estas ideas. A Martín Amaral, esté donde esté, que me reveló una forma nueva de ver y decir las cosas. A Élmer Mendoza, César López Cuadras y David Toscana, que me enseñaron a contar historias. A todos aquellos que, confiando en mí, me ayudaron a reunir el dinero necesario

para venir a Barcelona. A la Universidad Autónoma de Sinaloa, que me concedió la beca. A Blanca López Ceballos, por dar siempre la cara. A María Luisa Urrea, por ofrecer su ayuda incondicional. A Rosabel Salazar, Ross, por recibirme en la ciudad de Cerdanyola del Vallès, casi sin conocerme, y por ser mi guía en los primeros meses del viaje, por escucharme cuando era necesario y por leer lo que nunca dejaré de escribir, por la amistad y las largas charlas en el Castells. A Edson, el guatemalteco que me dio asilo en su casa cuando las cosas se pusieron difíciles y a quien nunca he vuelto a ver. A la familia del Café Gaucho: Lidia, Iván Ibáñez, Ceci, Javi, Mirta, Rita, Maxi, Germán, Olga, Vero, Oscar, Iván Hernández, sin ellos el hambre y la soledad habrían sido insostenibles. A todos los profesores del Máster de Historia de la Ciencia. A Xavier Roqué, que siempre ha sido un ejemplo atento y cordial. A Carl Hofer, que aceptó dirigir esta tesis y que soportó mis ausencias, mis prisas y mis largas desapariciones. A Enrique Martínez, por su ayuda con la lengua de Goethe, Gottfried Benn y Walter Benjamin. A todos los amigos que he conocido en el camino. A Pilar Moreno y Miguel Sastre Nadal, que generosamente me brindaron ayuda cuando la salud me hizo falta y que me han devuelto la sensación de tener aquí otra familia. A los nuevos amigos, a los compañeros de piso y a tantos otros que todavía me aguantan. A todos los que no he nombrado y están siempre en mi memoria. A María, que no solamente me ayudó a corregir estas páginas, sino que también me levantó cuando mis propios huesos no me sostenían, que me despierta cada mañana recordándome las promesas que una vez hice y que cada día he de cumplir, que sabe lo que me duele, lo que me obsesiona y cree en todo aquello que haremos juntos: para ti son todas las palabras.

Santa Anna, Cerdanyola del Vallès
Verano de 2012

SUMARIO

La presente investigación aborda la función de los experimentos imaginarios en la física cuántica entre los años de 1927 y 1936. Dos han sido los objetivos principales: (1) la realización de una detallada historiografía crítica de todos los experimentos imaginarios que pertenecen al periodo en cuestión y (2) la implicación directa de los experimentos imaginarios en la formulación del concepto de *entrelazamiento* (*entanglement*), acuñado en 1935 por el físico austriaco Erwin Schrödinger.

Mediante la revisión de los documentos originales en que los experimentos imaginarios fueron apareciendo, se establecen las conexiones existentes entre ellos y su repercusión en el devenir de la física. Al final, además de los resultados ya mencionados, se ofrece una descripción de los experimentos imaginarios como herramienta científica, sus características y sus peculiaridades con respecto al contexto histórico en que se sitúa esta investigación.

Se estudian aquí las conexiones entre científicos, las comunicaciones que hicieron que dichos experimentos imaginarios recorrieran buena parte de la comunidad científica del momento, y las particularidades de su aparición pública y privada. Se analiza con detalle cada uno de los experimentos imaginarios para encontrar las conexiones teóricas que los unen y seguir el rastro del concepto de *entrelazamiento*. Se abordan cuestiones como la estandarización en los experimentos imaginarios, la comunicación en los círculos científicos, la inmediatez en las respuestas, la corrección en los argumentos, la configuración experimental y el papel del lenguaje en la ciencia.

El Capítulo I *Introducción. Experimentos imaginarios en la física cuántica: un principio para la discusión*, aborda el estado de la discusión en

torno a los experimentos imaginarios, así como su definición, la etimología del término *Gedankenexperiment* y las características principales. Se establece el marco teórico de la discusión así como la justificación del periodo y de los experimentos imaginarios que se estudian. En el Capítulo II *1924-1930. Los experimentos imaginarios para un público privado: del microscopio de Heisenberg al fotón y la caja de Einstein*, se trata el Efecto Compton como un elemento fundamental en la formulación de los experimentos imaginarios y como principal causa de las discusiones iniciales. Los primeros experimentos imaginarios que se abordan pertenecen al texto de 1927, en el que Heisenberg consigna el experimento del microscopio de rayos gamma. Las conferencias de Solvay de 1927 y 1930 son también objeto de estudio, así como el papel de Paul Ehrenfest en las discusiones entre Bohr y Einstein. En el Capítulo III. *1931-1935. Discusión abierta: el caso del experimento imaginario de Einstein, Podolsky & Rosen*, se tratan los experimentos imaginarios publicados antes del artículo de EPR así como el propio artículo de los tres autores. El Capítulo IV. *Epílogo de una polémica: reacciones posteriores a EPR. El caso del gato de Schrödinger*, aborda todas las respuestas a EPR, la correspondencia de Einstein posterior a la publicación del artículo y las dos comunicaciones de Schrödinger en 1935, en una de las cuales se expone el experimento imaginario del gato y se habla del concepto de *entrelazamiento*. En el Capítulo V. *Conclusiones. Reflexiones finales en torno al papel de los experimentos imaginarios en la física cuántica* se ofrecen las consideraciones finales de la investigación, así como la propuesta de una posible investigación posterior.

Al final se agrega un Anexo en el cual se ofrece una tabla con todos los experimentos imaginarios revisados en el trabajo, su autor, y la referencia de su aparición pública.

SUMMARY

This dissertation deals with the function of thought experiments in quantum physics between 1927 and 1936. Two have been the main objectives: (1) the making of a detailed critical historiography of all thought experiments in this particular period, and (2) the direct implication of thought experiments in the development of the concept of *entanglement*, coined by Erwin Schrödinger in 1935.

By the study of original documents in which thought experiments were published, connections are made between them and their repercussion in the development of physics. At the end, besides the already mentioned results, a description of thought experiments as a scientific tool, its characteristics and its peculiarities among the specified historical context is offered.

Also, a study is made about connections between scientists, as well as the public and private communications by which these thought experiments traveled around the scientific community. Every detail of each thought experiment is analyzed in order to find the theoretical connection between them and to follow the trace of the concept of *entanglement*. Issues like thought experiments' standardization, communication among scientific circles, immediacy of the replica, re-elaboration of arguments, experimental configuration and the role of language in science are taken into account.

In Chapter I *Introduction: Thought Experiments in Quantum Physics: a beginning for the discussion*, the state of affairs of the discussion on thought experiments is the central issue, as well as its definition, the etymology

of the German term *Gedankenexperiment* and the main characteristics of the topic. A theoretical frame of the discussion is established, as well as the justification of the chosen historical period and the thought experiments that are about to be studied. In Chapter II *1924-1930: Thought experiments for a private public: from Heisenberg's microscope to Einstein's photon in a box*, the Compton Effect is treated as a fundamental element in the formulation of thought experiments, and as a main cause of the initial controversies. The firsts thought experiments were published in the 1927 document by Heisenberg, where the gamma rays microscope is described. The 1927 and 1930 Solvay Conferences are also under consideration here, as well as the role of Paul Ehrenfest in the discussions between Bohr and Einstein. In Chapter III *1931-1935: Open discussion: the Einstein, Podolsky & Rosen's thought experiment*, all thought experiments published before EPR as well as EPR itself are under examination. Chapter IV *Epilogue for a controversy: later reactions to EPR. The case of Schrödinger's cat*, deals with all the answers to the EPR thought experiment, as well as Einstein's correspondence after the publication of the article. Schrödinger's 1935 two papers, one of them containing the cat's thought experiment and the thesis of entanglement, are also under consideration here. In Chapter V *Conclusions: Final remarks on the role of thought experiments in quantum physics*, the results of the dissertation are shown as a way of closure. Also, some possible ways for future investigations are pointed out.

At the end of the document an Appendix is posted, in which all thought experiments that were studied in the precedent chapters are listed along with their authors, year and references of their public appearance.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN. EXPERIMENTOS IMAGINARIOS EN LA FÍSICA CUÁNTICA: UN PRINCIPIO PARA LA DISCUSIÓN

*Un experimento es una pregunta
que planteamos a la naturaleza*

Alexandre Koyré

Estudios de Historia del Pensamiento Científico

¿Qué es un experimento imaginario? ¿Dónde comienza la discusión? *Gedankenexperiment*: la etimología para explicar la naturaleza de la herramienta. Una discusión filosófica sobre un problema físico. El contexto histórico y el espacio de la nueva física.

Esto debe comenzar con una pregunta: ¿Por qué, en el momento en el que la física se encuentra en plena transformación con vistas a ser por excelencia la disciplina de la precisión; cuando sus actividades se llevan a cabo en costosos laboratorios, y ambiciosos proyectos son financiados por gobiernos y grandes empresas privadas; cuando la instrumentación se convierte en parte fundamental del quehacer de los científicos y los principios de estandarización comienzan a esparcirse por todo el orbe, por qué, entonces, en pleno contexto del desarrollo de la mecánica cuántica, prolifera el uso de esa herramienta llamada *experimentos imaginarios*?

Antes de contestar la extensa pregunta será necesario ofrecer una definición sobre lo que *es* un *experimento imaginario*, para lo que resulta imperativo llevar a cabo, primero que nada, un recorrido a través de las nociones en torno al tema y, luego, una revisión de las traducciones y etimologías que hacen referencia al término.

Algunos historiadores y filósofos de la ciencia (Brown, 1986, 1991; Irvine, 1991; Atkinson, 2003; Rescher, 1991; Laymon, 1991; Szabó Gendler, T., 1998, entre muchos otros) ubican ya en la tradición pre-socrática el uso de los experimentos imaginarios y trazan un largo continuum desde Zenón de Elea hasta David Bohm, pasando por Stevin, Galileo, Newton, Einstein, Schrödinger y un largo etcétera. Así, la definición que puede extraerse es simple: un experimento imaginario es todo experimento que no se lleva a cabo en la realidad, sino que se explica como una suerte de ejemplo con bases empíricas previas. Luego existe una amplia cantidad de matices alrededor de una definición tan escueta como ésta. Sin embargo, también en buena parte de dicha bibliografía se afirma que el término *Gedankenexperiment* fue utilizado por primera vez por H. C. Ørsted, en 1811 (Witt-Hansen, 1976). Es aquí donde se entra en el terreno de las denominaciones y la etimología.

Algunas de las definiciones que actualmente se citan en la bibliografía en torno a los experimentos imaginarios utilizan términos como *paradoja*, *aporías*, *contra-factual*, *contra-intuitivo*, *hipotético*, *reductio ad absurdum*, *a priori*, etc. John Norton (1991) define los experimentos imaginarios (*thought experiments*, en inglés) de la siguiente manera: «Los experimentos imaginarios son argumentos que: (i) proponen estados de cosas hipotéticos o contra-factuales, y (ii) refieren elementos particulares irrelevantes para la conclusión general» (Norton, 1991, p. 129). En algunos de los artículos mencionados antes, y en tantos otros, se encontrarán definiciones similares, no en cuanto al sentido general de la definición (otros autores no están de acuerdo con la noción empirista de

Norton, por ejemplo: Brown, 1986, 1991), sino en cuanto a las palabras que se eligen para construir dicha definición.

En cambio, si se echa una mirada al pasado, en su libro de 1908, Mach (aquí se utiliza la versión inglesa de 1976) establece un continuum entre los *experimentos imaginarios* y los *experimentos reales*, explicando que, en muchos casos, aunque no siempre sea una condición necesaria, los experimentos reales tienen como precedente un experimento imaginario, lo que no significa, a su vez, que a un experimento imaginario le siga luego uno real (Mach, 1976, p. 136). Mach se remonta, igual que los autores mencionados arriba, a Aristóteles, Galileo, Stevin, Kepler, entre otros. Resulta evidente que la saga de referencias en torno a los experimentos imaginarios como materia de estudio comienza con aquel breve texto de Mach que, publicado antes del periodo que interesa a esta investigación, ya sentaba las bases para una especie de tradición. Incluso, aunque en Mach se hace brevemente, la bibliografía actual repasa los mismos experimentos imaginarios que él, añadiendo algunos pocos anteriores al documento de Mach y, luego, incorporando el tropel de experimentos imaginarios posteriores. Más tarde, Kuhn (1977) también dedicó algunas páginas a los experimentos imaginarios, como también lo hicieron Lichtenberg (1990) en el siglo XVIII, «debemos experimentar con ideas», y Karl Popper (1962, 1982) y Alexandre Koyré (1977), ya bien entrado el siglo XX: «Los experimentos imaginarios desempeñan el papel de intermediarios entre lo matemático y lo real [...] entre el pensamiento puro y la experiencia sensible» (Koyré, 1977 p. 208, 250). La discusión filosófica en torno a los experimentos imaginarios versa, principalmente, sobre (1) la capacidad para proporcionar un conocimiento *nuevo* de la naturaleza; (2) la clasificación de los experimentos imaginarios; (3) la noción empirista y la noción platónica; y (4) la validez de sus resultados (Norton, 1991, Brown, 1986, 1991, entre otros). La definición de los experimentos imaginarios queda,

así, en una suerte de segundo plano. Es interesante apuntar que en la entrada correspondiente a *Thought experiments*, en la *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, la definición es bastante breve y general: «Los experimentos imaginarios son dispositivos de la imaginación usados para investigar la naturaleza de las cosas» (Brown & Fehige, 2011). Ahora bien, más interesante es decir que el autor de la entrada es James Robert Brown, defensor de la noción platónica opuesta a las ideas empiristas de John Norton. No obstante, hay un tercer elemento más interesante aún: la base de datos digital de la *Enciclopedia de Stanford* contiene la primera entrada del concepto *Thought experiments*, que data de 1996, y las subsiguientes enmiendas a lo largo de los años. La renovación más reciente es la del año 2011, citada arriba.

Así, en la primera edición, la definición es la siguiente: «Los experimentos imaginarios son dispositivos de la imaginación utilizados para investigar la naturaleza» (Brown, 1996), definición que se repite en el año 2002 y que cambia, para agregar «la naturaleza de las cosas» en 2006. Así permanecerá hasta la última modificación, en 2011. Resulta interesante notar cómo, en la primera publicación, la bibliografía es escasa y los nombres propios de investigadores se reducen a Brown y Norton y, en cada una de las enmiendas posteriores, sin embargo, aumenta el tamaño del documento y la cantidad de referencias y se lleva a cabo una modificación de ciertas ideas anteriores y una incorporación de conceptos nuevos. Una de estas nuevas ideas aparece por primera vez en la versión de 2010 y está relacionada con la definición de un *Thought experiment*: «Han existido diversos intentos por definir un “experimento imaginario”, pero probablemente será mejor dejar el término vagamente caracterizado, para así no perjudicar la investigación. Muchos de los conceptos más importantes con los que tratamos son como éste, por ejemplo, la religión o la democracia» (Brown & Fehige, 2010). Se está optando, por tanto, por una definición imprecisa.

Al revisar la bibliografía crítica es posible encontrar otras definiciones. Por ejemplo, Sören Häggqvist (2009, p. 57) afirma que se trata de «casos hipotéticos que intentan funcionar como experimentos, en el siguiente sentido: aspiran a *probar* hipótesis o teorías». Szabó Gendler (2004, p. 1154) nota que llevar a cabo un experimento imaginario tiene que ver con «razonar sobre un escenario imaginario con el objetivo de confirmar o refutar alguna hipótesis o teoría»; y Kuhn (1977), refiere que la función de los experimentos imaginarios es la de someter a prueba el sistema de ideas del científico, es decir, poner a prueba la solidez del paradigma. Sin embargo, además de la aparición constante de algunos conceptos (como los enumerados arriba), lo que todas las definiciones poseen en común es un completo desinterés por el origen y la etimología del término *Gedankenexperiment*.

Aunque la definición de la palabra y el concepto se atribuya a Ørsted (Witt-Hansen, 1976), que la utilizaría en el *Prolegomenon to the general theory of nature* (1811), o incluso, como también se mencionó antes (Brown, 2011), a Lichtenberg en su *Common place book* (1793), poco se ha dedicado al estudio del término en sí. Aquí, pues, se le otorgará una relevancia mayor. Ulrich Kühne (2005) dedicó un libro entero al método de los experimentos imaginarios, según el cual, la implicación de Ørsted en la *definición* de la herramienta y en la acuñación del término germano-latino tendría sus influencias en la filosofía de Kant. Kühne propone, en un artículo publicado en 2009, que es a partir de la aparición del método científico cuando se inicia el método experimental imaginario, y que no puede considerarse al razonamiento presocrático como equivalente a la experimentación imaginaria porque, añade Kühne, el método experimental no existió sino hasta que Stevin, Bacon, Galileo y Gilbert le dieron forma (Kühne, 2009, p. 2). Si mediante una definición basada en su ubicación temporal, y a pesar de la abundante bibliografía dedicada a su estudio, el término permanece todavía como una idea

incompleta, quizá valga la pena aproximarse al concepto desde un análisis etimológico. ¿Cuál es, pues, el origen del término *Gedankenexperiment*?

Compuesto mediante la fusión de un término germano y uno latino, la traducción literal generalmente utilizada es «thought experiment», en inglés. Esta traducción ha sido ampliamente utilizada debido a que la mayor parte de la bibliografía crítica está escrita, precisamente, en inglés. Si se intenta realizar una traducción literal al español, desde el término en alemán, tal vez la forma más acertada sea «experimento llevado a cabo en el pensamiento», aunque la denominación más comúnmente utilizada es «experimento mental», designación que, quizá, se aleje un poco del sentido original del término. No obstante, la palabra germana *Gedanken* significa mucho más que sólo *pensamiento*.

La segunda parte del término, de base etimológica latina, *experiment*, resulta poco problemática. En cambio, el término *Gedanken*, presenta más variaciones. Puede tratarse de un sustantivo (‘pensamiento, recuerdo, imaginación’), o bien de su adjetivo equivalente (‘pensado, recordado, imaginado’). Se trata, esta segunda opción, de un adjetivo deverbal de participio. Es decir, proviene de la conjunción de un verbo formado por el prefijo de participio *Ge-* añadido al verbo *Denken*, que significa ‘pensar, recordar, conmemorar, imaginar’. Pero no ‘recordar’ en cuanto a su acepción latina (*recordare*, volver a pasar por el corazón, teniendo en consideración que en la cultura clásica el corazón era el lugar de asiento de la mente y, por tanto, de la memoria), sino en términos de ‘mantener en la mente’, tal y como se mantiene el recuerdo de una persona que ha muerto, o de un conocimiento aprendido. No es, pues, una cuestión transitiva sino un estado que implica estabilidad y constancia. En cambio, en cuanto a la acepción ‘imaginar’, sí habría que apegarse a su etimología latina y alejarse del valor coloquial que dota a la

imaginación de una cualidad puramente inventiva, llena de construcciones alejadas de la *realidad*; así, *imaginar*, del latín *imagināri*, que a su vez provendría de *imitāri*, sería realizar un retrato de un objeto real, es decir, imitar la realidad describiéndola o reproduciéndola mediante algún artificio.

De esta manera, *Gedanken* se trataría de la forma adjetival de participio del verbo *Denken*, por lo que el término compuesto *Gedankenexperiment* podría traducirse de las siguientes maneras: (1) experimento recordado; (2) experimento conmemorado; (3) experimento pensado y (4) experimento imaginado. ¿Existen diferencias entre cada una de estas traducciones? A simple vista, las primeras dos formas evocan a la memoria y las dos segundas a la invención. Para elegir una de ellas es necesario volver al término original. *Gedanken* sería, pues, el recuerdo de algo que existió, pero que ya no está aquí; o bien, el recuerdo de algo que existe pero que *ahora* no se encuentra aquí. No se trata de un simple recuerdo o de un pensamiento común y corriente. En su sentido etimológico, un *Gedankenexperiment* se trataría de un ‘experimento recordado o imaginado’, tomando un elemento que involucra a la memoria y otro que involucra a la invención, según las cuatro acepciones numeradas antes. Sin embargo, haciendo un uso del término que no tenga que pasar por la traducción casi literal, podría decirse que un *Gedankenexperiment* consiste en «recordar o imaginar un experimento que ya ocurrió». Esto se explicará después en más detalle.

No consistiría, el *Gedankenexperiment*, en la mera reconstrucción de un experimento *real*, o en el reporte y la descripción de un experimento llevado a cabo con anterioridad; se trata, en cambio, de la formulación de un experimento cuyos elementos son resultado de la combinación de (1) elementos conocidos y aceptados, en principio, dentro del marco teórico de una disciplina científica, y (2) una configuración o diseño que los haga interactuar con el fin de obtener un

resultado final. Así, el término *Gedanken* haría referencia a esos elementos conocidos y el término *experiment*, al diseño experimental que se plantea con esos elementos. Por ejemplo, en el caso del experimento imaginario del microscopio de Heisenberg (1927), los *elementos conocidos* serían el Efecto Compton, por una parte, y el funcionamiento del mecanismo de un microscopio, por otra, que se conjugarían en un diseño experimental en el cual un electrón, que sería observado, se iluminaría mediante un haz de rayos gamma con el fin de demostrar o explicar (la función de los experimentos imaginarios se tratará más adelante) que, según el Principio de Incertidumbre, no sería posible realizar dos mediciones simultáneas sobre dos magnitudes de una partícula elemental, ya que la medición de una de las magnitudes estropearía la medición de la otra (Heisenberg, 1927).

Imaginar, como se apuntaba antes, consistiría en retratar un objeto real, algo que ya existe. Así, sería posible introducir un elemento de interés en esta definición: el concepto de *eidōs* (gr. εἶδος). El *eidōs* tiene que ver con la proyección de imágenes o vivencias que se han visto o imaginado con anterioridad. Es decir, es el *aspecto* de lo recordado, lo que es aprehensible de aquello que se piensa o se evoca, *lo visible de la idea*. De esta manera, el *eidōs* encierra el actuar completo del *Gedankenexperiment*: enunciar lo imaginado, enunciar el experimento imaginado. Entonces, tal vez, una denominación más precisa sería la de *Experimento eidético*, designación que haría referencia a esa proyección de elementos ya conocidos mediante una configuración que los relacionaría para generar *algo* diferente. No obstante, aquí se utilizará la expresión *experimento imaginario*, pues englobaría tanto el concepto de *eidōs* como el de *Gedankenexperiment*, es decir, evocaría la idea de la proyección de la imagen de un objeto real y apelaría con mayor claridad a la importancia de la memoria: los elementos visuales que formarían parte de la configuración experimental *por imaginar* son *aspectos* que, habiendo sido

adquiridos ya en el pasado, se traerían al presente mediante el ejercicio de la memoria.

Por otro lado, el término comúnmente usado en la bibliografía en español con respecto a este tema es el de *Experimentos mentales*, aludiendo al hecho de que la formulación experimental tiene lugar en la mente del científico. Esta idea da título, incluso, al libro de James Robert Brown, *The laboratory of the mind* (1991), donde se explica que los experimentos imaginarios ocurren, precisamente, en el *laboratorio de la mente*. Nada más lejos de la realidad. La diferencia entre decir *mental* o decir *imaginario*, como se puede notar, es sustancial: en una denominación se alude al *lugar* donde estas formulaciones se suceden (como si un experimento fuera tal por realizarse en un laboratorio, o un aula definiera lo que es una clase); en la otra se apela a la manera en que los propios *Gedankenexperiment* funcionan y se construyen, apela más a su *composición interna*. El experimento imaginario no *sucede* en la mente, sino todo lo contrario. Se trata de un ejercicio comunicativo que, para cumplir con su finalidad, debe valerse de una narración que lo exteriorice, que lo haga *público*.

A partir de aquí se extraen dos elementos fundamentales: (1) la condición de existencia previa de aquello que se recuerda y (2) la narración con que se transmite dicha imagen. Todo experimento imaginario es una narración. Todo recuerdo, todo proceso de imaginación, de hacer-una-imagen, requiere, para ser logrado, de una narrativa, de la conformación de una imagen, o escenario, mediante el discurso y el lenguaje. En ello hay una retórica y una intención persuasiva. Y esa narración es lo que le proporciona el *cuerpo* al experimento imaginario: «Los medios que permiten realizar los experimentos no son otra cosa que teoría encarnada», dice Koyré (1977, p. 300). De esta manera, los experimentos, en general, serían «poderosos

recursos de persuasión y convicción», instrumentos que corporizarían [embody] las teorías y las ideas (Gooding & Pinch, 1989, p. 4- 5).

Con el fin de cumplir este papel, el trabajo del experimentador debe transcribirse y diseminarse: las transcripciones se utilizan como argumentos que buscan una lectura específica (Gooding & Pinch, 1989, p. 5). Se llega, entonces, a una de las aristas más afiladas en torno al caso de los experimentos imaginarios: la estandarización. Los elementos previos, es decir, aquello que caería dentro del espectro del *Gedanken*, lo recordado, sería la piedra angular de la estandarización en los experimentos imaginarios. Un experimento, para que funcione como demostración, ya sea en contra o a favor de una teoría, debería estar construido mediante una serie de elementos que puedan ser reproducidos por aquellos interesados en la réplica. Esos elementos son los estándares: medidas, unidades, instrumentos, materiales, etcétera; o bien técnicas, métodos, modos de hacer y de observar, es decir, marcos teóricos. Para los experimentos imaginarios no se habla de estándares de magnitudes, sino de *principios*. Es decir, como se mencionó antes en el ejemplo del experimento del microscopio de Heisenberg, se tiene, por un lado, el Efecto Compton y por otro el principio de resolución de los microscopios. Se trata de dos principios científicos aceptados que se conjugan en un diseño experimental junto a otro elemento también aceptado, a saber, que la longitud de onda de los rayos gamma es muy pequeña, y, de acuerdo con el principio de resolución de los microscopios, un haz de luz con una longitud de onda muy pequeña ofrece el mayor grado de precisión posible para la observación. Uniendo esos tres elementos se obtendría, pues, una configuración experimental. Cada uno de estos elementos es perfectamente válido, sin embargo, es al unirse mediante una disposición determinada cuando el experimento imaginario cobra vida y da luz a su efecto. Sin esos elementos el experimento imaginario no sería reproducible. Los experimentos ganan

autoridad si utilizan instrumentos cuyo estatus es difícil de cuestionar y cuyo nivel de confianza es aceptado (Gooding & Pincher, 1989, p. 4).

De esta manera, elementos como el Efecto Compton, el Efecto Doppler, las leyes de la termodinámica o el electromagnetismo, la Teoría de la Relatividad, etcétera, funcionan como los estándares que permiten un diseño experimental robusto, anclado en principios comunes a la comunidad científica, y que persiguen, y permiten, un determinado resultado, así como la posibilidad de repetición del experimento imaginario con la finalidad de la réplica. Son estos elementos *estandarizados* de los experimentos imaginarios los que permiten la emergencia de las dos características más importantes de la herramienta experimental imaginaria: la inmediatez y la replicabilidad.

La naturaleza del experimento imaginario permite que el proceso comunicativo del cual forma parte sea más ágil y veloz que si se tratara de un experimento real que dependiera de una determinada instrumentación, del uso de instalaciones específicas, materiales, y habilidades especiales que pueden estar lejos del alcance de muchos. Es decir, atendiendo a que la retroalimentación es parte sustancial de un proceso comunicativo, y que esa retroalimentación depende de la aprehensión del mensaje y de la capacidad de reacción del receptor para emitir una respuesta, el experimento imaginario permite una asimilación más inmediata que puede reproducirse tantas veces como sea necesario sin la necesidad de condiciones técnicas; así, la réplica puede transmitirse de vuelta con mayor inmediatez desde el receptor o receptores al emisor.

De esta manera, el experimento imaginario sería como la bobina de Faraday. Es decir, cuando Faraday descubrió la rotación electromagnética, explica Hackmann (1989), resolvió el problema de la replicabilidad fabricando versiones de bolsillo de aquel aparato. Dichas *copias* del instrumento fueron enviadas a sus colegas científicos con el fin

de que pudieran replicar su descubrimiento, verificar la veracidad de la explicación del fenómeno, o bien, dicho de forma más clara, que *no* pudieran replicar su descubrimiento: el instrumento, en sí mismo, al ofrecer la posibilidad de réplica, buscaba cerrar el discurso mediante un diseño que intentaba ser infalible. Los experimentos imaginarios funcionan de esa misma forma: *copias* de un experimento *original* que se envían a todos aquellos colegas que puedan estar interesados. Sin embargo, el experimento imaginario no es un artefacto sino, únicamente, una narración: el aparato de Faraday iba acompañado de una explicación, una breve historia de su fabricación, una serie de instrucciones de uso, un modo de interpretar el fenómeno físico; el experimento imaginario, en cambio, encarna en sí mismo, o busca hacerlo así, todas esas facetas mediante la herramienta narrativa.

Quizá sea ahí donde se pueda encontrar una de las diferencias más notables entre los experimentos imaginarios y los experimentos reales: aunque la diferencia más evidente se encuentre en los adjetivos *real* e *imaginario*, la forma de narrar el planteamiento es un elemento distintivo sumamente importante. Es decir, como explica Cantor (1989), los reportes de experimentos reales se encuentran narrados desde la perspectiva del investigador, desde su punto de vista, y se convierten, gracias a esa perspectiva y a esa narrativa, en *hechos reales*, por así decirlo: explican *lo que se hizo*, ofrecen los acontecimientos, la secuencia de hechos del experimento, y, por ello, la mayor parte de los reportes experimentales *reales* se encuentran escritos como una retrospectiva (Cantor, 1989, p. 160), es decir, una mirada hacia atrás, a *lo que ya fue*, valiéndose de los modos verbales indicativo y condicional, por lo general, en tiempo pasado. Los experimentos imaginarios, en cambio, suelen escribirse en forma de narración prospectiva, es decir, mirando hacia el futuro, a *lo que será* una vez que se lleve a cabo el ejercicio experimental imaginario, y se vale del tiempo presente y de la modalidad

condicional e indicativa, al igual que en el caso de los experimentos reales, para lograr sus objetivos. La ciencia también es escritura (Locke, 1997), es persuasión y retórica, etimológicamente hablando, y dado que los experimentos imaginarios ocurren ahí, en la narración, es que la escritura y las características de la escritura deben tenerse en cuenta a la hora de estudiarlos: sin esa perspectiva, sin la noción de que una de las partes fundamentales del experimento imaginario es la propia narración, su estudio y análisis será incompleto.

Antes de dar respuesta a la extensa pregunta inicial, hay que delimitar cronológicamente la materia de este trabajo. Los experimentos imaginarios que aquí se estudiarán, objetos de un amplio debate histórico y filosófico, sucedieron entre los años de 1927 y 1936, casi una década en la que la física vivió notables cambios. Algunos de esos importantísimos cambios fueron la profesionalización de la física, su inclusión en los grandes cambios industriales y en la carrera armamentística, el desarrollo de los estándares internacionales, su giro hacia la precisión, el auge de los laboratorios tanto en las universidades como en la industria, la financiación gubernamental y privada, entre tantos otros. Los análisis historiográficos pasan por revisar, generalmente, el desarrollo de la física en la República de Weimar (Kragh, 2007), en el periodo de entreguerras, durante la Segunda Guerra Mundial, las implicaciones políticas, las migraciones científicas, etcétera. ¿Por qué, entonces, ante una física tan arraigada social, política, industrial y económicamente, la herramienta de los experimentos imaginarios cobró una importancia tan notable? Puede especularse que los costes económicos habrían obligado a algunos físicos a utilizar los experimentos imaginarios en lugar de los reales; o que habría consideraciones éticas que impidiesen la realización de algunos experimentos, hecho que habría causado que éstos tomaran un estatus imaginario; o, incluso, que las capacidades técnicas del momento no

permitieran que se llevara a cabo alguno de los supuestos planteados. Sin embargo, la razón tal vez sea otra: el desarrollo de la física durante esa década, que comenzó en 1923 con el Efecto Compton y terminó después de 1935 con los primeros esbozos formales del entrelazamiento, se dio con una velocidad vertiginosa. Este gran ritmo se debió a una coincidencia de físicos talentosísimos, de edades sorprendentemente tempranas, y a una serie de descubrimientos y teorías novedosas que iban apareciendo de forma prácticamente simultánea. Así, una teoría encontraba su refutación o su confirmación de forma casi inmediata. La velocidad con que la física se desarrolló durante esos años propició una suerte de impaciencia que pudo valerse de los experimentos imaginarios para encontrar una herramienta que agilizará los avatares de una ciencia desesperada por llegar a algún lugar. La Teoría de la Relatividad, por ejemplo, esperó hasta el eclipse de 1919 para encontrar una confirmación empírica. La cuántica no podía esperar tanto. Las cuantiosas inversiones económicas gubernamentales y privadas son ejemplo de ello: los descubrimientos no podían hacerse esperar, la intrincada red de intereses en que la ciencia se estaba convirtiendo exigía inmediatez, debates, resultados. En este sentido, los experimentos imaginarios serían la herramienta más adecuada para agilizar el desarrollo desesperado de una ciencia con tantas facetas: la polémica, esa guerra argumentativa, sería uno de los elementos que más sacudió el desarrollo científico durante los años más intensos de la mecánica cuántica.

Una función para los experimentos imaginarios. Razones para un contexto histórico. La física cuántica: ¿el lugar más apropiado? Motivos para una selección: desde el microscopio de Heisenberg hasta el gato de Schrödinger. El velo que cubre a los experimentos imaginarios: una realidad mucho más cotidiana. El comienzo.

¿Cuál es la función de los experimentos imaginarios? Desde Mach y Koyré, Duhem y Kuhn, hasta Norton y Brown, entre muchos otros historiadores y filósofos de la ciencia, ésta es la pregunta que se ha venido formulando para abordar el caso de los experimentos imaginarios. Una pregunta, sin embargo, que busca aislar de su contexto histórico a la herramienta experimental imaginaria y diseccionarla como un cadáver alejado de su realidad, de sus conexiones con lo vivo. Una pregunta tan abierta permite cualquier enfoque, cualquier punto de aproximación, y, sin embargo, en la mayoría de esos estudios se propone una revisión de los experimentos imaginarios *en sí*, es decir, de cada uno de ellos como si se tratara de fenómenos aislados sin otra relación que la de ser experimentos imaginarios. Los trabajos de Brown (1991), por ejemplo, establecen una suerte de *tradicición* que se alarga desde Galileo hasta Schrödinger; y el libro editado por Horowitz y Massey (1991) abarca desde los presocráticos hasta la actualidad, abordando experimentos imaginarios en física, filosofía natural, biología, filosofía, psicología, lingüística, y un largo etcétera. El análisis historiográfico queda, pues, a un lado.

Si se toma, por ejemplo, el caso de las paradojas de Zenón de Elea, la conclusión más inmediata, y la de mayor fama en la bibliografía que estudia el caso, apunta que las formulaciones de Zenón (Aquiles y la tortuga, por ejemplo) buscaban la negación del movimiento. Las *aporías* son revisadas al detalle y se extrae, desde luego, la conclusión de que

Zenón se equivocaba. Sin embargo, ¿qué sucede si esas formulaciones se estudian en el contexto en el que fueron formuladas? La formulación de las paradojas de Zenón emerge en el contexto de la discusión con los Pitagóricos (Kirk, Raven & Schofield, 1987) y es ahí donde debe ubicarse su análisis: fuera de ese contexto, las paradojas demuestran que Zenón negaba el movimiento y que su planteamiento era errado; sin embargo, dentro de su correspondiente contexto, el sentido cambia: las formulaciones de Zenón partían de la noción de pluralidad del mundo que defendían los Pitagóricos, un mundo infinitamente divisible en el cual, llevando al extremo esa divisibilidad del espacio, diría Zenón, quien defendía la unicidad del mundo, el movimiento sería imposible. Partiendo del razonamiento pitagórico, Zenón elabora las paradojas para expresar la incoherencia de aquel sistema cuando sus características son llevadas al extremo. La inclusión del contexto histórico proporciona una visión distinta de las conclusiones porque cambia el enfoque del análisis: el elemento bajo estudio no es un hecho aislado, sino que forma parte de un entramado necesario para comprender su naturaleza.

Por ello, la intención de este trabajo no es la de encontrar *una* función para los experimentos imaginarios, sino encontrar *la* función o funciones que cumplieron durante el desarrollo de la física cuántica en el lapso de tiempo comprendido entre los años de 1927 y 1936. Sólo mediante el estudio historiográfico sería posible entender su funcionamiento, su papel y su importancia. Estudiados como objeto de museo, como cuerpos sin vida en un teatro anatómico, es posible encontrar algunas respuestas. Sin embargo, no son esas respuestas las que se persiguen aquí. Se plantea, pues, antes que nada, una historiografía crítica de *todos* los experimentos imaginarios llevados a cabo durante el periodo en cuestión, y no sólo el análisis teórico de los más conocidos (como comúnmente se hace). Como instrumento de trabajo de los científicos, los experimentos imaginarios no pueden, así

como tampoco los experimentos reales, los laboratorios, las formulaciones matemáticas, etcétera, cumplir *una misma* función a través del tiempo. Esa función dependerá siempre del contexto histórico, de sus relaciones con las teorías, del desarrollo del conocimiento, de las relaciones entre científicos y de las conexiones entre los propios experimentos imaginarios. De ahí que la intención de este trabajo pase, primero, por ubicar, en la medida de lo posible, y según las fuentes históricas lo permitan, *todos* los experimentos imaginarios que tuvieron lugar en el periodo acotado, con el fin de encontrar esos lazos, las redes intrincadas tejidas en un periodo convulso para la física.

¿Por qué, pues, se elige la física cuántica; por qué, también, ese periodo en concreto? Las razones, que ya se han ido esbozando a lo largo de este capítulo introductorio, tienen que ver con (1) la cantidad de experimentos imaginarios encontrados durante la primera etapa de la investigación documental, en la que se planteó tratar, también, los experimentos imaginarios relacionados con la Teoría de la Relatividad; (2) la relación entre los experimentos imaginarios (conectados entre sí por la discusión en torno a la mecánica cuántica, su completitud, la Interpretación de Copenhague y el problema de la medición en la cuántica); (3) los actores participantes a lo largo de la década, constantes a la vez que variados (desde Einstein y Bohr hasta Schrödinger, pasando por Tolman, Rosen, Podolsky, Popper, Hermann, etc.); (4) las diferentes formas de *publicación* de los experimentos imaginarios y el efecto que esto tuvo en la comunicación y los quehaceres científicos (las primeras publicaciones, las Conferencias de Solvay y el papel fundamental de revistas como *Physical Review*, *Science* y *Die Naturwissenschaften*); y (5) el contexto de discusión en torno a la cuántica, que permitió que los experimentos imaginarios fueran utilizados como medio de comunicación entre científicos.

Es posible que estas razones, tratadas con mayor profundidad posteriormente, asentasen el terreno para la proliferación de los experimentos imaginarios en la física cuántica, que bien podría ser el lugar más apropiado para su empleo. La mezcla entre pericia técnica y falta de medios produjo una amalgama interesante: en términos generales, los medios técnicos que la física necesitaba para avanzar comenzaban a estar al alcance de los físicos, al menos en las universidades más prestigiosas o en centros de investigación financiados por organismos privados; sin embargo, como tanto los instrumentos como los materiales eran escasos y costosos, no cualquiera tenía acceso a ellos. Así, los medios técnicos eran conocidos, ya fuera de primera mano, ya fuera por las descripciones hechas en artículos especializados en los que se explicaba su uso durante algún experimento. De esta manera podían conocerse las propiedades y las capacidades de un instrumento sin necesidad de tenerlo al alcance. Esta extraña mezcla de conocimiento de los medios y ausencia de los mismos ayudaría a la proliferación de los experimentos imaginarios. No hay que pasar por alto que, aunque el adjetivo *imaginario* pueda entenderse como *algo inventado*, no es posible dicha invención sin un conocimiento o referencia previa de aquello que se quiere inventar. Lo *imaginario* de los experimentos imaginarios no es la invención de sus elementos sino la manera con que esos elementos, ya conocidos y estandarizados, son dispuestos en una configuración experimental. Por ejemplo, puede alegarse que, en la reformulación que Paul Langevin (1911) hizo del experimento de los gemelos de Einstein (Bensaude-Vincent, 1988), el físico *inventa* la nave espacial. Se trataría, dicho alegato, de un error de perspectiva y de contexto: cuarenta y seis años antes, Julio Verne había publicado *De la Tierra a la Luna*, y la referencia a la nave que viaja por el espacio sideral estaba ya hecha. Lo *imaginario* del experimento reside en introducir un gemelo en la nave y darle un reloj que llevará durante un

viaje por el espacio a una velocidad parecida a la velocidad de la luz, mientras que su hermano se quedaría en la Tierra con otro reloj, esperando la vuelta del viajero. En este sentido, la física cuántica ofrece un espacio óptimo: un entorno en el que existe un conocimiento estandarizado de los medios técnicos a la vez que de sus usos, procesos y resultados.

Ciertamente, como ya se ha dicho, la Teoría de la Relatividad es un espacio fecundo para el estudio de los experimentos imaginarios. Es por ello que, en un primer planteamiento, se encontraba dentro del diseño de esta investigación. Sin embargo, ante la inesperada cantidad de experimentos imaginarios condensados en un periodo de tiempo relativamente tan breve, hubo de acotarse el contexto histórico en aras de dedicar el suficiente tiempo a cada uno de los experimentos imaginarios y de establecer un hilo conductor temático más consistente y compacto.

Es importante señalar que no se ha llevado a cabo una *selección* de los experimentos imaginarios que conformaran el objeto de estudio de este trabajo. Como se apuntaba antes, los experimentos imaginarios se encuentran arraigados a un periodo en concreto y a un contexto científico también determinado. Así, lo que se seleccionó aquí fue ese contexto, el de la física cuántica entre 1927 y 1936. El velo que comúnmente se arroja sobre los experimentos imaginarios tiene que ver con una suerte de misterio que los rodea, como si se tratara de íconos individuales que aparecen aquí y allá en la historia de la ciencia, sembrando la duda y la paradoja. Sin embargo, el trabajo documental realizado para esta investigación demuestra que los experimentos imaginarios son mucho más que fotones y cajas, EPR y gatos envenados: experimentos poco conocidos y poco estudiados como los de Rosen y Vallarta (1932), Grete Hermann (1935), o los experimentos

menos conocidos de Einstein y Schrödinger, consignados en la correspondencia, forman parte del corpus de trabajo de esta tesis¹.

Así pues, la investigación conduce a pensar que los experimentos imaginarios no eran un hecho fuera de lo común en el desarrollo de la física, sino que eran mucho más utilizados de lo que normalmente se refiere en la bibliografía crítica. Herramientas prácticamente cotidianas en el quehacer científico, los experimentos imaginarios pueden considerarse como instrumentos comunicativos que pretenden extender las redes entre físicos, dando un cuerpo más *palpable* a las ideas y las teorías. Este *cuerpo palpable* no puede revelar su función en el desarrollo de la física cuántica sin considerar el contexto en el que tiene lugar.

Conferencias, congresos, publicaciones especializadas, correspondencia, etcétera, son las fuentes históricas de donde se han extraído los experimentos imaginarios tratados a continuación. Su papel como instrumentos de comunicación, el lugar en que aparecen publicados, una forma peculiar de la relación entre ciencia y público, las respuestas y los debates generados en torno a uno y otro experimento imaginario, así como las distintas formulaciones teóricas y técnicas, son algunos de los elementos que serán estudiados aquí con la intención de comprender, finalmente, el papel de los experimentos imaginarios en el desarrollo de la física cuántica.

Ahora bien, es necesario explicar el criterio según el cual las formulaciones que se presentan aquí se consideran como experimentos imaginarios. No depende, como abunda en la bibliografía crítica, de la definición de *experimento imaginario* que aquí se pueda proporcionar. Ciertamente, como se ha explicado antes, no se *eligieron* unos

¹ En el Anexo se incluye un cuadro donde se recogen todos los experimentos imaginarios revisados en este trabajo, junto con sus correspondientes referencias bibliográficas.

experimentos imaginarios en lugar de otros, sino que se *tomaron todos* los que se encontraron encuadrados dentro del momento histórico *elegido*. ¿Cómo se identificaron esos experimentos imaginarios? Como muestra de que la herramienta experimental imaginaria no era un hecho aislado sino, como se sostiene aquí, parte de la cotidianidad de los científicos, el criterio utilizado para identificarlos no es otro que el de los propios científicos. Términos como el evidente *Gedankenexperiment* y otros como *Ideal experiment*, *Thought experiment*, *Conceptual experiment*, *Experimental example*, *Caso imaginario*, *Escenario imaginario*, *Caso idealizado*, entre otros, son utilizados por los autores que se revisarán en adelante para designar al experimento imaginario que presentan, por lo general, en un artículo publicado. Hay ocasiones en las que la referencia al experimento imaginario no es tan literal ni evidente sino que toma una forma más sutil y velada: *Casos*, *Ejemplos*, *Escenarios* son etiquetas comunes cuando los experimentos, en vez de aparecer en artículos publicados, son explicados en conferencias o congresos. Por ejemplo, en la conferencia que ofreció Leon Rosenfeld en Bruselas en 1933, Einstein le hace una pregunta que conduce a la formulación de un experimento imaginario «¿Qué dirías de la siguiente situación?: Supongamos que dos partículas [...]» (Rosenfeld, 1967, p. 127). En este caso, es evidente que se trata de un experimento imaginario, no sólo por el contexto en que se formula, sino por el parecido que el planteamiento guarda con otros experimentos imaginarios anteriores propuestos por Einstein. Así, una de las ventajas de revisar *todos* los experimentos imaginarios del periodo de estudio, empezando, obviamente, por los más referenciados en la bibliografía crítica, es que ha facilitado la identificación de otros experimentos que podrían haberse pasado por alto debido a la falta de explicitación, en su formulación, de su naturaleza como experimentos imaginarios. Esta identificación ha sido posible gracias al hallazgo de elementos recurrentes en los diversos experimentos imaginarios que

abordan un mismo problema (por ejemplo, las respuestas en torno a EPR, o las formulaciones previas al famoso artículo de gato de Schrödinger que el autor fue exponiendo en su correspondencia con Einstein durante el verano de 1935), y también gracias a la existencia de diferentes versiones o variaciones de experimentos imaginarios formulados por uno u otro físico. De esta manera, se ha ido componiendo el corpus de que consta este trabajo, haciendo innecesario excluir o agregar experimentos imaginarios a partir de la subjetividad de una definición externa, es decir, una definición planteada a partir de otros criterios que no sean propiamente los criterios de los mismos exponentes del experimento imaginario.

Es por ello que tratar de aventurar una definición que pretendiese abarcar todos los experimentos imaginarios, perteneciesen o no a este periodo, o incluso a la física, sería, en este punto, negligente. La única definición posible aquí podría corresponder a los experimentos imaginarios en cuestión, no siendo, por tanto, trasladable a otros experimentos imaginarios en otros periodos históricos diferentes. Lo que se ha intentado lograr en este capítulo es un acercamiento esclarecedor al término en cuestión, que no debe confundirse con la definición de los experimentos imaginarios en general, de la misma manera que una definición etimológica (como la aquí propuesta) de un concepto como, por ejemplo, la complementariedad, no debería confundirse con los diferentes usos del término en sus diferentes ámbitos de aplicación. No es pretensión de este trabajo, tampoco, entrar en la discusión, patente en la filosofía de la ciencia, sobre si los experimentos imaginarios son o no son *experimentos*. Se da por sentado que no son fenómenos equivalentes y que, tanto su estudio como su consideración dentro de la historia de la ciencia siguen caminos, aunque paralelos, distintos. Las cuestiones epistemológicas y ontológicas, por lo mismo, quedan excluidas de este trabajo, ya que la intención última que

se persigue es la de encontrar la función de los experimentos imaginarios mediante la conformación de una historiografía crítica lo más completa posible.

Se da comienzo a esta investigación, pues, abordando lo que se considera la piedra angular de los experimentos imaginarios en la física cuántica: el Efecto Compton. Formulado en 1923, se convirtió en uno de los elementos *estandarizados* más utilizados en los planteamientos experimentales imaginarios durante los años siguientes en torno a las discusiones que rodearon a la física cuántica. Puede afirmarse, así, que fue la formulación del Efecto Compton lo que dio el banderazo de salida a los experimentos imaginarios que se estudian en este trabajo: se trata del motivo generador fundamental del primer experimento imaginario que se estudia aquí, el microscopio de Heisenberg (1927), que, a su vez, dio lugar a los experimentos imaginarios de Einstein en las Conferencias de Solvay en 1927 y 1930.

**CAPÍTULO II. 1924-1930. LOS EXPERIMENTOS IMAGINARIOS PARA
UN PÚBLICO PRIVADO: DEL MICROSCOPIO DE HEISENBERG AL
FOTÓN Y LA CAJA DE EINSTEIN.**

*—Es penoso irse del mundo
sin haber adquirido una sola certeza —dice Luder—
Todo mi esfuerzo se ha reducido a elaborar
un inventario de enigmas
Julio Ramón Ribeyro
Dichos de Luder*

No todas las historias se cuentan desde el comienzo. El Efecto Compton y el artículo de Bohr-Kramers-Slater: el camino hacia el Principio de Incertidumbre. Dudas antiguas que vuelven a agitarse. El experimento que comienza con la discusión, o la discusión que comienza con el experimento. Un primer asomo del entrelazamiento cuántico.

Para el año de 1923 la luz se había dividido. O la idea de la naturaleza de la luz estaba por dividirse. O fue que en el año de 1923 la forma de ver la luz se partió en dos mitades. O quizá lo que cambió fue la forma de explicar la propagación de la luz, su movimiento y su consistencia. Lo cierto es que la aparición del artículo de Arthur H. Compton, *A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements*, en *Physical Review*

en mayo de 1923, cambiaría en adelante la percepción en torno a la naturaleza de la luz y, algunos años después, afectaría también el corazón de la experimentación y la observación de los fenómenos.

O podría decirse que todo comenzó 24 años antes, con las investigaciones de Planck sobre el espectro de emisión del cuerpo negro y la naturaleza discontinua de la radiación. O dos años antes, en 1887, cuando Hertz describió el arco voltaico iluminado por la luz ultravioleta. Quizá, incluso, 18 años después de Hertz, cuando Einstein publicó *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (*On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light*) y los cuantos de luz se opusieron discretamente a la noción ondulatoria de Maxwell. O bien, en 1927, cuando Heisenberg formuló el Principio de Incertidumbre y utilizó, para explicarlo, el experimento imaginario del microscopio de rayos gamma.

En todo caso, aunque detrás de Planck exista otra serie de referencias diversas, el comienzo de la historia que aquí se cuenta tiene como primera estación el artículo de Heisenberg publicado en 1927, y como antecedente inmediato más determinante, el trabajo de Compton publicado en 1923. ¿Por qué? Porque la base del experimento imaginario del microscopio de Heisenberg se encuentra en el concepto de la dispersión del electrón, y sería ése el elemento primordial de una discusión que extendida más allá de una década.

El artículo de Compton propició una primera reacción en la forma de un trabajo escrito en conjunto por Bohr, Kramers y Slater (1924) que puede considerarse el primer intento de conciliar los dos modelos de radiación recién enfrentados, a saber: el modelo ondulatorio y el modelo corpuscular. O en todo caso, si no de conciliar, de descartar el uno por el otro.

El efecto Compton encontró una aceptación prácticamente inmediata tanto en Estados Unidos como en Europa, aun a pesar de que

algunos científicos seguían sin creer del todo en la imagen corpuscular de la radiación, Bohr entre ellos. No obstante, el trabajo de Compton no fue un caso aislado: Peter Debye (1923) seguía el mismo camino y ya Einstein (1916) había hablado de la transferencia de momento de un haz de radiación a una molécula tras un choque. Pero fue la evidencia experimental proporcionada por Compton lo que le proporcionó, en buena medida, la aceptación. Compton contaba con una larga experiencia industrial y técnica en laboratorios modernos y bien equipados y utilizó esa experiencia para desarrollar los experimentos necesarios que explicaron la dispersión de los rayos X. Desde 1916 hasta 1922, pasando por la Universidad de Minnesota, la Westinghouse Lamp Company, el Cavendish Laboratory y la Universidad de Washington, Compton fue reuniendo las habilidades y los conocimientos técnicos y teóricos necesarios para que la idea de la dispersión de los rayos X tomara cuerpo y fuera aceptada.

En buena medida, la aceptación general vino un año después, a través de un breve intento de refutación. Bohr seguía sin creer en la existencia del fotón, por lo que el Efecto Compton, que *demostraba* esa existencia, era un elemento que se oponía al programa científico del físico danés. Bohr incluso llegaría a coquetear con la posibilidad de la no conservación de la energía con el fin de no aceptar la existencia de los fotones como entidad real, sino solamente como artificio matemático. Sin embargo, la llegada de Slater a Copenhague en 1923, un físico norteamericano procedente de la Universidad de Harvard, le proporcionaría la última posibilidad de refutar la existencia de los fotones. Slater aportó la idea de un campo virtual de radiación creado por osciladores virtuales. Aunque la noción original de Slater involucraba la existencia de los fotones, la intención preconcebida de Bohr y Kramers, su alumno por excelencia en Copenhague en aquellos momentos, debía prescindir de los fotones y proporcionar una imagen

estadística de la conservación de la energía. Suficiente, según Bohr y Kramers, para demostrar que el principio de conservación era posible incluso sin considerar a los cuantos de luz de Einstein. Las diversas revisiones históricas del caso del artículo de BKS señalan que Slater no estuvo de acuerdo con la sustracción de los fotones de su idea original (Jammer, 1974; Stuewer, 1975). El propio Slater afirmó que el artículo fue escrito por Bohr y Kramers en su totalidad, y que él sólo participó en la parte dedicada a los osciladores virtuales y en la firma (Stuewer, 1975). El texto sería una suerte de intento de programa científico que buscaba, principalmente, apuntar hacia una determinada dirección investigativa en lugar de *probar*, mediante alguna demostración experimental o matemática, las ideas propuestas.

Quizá esta *asociación* entre Bohr, Kramers y Slater, su intención de escribir la refutación del Efecto Compton y, sobre todo, de los cuantos de luz de Einstein, tenga una cierta semejanza con la asociación, once años después, entre Einstein, Podolsky y Rosen, con el fin de escribir su famoso artículo en contra de la completitud de la mecánica cuántica. Bohr aprendería esa lección después de que el intento por establecer un Efecto Compton estadístico se viera derrotado por los experimentos de Bothe y Geiger así como los de Compton y Simon, ambos en 1925. La lección aprendida fue, pues, la importancia de la conformación de un grupo de trabajo y colaboración que enriqueciera las ideas que él defendía, como sucedió con la llegada de Slater, y que se dio, en el caso de Bohr, desde inicios de la década de 1920 y gracias al intenso número de visitantes que recibió la Universidad de Copenhague, primero, y el Instituto de Física Teórica de Bohr, después.

El artículo de BKS plantea otro elemento interesante. Además de la confirmación posterior del Efecto Compton (seguramente estimulada por la propuesta de Bohr y sus colaboradores) y de la existencia de los cuantos de luz, se eliminó el elemento estadístico que

los tres autores querían introducir en la concepción de la conservación de la energía. Había un elemento de acausalidad, una suerte de indeterminismo necesario para que la negación de los fotones no demandara la completa renunciación a la conservación de la energía. Ya hay aquí visos de lo que, en años posteriores, sería la discusión en torno a la mecánica cuántica: los dos actores principales, Bohr y Einstein, ya se enfrentaban, al menos indirectamente.

Pero los alcances del Efecto Compton serían bastante más amplios. Una de las ideas fundamentales de esta investigación, como se explicó en el capítulo inicial, es que el Efecto Compton es un elemento constante en todos los experimentos imaginarios relacionados con las discusiones en torno a la mecánica cuántica desde 1927 hasta 1936, y que funcionó no solamente como elemento estandarizado en la construcción de elementos imaginarios, sino también como piedra angular en la formulación de teorías en torno al problema de la medición en la mecánica cuántica. Llegaría a tener diferentes valores para diferentes científicos, según el contexto en que fuera aplicado. Para Heisenberg fue, por ejemplo, la prueba fehaciente de que la mecánica ondulatoria fallaba.

En 1927, Werner Heisenberg publicó un artículo titulado, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik* (*Sobre el contenido ideológico de la cinemática y la mecánica cuántica*), que apareció en el número 43 de la revista *Zeitschrift für Physik*². Sin duda, el elemento más problemático de la formulación de Heisenberg, y que fue arrastrado largos años durante el debate en torno a la cuántica, es el Principio de Incertidumbre, la imposibilidad de medir dos magnitudes no conmutativas en un mismo proceso de medición, de forma simultánea,

² Para este trabajo se utiliza la traducción al inglés que aparece en Wheeler & Zurek, eds., (1983).

consecuencia de la aplicación del Efecto Compton en la observación del momento de un electrón.

Prácticamente cuarenta años después, en el volumen de Rozental (1967), Heisenberg explica que el Instituto de Física Teórica de Bohr en Copenhague comenzó un intensivo trabajo tras la visita de Schrödinger en 1926, cuando el físico austriaco, ante el asedio de Bohr, según relata Heisenberg, aceptó los huecos y los fallos de la mecánica ondulatoria. Aquellos meses de discusiones, apunta Heisenberg, se materializaron en la elaboración de numerosos experimentos imaginarios que buscaban expresar las paradojas en las concepciones previas de la teoría cuántica, con el fin de adivinar qué respuesta daría la naturaleza a cada experimento (Heisenberg, 1967, p. 57). Sería en los primeros meses de 1927, durante una estancia de Bohr en Noruega, cuando Heisenberg recompondría el experimento imaginario del microscopio de rayos gamma a partir del recuerdo de unas discusiones con un compañero de universidad en Göttingen.

El planteamiento original fue expuesto a Pauli en una carta y revisado por Bohr a su regreso a Copenhague, luego de que Heisenberg le escribiera una carta anticipando el contenido del documento: «Por mi parte he trabajado vigorosamente en las últimas semanas con el fin de avanzar en el programa (con respecto a la mecánica cuántica de Dirac y Jordan) sobre el cual hablamos antes de tu marcha. Creo que he logrado el éxito total. El caso, en el cual *tanto p como q* están dados con una cierta precisión, puede formularse sin ir más allá de la formulación matemática de Dirac y Jordan... Incluso, puede verse que la transición de la “micro a la macromecánica” puede entenderse muy fácilmente: la mecánica clásica es completamente una parte de la mecánica cuántica. En cuanto a la vieja cuestión sobre “leyes estadísticas o causales”, la situación es ésta: uno *no puede* decir que la mecánica cuántica es estadística. Sin embargo, sólo es posible obtener resultados estadísticos si uno quiere calcular

“eventos futuros” a partir del “presente”, dado que uno no puede tomar en cuenta todas las condiciones iniciales del presente» (carta de Heisenberg a Bohr, 10 de Marzo de 1927, citado en Stolzenburg, 1975 y en Mehra, 1987)³. Con esto en mente, Bohr regresó a Copenhague con intención de enfrentarse a las nuevas formulaciones de Heisenberg. Más tarde, en el mes de abril, tras las discusiones entre ellos dos antes de la publicación del artículo, Bohr enviaría a Einstein un borrador del documento: el otro polo de la discusión estaba ya sobre aviso.

Con algunas modificaciones, el original fue publicado luego en las condiciones que se mencionan arriba. El artículo está dividido en cuatro párrafos y un breve apéndice final. El último párrafo está dedicado a algunos «experimentos idealizados especiales». No es ahí, sin embargo, donde se encontrará el famoso experimento del microscopio. ¿Por qué? Ya se hablará de esto más adelante.

Las objeciones de Bohr al primer planteamiento giran en torno a la intención inicial de Heisenberg de ubicar la incertidumbre en la medición de la trayectoria de un electrón mediante la influencia del Efecto Compton y el retroceso del electrón al chocar con los cuantos de la emisión de rayos gamma del microscopio. Fue Bohr quien señaló a Heisenberg que la incertidumbre, en este caso en particular, no ocurriría

³ «I myself have worked very vigorously during recent weeks in order to carry through the program (with respect to the Dirac-Jordan quantum mechanics [i.e., transformation theory]), about which we talked before your departure. I believe that I have fully succeeded. The case, in which \mathbf{p} as well as \mathbf{q} are given with a certain accuracy, can be formulated without going beyond the Dirac-Jordan mathematics... Further, one finds that the transition from "micro- to macromechanics" can be understood very easily: the classical mechanics is entirely a part of quantum mechanics. As for the old question concerning 'statistical or causal law,' the situation is this: one *cannot* say that quantum mechanics is statistical. However, one can obtain only statistical results, if one wants to calculate 'future events' from the 'present,' since one cannot take into account all the initial conditions of the present» (Heisenberg a Bohr, 10 de Marzo de 1927, citado en Stolzenburg, 1975 y en Mehra, 1987).

en la trayectoria del electrón, sino en la medición del momento, ya que la dispersión de la que se ocupaba el Efecto Compton tenía que ver, por fuerza, con la alteración del momento, una cualidad que, en la visión de Bohr con respecto a la dualidad onda-partícula, correspondía a la imagen corpuscular, junto con el concepto de energía, mientras que espacio y tiempo eran las magnitudes más adecuadas para la imagen ondulatoria (Rosenfeld, 1971).

La primera frase del documento ya plantea las intenciones generales del autor: crear una justificación de lo que viene más adelante y preparar al lector sobre las seguras consecuencias contra-intuitivas que pueden obtenerse de las formulaciones posteriores:

«Creemos que entendemos el contenido físico de una teoría cuando podemos ver sus consecuencias experimentales cualitativas en todos los casos simples y cuando, al mismo tiempo, verificamos que la aplicación de la teoría no contiene contradicciones internas. Por ejemplo, creemos que entendemos el contenido físico del concepto de espacio cerrado tridimensional de Einstein porque podemos visualizar las consecuencias experimentales de este concepto. Desde luego que esas consecuencias contradicen nuestros conceptos cotidianos de espacio y tiempo. Sin embargo, podemos convencernos a nosotros mismos de que la posibilidad de emplear los conceptos usuales de espacio y tiempo en distancias cosmológicas no puede justificarse ni mediante la lógica ni mediante la observación» (Heisenberg, 1927, p. 62)⁴.

⁴ «We believe we understand the physical content of a theory when we can see its qualitative experimental consequences in all simple cases and when at the same time we have checked that the application of the theory never contains inner

La motivación de Heisenberg para su revisión de los preceptos cuánticos de la cinemática y la mecánica está fundada en el supuesto de que, si se aceptase que, en un nivel microscópico, se tienen comportamientos discontinuos, la imagen corpuscular no permitiría aprehender el concepto de velocidad de una partícula porque la partícula se encontraría, al observarla, en una posición, y la determinación de la velocidad requiere del conocimiento de dos posiciones de la partícula (Heisenberg, 1927, p. 63). Hasta aquí, la formulación original, criticada por Bohr, se sostiene. Luego, Heisenberg prepara el terreno para el planteamiento del experimento del microscopio mediante una apelación al concepto, que en Bohr tomará una forma más elaborada, de *configuración experimental*. Heisenberg se refiere a esto mediante el término *Gestalt*, que puede traducirse como *molde*, *forma* o *configuración* y que en Heisenberg hace referencia a la ‘configuración’ o al ‘estado de cosas’ que rodea a la partícula que va a ser observada, incluyendo, como aclara más adelante, los medios técnicos con que se observa y se mide. Sin duda, el término, aunque es una palabra común y corriente en alemán, proviene del contexto de la *Gestalttheorie* que, todavía en la década de 1920, gozaba de la buena salud del impulso generador inicial. Heisenberg utiliza el vocablo *Gestalt* para referirse a todas las interacciones que hay alrededor de la partícula en cuestión. El planteamiento del experimento imaginario es el siguiente:

contradictions. For example, we believe that we understand the physical content of Einstein’s concept of a closed 3-dimensional space because we can visualize consistently the experimental consequences of this concept. Of course these consequences contradict our everyday physical concepts of space and time. However we can convince ourselves that the possibility of employing usual space-time concepts at cosmological distances can be justified neither by logic nor by observation» (Heisenberg, 1927, p. 62).

«Cuando uno quiere ser claro sobre qué es lo que debe entenderse por las palabras “posición de un objeto”, por ejemplo, del electrón (relativo a un marco de referencia dado), entonces uno debe especificar determinados experimentos con cuya ayuda uno planea medir la “posición del electrón”; de otro modo, estas palabras no tienen significado alguno [...] Por ejemplo, iluminemos el electrón y observémoslo bajo un microscopio. Entonces, la precisión más elevada posible en la medición de la posición está determinada por la longitud de onda de la luz. Sin embargo, en principio, uno podría construir, digamos, un microscopio de rayos γ , y con él llevar a cabo la determinación de la posición con tanta precisión como uno desee. En esta medición existe una característica importante: el Efecto Compton. Cada observación de luz dispersa que viene del electrón presupone un efecto fotoeléctrico (en el ojo, en la placa fotográfica, en la fotocelda) y puede, por tanto, interpretarse también que un cuanto de luz golpea el electrón, que es reflejado o dispersado y, entonces, de nuevo curvado por la lente del microscopio, produce el efecto fotoeléctrico. En el instante en que la posición se determina –por tanto, en el momento en que el fotón es dispersado por el electrón– el electrón se somete a un cambio discontinuo en el momento. Este cambio es tan grande como pequeña sea la longitud de onda de la luz empleada –es decir, mientras más exacta sea la determinación de la posición. En el instante en que la posición del electrón es conocida, su momento, entonces, puede ser conocido hasta magnitudes que corresponden con ese cambio discontinuo. Así, mientras más precisa sea

la determinación de la posición, menos preciso será el conocimiento del momento, y a la inversa» (Heisenberg, 1927, p. 64)⁵.

Como Heisenberg afirma unas líneas más adelante, la medición de la posición de una partícula exige que, en el proceso, se sucedan colisiones (Heisenberg, 1927, p. 65). Por tanto, si en la medición de la posición de la partícula, esas colisiones son inevitables y, atendiendo al Efecto Compton, desvían la partícula observada de su «posición en un tiempo determinado», entonces, otro concepto de la mecánica sería igualmente difícil de determinar con precisión arbitraria: la trayectoria de la partícula.

⁵ «When one wants to be clear about what is to be understood by the words “position of an object”, for example of the electron (relative to a given frame of reference), then one must specify definite experiments with whose help one plans to measure the “position of the electron”; otherwise this word has no meaning [...]. For example, let one illuminate the electron and observe it under a microscope. Then the highest attainable accuracy in the measurement of position is governed by the wavelength of the light. However, in principle one can build, say a γ -ray microscope and with it carry out the determination of position with as much accuracy as one wants. In this measurement there is an important feature, the Compton effect. Every observation of scattered light coming from the electron presupposes a photoelectric effect (in the eye, on the photographic plate, in the photocell) and can therefore also be so interpreted that a light quantum hits the electron, is reflected or scattered, and then, once again bent by the lens of the microscope, produces the photoeffect. At the instant when position is determined—therefore, at the moment when the photon is scattered by the electron—the electron undergoes a discontinuous change in momentum. This change is the greater the smaller the wavelength of the light employed—that is, the more exact the determination of the position. At the instant at which the position of the electron is known, its momentum therefore can be known up to magnitudes which correspond to that discontinuous change. Thus, the more precisely the position is determined, the less precisely the momentum is known, and conversely» (Heisenberg, 1927, p. 64).

Heisenberg postula el experimento imaginario del microscopio no para *demostrar* cómo funciona el Principio de Incertidumbre, o cómo el Efecto Compton incide en las mediciones de las partículas elementales, sino para producir una bola de nieve que, uno tras otro, irá derribando en cada concepto mecánico la idea de certidumbre y precisión, de manera que las nociones aceptadas puedan ponerse en duda en función de la *imposibilidad* de medir con precisión arbitraria la posición de un electrón usando un microscopio de rayos gamma. Por ejemplo, añade Heisenberg, la expresión «la órbita 1s del electrón del átomo de hidrógeno» no tiene sentido desde el punto de vista que se explica en el experimento: con el fin de medir la trayectoria 1s debe iluminarse el átomo con una luz cuya longitud de onda sea considerablemente más pequeña que 10^{-8} centímetros. Sin embargo, un solo fotón de esa luz es suficiente para alejar al electrón de su trayectoria, de modo que solamente un punto de la trayectoria puede ser definido. Por tanto, aquí, la palabra ‘trayectoria’ no tiene significado definido (Heisenberg, 1927, p. 65)⁶.

Aquí es donde se revela la intención del experimento del microscopio: ciertamente, sólo es posible determinar, en *una* medición de *un* átomo de hidrógeno, la posición de *un* electrón en la órbita, de manera que, si se llevan a cabo numerosas mediciones en numerosos átomos de hidrógeno, puede obtenerse una distribución de probabilidades de la *posible* trayectoria de la órbita 1s (Heisenberg, 1927, p. 65-6). No se trata, por tanto, de hablar únicamente de la

⁶ «Nevertheless, it is easy to recognize that, for example, the often used expression, the “1s orbit of the electron in the hydrogen atom”, from our point of view has no sense. In order to measure this 1s “path” we have to illuminate the atom with light whose wavelength is considerably shorter than 10^{-8} cm. However, a single photon of such light is enough to eject the electron completely from its “path” (so that only a single point of such path can be defined). Therefore here the word “path” has no definable meaning» (Heisenberg, 1927, p. 65).

indeterminación en la medición de la posición de un electrón, sino del carácter probabilístico de las observaciones propias de la mecánica cuántica, condición estadística que está dada por los mismos experimentos, pues introducen la imprecisión en la observación.

El objetivo del primer párrafo del artículo de Heisenberg y, sobre todo, del experimento imaginario del microscopio, se resume al inicio del segundo párrafo:

«Todos los conceptos que pueden ser usados en la teoría clásica para la descripción de un sistema mecánico pueden ser definidos exactamente también para los procesos atómicos, en analogía con los conceptos clásicos. Los experimentos que proporcionan dicha definición sufren, ellos mismos, una incertidumbre introducida puramente por los procedimientos observacionales que usamos cuando les exigimos la determinación simultánea de dos cantidades conjugadas canónicamente» (Heisenberg, 1927, p. 68)⁷.

Quizá es ya desde aquí que puede encontrarse uno de los elementos de la naturaleza de los experimentos imaginarios que durante años rondarían las discusiones en torno a la mecánica cuántica: el diseño experimental.

Se ha hablado un poco ya sobre el concepto de *configuración experimental*, más utilizado por Bohr ya en los lindes del artículo de EPR

⁷ «All concepts which can be used in classical theory for the description of a mechanical system can also be defined exactly for atomic processes in analogy to the classical concepts. The experiments which provide such a definition themselves suffer an indeterminacy introduced purely by the observational procedures we use when we ask of them the simultaneous determination of two canonically conjugate quantities» (Heisenberg, 1927, p. 68)

en 1935 y por Charles Galton Darwin en 1931, y que, como puede verse aquí, bajo el término *Gestalt* que utilizó Heisenberg en las primeras páginas del artículo, forma parte importante de la argumentación: la incertidumbre no es inherente a los fenómenos sino a los procesos de medición, y esto, sólo, cuando se intenta una medición simultánea de dos cantidades canónicamente conjugadas. Es a partir de esta formulación, aparentemente clara, de donde emanarán la mayor parte de las críticas hacia la completitud de la mecánica cuántica, especialmente, como se verá, por parte de Albert Einstein.

La pregunta que hay que hacerse a continuación es: ¿por qué, si hay un apartado específico en el cual se proponen experimentos imaginarios, tal y como lo anuncia el autor en el sumario inicial, se recurre, ya en las primeras páginas, a la formulación del experimento imaginario del microscopio de rayos gamma? Dicho experimento imaginario no posee una función de afirmación o refutación de un conjunto de ideas, no es tampoco un *ejemplo* de las repercusiones físicas de una teoría (en todo caso, los experimentos reales explicaron ya el Efecto Compton y, como mucho, el microscopio de Heisenberg sería una expresión de dicho efecto en una situación experimental específica), no busca tampoco resumir el conjunto de nociones del documento: su intención principal es la de servir como motor de arranque de toda la formulación, una formulación que, además, no se *ayuda* de experimentos imaginarios sino que *existe*, se lleva a cabo, mediante una sucesión de experimentos imaginarios que van apareciendo a lo largo de todo el documento.

En el segundo párrafo, Heisenberg aborda la condición estadística de la experimentación en el ámbito cuántico mediante la evocación de la teoría de Dirac y Jordan, que explica que en la teoría cuántica un experimento no puede proporcionar nunca información exacta sobre todas las cantidades involucradas.

Es ya en el tercer párrafo donde Heisenberg postula la idea que sería, sin duda, la que más incomodaría a Einstein sobre las implicaciones de una descripción de la realidad que resulta de la aceptación del Principio de Incertidumbre; sin embargo, antes, Heisenberg explica otro experimento imaginario que servirá para evidenciar dicha noción. Mientras habla de la transición de la micromecánica a la macromecánica, Heisenberg cuando menciona uno de los conceptos que recorrería las discusiones de la cuántica a través de los experimentos imaginarios: el *paquete de ondas (wave packet)*: la partícula observada se encuentra en un intervalo definido, apunta Heisenberg, pero su estado dentro de ese intervalo está sujeto al Principio de Incertidumbre. Entonces, plantea otro experimento imaginario:

«Dejemos que un átomo se encuentre en un estado de excitación $n = 1000$. Las dimensiones de la órbita, en este caso, son ya relativamente grandes, de manera que [...] es suficiente el uso de una luz de una longitud de onda relativamente baja para determinar la posición del electrón. Si la determinación de la posición no es demasiado difusa, entonces el retroceso [del efecto] Compton pondrá al átomo en un estado de excitación entre, digamos, 950 y 1050. Simultáneamente, el momento del electrón puede ser determinado mediante el efecto Doppler con una precisión dada por $\Delta p_1 q_1 \sim h$. Uno puede caracterizar el resultado experimental mediante un paquete de ondas, o mejor, un paquete de probabilidad de amplitud [...]» (Heisenberg, 1927, p. 73)⁸.

⁸ «For example, let an atom be given in a state of excitation $n = 1000$. The dimensions of the orbit in this case are already relatively large so that, in accordance with §1, it is enough to use light of relatively low wavelength to

En consecuencia, añade Heisenberg, si se lleva a cabo una segunda medición, su resultado sólo puede ser una predicción estadística, ya que se partiría del resultado de la primera medición, que ubicó al átomo en el rango entre 950 y 1050, es decir, entre los límites del paquete de ondas, pero con una posición imprecisa dentro de éste (Heisenberg, 1927, p. 74). Se sabe, pues, que la partícula está dentro del paquete de ondas, pero no se sabe *dónde* está dentro del paquete de ondas. La incertidumbre, entonces, se sostiene. Sin embargo, como ya hizo en el experimento imaginario anterior, Heisenberg afirma que realizando una serie de mediciones se obtendría un número de resultados de la posición de la partícula dentro del paquete de ondas que permitiría una predicción estadística de su trayectoria (Heisenberg, 1927, p. 74).

El concepto del paquete de ondas aparecerá en otros experimentos imaginarios y jugará un papel importante en las discusiones. Llegará, incluso, hasta 1935, donde se encontrará en torno a las ideas de Schrödinger en relación con el entrelazamiento y la superposición.

Para Heisenberg, el artículo sigue el camino de la diferenciación entre la teoría clásica y la teoría cuántica, aunque una diferenciación que no exige, necesariamente, una independencia. Es importante tener en cuenta que sería durante 1927, en la conferencia de Como, Italia, durante la celebración del centenario de Alessandro Volta, cuando Bohr presentaría el Principio de Complementariedad, la noción de que algunos elementos de la realidad deben ser tratados cuánticamente,

determine the position of the electron. If the position determination is not to be too fuzzy then the Compton recoil will put the atom in some state of excitation between, say, 950 and 1050. Simultaneously, the momentum of the electron can be determined from the Doppler effect with a precision given by $p_1 q_1 \sim h$. One can characterize the experimental finding by a wave-packet, or, better, a probability-amplitude packet [...]

(Heisenberg, 1927, p. 73).

mientras que otros deben ser tratados clásicamente (Bohr, 1928). Aunque el texto de Bohr aún no se había hecho público, el congreso de Como tuvo lugar en el mes de septiembre y el texto de Heisenberg se publicó en el mes de marzo. Las críticas de Bohr al texto de Heisenberg pasaban por las ideas de la Complementariedad, concebidas quizá durante la estancia de Bohr en Noruega en el mes de febrero, de manera que esa noción del tratamiento cuántico y clásico de los fenómenos y los instrumentos de medición podía ya estar sembrada en el físico alemán. Por ello, ya hay conatos de una especie de noción de Complementariedad en el experimento imaginario que plantea Heisenberg al hablar de lo microscópico y lo macroscópico. Ese nuevo experimento imaginario es breve, confuso, y posee una formulación experimental o matemática prácticamente nula. Es un texto complicado que acaso busca explicar una todavía no muy bien entendida Complementariedad. Se basa en la reflexión de un rayo de electrones hacia una rejilla. El planteamiento experimental sostiene que, cuando el espacio entre las rejillas se encuentra en el orden de la longitud de onda de los electrones de de Broglie, entonces, la reflexión ocurre en direcciones discretas, definidas, tal y como sucede con la reflexión de la luz en una rejilla. Se tiene, pues, una explicación cuántica. De manera que, si se envía un electrón a un punto específico de la rejilla, la teoría clásica no podría proporcionar una explicación adecuada, ya que el fenómeno de la reflexión discreta contradice las nociones clásicas de radiación. Sin embargo, apunta Heisenberg, cuando se quiere determinar la posición del electrón con tal precisión que sea posible determinar en qué punto de la rejilla golpea, el electrón adquiere una elevada velocidad debido a la influencia del instrumento de observación (es decir, siguiendo la teoría de de Broglie, la acción de un microscopio); de manera que la longitud de onda de los electrones se vuelve mucho más corta, lo que produce que la reflexión sobre la rejilla ocurra tal y como

se predijo mediante la teoría clásica, sin violar la teoría cuántica (Heisenberg, 1927, p. 76)⁹. La observación del fenómeno microscópico, cuántico, proporciona la imagen macroscópica, clásica, de, por ejemplo, la órbita del electrón. Es decir, y aquí se vuelve a un concepto que incordiaría a Einstein: la *órbita*, según Heisenberg, es resultado de *nuestra* observación [Die Bahn entsteht erst dadurch, daß wir sie beobachten] (Heisenberg, 1927, p. 73). Se entiende, entonces, que aunque el resultado de la medición cuántica sea un elemento clásico, o cuya imagen es clásica, como la órbita del electrón, por ejemplo, la forma de obtenerla es mediante los preceptos cuánticos y, por tanto, se encuentra sujeta al Principio de Incertidumbre. Una manera muy rebuscada, tal vez, de la Complementariedad.

El cuarto párrafo del artículo de Heisenberg propone la discusión de algunos experimentos imaginarios. Hasta este punto del documento, la enunciación del Principio de Incertidumbre se ha hecho, tras una primera y breve aproximación teórica de apenas unas cuantas líneas, a partir de la sucesión de una serie de experimentos imaginarios que, aparentemente, buscan *corporizar* los efectos del Principio de

⁹ «To illustrate that the difference between the classical and the quantum statistical laws leads to gross macroscopic differences between the results of the two theories, let the reflection of a beam of electrons at a grating be discussed briefly. When the spacing of the rulings is of the order of the de Broglie wavelength of the electrons, then reflection occurs in definite, discrete directions like the reflection light at a grating. What classical theory gives is grossly and macroscopically different. Nevertheless, from the orbit of an individual electron we can in no way find a contradiction with a classical theory. We might if we could, direct the electron, say, to a definite point on a grating ruling, and then verify that the reflection there violates classical theory. However, when we want to determine the position of the electron so precisely that we can say at what point on a grating ruling it hits, then the electron acquires through this position determination a large velocity, and the de Broglie wavelength of the electron becomes so much shorter that now the reflection really can and will take place approximately as predicted classically, without violating the laws of the quantum theory» (Heisenberg, 1927, p. 76).

Incertidumbre. Es decir, el artículo de Heisenberg puede verse como una versión mínima, condensada de toda la discusión en torno a la mecánica cuántica: la sucesión de un experimento imaginario tras otro.

Para el final del tercer párrafo del artículo, los principales elementos de la formulación de Heisenberg ya se han dejado ver: (1) el Principio de Incertidumbre; (2) la configuración experimental, o *Gestalt*; (3) el concepto de *salto cuántico* (*quantum jump*, en inglés; *Quantensprünge*, en alemán); (4) el paquete de ondas (*wave packet*; *wellenpaket*) y (5) la reducción o colapso del paquete de ondas. Mediante los experimentos imaginarios formulados, Heisenberg intenta clarificar las implicaciones de estos conceptos. De esta manera, el experimento del microscopio de rayos gamma involucra tanto el Principio de Incertidumbre como el concepto de configuración experimental, pero, a la vez, introduce la noción del salto cuántico, la transición de un estado a otro: el electrón observado *salta* a un estado diferente cuando es golpeado por el fotón del haz de luz, fenómeno que se explica en el segundo experimento imaginario; de ahí se extrae que dicho *salto* comporta el colapso de la función de onda y se obtiene una posición para el electrón, hecho explicado en el tercer experimento, de manera que se *regresa* a una percepción clásica del fenómeno, como se explica en el cuarto experimento, ya que se cumple con la descripción de *un* estado del sistema, por ejemplo, la descripción de la órbita en un determinado momento del tiempo.

Aquí, el valor del experimento imaginario del microscopio de rayos gamma cambia. Quizá no se trate de un cambio radical, pero su valor contextual es más que solamente plantear un *ejemplo* del funcionamiento del Principio de Incertidumbre: inicia la discusión y *entrelaza* el resto de experimentos imaginarios para dar un sentido redondo al artículo. De ahí la importancia de estudiar no sólo los experimentos imaginarios más conocidos, sino *todos* los experimentos

imaginarios durante el periodo crítico de la cuántica, desde 1927 hasta 1936.

El siguiente experimento imaginario aborda, de nuevo, la cuestión de los saltos cuánticos. Tal vez sea esto lo que represente para Heisenberg la ruptura más importante con la teoría clásica: además de reforzar la idea del paquete de ondas, continúa con las manifestaciones del Principio de Incertidumbre. El planteamiento es el que sigue:

«Consideramos, por ejemplo, el siguiente experimento. Un átomo, en un tiempo $t = 0$ en un estado $n = 2$ puede saltar [übergehen], mediante radiación, al estado normal $n = 1$ [...] Este átomo se envía a través de un campo magnético no homogéneo para la determinación de su nivel de energía, tal y como es usual en el experimento de Stern-Gerlach; sin embargo, el campo no homogéneo deberá seguir al rayo atómico durante un largo trecho de su trayectoria. La aceleración provocada será medida, digamos, de esta manera: dividimos todo el tramo que recorre el rayo atómico a lo largo del campo magnético en pequeñas secciones, al final de lo cual se determinará la desviación del haz. Dependiendo de la velocidad del rayo atómico, la división en intervalos de espacio para el átomo corresponde a una división en pequeños intervalos de tiempo Δt . Para dicha división Δt corresponde una propagación de energía del orden de $h/\Delta t$ [...] En consecuencia, se encontrará para una serie de intervalos Δt un “estado $n = 2$ ”, y luego, continuamente, un “estado $n = 1$ ”. Con el fin de que sea posible una diferenciación de los dos estados, Δt no puede reducirse por debajo de $h/\Delta t$. Con esta precisión, entonces, se determina el tiempo en que ocurre el salto [Mit dieser

Genauigkeit ist also der Zeitpunkt des Übergangs bestimmbar]» (Heisenberg, 1927, p. 77)¹⁰.

Los planteamientos de Heisenberg oscilan, como puede notarse, entre una especie de sólido andamiaje matemático y un difuso despliegue de elementos experimentales. Utiliza, sobre todo, como medios de estandarización, el experimento de Stern-Gerlach, los efectos Compton y Doppler, y las formulaciones matemáticas de de Broglie, Dirac, Jordan y Schrödinger. Estos elementos de estandarización, además de funcionar como medios para recrear el experimento imaginario, sirven para otorgarle un determinado valor legítimo, es decir, el experimento imaginario *debe* salir fortalecido por el uso de recursos aceptados, de manera que, en todo caso, la objeción no debería ir dirigida al experimento en sí, sino a los elementos *estandarizadores* asociados a él.

El experimento imaginario de los saltos cuánticos vuelve sobre el hecho de que, dentro del paquete de ondas, sólo hay una precisión posible: la que permite el Principio de Incertidumbre, y dentro de los límites entre los que se define el paquete de ondas. Pero no le es

¹⁰ «We consider, for example, the following experiment. An atom, at time $t = 0$ in state $n = 2$ may transit, via radiation, to the ground state, $n = 1$ [...] This atom is sent through an inhomogeneous magnetic field for the determination of its energy level, as is usual in the Stern-Gerlach experiment; yet we also have the inhomogeneous field follow the atomic beam over a long stretch of its path. The consequent acceleration we will measure, say, in this way: we divide the entire stretch that the atomic beam pursues in the magnetic field into short sections, at the end of each of which we determine the deviation of the beam. Depending on the velocity of the atomic beam, the division into intervals of space corresponds for the atom to division into small time intervals Δt . According to §1, equation (2), there corresponds to a time interval Δt a spread in energy of $h/\Delta t$ [...] Thus one will first find for a series of intervals Δt “state $n = 2$ ”, then steadily “state $n = 1$.” In order that a distinction between the two states will still be possible, Δt cannot be shrunk below $h/\Delta t$. Thus the instant of the transition is determinable within this spread» (Heisenberg, 1927, p. 77).

suficiente, al parecer, para asentar sus ideas, por lo que Heisenberg procede al despliegue de uno de los métodos más utilizados a lo largo de los casi diez años que corresponden a este trabajo de investigación, y que tiene que ver con la intención de agotar el discurso, en la medida de lo posible, estudiando todas las aristas en las que el sistema de ideas propuesto puede verse involucrado. El uso de experimentos imaginarios es lo que permite la agilización de este agotamiento del discurso, sin tener que esperar a la realización y confirmación de los experimentos reales. De manera que Heisenberg intenta demostrar, mediante otro experimento imaginario, los alcances de la incertidumbre, ahora aplicada a la medición de la energía del átomo:

«En los postulados de la teoría cuántica de Bohr, la energía de un átomo tiene la ventaja, sobre otros determinantes del movimiento (posición del electrón, por ejemplo, etc.), en que su valor numérico puede siempre ser dado. Esta posición preferencial que la energía posee sobre otras cantidades mecánico-cuánticas se debe solamente a la circunstancia de que representa una integral de las ecuaciones del movimiento para sistemas cerrados (la matriz de energía E , es constante). Para sistemas abiertos, en cambio, la energía no destaca sobre ninguna otra cantidad mecánico-cuántica. En particular, uno podrá ser capaz de diseñar experimentos en los cuales las fases, ν , del átomo son medidas con precisión, pero en los que la energía permanece indeterminada [...] Tales son los experimentos con resonancia fluorescente. Si uno irradia un átomo con una frecuencia propia, digamos $\nu_{12} = (E_2 - E_1)/h$, entonces el átomo oscila en la fase de la radiación externa; por tanto, en principio, no tiene sentido preguntar

en qué estado, E_1 o E_2 , se encuentra oscilando el átomo. La relación de la fase entre el átomo y la radiación externa puede ser determinada, por ejemplo, mediante las relaciones de fase de grandes números de átomos con radiación (experimento de Wood). Si uno prefiere evitar los experimentos con radiación, entonces se puede medir también la relación de la fase determinando la posición exacta del electrón tal y como en §1, en diferentes momentos del tiempo relativos a la fase de la luz que incide en los átomos» (Heisenberg, 1927, p. 77-8)¹¹.

Lo que el físico alemán persigue, como se ha dicho antes, es el agotamiento del discurso: la formulación de, uno tras otro, experimentos imaginarios que, pese a contener diferencias mínimas, avanzan todos hacia un mismo fin: el de cubrir todos los flancos en los

¹¹ «In Bohr's basic postulates of quantum theory, the energy of an atom has the advantage over other determinants of the motion (position of the electron, etc.) in that its numerical value can always be given. This preferred position which the energy has over other quantum-mechanical quantities it owes only to the circumstance that it represents an integral of the equations of motion for closed systems (the energy matrix E is a constant). For open systems, in contrast, the energy is not singled out over any other quantum-mechanical quantity. In particular one will be able to devise experiments in which the phases, φ , of the atom are precisely measured, but in which then the energy remains in principle undetermined [...] Resonance fluorescence is such an experiment. If one irradiates an atom with an eigenfrequency, say $\nu_{12} = (E_2 - E_1)/h$, then the atom vibrates in phase with the external radiation. Then, even in principle, it makes no sense to ask in which state, E_1 or E_2 , the atom is thus vibrating. The phase relation between atom and external radiation may be determined, for example, by the phase relations of large numbers of atoms with radiation (Wood's experiments). If one prefers to avoid experiments with radiation then one can also measure the phase relation by carrying out exact position determinations on the electron in the sense of §1 at different times relative to the phase of the light impinging (on many atoms)» (Heisenberg, 1927, p. 77-8).

que el Principio de Incertidumbre puede ser puesto en tela de duda. El experimento imaginario anterior vuelve a tratar la cuestión de la incertidumbre, esta vez desde la energía del átomo dentro del paquete de ondas. La enunciación de experimentos imaginarios, a estas alturas del documento, se convierte ya en una cuestión que ni siquiera necesita de una presentación previa: el experimento deviene parte natural de las explicaciones. No es un artificio agregado al planteamiento teórico o matemático, sino, en sí mismo, el cuerpo del planteamiento. Sin esas construcciones, sin su papel *corporizador* de las ideas, el texto sería débil, endeble y no llegaría ni, tan sólo, a expresar lo que el autor desea.

Apenas unas líneas más abajo, Heisenberg vuelve a referir otro experimento imaginario. Esta vez utiliza un planteamiento original de Niels Bohr, tal y como él mismo afirma, aunque sin proporcionar ninguna referencia bibliográfica. Este nuevo experimento imaginario está relacionado también con el experimento de Stern y Gerlach y apenas se desvía lo suficiente del planteamiento original del experimento de 1922 en el que el humo de un cigarrillo reveló el haz de luz de los electrones. Para Heisenberg, como se verá, la división del haz de luz en dos rayos, en el dispositivo de Stern y Gerlach, es equivalente, en cierta medida y aunque no lo afirme explícitamente, a la *interferencia* del microscopio de rayos gamma en la observación del electrón. Este *nuevo* experimento imaginario, que en realidad es una versión extendida del que se presentó, páginas antes, con respecto al fenómeno del *salto cuántico*, tiene una intención diferente de aquél: la de justificar la existencia de las matrices como formulación matemática de la mecánica cuántica otorgándoles el valor de encarnar un elemento propio de la configuración experimental, una suerte de muy previa noción de *completitud de una teoría*, en la manera en que Einstein, Podolsky y Rosen (1935) la enunciarían ocho años después.

El experimento comienza con el mismo planteamiento que el experimento del *salto cuántico*: « [...] los átomos de un rayo atómico de Stern-Gerlach son, en principio, excitados hasta cierto punto, mediante un haz de luz, hasta lograr la resonancia fluorescente. Después de un tramo del camino, que siguen a través de un campo magnético no homogéneo, la radiación que emerge de los átomos puede ser observada durante toda la trayectoria, antes y después del campo magnético» (Heisenberg, 1927, p. 78)¹². Luego se sucede lo mismo que en el experimento de Stern-Gerlach: el haz se divide. Es de ahí de donde Heisenberg extrae sus conclusiones:

«Antes de que los átomos entren en el campo magnético, tiene lugar la resonancia ordinaria; es decir, como en la teoría de la dispersión, debe asumirse que todos los átomos irradian ondas esféricas en fase con la luz incidente. A primera vista, esta noción contradice el resultado que la aplicación directa de la teoría cuántica de la luz, o de las reglas básicas de la teoría cuántica, proporcionaría. En consecuencia, mediante esta noción podemos concluir que sólo unos pocos átomos adquieren el “estado superior” mediante la absorción del cuanto de luz, y que, por tanto, toda la radiación de resonancia surge a partir de unos pocos centros de radiación intensiva [...] Después de que los

¹² «In a well-known idealized experiment proposed by Bohr, the atoms of a Stern-Gerlach atomic beam are first excited to a resonance fluorescence at a definite state by incident radiation [In einen bekannten von Bohr angegebenen Gedankenexperiment werden die Atome einer Gerlachschen Atomstrahls zunächst an einer bestimmten Stelle durch eigenstrahles Licht zur Resonanzfluoreszenz erregt]. After a little way they go through an inhomogeneous magnetic field. The radiation emerging from the atoms can be observed during the whole path, before and after the magnetic field» (Heisenberg, 1927, p. 78).

átomos hayan pasado el campo magnético, sin embargo, no puede haber duda de que el rayo atómico se ha dividido en dos rayos que corresponden, uno al estado superior, y otro al estado inferior. Si ahora el átomo que se encuentra en el estado inferior emitiera radiación, tendríamos una grave violación de la ley de conservación de la energía, dado que toda la energía de excitación reside en el haz cuyos átomos se encuentran en el estado superior» (Heisenberg, 1927, p. 78-9)¹³.

La clave, aquí, es la idea de la violación de la ley de conservación de la energía. Ahí reside la razón de la reformulación de este experimento imaginario: Heisenberg quiere llegar a la posibilidad de la violación de la ley de conservación de la energía para introducir, como elemento reparador, la matriz de su mecánica cuántica. Por ello continúa: «En el campo externo de radiación, las fases de los átomos están definidas. Por tanto, no tiene sentido hablar de la “energía del átomo”», dice Heisenberg, y continúa «Incluso, después de que el átomo ha dejado el

¹³ «Before the atoms enter the magnetic field, ordinary resonance takes place; that is, as in dispersion theory, it must be assumed that all atoms send out spherical waves in phase with the incident light. The latter view at first sight contradicts the result that a crude application of the quantum theory of light or the basic rules of quantum theory would give. Thus from this view one would conclude that only a few atoms are raised to the “upper state” through absorption of the light quantum, and that therefore the entire resonance radiation arises from a few intensively radiation centers [...] After the atoms have passed the magnetic field, however, there can hardly be any doubt that the atomic beam has divided into two beams of which one corresponds to atoms in the upper state, the other in the lower. If now the atom is in the lower state were to radiate, then we would have a gross violation of the law of conservation of energy. For all the energy of excitation resides in the beam with atoms in the upper state. Still less can there be any doubt that past the magnetic field only the “upper state” beam sends out light, and indeed incoherent light, from the few intensively radiation atoms in the upper state» (Heisenberg, 1927, p. 78-9).

campo de radiación uno no está en poder de decir que se encuentra en un estado estacionario definido, en tanto que uno indaga sobre las propiedades de coherencia de la radiación [...] Más allá del campo magnético, la energía de los átomos se encuentra definida y, por tanto, las fases están indeterminadas. La radiación resultante es incoherente y proviene sólo de los átomos en el estado superior. El campo magnético determina la energía y, por tanto, destruye la relación de la fase» (Heisenberg, 1927, p. 79)¹⁴. Hasta aquí se cumple su expectativa de la posibilidad de una violación de la ley de conservación de la energía así como la relación de todo esto con el Principio de Incertidumbre y el experimento inicial del microscopio de rayos gamma, y será, a partir de la necesidad de preservar la ley de conservación, que Heisenberg otorgará un lugar en *la realidad* a la matriz de energía. Por ello su conclusión es tan breve: ya ha ido asentando todo lo que quiere lograr: «El experimento imaginario de Bohr es una bella ilustración del hecho de que la energía del átomo en realidad no es un número, sino una matriz. La ley de conservación se sostiene para la matriz de energía, y por tanto, también para el valor de la energía tan precisamente como puede ser medido» (Heisenberg, 1927, p. 79)¹⁵.

Con cada experimento imaginario, Heisenberg hace avanzar el discurso de su texto: la narrativa, en general, sigue el hilo conductor de

¹⁴ «In the external radiation field the phases of the atoms are determined. Therefore it is meaningless to speak of the “energy of the atom”. Also, after the atom has left the radiation field one is not entitled to say that it is in a definite stationary state, insofar as one enquires about the coherence properties of the radiation. [...] Beyond the magnetic field the energies of the atoms are well determined and therefore the phases are indeterminate. The resulting radiation is incoherent and comes only from atoms in upper state. The magnetic field determines the energies and therefore destroys the phase relation» (Heisenberg, 1927, p. 79).

¹⁵ «Bohr’s idealized experiment is a very beautiful illustration of the fact that the energy of the atom “in reality” is not a number but a matrix. The conservation law holds for the energy matrix and therefore also for the value of the energy as precisely as it can be measured» (Heisenberg, 1927, p. 79).

la herramienta experimental imaginaria, y se mantiene en ese rumbo incluso cuando resulta excesivo: en algunos momentos, el discurso parece abordar otro nuevo experimento imaginario pero, conforme se avanza, es posible notar que la forma de explicar de Heisenberg se confunde con la narrativa con la que expone sus experimentos imaginarios. A pesar de esta similitud en la prosa, no hay problemas para identificar cuándo se trata de un experimento imaginario y cuándo se trata de una explicación que evoca la ocurrencia de algún fenómeno específico. Esta posibilidad se da o bien por las etiquetas puestas por el propio autor, *Gedankenexperiment* o *Paradoxon*, o bien por la composición de la narrativa experimental, basada en el planteamiento de un estado de cosas seguido de la obtención de un resultado final, que se analiza a la luz de las teorías propuestas.

Una paradoja es lo que Heisenberg refiere en el siguiente experimento imaginario, cuyo origen se remite a un artículo de Ehrenfest y Breit (1922) mediante el cual se pretende abordar la cuestión del tiempo en las mediciones cuánticas.

Se trata de un experimento imaginario bastante largo que implica la relación de dos elementos en un sistema, un rotor y una pieza deslizante. Aunque la imagen ofrecida es más bien macroscópica, se trata de elementos que deberían considerarse microscópicos: la forma *cercana* o *común* de las partes conformantes del planteamiento no busca extraer del texto nociones macroscópicas sino hacer *visible* una de las principales condiciones del experimento imaginario: el *emparejamiento* (*Kopplung*) de los dos elementos. En el planteamiento deviene importante la relación entre las dos piezas, que se encuentran conectadas como si se tratara de un mecanismo macroscópico, al menos en lo que respecta a la forma en que se conectan y los nombres que se les otorga. Dichas características remiten a una lectura que no corresponde a las partículas elementales, electrones, átomos o haces de luz sino, más bien, al

emparejamiento de los dos elementos, cuestión que resulta ser la más relevante del planteamiento:

«Un rotor, el cual visualizaremos como una rueda dentada, está provisto de un accesorio que, después de f revoluciones de la rueda, revierte la dirección de su rotación. La rueda se encaja con un deslizador dentado que se mueve sobre una línea recta entre dos bloques. El deslizador golpea uno de los bloques después de un definido número de rotaciones y , de esa manera, revierte la rotación de la rueda dentada. El periodo T real del sistema es grande en comparación con el periodo de rotación t de la rueda. Los niveles discretos de energía son, por consecuencia, densos y , mientras más densos sean, mayor será el valor de T [Die diskreten Energiestufen liegen entsprechend dicht, und zwar um so dichter, je größer T ist]. Desde el punto de vista de la consistente teoría cuántica, todos los estados estacionarios poseen el mismo peso estadístico. Por tanto, para un valor de T suficientemente grande, prácticamente todos los valores de energía ocurren con igual frecuencia, en oposición a lo que sería esperado para el rotor. Así, con el fin de determinar si el sistema se inclina por los valores discretos de energía que pertenecen, a menudo de forma exclusiva, únicamente al rotor, o bien si asumen con igual probabilidad todos los valores posibles (esto es, valores que corresponden al pequeño intervalo de energía h/T), basta un tiempo t_1 , que es pequeño en relación con T . En otras palabras, aunque el periodo largo no desempeña ningún rol en dichas mediciones, parece que se expresa en el hecho de que todos

los valores de energía posibles pueden ocurrir. Somos de la idea de que, también en la realidad, tales experimentos para la determinación de la energía total del sistema proporcionarían todos los valores de energía posibles con igual probabilidad. El factor responsable de este resultado no es el gran periodo T , sino el elemento deslizante. Aun si el sistema posee algunas veces una energía idéntica con el valor cuantizado de energía del rotor, puede modificarse fácilmente —mediante fuerzas externas que actúan en los bloques— hacia estados que no corresponden a la cuantización del rotor. El sistema emparejado [Das gekoppelte System], rotor más deslizador, muestra, de hecho, una periodicidad completamente diferente de aquélla que muestra el rotor [solo]» (Heisenberg, 1927, p. 81)¹⁶.

¹⁶ «A rotator, which we will visualize as a gear-wheel, is provided with an attachment which after f revolutions of the wheel exactly reverses the direction of its rotation. For example, let the gear-wheel mesh with a toothed sliding member which moves on a straight line between two stops. The slider hits a stop after a definite number of rotations and in that way reverses the rotation of the gear-wheel. The true period T of the system is long in comparison with the rotation period t of the wheel. The discrete energy levels are densely packed —and the denser the packing, the greater the value of T . From the standpoint of consistent quantum theory all stationary states have the same statistical weight. Therefore, for sufficiently great T , practically all energy values occur with equal frequency, in opposition to what would be expected for the rotator. Thus, in order to determine whether the system takes on the discrete energy values belonging to the pure rotator exclusively or particularly often, or whether it assumes with equal probability all possible values (that is, values which correspond to the small energy interval h/T), a time t_1 suffices which is small relative to T . In other words, although the long period plays no part at all in such measurements, it appears to express itself in the fact that all possible energy values can occur. We are of the view that, in reality also, such experiments for the determination of the total energy of the system would give all possible energy values with equal probability. The factor responsible for this outcome is not the big period T , but the sliding member.

Este *emparejamiento* del que habla Heisenberg no es, evidentemente, igual al concepto de *entrelazamiento* de Schrödinger, que no aparecerá sino hasta 1935, pero la referencia salta a la vista. La diferencia principal reside en que los elementos de la formulación de Heisenberg *funcionan* en conjunción desde un inicio, y no se obtienen los valores de las magnitudes de uno de los elementos al realizar mediciones en el otro, sino que, aquí, deviene necesario romper ese *emparejamiento* porque las propiedades de cada uno de los elementos se conjugan de tal forma que sólo separándolos puede ser posible establecer una medición precisa de las magnitudes del elemento que interesa (esa necesidad de romper el *emparejamiento* existe también en el *entrelazamiento* de Schrödinger, aunque por diferentes razones). Uno de los puntos fundamentales de este experimento imaginario es el de proporcionar un asidero *físico* a la relación de incertidumbre entre el tiempo y la energía ($E_1 t_1 \sim h$), partiendo, aunque no se explicita (ya en el cuerpo del documento se explicó esta relación), del experimento de Stern-Gerlach y del experimento de colisiones de Franck-Hertz. En el segundo caso, y como el propio Heisenberg explica, la medición de la energía del átomo se basa en la medición de la energía de los electrones en movimiento rectilíneo, dada la validez de la ley de conservación de la energía en la teoría cuántica; y, con respecto al experimento de Stern-Gerlach, escribe Heisenberg, la precisión en la medición de la energía decrece en tanto se acorta el tiempo en que el átomo se encuentra bajo la influencia del campo de deflexión (Heisenberg, 1927, p. 67). La solución, pues, tiene que ver con la separación de los elementos para que las magnitudes

Even if the system sometimes happens to have an energy identical with the quantized energy value of the simple rotator it can be modified easily –by external forces acting on the stop–to states which do not correspond to the quantization of the simple rotator. The coupled system, rotator-plus-slider, indeed shows a periodicity entirely different from that of the rotator» (Heisenberg, 1927, p. 81).

dejen de interactuar: debe prescindirse de una magnitud para obtenerse la otra:

«La solución de la paradoja reside en una circunstancia diferente. Cuando queremos medir la energía del rotor solamente, debemos primero romper el emparejamiento [*Kopplung*] entre el rotor y el deslizador. En la teoría clásica, cuando la masa del deslizador es suficientemente pequeña, el emparejamiento puede romperse sin cambiar la energía; y así, en consecuencia, la energía de todo el sistema puede ser igualada a la del rotor (para un deslizador con masa pequeña). En la mecánica cuántica, la energía de interacción entre el deslizador y el rotor es, al menos, del mismo orden de magnitud que el nivel de energía del rotor [...] Al solucionar el emparejamiento [bei Lösung der *Kopplung*], el deslizador y el rotor toman, individualmente, sus energías cuánticas características. Consecuentemente, en tanto que somos capaces de medir los valores de energía del rotor, siempre encontramos los valores cuánticos de energía con la precisión experimental. Aún para una masa infinitesimal como la del deslizador [Auch bei verschwindender Masse der Stange], sin embargo, la energía del sistema emparejado es diferente a la energía del rotor. La energía del sistema emparejado puede tomar todos los valores posibles (consistentes con la cuantización de T) con igual probabilidad» (Heisenberg, 1927, p. 81-2)¹⁷.

¹⁷ «The solution of the paradox lies rather in a different circumstance. When we want to measure the energy of the rotator alone, we must first break the coupling between the rotator and the slider. In classical theory, when the mass of the slider is sufficiently small, the coupling can be broken without a change in energy; and

Los experimentos imaginarios del artículo de Heisenberg tienen como objetivo tratar el Principio de Incertidumbre desde la *necesidad* de conciliar la mecánica cuántica con la experiencia. Estos experimentos imaginarios nacieron de las bien conocidas discusiones con Bohr durante los años de 1926 y 1927, en Copenhague, y también, como el propio Heisenberg afirmaría, de sus conversaciones con Einstein durante la primavera de 1926, tras el Coloquio de Física en la Universidad de Berlín. Según referencias del propio Heisenberg, durante aquellas conversaciones Einstein le dijo que es la teoría la que decide lo que *podemos* observar (Heisenberg, 2004, p. 89). Así, explica Jammer, «el punto de partida de Heisenberg fue la visión operacional de que un concepto científico es un código condensado de operaciones, y su significado, en última instancia, una relación definida entre impresiones sensoriales del observador. Porque, aseguraba, para entender el significado del concepto “lugar” o “posición” de una partícula, tal como un electrón, uno debe referirse a un experimento específico mediante el cual “la posición” será determinada; de otra manera, el concepto no tiene sentido» (Jammer, 1974, p. 63)¹⁸. Por su parte, Heisenberg

there, consequently, the energy of the entire system can be equated to that of the rotator (for small slider mass). In quantum mechanics the energy of interaction between slider and rotator is at least of the same order of magnitude as the level spacing of the rotator [...] On decoupling, the slider and the rotator individually take their characteristic quantum energies. Consequently, insofar as we are able to measure the energy values of the rotator alone we always find the quantum energy values with the experimental accuracy. Even for vanishing mass of the slider, however, the energy of the coupled system is different from the energy of the rotator. The energy of the coupled system can take on all possible values (consistent with the *T*-quantization) with equal probability» (Heisenberg, 1927, p. 81-2).

¹⁸ «His point of departure here was the operational view that a scientific concept is a condensed code of operations and its meaning, in the last analysis, a definite relation between sense impressions of the observer. For, he said, to understand the

concluye que «La física debe describir solamente las relaciones entre las observaciones. El verdadero estado de cosas puede expresarse así: Dado que todos los experimentos están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica, y, por tanto, a la ecuación $p_1q_1 \sim h$, se deduce que la mecánica cuántica establece el fracaso final de la causalidad» (Heisenberg, 1927, p. 83)¹⁹.

En su autobiografía, publicada en 1969, Heisenberg (2004) narra con un impresionante nivel de detalle aquella reunión en la casa de Einstein, en Berlín, ocurrida cuarentaidós años antes, en 1927. Se trata de un largo diálogo en el que las intervenciones de cada uno de los participantes se extienden durante varias páginas como si se tratara de una novela bien construida. La discordia de la discusión, según Heisenberg, tenía que ver con la idea de que la mecánica matricial debía basarse solamente en las magnitudes observables, idea que a Einstein le habría parecido descabellada, ya que «el hecho que debe ser observado origina una serie de acontecimientos en nuestro aparato de medición» dice Heisenberg que dijo Einstein, y «Como consecuencia de ellos, en dicho aparato tienen lugar eventos ulteriores que terminan provocando indirectamente la impresión sensorial y la fijación del resultado en nuestra conciencia» (Heisenberg, 2004, p. 89). Las respuestas de Heisenberg durante la referencia de aquella discusión versan sobre el hecho de que él había utilizado, para la elaboración de su artículo sobre la mecánica matricial en 1925, un enfoque similar al que habría usado

meaning of the concept “place” or “position” of a particle, such as an electron, one has to refer to a definite experiment by which “the position” is to be determined; otherwise the concept has no meaning» (Jammer, 1974, p. 63).

¹⁹ «Physics ought to describe only the correlation of observations. One can express the true state of affairs better in this way: Because all experiments are subject to the laws of quantum mechanics, and therefore to equation (1) [$p_1q_1 \sim h$], it follows that quantum mechanics establishes the final failure of causality» (Heisenberg, 1927, p. 83).

Einstein para deducir la Teoría de la Relatividad, es decir, que él había recordado cómo el análisis de la simultaneidad de eventos espacialmente separados resolvió las contradicciones en la óptica y la electrodinámica pre-relativista, aludiendo a que Einstein había hecho «hincapié en que no se puede hablar de tiempo absoluto, puesto que este tiempo absoluto no es observable» y que «Sólo los datos de los relojes –ya sea en un sistema de referencia o en reposo– son los que deciden la determinación del tiempo» (Heisenberg, 2004, p. 89). A decir de Heisenberg es, gracias a las ideas expresadas por Einstein en aquella conversación, que se fueron gestando tanto el artículo de 1927 como los experimentos imaginarios que lo componen.

Aunque en la bibliografía que se dedica a este periodo, o incluso la que se dedica a los experimentos imaginarios, el más citado es el experimento del microscopio de rayos gamma, el resto de formulaciones, que pueden parecer poco trascendentales, sirven a Heisenberg como método de comunicación del Principio de Incertidumbre: sin la encarnación de las relaciones de incertidumbre en esos experimentos imaginarios, quizá, su asentamiento en la mecánica cuántica habría sufrido considerables tropiezos. No debe olvidarse que, desde su formulación, fue Bohr quien presentó las primeras objeciones al texto (incluso referidas por Heisenberg en el mismo artículo, en la nota final), objeciones que llegaron a tomar una forma mucho más contundente en el artículo presentado ese mismo año en la conferencia de Como, en el centenario de Volta, como ya se ha mencionado antes. Quizá la influencia de los experimentos imaginarios como *prueba* y *testaferro* del valor y del funcionamiento del Principio de Incertidumbre fue lo que logró que, a pesar de esas primeras objeciones, las relaciones de incertidumbre fueran incluidas en el libro de texto de Hermann Weyl, publicado en 1928, *Gruppentheorie und Quantenmechanik (The Theory of Groups and Quantum-Mechanics)*, apenas un año después del turbulento

1927 en el que, además del artículo de Heisenberg y la comunicación de Bohr en Como, se sucedió la primera discusión pública entre Einstein y Bohr en la V Conferencia de Solvay, con los correspondientes experimentos imaginarios.

El asentamiento de las relaciones de incertidumbre entre posición y momento ($\Delta p \Delta q \sim \hbar$), y entre tiempo y energía ($\Delta E \Delta t \sim \hbar$), estaría respaldado, además de por su formulación matemática, por la enunciación de los experimentos imaginarios: cada uno cumpliría una función de respaldo para cada una de las relaciones de incertidumbre planteadas por Heisenberg y para cada una de las ideas subyacentes que soportan el andamiaje de su formulación: ya se trate de los *saltos cuánticos* y el carácter discreto de la energía, o de la importancia del paquete de ondas, o bien de las relaciones $\Delta p \Delta q \sim \hbar$ y $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ o bien de la ley de la conservación de la energía, los experimentos imaginarios planteados ofrecen un respaldo importante para que Heisenberg pueda concluir que la mecánica cuántica establece el fracaso final del concepto de causalidad tal y como lo explica la teoría clásica.

Pero habría otra discusión a partir de 1927, quizá más breve, o circunscrita a un ámbito más cerrado, además de las ya conocidas entre Einstein y Bohr, o entre Heisenberg y Einstein: la discusión entre Bohr y Heisenberg en torno a la naturaleza y el alcance de las relaciones de incertidumbre. Desarrollada en un ámbito mucho más privado aún, las conversaciones entre Bohr y Heisenberg a raíz de la publicación del artículo donde se exponía el Principio de Incertidumbre estuvieron mediadas, en buena parte, por la presencia de Pauli, que había acogido con buenos ojos las ideas de Heisenberg. Sin embargo, la discordancia se mantuvo incluso después de la publicación del Principio de Complementariedad de Bohr.

Uno de los puntos más importantes de aquellas discusiones es el anclaje del propio Principio de Incertidumbre, es decir, la particularidad

de la teoría en la que reside la incertidumbre. Hacia el final del artículo, Heisenberg escribe que, de acuerdo con los comentarios de Bohr, la incertidumbre no surge exclusivamente de las discontinuidades, sino que se encuentra ligada al hecho de que se atribuye la misma validez a los experimentos que muestran la imagen corpuscular, por un lado, y la imagen ondulatoria, por el otro (Heisenberg, 1927, p. 83)²⁰. La noción de Heisenberg sí estaba basada en las discontinuidades, como él mismo explica en el artículo, es decir, la incertidumbre viene dada por el carácter discontinuo de los fenómenos, la limitación de la aplicabilidad de las nociones clásicas como momento y posición a los fenómenos microfísicos y los aspectos corpuscular y ondulatorio (ambos aspectos de una misma realidad física). La noción de Bohr, en cambio, estaba basada en que la existencia de dos lenguajes capaces de explicar una misma realidad, pero cuya aplicabilidad simultánea era imposible, aún a pesar de que ésta era la única forma de obtener una descripción completa de los fenómenos físicos (Jammer, 1974, p. 65-6). En medio de aquellas primeras discusiones entre Bohr y Heisenberg resonaban las trayectorias de los electrones dentro de la cámara de niebla de Wilson, que Einstein usaría durante la quinta Conferencia de Solvay para intentar rebatir el Principio de Incertidumbre. No obstante, el eco mayor lo proporcionarían los experimentos imaginarios propuestos en las discusiones: fotones, rendijas, cajas y relojes.

Si bien es cierto que una de las características de la teoría cuántica que no convencía a Einstein, ni a otros físicos, era su carácter probabilista, la idea expresada por Heisenberg de que la causalidad había encontrado su fin, golpeó con fuerza en su conciencia. Los conceptos

²⁰ «Above all, the uncertainty in our observation does not arise exclusively from the occurrence of discontinuities, but is tied directly to the demand that we ascribe equal validity to the quite different experiments which show up in the corpuscular theory on one hand, and in the wave theory on the other hand» (Heisenberg, 1927, p. 83).

de *incertidumbre* (*Uncertainty*, *Unsicherheit*) y de *indeterminación* (*Indeterminateness*; *Unbestimmtheit*), generarían buena parte de la polémica. Las acepciones de dichos términos serían objeto de revisión, quizá no de forma directa, pero estarían siempre presentes en los experimentos imaginarios hasta 1935 con el artículo de Einstein, Podolsky y Rosen. La considerable diferencia entre la *incertidumbre*, la ausencia de conocimiento de los valores de los observables, y la *indeterminación*, la ausencia de los valores de los observables independientemente del observador (Jammer, 1974, p. 61) sería un punto clave en los últimos años de la discusión, abordado por Grete Hermann en 1935, en un artículo al cual no se le prestó demasiada atención.

Los elementos utilizados por Heisenberg, lejos de desaparecer o desvanecerse en el tiempo, permanecieron subyacentes en las formulaciones imaginarias posteriores, arrastrando ideas y concepciones que llevarían, poco a poco, a la formulación del concepto de *entrelazamiento*.

La discusión pública: el eco del centenario de Alessandro Volta. El Principio de Complementariedad: las brumas del norte. El raudo otoño del 1927. La quinta Conferencia de Solvay. La primera irrupción de C. G. Darwin: 1929. La sexta Conferencia de Solvay. El público privado. La retórica del experimento imaginario.

De las discusiones entre Bohr y Heisenberg, a principios de 1927, a la conferencia en Como, Italia, en el último tercio del mismo año, los meses se estiraron para acoger un debate que, luego, se extendería durante décadas.

De forma apresurada, como explica Rosenfeld (1971), Bohr preparó un documento breve en el cual esbozaba las ideas del Principio de Complementariedad, y que presentaría en la conferencia de Como, Italia, en el ya mencionado centenario de Alessandro Volta. Es ya bien sabido que aquella fue la ocasión en que se presentó por primera vez la Complementariedad, y ocasión, también, en que Einstein no se encontraba presente en el foro. No se discutirá aquí la naturaleza de las ideas de Bohr, ya que no es la intención de este trabajo. No obstante, algunos de los señalamientos del físico danés incomodarían a Einstein, tal y como lo habría hecho el artículo de Heisenberg sobre el Principio de Incertidumbre (1927). Dichas ideas expresadas por Bohr tenían que ver con la discontinuidad de los procesos atómicos y la necesaria renunciación a la coordinación causal espacio-tiempo para los procesos atómicos (Bohr, 1928, p. 88). Aunque para Bohr no podía haber ninguna duda sobre la aplicación independiente de las ideas de espacio y tiempo, por un lado, y de la de causalidad, por el otro (Bohr, 1928, p. 91), las dos nociones de la naturaleza de la luz son consideradas como diferentes intentos de interpretar la evidencia experimental en la cual la limitación de los conceptos clásicos se expresa en forma complementaria (Bohr, 1928, p. 91). Por tanto, sólo mediante la interacción de las partículas elementales con otro sistema pueden ser definibles y observables las propiedades de dichas partículas en la teoría cuántica (Bohr, 1928, p. 92), debido a que dicha interacción entre lo que se observa y el agente de observación (microscopio, por ejemplo) conlleva la correspondiente relación de incertidumbre postulada por Heisenberg. Por esto, explica Bohr, para una descripción más detallada de la interacción entre los elementos individuales se debe recurrir a un procedimiento que permita tomar en cuenta el emparejamiento de los elementos (Bohr, 1928, p. 97).

Este emparejamiento entre el instrumento de medición y el objeto medido, tal y como lo propuso Heisenberg en el último

experimento imaginario de su artículo de 1927, guarda una semejanza considerable con el concepto de emparejamiento que luego, en 1935, utilizará Schrödinger, y que lo llevará, finalmente, a la formulación del *entrelazamiento*. La idea de que tanto el objeto observado como el instrumento de medición se conectan mediante la interacción del proceso de observación no es únicamente propia de la formulación, en 1935, del experimento imaginario de EPR: se trata de una idea que, como puede verse aquí, venía gestándose, en este contexto, desde finales de la década de 1920.

En el documento de Bohr, que fue reescrito y publicado en 1928 en la revista *Nature*, se menciona solamente un experimento imaginario: el microscopio de rayos gamma. Quizá porque se trata de la formulación que mejor encarna el espíritu del Principio de Incertidumbre, quizá porque su construcción era la más sólida, o tal vez porque Bohr conocía los puntos débiles del planteamiento original, y por el peso específico del uso del Efecto Compton, el microscopio de rayos gamma se convirtió en el experimento imaginario por excelencia para hablar de las relaciones de incertidumbre. Bohr, no obstante, pasa por encima del experimento con poco detalle y le otorga una importancia menor en relación con el intenso armazón de ideas que presenta en el documento. Así es como Bohr refiere el experimento imaginario de Heisenberg:

«Por una parte, las coordenadas de una partícula pueden ser medidas con cualquier grado de precisión deseado mediante el uso, por ejemplo, de un instrumento óptico, provisto de una radiación con una longitud de onda suficientemente corta, sin embargo, la dispersión de la radiación del objeto siempre está conectada con un cambio finito en el momento, el cual es tan grande como pequeña sea la

longitud de onda de la radiación utilizada. El momento de una partícula, por otro lado, puede determinarse con cualquier grado de precisión deseado mediando la medición, por ejemplo, del Efecto Doppler de la radiación dispersa, dado que la longitud de onda de la radiación es tan grande que el efecto del retroceso puede ser obviado, pero entonces la determinación de las coordenadas espaciales de las partículas deviene correspondientemente menos precisa» (Bohr, 1928, pp. 97-8)²¹.

Aunque ésta es la única referencia explícita del planteamiento del experimento imaginario de Heisenberg, el documento de Bohr dedica varias páginas a una detallada y extensa evaluación de sus implicaciones desde todas las aristas posibles, en la manera en que lo hace Heisenberg en su artículo, con la diferencia de que Bohr no vuelve a abordar ningún experimento imaginario. Tras la reunión en Como, la polémica se abrió, y Einstein no faltó a la siguiente cita: la V Conferencia de Solvay, un mes después.

Sin embargo, dado que, en primer término Einstein poseía ya de primera mano la referencia del artículo de Heisenberg, preparaba ya una respuesta en el mes de mayo: una comunicación a la Academia Prusiana de Ciencias que nunca llegó a publicarse porque, en la formulación, se

²¹ «On one hand, the co-ordinates of a particle can be measured with any desired degree of accuracy by using, for example, an optical instrument, provided radiation of sufficiently short wave-length, however, the scattering of radiation from the object is always connected with a finite change in momentum, which is the larger the smaller the wave-length of the radiation used. The momentum of a particle, on the other hand, can be determined with any desired degree of accuracy by measuring, for example, the Doppler effect of the scattered radiation, provided the wave-length of the radiation is so large that the effect of recoil can be neglected, but then the determination of the space co-ordinates of the particles becomes correspondingly less accurate» (Bohr, 1928, pp. 97-8).

hace patente uno de los problemas que más preocuparían a Einstein con respecto a la formulación de la mecánica cuántica: el entrelazamiento.

Aunque a finales de la década de 1920 el término *entrelazamiento* no existía en la medida y en la forma en que sería utilizado luego por Schrödinger en 1935, y en las contadas ocasiones en que se empleó (por Heisenberg y por Bohr, pero antes por Walter Bothe en 1926), el término escogido fue *emparejamiento* (*Kopplung*, en alemán), la noción de la acción-a-distancia como causa subyacente del carácter probabilista de la teoría cuántica era una de las principales preocupaciones de Einstein: la incertidumbre sería un síntoma, mientras que la acción-a-distancia (*entrelazamiento* o *emparejamiento*) sería la enfermedad subyacente (Howard, 2007, p. 12).

En la conferencia frente a la Academia Prusiana de Ciencias, Einstein explicó un modelo de variables ocultas que pretendía evadir la cuestión estadística mediante la evasión del emparejamiento: «He encontrado que el esquema no satisface un requisito general que debe ser impuesto en una ley general del movimiento de los sistemas. // Consideremos, en particular, un sistema Σ que consiste en dos subsistemas energéticamente independientes, Σ_1 y Σ_2 ; esto significa que la energía potencial, así como la energía cinética, se encuentra compuesta de dos partes aditivas, la primera de las cuales contiene cantidades referentes sólo a Σ_1 , la segunda posee cantidades referentes sólo a Σ_2 . Entonces, es bien sabido que $\psi = \psi_1 \cdot \psi_2$, donde ψ_1 depende solamente de las coordenadas de Σ_1 , y ψ_2 solamente de las coordenadas de Σ_2 . En este caso, debemos demandar que los movimientos del sistema compuesto sean combinaciones de posibles movimientos de los subsistemas» (Einstein 1927a, citado en Howard, 2007, p. 11)²². Sin

²² «I have found that the schema does not satisfy a general requirement that must be imposed on a general law of motion for systems. // Consider, in particular, a system Σ that consists of two energetically independent subsystems, Σ_1 and Σ_2 ; this

embargo, su procedimiento no pudo deshacerse del concepto de la acción-a-distancia mediante el uso de las variables ocultas, y la versión escrita de aquella conferencia no llegó a publicarse, quizá por la aparición de una carta que Heisenberg le envió en el mes de junio de ese año. Pero en Einstein la incomodidad del *emparejamiento, entrelazamiento o acción-a-distancia* ya estaba haciendo mella.

Ya en mayo de 1927, Heisenberg había escrito a Einstein para conocer su opinión sobre su artículo del Principio de Incertidumbre. Heisenberg sabía, mediante Bohr, que Einstein no había aceptado de buena gana las relaciones de incertidumbre, y le escribió preguntándole si ya había diseñado algún experimento que contradijera el Principio de Incertidumbre (Jammer, 1974, p.126). Poco después, en el mes de junio, Heisenberg escribió una nueva carta a Einstein donde le proponía un experimento imaginario en el cual una partícula era difractada por una rejilla cuya separación entre cada línea consecutiva era mucho más larga que el tamaño de la partícula moviéndose lentamente:

«De acuerdo con tu teoría, la partícula será reflectada en una dirección discreta definida en el espacio. Si conocías la trayectoria de la partícula, podrías, en consecuencia, calcular dónde golpea la rejilla y colocar un obstáculo que la refleje en una dirección elegida arbitrariamente, independiente de las otras líneas de la rejilla...Pero, en realidad, la partícula será reflectada en esa dirección discreta definida. Esta

means that the potential energy as well as the kinetic energy is additively composed of two parts, the first of which contains quantities referring only to Σ_1 , the second quantities referring only to Σ_2 . It is then well known that $\psi = \psi_1 \cdot \psi_2$, where ψ_1 depends only on the coordinates of Σ_1 , ψ_2 only on the coordinates of Σ_2 . In his case we must demand that the motions of the composite system be combinations of possible motions of the subsystems» (Einstein 1927, citado en Howard, 2007, p. 11).

inconsistencia podría evitarse sólo al relacionar el movimiento de la partícula con su correspondiente onda de de Broglie [la cual, debido a la pequeña velocidad que se asume para la partícula, es del orden de magnitud de la constante de la rejilla]. Esto significaría, sin embargo, que se asume que el tamaño de la partícula, es decir, el rango de sus fuerzas interactivas, depende de su velocidad. Esto representa el abandono del término “partícula” y no concuerda, creo, con el hecho de que, en la ecuación de Schrödinger o en la función de Hamilton de la mecánica matricial, la energía potencial esté representada mediante la expresión simple e^2/r . Si usas el término “partícula” en una forma tan liberal, considero muy posible que la trayectoria de una partícula pueda ser definida. Pero entonces, la gran sencillez con la cual la mecánica cuántica estadística describe el movimiento de una partícula, en la medida en que uno puede hablar de tal movimiento, en mi opinión, se ha perdido. Si te entiendo correctamente, estarías completamente listo para sacrificar esta sencillez con el fin de salvar el principio de causalidad» (Carta de Heisenberg a Einstein, 10 de junio de 1927, citado en Jammer, 1974, p. 126)²³.

²³ «According to your theory the particle will be reflected in a definite discrete direction in space. If you knew the path of the particle, you could consequently compute where it hits the grating and place there an obstacle which reflects it in an arbitrarily chosen direction, independent of the other lines of the grating...But in reality the particle will be reflected in that definite discrete direction. This inconsistency could be avoided only by relating the motion of the particle with its de Broglie wave [which because of the assumed small velocity of the particle is of the order of magnitude of the grating constant]. This would mean, however, that the size of the particle, that is, the range of its interacting forces, is assumed to depend on its velocity. This amounts to abandoning the term “particle” and does

El experimento de la carta de Heisenberg es una versión de una de las formulaciones imaginarias de su artículo sobre el Principio de Incertidumbre. En concreto, se trata del quinto experimento imaginario que presenta en el artículo, la reflexión de un rayo de electrones en una rejilla (Heisenberg, 1927, p. 76). La variación, sin embargo, es interesante, y quizá sea posible extraer, a partir de aquí, algunos elementos de las formulaciones que, más tarde en ese mismo año, Einstein presentaría en la V Conferencia de Solvay. En primer término, Heisenberg cambia su haz de electrones por una sola partícula, y propone que, al saber dónde golpeará la partícula en la rejilla, se coloque un *obstáculo* que la refleje en una dirección arbitraria elegida. Estos elementos clave aparecerían, luego, en las formulaciones imaginarias de Einstein, en el experimento conocido como *photon-and-slit*.

Al tiempo, en Copenhague, la bruma del entrelazamiento ya se extendía sutilmente sobre la física cuántica aunque, eso sí, oculta tras los avatares de una polémica que, aparentemente, se ocupaba de otros temas: la incertidumbre, la indeterminación, la causalidad, la cuestión probabilista. Bohr también se había encontrado con los indicios de alguna forma del entrelazamiento, una suerte de violaciones de la descripción espacio-temporal que se traduciría en esa conexión a distancia entre dos sistemas o dos partículas: en 1920, un trabajo de Carl Ramsauer evidenció la noción contra-intuitiva de que la sección

not tally, I think, with the fact that in the Schrödinger equation or in the Hamilton function of matrix mechanics the potential energy is represented by the simple expression e^2/r . If you use the term "particle" in such a liberal way, I deem it well possible that the path of a particle can be defined. But then the great simplicity with which statistical quantum mechanics describes the motion of a particle, as far as one can speak of such motion, is in my opinion lost. If I understand you correctly, you would be readily prepared to sacrifice this simplicity to save the principle of causality» (Carta de Heisenberg a Einstein, 10 de junio de 1927, citado en Jammer, 1974, p. 126).

transversal de la dispersión de electrones que pasan a través de ciertos gases nobles tiende a cero en tanto que la velocidad del electrón se reduce (Ramsauer, 1920). De esta manera, como afirma Howard (2007), Bohr sospechó que una variedad de fenómenos no-clásicos encontrarían su explicación en la violación de suposiciones clásicas sobre la independencia mutua de sistemas que interactúan, o, en términos de Bohr, en el fallo de una «descripción ordinaria del espacio-tiempo» (Howard, 2007, p. 12). El entrelazamiento se vislumbraba, nebulosamente, como resultado de alguna violación de los principios de la causalidad espacio-temporal de la teoría clásica, pero todavía no llegaría a trascender por completo.

En cambio, los puntos fundamentales de las ideas que Bohr presentó en la conferencia de Como en septiembre de 1927 marcan el punto de partida de la discusión que, en adelante, utilizará los experimentos imaginarios como arena de lucha. Estos elementos, desmenuzados y esquematizados en Jammer (1974, p. 101), pueden encontrarse tanto en el artículo de Heisenberg de 1927 como en los posteriores trabajos relacionados con la discusión sobre la mecánica cuántica: (1) Indivisibilidad del cuanto de acción (postulado cuántico); (2) Discontinuidad (o individualidad) de los procesos elementales; (3) Incontrolabilidad de la interacción entre objeto e instrumento; (4) Imposibilidad de una descripción (estricta) espacio-temporal, y al mismo tiempo, una descripción causal y (5) Renunciación del modo clásico de descripción (Jammer, 1974, p. 101). Si bien estos cinco puntos resumen las ideas principales de Bohr expresadas en torno a la Complementariedad, también son los elementos que suscitarían más críticas y discusiones y que encontrarían, en la enunciación de los experimentos imaginarios, la forma de hacerse visibles entre la bruma.

Antes de hablar en concreto de lo que sucedió en las Conferencias de Solvay, es importante hacer una aclaración de carácter metodológico. Desde el punto de vista del trabajo del historiador, las Conferencias de Solvay se encuentran al alcance de la mano en los volúmenes publicados por Gauthier-Villars. No obstante, el valor de esta fuente debe ponerse bajo consideración. Las comunicaciones presentadas por cada científico durante las conferencias fueron reunidas y editadas en un volumen que, a su vez, contiene la transcripción de las discusiones que tenían lugar al final de cada una de las ponencias. La publicación, sin embargo, hubo de esperar a que dichas transcripciones fueran enviadas a cada uno de los participantes, de manera que pudieran realizar correcciones de sus propios comentarios, que serían devueltas a los editores para publicarse así como versión definitiva. De esta forma, los documentos impresos en los volúmenes publicados en 1928 y 1932 (para las conferencias de 1927 y 1930, respectivamente) no muestran las verdaderas discusiones que tuvieron lugar entre los participantes²⁴. De la misma manera, las principales aportaciones a estas controversias, especialmente las de Einstein, son referidas por Niels Bohr en 1949, en su texto *Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*; estas y otras discusiones que tuvieron lugar en Solvay, han sido referidas en otros volúmenes a cuenta de diferentes científicos participantes. Resulta, pues, que las versiones conocidas sobre los experimentos imaginarios durante las dos Conferencias de Solvay que aquí interesan han estado sujetas o bien a modificaciones, o bien a la memoria de los participantes.

No obstante, es la propia naturaleza de los experimentos imaginarios lo que permite que sean posibles situaciones como ésta: la

²⁴ Se extiende un agradecimiento al Profesor Xavier Roqué, quien tuvo acceso directo a esta información, por haberla compartido conmigo.

perfectibilidad de las formulaciones se pone a prueba cada vez que se revisa el ejercicio experimental, lo que da pie a que el científico corrija, reformule y reescriba el proceso completo y sus detalles con el obvio objetivo de dotarlo de solidez, de elaborar una versión más robusta. Algunas de las formulaciones son diseños muy bien estudiados, ideas sobre las que se ha reflexionado con calma; otras, en cambio, son resultado de la propia discusión, y se construyen en el momento en que la misma controversia lo demanda, de manera que pueden contener *fallos* o no encarnar por completo las ideas que se desean expresar. Los experimentos imaginarios que Bohr refiere en su texto de 1949 provienen de la referencia de los volúmenes editados como resultado de las Conferencias de Solvay, de manera que no se trata, por completo, de un ejercicio de memoria.

El día 24 de octubre de 1927, por la mañana, dieron comienzo las lecturas de la V Conferencia de Solvay. El primero en exponer su participación fue W. L. Bragg, tratando el tema de la difracción de los rayos X; después, Arthur H. Compton ofreció una conferencia en torno a la teoría electromagnética de la radiación, seguido de Louis de Broglie, con una ponencia titulada *La nueva dinámica de los cuantos* en la que proponía la idea de la existencia de una *onda piloto*, una forma reducida de su teoría ondulatoria previa. Intentaba ofrecer una teoría determinista para los fenómenos atómicos que, ante las objeciones de Pauli, que refirió un experimento imaginario de Fermi, de 1926, no logró interesar a los asistentes al congreso. La respuesta de Pauli a la exposición de de Broglie tuvo lugar en la discusión final del encuentro en el marco de la controversia entre Bohr y Einstein. Este experimento imaginario resulta interesante, más allá de su formulación, por el valor de su uso. Es decir, aunque la propuesta de la *onda piloto* de de Broglie no poseía en sí misma suficiente fuerza como para sustituir, o emparejar siquiera, la influencia de la función- ψ y, a pesar, incluso, de que, aparentemente, los asistentes

al congreso no se interesaron demasiado por la proposición, Pauli tomó la palabra para, evocando el trabajo de Fermi, debilitar la noción de de Broglie. Se trata de la colisión entre una partícula de masa m , que se mueve a lo largo del eje x , y un rotor rígido. Mediante una formulación matemática (que puede encontrarse en Fermi, 1926), la colisión se reduce a una difracción de la partícula. La objeción de Pauli residía en que, al aplicar a este caso la propuesta de la *onda piloto*, se obtenía un resultado incompatible con las exigencias del postulado de la teoría cuántica, es decir, que el rotor se encontrase en un estado estacionario antes y después de la colisión (Pauli, 1928, pp. 280-2). No obstante, esta pequeña participación no llegó demasiado lejos, ya que la verdadera intención del encuentro iba hacia otros terrenos.

Tras la participación de de Broglie, llegó el turno para Born y Heisenberg (1928), quienes trataron la mecánica matricial y sentenciaron, a manera de dictamen final, que la mecánica cuántica era un teoría completa no susceptible a modificaciones. El principal elemento de la comunicación pasaba por aceptar la existencia de discontinuidades introduciendo «naciones nuevas mediante un análisis preciso de lo que es *esencialmente observable*» (Mehra, 1975, p. 146, énfasis del autor). Ambos físicos señalaban que «la mecánica cuántica está caracterizada por dos tipos de discontinuidades: la existencia de partículas y de estados estacionarios; además, estas discontinuidades introducen un elemento estadístico que resulta sumamente importante para sus cimientos» (Mehra, 1975, p. 146). Sin embargo, el principal objetivo de la comunicación era el de presentar dicho formalismo matemático: la mecánica matricial, a la que se había llegado debido a los «infructuosos intentos de establecer una teoría de la radiación para un átomo excitado desde el punto de vista de la física clásica» (Mehra, 1975, p. 146). Una vez planteado el formalismo matemático, Born y Heisenberg debieron mostrar las dificultades que, contra los beneficios

ya establecidos, presentaba el esquema de las matrices: la principal de estas dificultades era la incapacidad para tratar cantidades no periódicas, es decir, sistemas cerrados, o sea, no podía predecir si determinado estado del sistema *existe*, sino solamente la *posibilidad de su existencia* (Mehra, 1975, p. 148, énfasis agregado). Para explicar la situación utilizaron un caso especial, a manera de ejemplo físico, que consideraba un sistema cerrado separado en dos partes distintas que, luego, habrían de interactuar una con la otra. En el ejemplo, una vez que los dos sistemas han interactuado, el intercambio de energía puede ser interpretado, decían Born y Heisenberg, de dos formas distintas: (1) la periodicidad del primer sistema posee un periodo largo, por tanto la energía fluctúa según la duración de dicho periodo, y (2) existen discontinuidades, y por ello, la transmisión de energía de un sistema a otro, durante la interacción, sucede mediante *saltos cuánticos* (Born & Heisenberg, 1928, pp. 174-7; ver también Mehra, 1975, p. 148). En relación con esto, los físicos explicaron que las nociones de velocidad, posición, momento, energía, etc., podía ser bien definidas mientras se consideraran individualmente, sin embargo, no resultaría posible, dentro del esquema cuántico, medir simultáneamente con precisión indefinida ninguna de estas magnitudes. De esta manera, aseguraban, podían ajustarse al Principio de Complementaridad de Niels Bohr.

Después de Born y Heisenberg llegó el turno de Schrödinger, quien ofreció una conferencia sobre la mecánica ondulatoria. No fue sino al final de la jornada cuando Lorentz dio paso a la discusión, después de mostrar su descontento con el rechazo que la teoría cuántica hacía del determinismo (es importante recordar que Lorentz pertenecía a una generación más cercana a la de Einstein que a la de Bohr y Heisenberg) y dio la palabra a Bohr para que expusiera sus ideas sobre el estado actual de la teoría cuántica. Bohr repitió los principales preceptos

del documento que, un mes antes, había leído en Como, y procedieron a la discusión más informal.

En su participación, Max Born ofreció un experimento imaginario que, como afirmó, había sido formulado por Einstein: «Un elemento radioactivo emite partículas alfa en todas las direcciones; esto se hace visible mediante una cámara de Wilson; si, ahora, una onda esférica es asociada con cada acto de emisión, ¿cómo puede entenderse que el rastro de cada partícula aparezca como una línea (casi) recta? En otras palabras: cómo puede el carácter corpuscular de un fenómeno ser reconciliado con su representación en términos de ondas?» (Born, 1928, pp. 250-3)²⁵. Fue entonces cuando Born, con la enunciación de este pequeño experimento imaginario, puso sobre la mesa el tema que más interesaba a todos: la dualidad onda-corpúsculo, lo que desembocó en el momento en que Einstein inició su participación en la discusión. Es entonces cuando se plantea el conocido experimento imaginario del fotón y la rendija (*photon-and-slit*):

«Sea S una pantalla donde se realizó una pequeña abertura O, y P una placa fotográfica en forma de semiesfera de radio grande. Supongamos que los electrones caen en S en la dirección de las flechas. Algunos de estos electrones pasan a través de O; debido a la pequeñez de la abertura y la velocidad de las partículas, se distribuyen uniformemente en todas las direcciones e inciden sobre la placa. Las siguientes consideraciones son comunes a ambos modos de

²⁵ «A radioactive element emits alpha-particles into all directions; these are made visible by means of a Wilson chamber; if, now, a spherical wave is associated with every act of emission, how can it be understood that the trace of each alpha-particle appears as an (almost) straight line? In other words: how can the corpuscular character of a phenomenon be reconciled with its representation in terms of waves?» (Born, 1928, pp. 250-3).

concebir la teoría. Hay ondas de de Broglie que caen casi normalmente en S y son difractados en O. Más allá de O hay ondas esféricas que llegan a la pantalla P y la intensidad en P proporciona la medida de lo que incide en la pantalla» (Einstein, 1928, p. 253-4)²⁶.

Esta formulación se encuentra ligada a la proposición de dos diferentes interpretaciones que pueden adoptarse, según Einstein, con respecto al dominio de validez de la teoría cuántica: «Interpretación I: *la teoría no proporciona ninguna información sobre los procesos individuales, sino solamente sobre un ensamble de una infinidad de procesos elementales*» e «Interpretación II: *la teoría alude a que es una teoría completa de los procesos individuales*» (Einstein,

²⁶ «Soit S un écran dans lequel on a pratiqué une petite ouverture O, et soit P une pellicule photographique en forme de demi-sphère de grand rayon. Supposons que des électrons tombent sur S dans la direction des flèches. Une partie de ces électrons passe par O; à cause de la petitesse de l'ouverture et de la vitesse des particules, ils se répartissent uniformément sur toutes les directions et vont agir sur la pellicule. // Les considérations suivantes sont communes aux deux manières de concevoir la théorie. Il y a des ondes de de Broglie qui tombent à peu près normalement sur S et sont diffractées en O. Au delà de O on a des ondes sphériques qui atteignent l'écran P et dont l'intensité en P donne la mesure de ce qui se passe en cet endroit» (Einstein, 1928, p. 253-4). La versión de Bohr es la siguiente: «A particle (electron or photon) penetrating through a hole or a narrow slit in a diaphragm placed at some distance before a photographic plate. // On account of the diffraction of the wave connected with the motion of the particle and indicated in the figure by the thin lines, it is under such conditions not possible to predict with certainty at what point the electron will arrive at the photographic plate, but only to calculate the probability that, in an experiment, the electron will be found within any given region of the plate. The apparent difficulty, in this description, which Einstein felt so acutely, is the fact that, if in the experiment the electron is recorded at one point A of the plate, then it is out of the question of ever observing an effect of this electron at another point (B), although the laws of ordinary wave propagation offer no room for a correlation between two such events» (Bohr, 1949, p. 20).

1928, p. 254)²⁷. De acuerdo con la Interpretación I, dado que la ecuación de ondas no representa una partícula individual, sino un ensamble de partículas, entonces $|\psi(r)|^2$ expresa la probabilidad de que, en r , exista *alguna* partícula del ensamble (Einstein, 1928, p. 256). Por otro lado, con respecto a la Interpretación II, si la mecánica cuántica es una teoría completa de los procesos individuales, cada partícula que se mueve hacia la pantalla se describe como un paquete de ondas, el cual, tras la difracción, llega a un determinado punto P en la pantalla, y $|\psi(r)|^2$ representa la probabilidad de que, en un momento dado, una partícula se muestre presente en r (Einstein, 1928, p. 256). La objeción principal de Einstein se dirigía a la segunda interpretación: «La interpretación II, de acuerdo con la cual $|\psi|^2$ expresa la probabilidad de que *esta* partícula esté situada en un determinado lugar, presupone un mecanismo muy particular de acción a distancia, el cual podría evitar que la onda se propagase continuamente por el espacio y actuase en *dos* lugares de la pantalla... En mi opinión, la Interpretación II de $|\psi|^2$ implica una contradicción con el postulado de la relatividad» (Einstein 1928, 255-6)²⁸. Es decir, dado que la localización de la partícula es una potencialidad, debe existir una acción-a-distancia que evite que la onda continúe propagándose en la pantalla y pueda ser posible ver la partícula en dos lugares a la vez. De lo que Einstein concluye que, si sólo se utiliza la ecuación de Schrödinger y no se establece una localización

²⁷ «Interpretation I, “the theory does not give any information about the individual processes, but only about an ensemble of an infinity of elementary processes” [...] Interpretation II, “the theory claims to be a complete theory of the individual processes”» (Einstein, 1928, p. 254).

²⁸ «I have objections to make against interpretation II... The interpretation according to which $|\psi|^2$ expresses the probability that *this* particle is situated at a certain place presupposes a very particular mechanism of action at a distance which would prevent the wave continuously distributed in space from acting at *two* places of the screen... Interpretation II of $|\psi|^2$ in my opinion implies a contradiction with the relativity postulate» (Einstein 1928, 255-6).

determinada de la partícula, se está yendo en contra del postulado de la relatividad. Las objeciones de Einstein en contra de la mecánica cuántica pueden distinguirse ya: (1) que la mecánica cuántica sea entendida como una teoría estadística sobre ensambles de procesos elementales o bien como una teoría de sistemas individuales; (2) que la mecánica cuántica se considere una teoría completa y (3) que la mecánica cuántica implique una acción-a-distancia que iría en contra de la Teoría de la Relatividad.

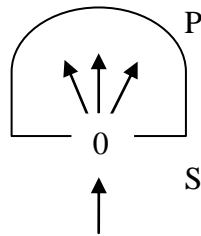


Figura 1. Photon-and-slit. Institut International de Physique Solvay, *Rapport et discussions du 5e Conseil*, Paris, 1928, p. 254.

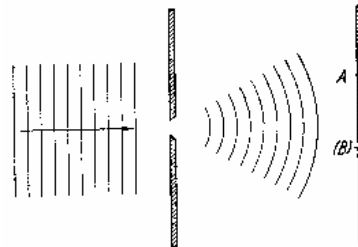


Figura 2. Diagrama de la versión de Bohr. Photon-and-slit. Bohr, 1949, p. 20.

La objeción (3) ante la acción-a-distancia es el nicho donde entra, ya en este momento *temprano* de la discusión, el fantasma del entrelazamiento. La posibilidad de que las fuerzas correspondientes a las partículas elementales no actuaran solamente en pequeñas distancias en el espacio le parecía a Einstein una noción contra-intuitiva, y se convirtió en una de sus primeras objeciones contra la cuántica y en una de las que permanecería a lo largo de los años, subyacente en casi todas sus formulaciones, volviendo a la luz con notable fuerza en el experimento imaginario de EPR en 1935. Es posible observar, también, que las nociones de Einstein y Schrödinger, que comúnmente se refieren como partidarias de un mismo sistema de ideas, no estaban del todo

sintonizadas, sino que, simplemente, la mecánica ondulatoria de Schrödinger era la versión que menos disgustaba a Einstein (Jammer, 1974, p. 119).

Para Bohr, el sentido del experimento del fotón y la rendija es éste:

«[...] sólo en el supuesto de que el diafragma y la placa tengan posiciones espaciales bien definidas de manera que resulta imposible, dentro del marco del formalismo mecánico-cuántico, realizar predicciones más detalladas con respecto a la placa fotoeléctrica donde la partícula será registrada. Si, sin embargo, admitimos un margen suficientemente grande en el conocimiento de la posición del diafragma, debería, en principio, ser posible controlar la transferencia de momento al diafragma y, así, realizar predicciones más detalladas sobre la dirección de la trayectoria del electrón desde el agujero hasta el punto de registro. En lo que concierne a la descripción mecánico-cuántica, tenemos que considerar aquí un sistema de dos cuerpos consistente en el diafragma y la partícula, y es sólo mediante una aplicación explícita de las leyes de conservación al sistema en el que nos preocupa el Efecto Compton donde, por ejemplo, la observación del retroceso del electrón a causa de una cámara de niebla nos permite predecir en qué dirección el fotón dispersado será finalmente observado» (Bohr, 1949, p. 23-4)²⁹.

²⁹ « In fact, it is only on the assumption that the diaphragm and the plate have well-defined positions in space that it is impossible, within the frame of the quantum-mechanical formalism, to make more detailed predictions as to the point of the photographic plate where the particle will be recorded. If, however, we admit a

De esta forma, aunado a la idea de la acción-a-distancia, la noción de un *sistema de dos cuerpos (two-body sistem)*, como lo explica Bohr, vuelve a traer a colación la temprana aparición del entrelazamiento como un fenómeno todavía considerado como un factor resultante no deseado. Se le tomará, por tanto, en tal consideración, la de resultado no esperado, sobre todo por parte de Einstein, quien hará hincapié en que se trata de una contradicción con la Teoría de la Relatividad.

Después de la formulación del experimento imaginario del fotón y la rendija, la discusión llevó a una serie de planteamientos que, ya fuera durante ese primer día o bien a lo largo de todo el encuentro, se fueron sucediendo en los foros públicos de las conferencias, en las caminatas, en los desayunos, en las reuniones nocturnas y, lo que es más importante, lejos de los transcriptores que dieron cuerpo a las formulaciones expuestas durante las conferencias que terminarían editándose en el volumen correspondiente en 1928, pero que no llegarían a registrar todas las conversaciones que se sucedieron durante aquel encuentro. La versión de aquellos *otros* experimentos imaginarios, forjados lejos de los transcriptores, llega desde la memoria de Bohr más de veinte años después de aquella V Conferencia de Solvay (Jammer, 1974, apunta que Bohr comenzó a escribir ese recuento durante una breve estancia en Princeton en 1948). Las fuentes históricas, por tanto,

sufficiently large latitude in the knowledge of the position of the diaphragm it should, in principle, be possible to control the momentum transfer to the diaphragm and, thus, to make more detailed predictions as to the direction of the electron path from the hole to the recording point. As regards the quantum-mechanical description, we have to deal here with a two-body system consisting of the diaphragm as well as of the particle, and it is just with an explicit application of conservation laws to such a system that we are concerned in the Compton effect where, for instance, the observation of the recoil of the electron by means of a cloud chamber allows us to predict in what direction the scattered photon will eventually be observed» (Bohr, 1949, p. 23-4).

deben ir y venir entre las transcripciones editadas en 1928 y la recolección de Bohr publicada en 1949.

El medio conductor común de esas discusiones *informales* sería el de los experimentos imaginarios: a través de la formulación de un ejercicio experimental imaginario tras otro, la discusión discurriría entre Bohr y Einstein gracias a la mediación de Ehrenfest. El lenguaje común era, pues, el *Gedankenexperiment*, y la *autoría* del experimento imaginario, en estos casos, se difumina: la versión que hoy en día se conoce, proporcionada, como se ha dicho, por Bohr en 1949, no otorga ni a Bohr ni a Einstein la autoría de los subsiguientes experimentos imaginarios: se parte del experimento del fotón y la rendija y, en adelante, Bohr explica cada nuevo experimento imaginario seguido de su postura teórica o de la de Einstein.

De esta manera, el experimento imaginario de la doble rendija queda formulado de la siguiente manera (en la nota al pie se presenta la formulación completa, con las ecuaciones correspondientes): «Una partícula entra a través de un agujero en un diafragma con o sin un obturador que abre y cierra el agujero. Las líneas paralelas equidistantes a la izquierda indican el tren de ondas planas correspondiente al estado de movimiento de una partícula que, antes de alcanzar el diafragma, posee un momento P relacionado con el número de ondas σ por la segunda parte de la ecuación (1) [$P=h\sigma$]. De acuerdo con la difracción de las ondas cuando pasan a través del agujero, el estado de movimiento de la partícula hacia la derecha del diafragma está representado por el tren de onda esférico con una apertura angular definida y con una extensión radial limitada» (Bohr, 1949, p. 21)³⁰.

³⁰ «[...] the simple case of a particle penetrating through a hole in a diaphragm without or with a shutter to open and close the hole, as indicated in Figs. 2a and 2b, respectively. The equidistant parallel lines to the left in the figures indicate the train of plane waves corresponding to the state of motion of a particle which,

El problema que Einstein quería señalar, recuerda Bohr, era hasta dónde el control del momento y la transferencia de energía, involucrados en la localización de la partícula en el espacio y el tiempo, pueden ser usados para posteriores especificaciones del estado de la partícula tras pasar a través del agujero. Aquí, continúa Bohr, debe

before reaching the diaphragm, has a momentum P related to the wave-number σ by the second of equations (1). In accordance with the diffraction of the waves when passing through the hole, the state of motion of the particle to the right of the diaphragm is represented by a spherical wave train with a suitably defined angular aperture ϑ and, in case of Fig. 2b, also with a limited radial extension. Consequently, the description of this state involves a certain latitude Δp in the momentum component of the particle parallel to the diaphragm and, in the case of a diaphragm with a shutter, an additional latitude ΔE of the kinetic energy. Since a measure for the latitude Δq in location of the particle in the plane of the diaphragm is given by the radius a of the hole, and since $\vartheta \approx (1/\sigma a)$, we get, using (1), just $\Delta p \approx \vartheta P \approx (b/\Delta q)$, in accordance with the indeterminacy relation (3). This result could, of course, also be obtained directly by noticing that, due to the limited extension of the wave-field at the place of the slit, the component of the wave-number parallel to the plane of the diaphragm will involve a latitude $\Delta \sigma \approx (1/a) \approx (1/\Delta q)$. // Similarly, the spread of the frequencies of the harmonic components in the limited wave-train in Fig. 2b is evidently $\Delta \nu \approx (1/\Delta t)$, where t is the time interval during which the shutter leaves the hole open and, thus, represents the latitude in time of the passage of the particle through the diaphragm. From (1), we therefore get $\Delta E \cdot \Delta t \approx (4)$, again in accordance with the relation (3) for the two conjugated variables E and t . // From the point of view of the laws of conservation, the origin of such latitudes entering into the description of the state of the particle after passing through the hole may be traced to the possibilities of momentum and energy exchange with the diaphragm or the shutter. In the reference system considered in Figs. 2a and 2b, the velocity of the diaphragm may be disregarded and only a change of momentum Δp between the particle and the diaphragm needs to be taken into consideration. The shutter, however, which leaves the hole opened during the time Δt , moves with a considerable velocity $v \approx (a/\Delta t)$, and a momentum transfer Δp involves therefore an energy exchange with the particle, amounting to $v \Delta p \approx (1/\Delta t) \cdot \Delta q \cdot \Delta p \approx (b/\Delta t)$, being just of the same order of magnitude as the latitude ΔE given by (4) and, thus, allowing for momentum and energy balance» (Bohr, 1949, p. 21-3).

tomarse en consideración que, hasta ahora, se ha asumido que la posición y el movimiento del diafragma y el obturador están precisamente coordinados con el marco de referencia espacio-temporal. Esta suposición implica, en la descripción del estado de estos cuerpos, un margen esencial sobre su momento y energía que no necesita, desde luego, afectar notablemente a las velocidades si el diafragma y el obturador son suficientemente pesados. Sin embargo, tan pronto como queremos conocer el momento y la energía de estas partes del arreglo de medición con una precisión suficiente para controlar el momento y el intercambio de energía con la partícula bajo investigación, debemos, dice Bohr, de acuerdo con las relaciones generales de incertidumbre, perder la posibilidad de su localización precisa en el espacio y el tiempo. Tenemos, por tanto, que examinar cuánto afectará esta circunstancia el uso pretendido de todo el arreglo y, como veremos, este punto crucial conlleva el carácter complementario del fenómeno (Bohr, 1949, p. 23)³¹.

³¹ «The problem raised by Einstein was now to what extent a control of the momentum and energy transfer, involved in a location of the particle in space and time, can be used for a further specification of the state of the particle after passing through the hole. Here, it must be taken into consideration that the position and the motion of the diaphragm and the shutter have so far been assumed to be accurately co-ordinated with the space-time reference frame. This assumption implies, in the description of the state of these bodies, an essential latitude as to their momentum and energy which need not, of course, noticeably affect the velocities, if the diaphragm and the shutter are sufficiently heavy. However, as soon as we want to know the momentum and energy of these parts of the measuring arrangement with an accuracy sufficient to control the momentum and energy exchange with the particle under investigation, we shall, in accordance with the general indeterminacy relations, lose the possibility of their accurate location in space and time. We have, therefore, to examine how far this circumstance will affect the intended use of the whole arrangement and, as we shall see, this crucial point clearly brings out the complementary character of the phenomena» (Bohr, 1949, p. 23).

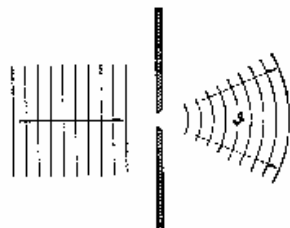


Figura 3a. Experimento de la doble rendija. Bohr, 1949, p. 22

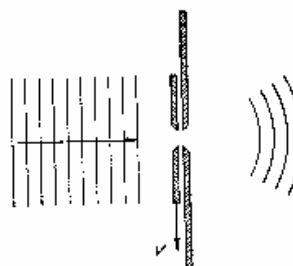


Figura 3b. Experimento de la doble rendija. Bohr, 1949, p. 22

Quizá, la formulación del experimento de la doble rendija sea el primer intento de Einstein, intención que conservará durante varios años, de atacar las inconsistencias que él veía en la mecánica cuántica, mediante la formulación de un experimento imaginario que mostrara las repercusiones macrofísicas de las relaciones de incertidumbre. Elementos como el obturador aparecerán más adelante en otros experimentos imaginarios, evidenciando con mayor intensidad estas repercusiones.

La larga re-formulación del experimento de la doble rendija agrega una tercera rendija, obedeciendo a la solicitud de Einstein de que, una vez practicada una observación, se evitase la incertidumbre mediante la utilización de *otro* elemento de control, es decir, otro instrumento de medición. La propuesta de Einstein, señalada por Bohr en la referencia del experimento imaginario, puede evidenciar la forma en que fueron construidos estos experimentos imaginarios: comenzando con el primer experimento del fotón y la rendija y con la correspondiente respuesta de Bohr, se genera un segundo experimento

imaginario, agregando al diseño experimental las objeciones del físico danés; cuando un nuevo análisis encontraba el *fallo* subyacente en la formulación, se volvía a ajustar el esquema con la intención de poner a prueba cualquier objeción. Llevados a cabo de esta manera, los experimentos imaginarios alcanzan la forma más fecunda de su naturaleza. Es así, pues, como se tiene la tercera versión del experimento imaginario, una larga formulación que incluye el agregado de una tercera rendija:

«Si un rayo paralelo de electrones (o fotones) golpea desde la izquierda en el primer diafragma, observaremos, bajo ciertas condiciones, un patrón de interferencia en la placa indicado por el ensombrecimiento de la placa fotográfica [...] Con rayos intensos, este patrón se consolida mediante la acumulación de un gran número de procesos individuales, cada uno dando lugar a una pequeña mancha en la placa fotográfica, y la distribución de estas manchas obedece a una sencilla ley derivable del análisis de ondas. La misma distribución debería encontrarse también en la revisión estadística de muchos experimentos realizados con haces tan débiles que, en una sola exposición, solamente un electrón (o fotón) llegará a la placa fotográfica en un punto señalado en la figura como una pequeña estrella. Por ello, ahora, como se indica con las flechas quebradas, el momento transferido al primer diafragma debería ser diferente si asumimos que el electrón pasa a través de la rendija superior o inferior en el segundo diafragma. Einstein sugirió que un control de la transferencia de momento permitiría un análisis más preciso del fenómeno

y, en particular, decidir a través de cuál de las dos rendijas ha pasado el electrón antes de llegar a la placa.

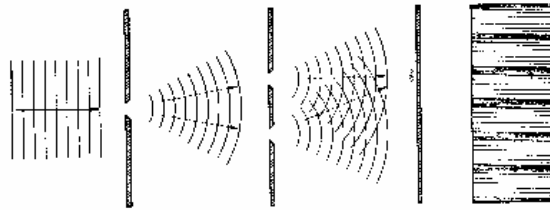


Figura 4. Variación del experimento de la doble rendija. Bohr, 1949, p. 24

Un examen más preciso mostró, sin embargo, que el control sugerido de la transferencia de momento involucraría un margen en el conocimiento de la posición del diafragma que excluiría la aparición del fenómeno de interferencia en cuestión. De hecho, si ω es el ángulo pequeño entre las trayectorias estimadas de la partícula pasando a través de la rendija superior o inferior, la diferencia de la transferencia de momento en estos dos casos será, de acuerdo con (1) [$E=h\nu$, $P=h\sigma$], igual a $h\sigma\omega$ y cualquier control del momento del diafragma con una precisión suficiente para medir esta diferencia involucrará, debido a las relaciones de incertidumbre, un margen mínimo en la posición del diafragma, comparable con $1/\sigma\omega$. Si, como en la imagen, el diafragma con las dos rendijas se sitúa entre el primer diafragma y la placa fotoeléctrica, se verá que el número de franjas por unidad de longitud será igual que $h\sigma\omega$ y, dado que una incertidumbre en la posición

del primer diafragma de la medida de $1/\sigma\omega$ causará una incertidumbre igual en la posición de las franjas, se tiene que ningún efecto de interferencia puede aparecer. El mismo resultado se sostiene fácilmente para cualquier otra localización del segundo diafragma entre el primer diafragma y el plato, y sería obtenido también si, en lugar del primer diafragma, otro de estos tres cuerpos fuese usado para el control, con el propósito sugerido [por Einstein], de la transferencia de momento» (Bohr, 1949, p. 24-5)³².

³² «If a parallel beam of electrons (or photons) falls from the left on the first diaphragm, we shall, under usual conditions, observe on the plate an interference pattern indicated by the shading of the photographic plate shown in front view to the right of the figure. With intense beams, this pattern is built up by the accumulation of a large number of individual processes, each giving rise to a small spot on the photographic plate, and the distribution of these spots follows a simple law derivable from the wave analysis. The same distribution should also be found in the statistical account of many experiments performed with beams so faint that in a single exposure only one electron (or photon) will arrive at the photographic plate at some spot shown in the figure as a small star. Since, now, as indicated by the broken arrows, the momentum transferred to the first diaphragm ought to be different if the electron was assumed to pass through the upper or the lower slit in the second diaphragm. Einstein suggested that a control of the momentum transfer would permit a closer analysis of the phenomenon and, in particular, to decide through which of the two slits the electron had passed before arriving at the plate. A closer examination showed, however, that the suggested control of the momentum transfer would involve a latitude in the knowledge of the position of the diaphragm which would exclude the appearance of the interference phenomena in question. In fact, if ω is the small angle between the conjectured paths of a particle passing through the upper or the lower slit, the difference of momentum transfer in these two cases will, according to (1), be equal to $h\sigma\omega$ and any control of the momentum of the diaphragm with an accuracy sufficient to measure this difference will, due to the indeterminacy relation, involve a minimum latitude of the position of the diaphragm, comparable with $1/\sigma\omega$. If, as in the figure, the diaphragm with the two slits is placed in the middle between the first diaphragm and the photographic plate, it will be seen that the number of fringes per unit length will be just equal to $h\sigma\omega$ and, since an uncertainty in the position of the first

La conclusión de Bohr, probablemente posterior a las discusiones con Einstein, más propia de una forma madurada de entender la cuántica gracias al paso de los años, es la siguiente:

«Este punto posee una importante consecuencia lógica, dado que es la única circunstancia en la que se nos presenta la opción de *o bien* rastrear la trayectoria de una partícula *o bien* observar el efecto de interferencia, lo cual nos permite escapar de la paradójica necesidad de concluir que el comportamiento de un electrón o un fotón debe depender de la presencia de una rendija en el diafragma a través de la cual podría no pasar. Tenemos aquí un ejemplo típico de cómo el fenómeno complementario aparece bajo arreglos experimentales mutuamente excluyentes y nos enfrentamos con la imposibilidad, en el análisis de los efectos cuánticos, de establecer una separación definida entre un comportamiento independiente de los objetos atómicos y su interacción con los instrumentos de medición que sirven para definir las condiciones bajo las cuales ocurren los fenómenos» (Bohr, 1949, p. 25-6)³³.

diaphragm of the amount of $1/\sigma\omega$ will cause an equal uncertainty in the positions of the fringes, it follows that no interference effect can appear. The same result is easily shown to hold for any other placing of the second diaphragm between the first diaphragm and the plate, and would also be obtained if, instead of the first diaphragm, another of these three bodies were used for the control, for the purpose suggested, of the momentum transfer» (Bohr, 1949, p. 24-5).

³³ «This point is of great logical consequence, since it is only the circumstance that we are presented with a choice of *either* tracing the path of a particle or observing interference effects, which allows us to escape from the paradoxical necessity of concluding that the behaviour of an electron or a photon should depend on the presence of a slit in the diaphragm through which it could be proved not to pass.

Las constantes modificaciones del experimento imaginario iban componiendo, no ya versiones más precisas de cada formulación, ni variaciones ligeramente diferentes, sino diseños separados que, como puede verse en las últimas dos variaciones, cambian por completo el esquema inicial y buscan, por diversos medios, obtener una idea que, al integrar cada uno de los experimentos imaginarios como principio generador, es la piedra angular del experimento imaginario: la intención de Einstein de evadir la transferencia de momento. La siguiente versión, que parece más una proposición de Bohr a petición de Einstein, se enfoca específicamente en el fenómeno de la interferencia:

«Así, para el estudio de un fenómeno de interferencia del tipo indicado en la figura 3 [en este caso es la figura 4], se sugiere usar un arreglo experimental como el mostrado en la figura 4 [aquí, figura 5], donde los elementos sólidos del aparato, que funcionan como diafragmas y portaplacas, se encuentran firmemente atornillados a un soporte común.

En tal arreglo, donde el conocimiento de las posiciones relativas de los diafragmas y la placa fotográfica se asegura mediante una conexión rígida, es obviamente imposible controlar el intercambio de momento entre la partícula y las partes separadas del aparato. La única forma en la que, en tal arreglo, podemos asegurar que la partícula pasa a través de una de las rendijas en el segundo diafragma

We have here to do with a typical example of how the complementary phenomena appear under mutually exclusive experimental arrangements and are just faced with the impossibility, in the analysis of quantum effects, of drawing any sharp separation between an independent behaviour of atomic objects and their interaction with the measuring instruments which serve to define the conditions under which the phenomena occur» (Bohr, 1949, p. 25-6).

es cubrir la otra rendija con una tapa, como se indica en la figura; pero si la rendija está cubierta, desde luego que no se dudará de cualquier fenómeno de interferencia, y sobre la placa observaremos simplemente una distribución continua como en el caso del diafragma sencillo en la figura 1.

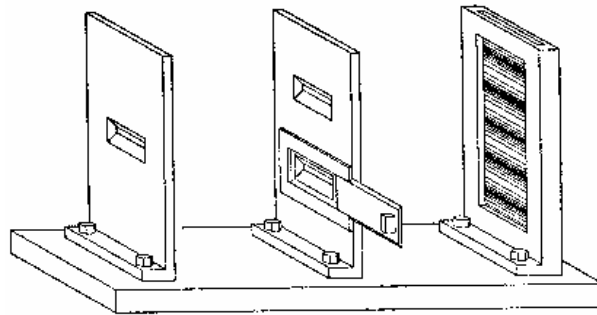


Figura 5. Experimento de la rendija cubierta (Bohr's Interference).
Bohr, 1949, p. 27.

En el estudio de los fenómenos del tipo de los que estamos tratando, con un detallado equilibrio del momento, algunas partes de todo el dispositivo deben, naturalmente, tener la libertad de moverse con independencia de las otras. Tal aparato se bosqueja en la figura 5 [figura 6], donde un diafragma con una rendija está suspendido, mediante muelles delgados, de un yugo sólido atornillado a un soporte, en el cual también otras partes inamovibles del arreglo deben ser aseguradas. La escala en el diafragma, junto con los indicadores en los amortiguadores del yugo, tiene que ver con la observación

del movimiento del diafragma, como puede requerirse para obtener una estimación de la transferencia de momento, permitiéndonos obtener conclusiones sobre la deflexión sufrida por la partícula al pasar a través de la rendija. No obstante, dado que cualquier lectura de la escala, en cualquier forma que sea realizada, involucrará un incontrolable cambio en el momento del diafragma, siempre habrá, en conformidad con el Principio de Incertidumbre, una relación recíproca entre nuestro conocimiento de la posición de la rendija y la precisión en el control del momento» (Bohr, 1949, pp. 27-8)³⁴.

³⁴ «Thus, for the study of an interference phenomenon of the type indicated in Fig. 3, it suggests itself to use an experimental arrangement like that shown in Fig. 4, where the solid parts of the apparatus, serving as diaphragms and plateholder, are firmly bolted to a common support. // In such an arrangement, where the knowledge of the relative positions of the diaphragms and the photographic plate is secured by a rigid connection, it is obviously impossible to control the momentum exchanged between the particle and the separate parts of the apparatus. The only way in which, in such an arrangement, we could insure that the particle passed through one of the slits in the second diaphragm is to cover the other slit by a lid, as indicated in the figure; but if the slit is covered, there is of course no question of any interference phenomenon, and on the plate we shall simply observe a continuous distribution as in the case of the single fixed diaphragm in Fig. 1. // In the study of phenomena in the account of which we are dealing with detailed momentum balance, certain parts of the whole device must naturally be given the freedom to move independently of others. Such an apparatus is sketched in Fig. 5, where a diaphragm with a slit is suspended by weak springs from a solid yoke bolted to the support on which also other immobile parts of the arrangement are to be fastened. The scale on the diaphragm together with the pointer on the bearings of the yoke refer to such study of the motion of the diaphragm, as may be required for an estimate of the momentum transferred to it, permitting one to draw conclusions as to the deflection suffered by the particle in passing through the slit. Since, however, any reading of the scale, in whatever way performed, will involve an uncontrollable change in the momentum of the diaphragm, there will always be, in conformity with the indeterminacy principle, a

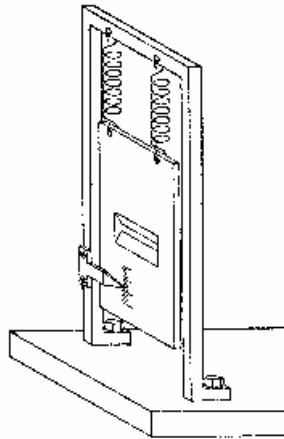


Figura 6. String and slit.
Bohr, 1949, p. 28.

Se ha visto hasta ahora cómo el arreglo experimental inicial, bastante básico, ha pasado a convertirse en un diseño físico mucho más visual, con un nivel de detalle considerable y con restricciones de funcionamiento y disposición muy específicas. El ensamble inicial planteado por Einstein al final del primer día de Solvay era un diseño sencillo, casi puramente teórico, en el sentido de que ni siquiera su descripción física, como ya se ha visto, era suficientemente detallada o visual, al menos en comparación con estos últimos experimentos imaginarios. Como se verá a lo largo de este trabajo, el nivel de detalle en la descripción de los elementos *técnicos* del experimento imaginario deviene de suma importancia: a través de los años, la manera de formular los experimentos imaginarios fue cambiando (más allá de que

reciprocal relationship between our knowledge of the position of the slit and the accuracy of the momentum control» (Bohr, 1949, pp. 27-8).

pueda ser posible atribuir, a cada físico, una forma diferente de ejercer la experimentación imaginaria): pasó de una formulación medianamente técnica y descriptiva, a una formulación que prescinde del andamiaje *experimental*, es decir, de los detalles técnicos, y se interesa más por la vestidura teórica del experimento imaginario, que se vería traducida en la formulación de axiomas, principios, postulados y criterios. El caso de los experimentos imaginarios durante el encuentro de Solvay en 1927 es una suerte de pequeña analogía de la metodología de funcionamiento de la herramienta experimental imaginaria a lo largo de todo el periodo, y conduciría a que, a partir de 1931, la forma de diseñar los experimentos imaginarios cambiara notablemente.

De la misma manera, se hace evidente la conexión entre los experimentos imaginarios a lo largo de los años que aquí se estudian. Ya se habló del uso de rendijas y obturadores, que aparecerán más adelante, pero el caso del último experimento imaginario referido por Bohr encarna de una manera importante esta serie de conexiones: el diagrama ofrecido posee una semejanza notable con el experimento imaginario del fotón y la caja que usará Einstein en la VI Conferencia de Solvay, en 1930 y que tendrá ecos tanto en un experimento imaginario de 1931, publicado junto con Tolman y Podolsky, como en el famoso artículo de EPR.

«El siguiente caso [Figura 7] es un arreglo que, en contraste con los anteriores, involucra la observación del tiempo. Consiste en un obturador conectado rígidamente con un robusto reloj que descansa en un soporte, el cual sostiene un diafragma, así como otros elementos de carácter similar, regulados por el mismo reloj o por otros relojes estandarizados en relación con éste. La intención especial es señalar que el reloj es una pieza de maquinaria cuyo

desempeño puede ser completamente explicado por la mecánica ordinaria y que no será afectado ni por la posición de sus manecillas ni por la interacción de sus accesorios con una partícula atómica. Al asegurar la apertura del agujero en un instante definido, un aparato de este tipo podría, por ejemplo, ser usado para una precisa medición del tiempo que un electrón o fotón tarda en ir desde el diafragma a algún otro lugar, pero, evidentemente, no dejaría oportunidad de controlar la transferencia de energía al obturador con la intención de obtener conclusiones sobre la energía de la partícula que ha pasado a través del diafragma. Si estamos interesados en tales conclusiones debemos, desde luego, usar un arreglo en el cual los dispositivos de obturación ya no funcionen como relojes precisos, sino en el cual el conocimiento del momento cuando se abra el agujero del diafragma involucre un margen en relación con la precisión de la medición de la energía mediante la relación general (4) $[\Delta E \cdot \Delta t \approx h]$ » (Bohr, 1949, pp. 28-9)³⁵.

³⁵ «In the same semi-serious style, Fig. 6 represents a part of an arrangement suited for the study of phenomena which, in contrast to those just discussed, involve time coordination explicitly. It consists of a shutter rigidly connected with a robust clock resting on the support which carries a diaphragm and on which further parts of similar character, regulated by the same clock-work or by other clocks standardized relatively to it, are also to be fixed. The special aim of the figure is to underline that a clock is a piece of machinery, the working of which can completely be accounted for by ordinary mechanics and will be affected neither by reading of the position of its hands nor by the interaction between its accessories and an atomic particle. In securing the opening of the hole at a definite moment, an apparatus of this type might, for instance, be used for an accurate measurement of the time an electron or a photon takes to come from the diaphragm to some other place, but evidently, it would leave no possibility of controlling the energy transfer to the shutter with the aim of drawing conclusions as to the energy of the particle which has passed

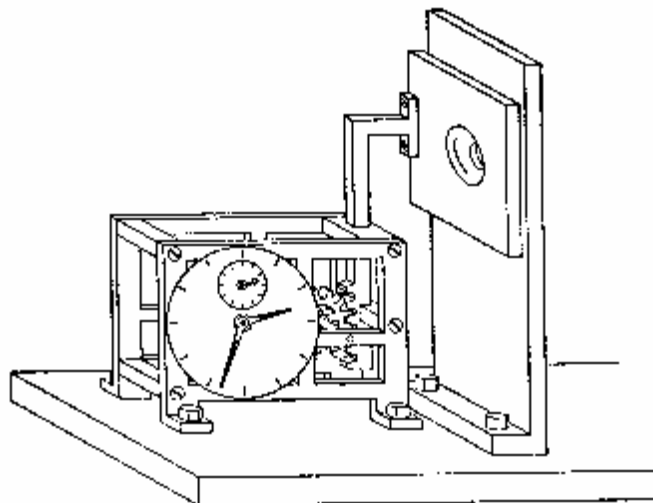


Figura 7. Experimento del reloj y la rendija.
Bohr, 1949, p. 29

La introducción del reloj en el experimento imaginario denota una intención clave de las formulaciones de Einstein: partiendo del propio Principio de Complementariedad introduce en el proceso de medición de las magnitudes de una partícula elemental un instrumento de referencia, el reloj, que, en principio, se somete a los principios clásicos, no a las afectaciones cuánticas, y que, por tanto, exige ser tratado bajo un marco de referencia diferente en el que las perturbaciones

through the diaphragm. If we are interested in such conclusions we must, of course, use an arrangement where the shutter devices can no longer serve as accurate clocks, but where the knowledge of the moment when the hole in the diaphragm is open involves a latitude connected with the accuracy of the energy measurement by the general relation (4)» (Bohr, 1949, pp. 28-9).

ocasionadas por el comportamiento de las partículas no afectarán a su funcionamiento. Finalmente, Bohr definiría la Complementariedad como la necesidad de proporcionar una descripción clásica para los instrumentos de medición y un tratamiento mecánico-cuántico para las partículas. De ahí que Bohr concluya, entre otras cosas, que «El principal punto aquí es la distinción entre los *objetos* bajo investigación y los *instrumentos de medición*, los cuales sirven para definir, en términos clásicos, las condiciones bajo las que se sucede el fenómeno» (Bohr, 1949, pp. 29-30)³⁶.

Estos cuerpos, explica Bohr, junto con las partículas, constituirían el sistema al que debe ser aplicado el formalismo mecánico-cuántico. En lo concerniente a la especificación de las condiciones, continúa, para cualquier aplicación del formalismo, es más esencial el hecho de que *todo el arreglo experimental* sea tomado en cuenta. Es así, concluye, como la introducción de cualquier otra pieza o aparato, como un espejo, en el camino de la partícula, puede comportar nuevos efectos de interferencia que ejerzan una influencia en las predicciones, con respecto a los resultados que serán luego registrados (Bohr, 1949, p. 30)³⁷. En este experimento, así como en los tratados recientemente, el concepto de *interferencia* se convierte en un elemento recurrente. Bohr no hace referencia a la objeción de Einstein en torno a la acción-a-

³⁶ «The main point here is the distinction between the *objects* under investigation and the *measuring instruments* which serve to define, in classical terms, the conditions under which the phenomena appear» (Bohr, 1949, pp. 29-30).

³⁷ «[...] these bodies together with the particles would in such a case constitute the system to which the quantum-mechanical formalism has to be applied. As regards the specification of the conditions for any well-defined application of the formalism, it is moreover essential that the *whole experimental arrangement* be taken into account. In fact, the introduction of any further piece of apparatus, like a mirror, in the way of a particle might imply new interference effects essentially influencing the predictions as regards the results to be eventually recorded» (Bohr, 1949, p. 30).

distancia, pero utiliza el término *interferencia* en repetidas ocasiones como sustituto genérico de la noción de Einstein. Los polos del debate, Einstein y Bohr, empiezan a distanciarse y a establecer, quizá sin buscarlo, una separación notable para con los demás físicos interesados en el tema: en la revisión llevada a cabo por Bohr de las discusiones en Solvay no se menciona ni a Heisenberg ni a Schrödinger ni a ningún otro físico que pudiera haber participado. Ehrenfest, mediador de los encuentros y amigo tanto de Bohr como de Einstein, es apenas mencionado en una ocasión y para hacer referencia a su papel conciliador. La condición *pública* de la conferencia quedó reducida a dos actores principales que acapararían el discurso y buscarían solventar por ellos mismos el debate de la mecánica cuántica. Einstein defiende sus propias objeciones a la teoría y no lleva tras de sí una escuela de pensamiento (a diferencia de Bohr), ni representa a un grupo de físicos con determinadas concepciones teóricas; no obstante, no es el único que tiene reservas frente a la interpretación mecánico-cuántica de la escuela de Copenhague. ¿Dónde estaban de Broglie y Schrödinger, entre otros, en aquel momento?

Los experimentos imaginarios planteados en aquellas reuniones ejercieron, tanto en Bohr como en Einstein, una influencia de gran impacto. Para Bohr, aquellos *escollos* significaron una ayuda que afinaría sus nociones con respecto a la Complementariedad; para Einstein, definirían nuevas formas de criticar la teoría cuántica. En el caso de Bohr, los ejemplos son evidentes: en algunas de las formulaciones puede percibirse la intención de dirigir todo el diseño experimental hacia un resultado que refuerce la noción de la Complementariedad: «Si un efecto semi-reflejante se sitúa en el camino de un fotón, dejando dos posibilidades para su dirección de propagación, o bien el fotón puede ser registrado en una y sólo en una de las dos placas fotográficas situadas a gran distancia en ambas

direcciones, o bien podemos, al remplazar las placas por espejos, observar efectos que demuestren una interferencia entre los dos trenes de onda reflejadas. En cualquier intento de una representación pictórica del comportamiento del fotón, deberíamos, pues, encontrarnos con una dificultad: estar obligados a decir que el fotón, por una parte, siempre elige *una* de los dos trayectorias y que, por otra parte, se comporta como si hubiese pasado por *ambas* trayectorias» (Bohr, 1949, p. 30)³⁸.

Para entender las repercusiones que estas controversias tuvieron en Einstein, es necesario revisar los experimentos imaginarios de la siguiente Conferencia de Solvay, en el otoño de 1930.

Entre las dos Conferencias de Solvay hay, aparentemente, un receso en la discusión. No obstante, lejos del núcleo central de la controversia, la publicación de tres artículos llevaría el Principio de Incertidumbre más allá de las discusiones de Solvay: E. A. Ruark (1928), Edmund H. Kennard (1927) y Charles Galton Darwin (1929) entrarían en la periferia de la discusión con sendos artículos que abordaban el Principio de Incertidumbre.

Ruark ofreció una conferencia ante la *American Physical Society*, a finales de 1927, que sería publicada en el mes de marzo de 1928 en *Physical Review* y que versaba sobre algunas aplicaciones del Principio de

³⁸ «If a semi-reflecting mirror is placed in the way of a photon, leaving two possibilities for its direction of propagation, the photon may either be recorded on one, and only one, of two photographic plates situated at great distances in the two directions in question, or else we may, by replacing the plates by mirrors, observe effects exhibiting an interference between the two reflected wave-trains. In any attempt of a pictorial representation of the behaviour of the photon we would, thus, meet with the difficulty: to be obliged to say, on the one hand, that the photon always chooses *one* of the two ways and, on the other hand, that it behaves as if it had passed *both* ways» (Bohr, 1949, p. 30).

Incertidumbre. Kennard (1927), por su parte, escribió una nota que refería tanto al documento de Ruark como al artículo de Heisenberg de 1927. Al otro lado del mundo, pero, igualmente, con una cierta distancia en relación al punto neurálgico de la física cuántica, Darwin, nieto del Darwin evolucionista, profesor de filosofía natural de la Universidad de Edimburgo, publicaba, en 1929, en *Proceedings of the Royal Society*, un extraño artículo que proponía una alternativa frente a la dualidad onda-partícula.

Los ecos de los artículos publicados, las reuniones en Como, en Solvay, las controversias y las polémicas viajaban atravesando el orbe en los pesados barcos de vapor, dentro de sacos de correo, en las recolecciones de los científicos viajeros que tenían la oportunidad de asistir a aquellos encuentros, en las revistas especializadas que iban de un lugar a otro y, sobre todo, en las Conferencias de Chicago, de Werner Heisenberg, en 1929, que se publicarían luego en 1930 en el compendio titulado *The Physical Principles of Quantum Theory*. La vía de entrada más importante de las ideas de la *nueva* física la proporcionaría el propio Heisenberg. Los experimentos imaginarios ahí ofrecidos (que no se revisarán ya aquí) son prácticamente los mismos que presentó en 1927, en el famoso artículo, con algunas pequeñas modificaciones que los convertían en argumentos más robustos y sólidos. A partir de ahí, la controversia de la mecánica cuántica empezaría a abrir sus fronteras. No obstante, tardaría aún unos pocos años más en convertirse en una polifonía de participaciones y experimentos imaginarios.

Ruark fue uno de los primeros físicos norteamericanos en publicar un artículo sobre el Principio de Incertidumbre. De hecho, Kennard (1927, p. 344) señala que «atinadamente» Ruark denominó a las ideas de Heisenberg como Principio de Indeterminación (*Indetermination Principle*). Kennard, profesor en la Universidad de Cornell, se interesó por el texto de Ruark y no tardó en escribir su propia contribución.

Podría decirse, pues, que se trata de una suerte de proceso divulgativo entre científicos: había que traer, desde el viejo continente, las novedades de una física que se encontraba en constante cambio a una velocidad de vértigo.

Ruark plantea un experimento imaginario simple: Para medir la velocidad de un electrón en un tiempo t , es posible hacer que dos (o más) cuantos de luz reboten en el electrón simultáneamente, luego, los cuantos pasarán por sendos microscopios que se encuentran apuntando al electrón desde líneas diferentes; después de que los cuantos de luz reboten en el electrón será posible, mediante el Efecto Doppler, calcular su velocidad; sin embargo, para hacerlo con mayor precisión, añade Ruark, los cuantos de luz se hacen pasar por una rejilla o un instrumento de alto poder de resolución; no puede saberse, sin embargo, con precisión, por cuál de las rendijas pasaron los cuantos de luz, y como cada trayectoria es diferente para diferentes rendijas, no es posible saber en qué instante los cuantos rebotaron en el electrón. Esta indefinición en el tiempo, continúa Ruark, es proporcional al poder de resolución de la rendija o el instrumento y, por tanto, a la precisión del valor obtenido para la velocidad. En un caso ideal, concluye, una infinita precisión produce una infinita incertidumbre (Ruark, 1928, p. 311). El documento de Ruark se trata de una reproducción de las ideas de Heisenberg, al igual que su experimento imaginario, que se basa en los que el físico alemán ofreció en su artículo de 1927.

En la misma tónica se encuentra el artículo de Kennard (1927), escrito a la sazón del texto de Ruark. Se trata de un experimento imaginario sencillo que pretende, solamente, demostrar una de las aplicaciones del Principio de Incertidumbre. Kennard plantea que un electrón pasa de la placa de un condensador cargado a una segunda placa a través de un agujero y atravesando un espacio libre de fuerzas magnéticas y eléctricas. El agujero, explica Kennard, se abre y cierra

mediante un obturador durante un intervalo T en un momento específico t_1 . Por tanto, continúa, en el tiempo t_1 se sabe dónde está el electrón, con una precisión en ciertos límites, y al hacer que el tiempo T sea muy pequeño se disminuye la incertidumbre a voluntad. Interesa, entonces, medir la velocidad de la partícula cuando atraviesa el agujero. Sin embargo, al pasar por el agujero, cuando el obturador se abre, la partícula sufre una alteración en su momento, asevera Kennard, y, para obtener una medición precisa de la velocidad, debe conocerse la velocidad antes y después de atravesar el agujero, ambas con la misma precisión. Es posible, asegura, disminuir la influencia del agujero al hacerlo lo suficientemente grande, o bien, al hacer que el tiempo T de apertura del obturador sea mayor, lo que ocasiona que la posición de la partícula al inicio del experimento se encuentre sometida a una incertidumbre, ya que la precisión en t_1 estaba dada para un valor de T muy pequeño. La medición conlleva la correspondiente incertidumbre en la medida en que se obtendría un valor de la velocidad antes y otro después del paso de la partícula por el obturador (Kennard, 1927, p. 346-7).

Como puede observarse, estos dos textos ofrecen una especie de revisión del funcionamiento del Principio de Incertidumbre. No se percibe, en ninguno de los dos documentos, una oposición ni a las ideas de Heisenberg ni a las de Bohr. Los planteamientos imaginarios son casi reproducciones de los presentados por Heisenberg tanto en el artículo de 1927 como en la conferencia de Chicago. Sin embargo, el tercer autor mencionado, Darwin, apuntaba en una dirección muy diferente.

En abril de 1929, Charles Galton Darwin publica, bajo el título *A Collision Problem in the Wave Mechanics*, un artículo que, aunque acepta el Principio de Incertidumbre de Heisenberg y la Complementariedad de Bohr, propone una forma de evitar la dualidad onda-partícula mediante una suerte de superposición basada en el uso, únicamente, de la imagen

ondulatoria. Por tratarse de un caso muy particular, y por posterior participación de Darwin en la discusión, se le dedicarán unos párrafos más que a Ruark y a Kennard.

Durante los últimos años de la década de 1920, Darwin se dedicaba al estudio de la óptica cuántica, los efectos magneto-ópticos y la teoría relativista del electrón, de Dirac, entre otras investigaciones. A principios de la década siguiente, como se verá más adelante, publicaría un par de artículos sobre el Principio de Incertidumbre; y, a partir de 1936, se involucraría en la dirección del Laboratorio Nacional de Física, posición que lo acercaría a coordinar los esfuerzos norteamericanos, británicos y canadienses en el marco de Proyecto Manhattan. Más interesante resulta el hecho de que, a partir de 1911, junto a Ernest Rutherford y Niels Bohr, trabajaría en la teoría atómica de Rutherford. Con notorias inclinaciones por la noción teórica de la Interpretación de Copenhague, publicó varios artículos que vindicaban el valor y la importancia tanto del Principio de Incertidumbre como de la Complementariedad de Bohr.

Aunque no asistió a la V Conferencia de Solvay, sí lo hizo a la siguiente reunión, en 1930. El documento que publicó en 1929 es un largo compendio de experimentos imaginarios que buscan demostrar la efectividad y la validez de las relaciones de incertidumbre y de la complementariedad de las imágenes corpuscular y ondulatoria. A la vez, propone una interpretación diferente, algo así como su propia interpretación, de la mecánica cuántica: lo llama *Principle of Postponement*.

La pregunta que se plantea Darwin versa sobre el comportamiento de la función de onda con respecto a dos cuerpos y, por *dos cuerpos*, Darwin se refiere al objeto observado y al instrumento de medición, tal y como la explicara Bohr en el documento sobre la complementariedad publicado en 1928, en *Nature*, y que, por el contenido de su artículo, debió haber leído, sin duda.

El punto de partida de Darwin es la noción de que, según las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, la «*observación* de las partículas puede sólo realizarse una vez, dado que perturba el sistema en una forma que resulta desconocida» (Darwin, 1929, p. 376)³⁹. De ahí que los experimentos deban entenderse siempre desde una repetición que permita obtener una distribución de resultados, de manera que «en cada observación se pueda imaginar que la onda se convierte en una partícula y que, luego, para pasar a la siguiente observación, se convierte de nuevo en una onda» (Darwin, 1929, p. 376)⁴⁰. La forma en que Darwin entiende la teoría se hace evidente en el primer experimento imaginario que formula:

«Suponga que estamos observando el paso de rayos- β mediante una nube de Wilson. Imaginamos que los rayos pasan desde una fuente a través de un sistema de rendijas, campos magnéticos o eléctricos, hojas absorbentes, cristales que producen interferencia, obturadores móviles, etc. Interpuestas en tres lugares en su trayectoria hay tres cámaras de niebla que registran su paso, y desde luego que, al hacerlo, influyen en su movimiento, aunque deberemos suponer que no lo hacen tanto como para detenerlos completamente. Las cámaras están dispuestas de tal manera que todos los rayos que entran en la segunda y tercera [cámara] han pasado a través de la primera. Observamos los rastros en la nube de los rayos- β individuales en las tres cámaras, y el experimento consiste en encontrar las

³⁹ «*observation* of the particles may only be made once, as it itself disturbs the system in a way that is unknowable» (Darwin, 1929, p. 376).

⁴⁰ «[...] at each observation we imagine the wave turned into a particle, and then for the passage to the next we turn it back into a wave» (Darwin, 1929, p. 376).

relaciones estadísticas entre ellas—digamos que por cada 10 partículas en la primera cámara hay 5 en la segunda y 3 en la tercera. Ahora la razón 5:3 para las dos últimas cámaras será obtenida ya sea si observamos la primera cámara o no; pero, si no miramos a ella, deber ser legítimo considerar esta cámara como uno de los obstáculos en la trayectoria de los rayos- β , en la misma base que las rendijas y las hojas absorbentes. [...] Existen pocas dudas de que la teoría cuántica existente verificaría que la observación en la segunda y la tercera cámaras sea la misma si las consideramos como producidas por un muy complicado “patrón de interferencia” producido por la primera [cámara], o si observamos el paso real de una partícula a través de la primera y consideramos que la onda recomienza ahí. Sería necesaria la filosofía del solipsismo para creer que la primera cámara proporciona un rastro de niebla cuando es vigilada y un patrón de interferencia cuando no; debemos suponer que las dos descripciones son sólo aspectos diferentes de una misma cosa» (Darwin, 1929, p. 377)⁴¹.

⁴¹ «Suppose that we are observing the passage of β -rays by means of Wilson clouds. We imagine the rays to be passing from a source through any system of slits, electric or magnetic fields, absorbing foils, crystals to produce interference, moving shutters, etc. Interposed at three places in their path are three cloud chambers which record their passage, and of course in doing so influence their motion, but we shall suppose not so as to stop it completely. The chambers are so disposed that all the rays that enter the second or third will have gone through the first. We observe the cloud tracks of the individual β -rays in all three chambers, and the experiment consists in working out statistical relations between them—say that for every 10 particles in the first chamber there are 5 in the second and 3 in the third. Now the ratio 5:3 for the last two chambers will be obtained whether we observe the first chamber or not; but if we do not look at it, it must be legitimate to regard this chamber as one of the obstacles in the path of the β -rays, on the same footing

La conclusión del primer planteamiento de Darwin evidencia su concepción de la cuántica: tanto la imagen corpuscular como la ondulatoria son formas complementarias de una misma realidad o fenómeno. No obstante, la intención de fondo de Darwin es la de proponer una aproximación puramente ondulatoria de los fenómenos, *posponiendo* la interpretación corpuscular, aunque no ahonda en las razones para hacerlo. Aunque en años posteriores, a principios de la década de 1930, Darwin abandonaría esta idea y abogaría por la complementariedad y la posibilidad de recurrir a una u otra interpretación según sea necesario, el artículo de 1929 plantea un larguísimo experimento imaginario, sustentado en una igualmente extensa formulación matemática, que pretende abordar el mismo caso: la colisión de dos partículas desde ambas interpretaciones, corpuscular y ondulatoria, con la intención de demostrar que, *posponiendo* la interpretación corpuscular y realizando una serie de cambios en el diseño experimental, es posible continuar con la imagen ondulatoria. El artículo posee, hacia el final, un aire de voluntad fundacional, como si Darwin tratara de proponer una *nueva* manera de interpretar los fenómenos atómicos. El experimento imaginario, que se vale de un diseño abigarrado y abundante en elementos técnicos, se repite una y otra vez con mínimas modificaciones que sirven al propósito de *posponer*

as the slits and absorbing foils. As it entails absorption, we must include its atoms in our wave equation in the manner described above. There is little doubt that the existing quantum theory would verify that the observation in the second and the third chambers are the same whether we regard them as produced by a highly complicated “interference pattern” produced by the first, or whether we observe the actual passage of a particle through the first and regard the wave as restarted there. It would require almost the philosophy of the solipsist to believe that the first chamber gives a cloud track when it is watched and an interference pattern when unwatched; we have to suppose that the two descriptions are only different aspects of the same thing» (Darwin, 1929, p. 377).

la interpretación corpuscular. Resulta interesante que dicha voluntad de *postponer* la imagen corpuscular específica que no se trata de eliminarla, sino de utilizar únicamente la imagen ondulatoria, sin necesidad de recurrir a la otra solamente por el hecho de que *es posible hacerlo*. Y no obstante, hace hincapié en que ambas imágenes son complementarias y en que se trata de dos formas de ver un mismo fenómeno. El experimento imaginario de Darwin, su planteamiento original, del cual parten todas las modificaciones que propone, es el siguiente:

«En un pequeño agujero A en una pantalla se coloca una película de materia compuesta de átomos de masa m . Incidente sobre esta película hay un continuo haz de átomos de masa M y velocidad V. Los dos tipos [de átomos] poseen una carga eléctrica e , de tal manera que se repelen el uno al otro—el resultado general sería el mismo para cualquier ley de fuerza, pero éste tiene la ventaja de que la solución exacta se conoce. En consecuencia de la colisión, ambos tipos de partícula serán dispersados, cada uno produciendo rayos en todas las direcciones, o a cualquier velocidad en todas las direcciones hacia adelante. Pero esto no es todo, dado que los principios elementales de energía y momento muestran que si M viaja a lo largo de AB, entonces, m deber viajar a lo largo de una cierta dirección definida AC, y ambas partículas deben poseer velocidades prescritas. Llamaremos a ese par de partículas par coherente. Si dos observadores buscan centelleos en los lugares apropiadamente relacionados, siempre las verán simultáneamente» (Darwin, 1929, p. 378)⁴².

⁴² «On a small hole A in a screen there is placed a film of matter composed of atoms of mass m . Incident on this film is a continuous stream of atoms of mass M

una pantalla. Más tarde agregaría sendos espejos en E y G, según puede verse en el diagrama, para repetir el proceso.

La intención, como se adelantó en los párrafos anteriores, que tiene Darwin es la de lograr un diseño experimental el cual no requiera de la interpretación corpuscular sino solamente de la ecuación de onda. En el texto no expresa ningún rechazo ni hacia la teoría cuántica ni hacia las relaciones de incertidumbre, pero su búsqueda denota que, por lo menos en 1929, no está del todo convencido de que la cuántica pueda, o *deba*, explicar todos los fenómenos. No se ahondará aquí en el resto del planteamiento de Darwin, que es rico en formulaciones matemáticas y variaciones (aunque mínimas) del experimento imaginario que ya se planteó, pero se analizarán aspectos de su procedimiento.

El problema que plantea Darwin (que quizá no es suficientemente claro en la exposición del experimento imaginario) es el de resolver las mediciones correspondientes a la colisión entre los átomos que se encuentran en A y el haz de átomos que atraviesa la rendija situada, también, en A. Al chocar, unas partículas se dirigen hacia una dirección en AB, donde hay un espejo, y otras hacia una dirección AC, donde hay otra rendija y una placa fotográfica. Se desea medir la posición y la velocidad después de la colisión. Pero Darwin no intentará medir una partícula, o dos, sino el haz de átomos, para lo que propone utilizar, primero, para la trayectoria AB, la reducción del paquete de ondas de la función propia, y luego, para la trayectoria AC, para la cual, dice Darwin, sería habitual usar una interpretación corpuscular debido a que el haz golpea una placa fotográfica de la cual se obtiene un centelleo, propone usar la ecuación de Schrödinger: cuando el rayo AB se refleja en el espejo, viaja en dirección de la rendija C, y ahí se encuentra con el otro rayo, AC, de manera que, según Darwin, se sucede una superposición de las ondas, por lo cual, podría aplicarse a AC la ecuación de Schrödinger y obtener sus magnitudes sin tener que acudir a

la interpretación corpuscular, antes incluso de que ocurra el centelleo en la pantalla y sin tener, por tanto, que recurrir a la observación del mismo.

La razón para *posponer* la interpretación corpuscular, según Darwin, es la *simplificación*: utilizar sólo una imagen, la ondulatoria, y evadir el Principio de Incertidumbre, inherente a la interpretación corpuscular (y que en ningún momento objeta).

¿Qué importancia posee este experimento imaginario de Darwin? Aunque el documento parece no integrarse en la discusión principal en torno a la mecánica cuántica, su intención de proporcionar una interpretación únicamente basada en la mecánica ondulatoria lo ubica, aunque de forma marginal, en la controversia. La idea de la superposición, por otro lado, remite a la superposición que planteará Schrödinger en su famoso artículo del gato, pero en el caso de Darwin se trata de un fenómeno intencionado: el diseño experimental *produce* esa superposición como herramienta para sostener la imagen ondulatoria y no tener que recurrir a la imagen corpuscular. Puede pensarse que el razonamiento de Darwin resulta innecesario y que deviene una forma de negar la dualidad onda-partícula. No obstante, el mismo Darwin se ocuparía después, no mucho después, de defender la noción de la complementariedad y la *imposibilidad de escapar* del Principio de Incertidumbre.

La Sexta Conferencia de Solvay sería, después de las primeras discusiones públicas, un evento esperado con ansias por los científicos asistentes.

Aunque el tema principal de la conferencia era el de las propiedades magnéticas de la materia, y todos los documentos

presentados en las participaciones ciertamente abordaron el tema principal, había una gran expectación ante el reencuentro entre Bohr y Einstein. En este caso, el registro histórico de los hechos vuelve a jugar con la memoria: dado que las discusiones entre Bohr y Einstein no tuvieron lugar en el marco de las conferencias oficiales del encuentro, no hay registro de ellas a modo de transcripción, como en el caso de la V Conferencia. Aquí, con más resignación que voluntad, debe confiarse en la recolección de hechos que, como ya se ha mencionado, realizó Bohr en su texto de 1949. De esta discusión se conservan dos experimentos imaginarios, quizá los más famosos de todo el periodo en cuestión, junto al gato de Schrödinger y el microscopio de Heisenberg, por su carácter visual y el hecho de que su comprensión es posible sin formulaciones matemáticas o conocimientos especiales de física. Se trata del experimento del fotón y la caja: aunque se conoce como *el* experimento del fotón y la caja, debe aclararse que, en la discusión, se formularon dos experimentos muy similares pero con sensibles diferencias: en el primero, Einstein ponía en jaque la Interpretación de Copenhague; en el segundo, Bohr obtiene una «espectacular victoria» sobre Einstein (Jammer, 1974, p. 183). No interesa aquí utilizar el término victoria, ni mucho menos calificarlo de una manera tan ampulosa. Lo que interesa es, en cambio, exponer que en la discusión se parte de un primer experimento imaginario del fotón y la caja que conduce a un segundo experimento imaginario del fotón y la caja:

«Como una objeción a la noción de que el control del intercambio de momento y energía entre los objetos y los instrumentos de medición estaba excluido si estos instrumentos tenían el propósito de definir el marco espacio-temporal de los fenómenos, Einstein puso de manifiesto el argumento de que tal control debía ser posible

cuando las exigencias de la Teoría de la Relatividad eran tomadas en consideración. En particular, la relación general entre energía y masa, expresada en la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$, debería permitir, mediante un simple pesaje, medir la energía total de cualquier sistema y, por tanto, controlar, en principio, la energía transferida a él cuando interactúa con un objeto atómico.

Como un diseño especial para tales fines, Einstein propuso el dispositivo indicado en la figura 7 [Figura 9, aquí], que consiste en una caja con un agujero en un lado, que puede ser abierto o cerrado por un obturador mediante un reloj dentro de la caja.

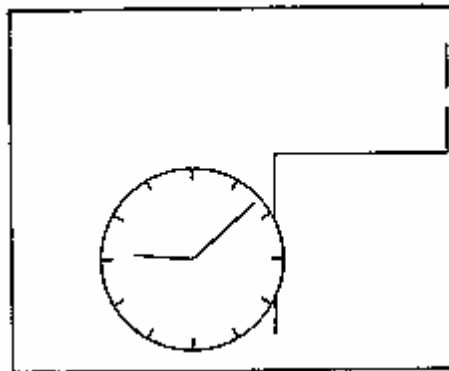


Figura 9. Einstein's Photon-in-a-box.
Bohr, 1949, p. 33.

Si, al principio, la caja contiene una cierta cantidad de radiación y el reloj está programado, en un tiempo elegido, para abrir el obturador durante un intervalo de tiempo muy corto, podría lograrse que un solo fotón fuera liberado a

través del agujero en un momento conocido con tanta precisión como fuera deseada. Incluso, aparentemente sería posible, mediante el pesaje de toda la caja antes y después del suceso, medir la energía del fotón con cualquier precisión deseada, en evidente contradicción con la incertidumbre recíproca del tiempo y la energía en la mecánica cuántica» (Bohr, 1949, pp. 33-4)⁴³.

El experimento imaginario, como explica Bohr, planteó serias dificultades, y resultó más que complicado hacerle frente. Más allá de la discusión, es importante señalar algunos elementos particulares de la formulación de Einstein.

Existe una notable semejanza con el experimento del reloj y la rendija que Einstein propuso en la V Conferencia de Solvay. En ese experimento imaginario se planteaba que un reloj firmemente

⁴³ «As an objection to the view that a control of the interchange of momentum and energy between the objects and the measuring instruments was excluded if these instruments should serve their purpose of defining the space-time frame of the phenomena Einstein brought forward the argument that such control should be possible when the exigencies of relativity theory were taken into consideration. In particular, the general relationship between energy and mass, expressed in Einstein's famous formula $E = mc^2$ (5), should allow, by means of simple weighing, to measure the total energy of any system and, thus, in principle to control the energy transferred to it when it interacts with an atomic object. // As an arrangement suited for such purpose, Einstein proposed the device indicated in Fig. 7, consisting of a box with a hole in its side, which could be opened or closed by a shutter moved by means of a clock-work within the box. // If, in the beginning, the box contained a certain amount of radiation and the clock was set to open the shutter for a very short interval at a chosen time, it could be achieved that a single photon was released through the hole at a moment known with as great accuracy as desired. Moreover, it would apparently also be possible, by weighing the whole box before and after this event, to measure the energy of the photon with any accuracy wanted, in definite contradiction to the reciprocal indeterminacy of time and energy quantities in quantum mechanics» (Bohr, 1949, pp. 226-8).

atornillado a una base abriría un obturador por el cual pasaría una partícula, de manera que sería posible, en principio, conocer con precisión el momento en que la partícula pasaría por la rendija, pero, como señala Bohr, no podría ayudar a la medición de la energía de la partícula (Bohr, 1949, 28-9). Este experimento imaginario del reloj y la rendija es el último que presenta Bohr en su narración de aquellos encuentros de 1927. No está consignado en las transcripciones de la conferencia y el detalle que se ofrece de su funcionamiento es escaso. El parecido, sin embargo, con el experimento del fotón y la caja es incontestable. La diferencia básica, como resulta evidente, es el acto de pesar la caja y obtener así la energía mediante la ecuación de Einstein. Quizá en 1927 Einstein no pensó en esta relación, y aquel experimento imaginario quedó, podría decirse, casi incompleto. Sin embargo, otros elementos agregados en la versión de 1930 resultan interesantes. La mezcla del obturador coordinado con el reloj se vio también en Ruark (1928), pero más interesante resulta la situación del reloj dentro de la caja, controlando el paso del fotón a través de la rendija, a voluntad del experimentador, tal y como habría funcionado el demonio de Maxwell 63 años antes. Aunque el planteamiento de Einstein y el de Maxwell (1871, p. 370) persiguen intereses distintos, es posible decir que el reloj de Einstein funciona como el demonio de Maxwell. Las diferencias entre la formulación de Einstein y la de Maxwell son evidentes, no hay aquí intención de hacer una equivalencia entre ambas, sino de establecer, como referencia tomada por el diseño de Einstein, el planteamiento imaginario de Maxwell: el reloj, dentro de la caja como el demonio, controla la salida de las partículas a voluntad.

Las narraciones de los hechos ocurridos en Solvay después de que Einstein presentara el experimento imaginario a Bohr hacen referencia a que el físico danés pasó la noche en vela buscando una respuesta (Jammer, 1974, p. 134). La discusión, narra Bohr, los llevó a

pensar en que era necesario revisar con más detalle las relaciones entre masa inercial y gravitacional, de acuerdo con la ecuación de Einstein; especialmente, explica Bohr, la relación entre el funcionamiento del reloj y su posición en un campo gravitacional (Bohr, 1949, p. 35). La discusión se centró en el diseño de un aparato que contuviera el planteamiento original de Einstein con algunas modificaciones:

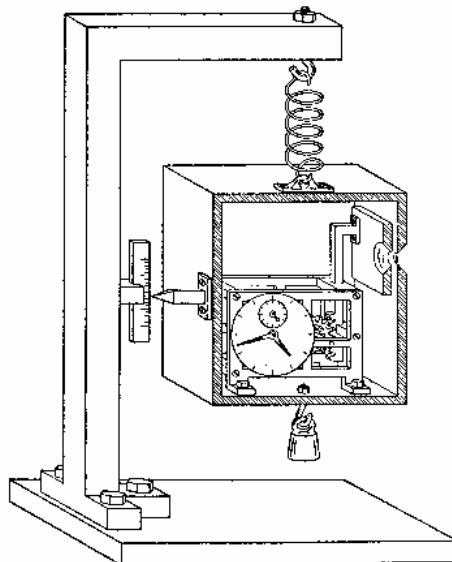


Figura 10. Photon-in-a-box.
Bohr, 1949, p. 35

«La caja, de la cual se muestra una sección con el fin de mostrar su interior [Figura 10], está suspendida de una balanza con un muelle, y dotada de un puntero para leer su posición en una escala fijada en el soporte de la balanza. El pesaje de la caja puede, pues, llevarse a cabo con cualquier

precisión deseada Δm ajustando la balanza a su posición en cero mediante una serie de cargas apropiadas. El punto esencial ahora es que ninguna determinación de esta posición con una precisión dada Δq involucrará un margen mínimo Δp en el control del momento de la caja, conectado con Δq mediante la relación (3) [$\Delta q \cdot \Delta p > h$]. Este margen, obviamente, debe ser más pequeño que el impulso total, el cual, durante el intervalo T del procedimiento de la balanza, puede ser dado mediante el campo gravitacional para un cuerpo con masa Δm , o $\Delta p \approx \frac{h}{\Delta q} T g \Delta m$ (6), donde g es la constante gravitacional. Mientras más grande sea la precisión en la lectura de q del puntero, más largo deberá ser, por consecuencia, el intervalo T del proceso de la balanza, si se desea obtener una precisión Δm en el pesaje de la caja y su contenido.

Ahora, de acuerdo con la Teoría General de la Relatividad, un reloj, cuando se desplaza en la dirección de la fuerza gravitacional de la cantidad de Δq , cambiará su velocidad [rate] en tal medida que su lectura en el curso del intervalo de tiempo T diferirá una cantidad ΔT , dada por la relación $\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{c^2} g \Delta q$ (7). Al comparar (6) y (7) vemos, por tanto, que, tras el procedimiento de pesaje, habrá, en nuestro conocimiento del ajuste del reloj, un margen $\Delta T > \frac{h}{c^2 \Delta m}$. Junto con la formula (5) [$E = mc^2$], esta relación conduce, de nuevo, a $\Delta T \cdot \Delta E > h$, de acuerdo con el Principio de Incertidumbre. En consecuencia, el uso del aparato como un medio de medir con precisión la energía

del fotón, evitará que podamos controlar el momento de su salida» (Bohr, 1949, p. 35-6)⁴⁴.

La respuesta de Bohr, más allá de representar esa llamada «espectacular victoria» sobre Einstein, es una muestra excelente sobre la forma de discutir que luego encontraría su máxima expresión en la respuesta publicada al artículo de EPR en 1935. Bohr no refuta el experimento imaginario de Einstein, quizá porque ya lo ha hecho tres años antes en ese mismo lugar; lo que hace es fortalecerlo, proporcionarle un diseño experimental mucho más robusto, dotarlo de condiciones técnicas y teóricas que le aporten una solidez que como diseño experimental no tenía, pero que como argumento lograba encarnar de alguna manera; es

⁴⁴ «The box, of which a section is shown in order to exhibit its interior, is suspended in a spring-balance and is furnished with a pointer to read its position on a scale fixed to the balance support. The weighing of the box may thus be performed with any given accuracy Δm by adjusting the balance to its zero position by means of suitable loads. The essential point is now that any determination of this position with a given accuracy Δq will involve a minimum latitude Δp in the control of the momentum of the box connected with Δq by the relation (3). This latitude must obviously again be smaller than the total impulse which, during the whole interval T of the balancing procedure, can be given by the gravitational field to a body with a mass Δm , or $\Delta p \approx \frac{h}{\Delta q} T g \Delta m$ (6), where g is the gravity constant. The greater the accuracy of the reading q of the pointer, the longer must, consequently, be the balancing interval T , if a given accuracy Δm of the weighing of the box with its content shall be obtained. // Now, according to general relativity theory, a clock, when displaced in the direction of the gravitational force by an amount of Δq , will change its rate in such a way that its reading in the course of a time interval T will differ by an amount ΔT given by the relation $\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{c^2} g \Delta q$ (7). By comparing (6) and (7) we see, therefore, that after the weighing procedure there will in our knowledge of the adjustment of the clock be a latitude $\Delta T > \frac{h}{c^2 \Delta m}$. Together with the formula (5), this relation again leads to $\Delta T \cdot \Delta E > h$, in accordance with the indeterminacy principle. Consequently, a use of the apparatus as a means of accurately measuring the energy of the photon will prevent us from controlling the moment of its escape» (Bohr, 1949, p. 35-6).

decir, el planteamiento experimental imaginario de Einstein era sencillo, pero la idea de utilizar la relación masa-energía le confería una dificultad considerable. Bohr rediseñó el experimento imaginario con una serie de elementos que, si bien satisfacían las carencias técnicas iniciales, le daban la oportunidad de refutarlo a partir de su propia fortaleza: la ecuación de Einstein.

Después de la conferencia de 1930, los caminos de Einstein y Bohr se separaron considerablemente. La discusión abandonaría los salones de las grandes conferencias privadas y se mudaría a las páginas de las revistas científicas. Pasarían cinco años antes de que Bohr y Einstein volvieran a establecer un diálogo. No obstante, en esos cinco años, los experimentos imaginarios propuestos por otros científicos proliferaron formando una red sutil, tenue, pero firme y constante.

Sobre el estado de la discusión en torno a la mecánica cuántica durante los primeros años de la década de 1930. De los escenarios *privados* a los escenarios *públicos*. La importancia de la muerte de Paul Ehrenfest.

Para algunos historiadores de la ciencia se abre, a partir de 1930, un debate significativo: el de la orientación de la crítica que Einstein hace sobre la mecánica cuántica. Algunos, como Jammer (1974), Pais (1984) y Paty (1995), afirman que hay un punto de inflexión a partir de la VI Conferencia de Solvay, y que después de 1931, tras la refutación que hace Niels Bohr del experimento imaginario del fotón y la caja, dicha crítica se divide en dos etapas: hasta antes de 1931 Einstein intentaba demostrar la existencia de inconsistencias internas de la teoría, y después de 1931 se dedicaría a demostrar la incompletitud de la mecánica

cuántica como representación de la realidad (Pais, 1984, p. 450). Sin embargo, Fine (1996) está convencido de que no hay tal cambio en la orientación crítica de Einstein. A partir de una revisión de las primeras controversias, hasta antes de 1931, encuentra que tanto la crítica a la incompletitud como a la inconsistencia interna ya estaban presentes en el programa científico que Einstein había construido alrededor de sus objeciones a la cuántica. Según Fine, es posible identificar cinco puntos fundamentales que Einstein criticaba a la mecánica cuántica a partir de 1927:

«(1) las ecuaciones de la teoría no son relativísticamente invariantes [*relativistically invariant*]; (2) no produce una buena aproximación del comportamiento clásico de los objetos macroscópicos; (3) conduce a correlaciones entre objetos separados espacialmente que parecen contravenir los principios de acción-por-contacto; (4) es una teoría esencialmente estadística que parece incapaz aún de *describir* el comportamiento de un sistema individual [énfasis del autor]; y (5) el alcance de las relaciones de conmutación no puede ser, de hecho, tan amplia como la teoría supone» (Fine, 1996, p. 28).

Fine encuentra la evidencia para su afirmación en dos fuentes principales: (1) una carta que Einstein escribió a Paul Ehrenfest el 12 de febrero de 1926, y (2) una comunicación escrita, quizá, para la Conferencia de Solvay de 1927, que finalmente no fue leída ahí, y que en Mayo del mismo año sería presentada ante la Academia Prusiana con el título *Does Schrödinger's Wave Mechanics Determine the Motion of a System Completely, or Only in the Sense of Statistics?* Del primero obtiene, Fine, los primeros dos puntos; el resto proviene del texto no publicado de 1927.

Por su parte, Jammer, Pais y Paty, acusan el cambio de orientación en la crítica a un elemento mucho más dinámico: cuando Einstein presentó, en las Conferencias de Solvay de 1927 y 1930, los experimentos imaginarios *Photon-and-slit* y *Photon-in-a-box* como sustento de su objeción hacia la nueva mecánica cuántica, los argumentos que se fueron sucediendo en el transcurso de las discusiones harían cambiar la opinión de Einstein con respecto al enfoque de su crítica; es decir, la oposición, principalmente por parte de Bohr, modificaría el modelo de su programa científico al derrotar las construcciones experimentales que ofreció en cada ocasión, demostrando que, en el conjunto de leyes físicas que regían los fenómenos bajo estudio, no había incoherencias que manifestaran un fallo interno de la teoría cuántica. El objetivo de su crítica, por tanto, debía mudarse al foco de la repercusión física de la mecánica cuántica como tal. No obstante, ninguno de los tres autores específica, en la manera en la que lo hace Fine, la diferencia entre los dos periodos identificados de la crítica de Einstein hacia la cuántica. ¿Hay en realidad una diferencia, como afirman Jammer, Pais y Paty, o la crítica de Einstein hacia la cuántica siempre fue siempre la misma? Una perspectiva diferente puede apuntar que existe una diferencia importante, aunque dicha diferencia no residiría en las opiniones que Einstein expresa en los documentos citados por Fine sino en la formulación de los experimentos imaginarios que utilizaría para sustentar sus argumentos contra la mecánica cuántica.

Después de la VI Conferencia de Solvay, donde Einstein presentó el experimento del fotón y la caja, los argumentos de Bohr para desmontar las objeciones de Einstein darían la clave para reformular aquellos primeros argumentos y dotar de una mayor solidez la discusión. A grandes rasgos, Bohr desestimó el experimento imaginario de Einstein mediante la relación del reloj y la perturbación producida en él por el campo gravitacional y el fotón que abandonaba la caja, cumpliendo así el

principio de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. A partir de esta refutación, los siguientes experimentos imaginarios de Einstein fueron concebidos, desde el inicio, para poner en tela de juicio otros aspectos de la mecánica cuántica, quizá no tanto por un cambio de orientación crítica como por una necesidad «técnica» en la configuración de los experimentos imaginarios, y se construyeron aceptando, de inicio, la validez de las relaciones de incertidumbre, incluso con más intensidad que la que ponía en ellas el propio Heisenberg (Jammer, 1974, p. 166), de manera que el basamento en las relaciones de incertidumbre tenía como objetivo que, al aceptarlas por completo, se evidenciara la falta de solidez total de la teoría cuántica (Jammer, 1974, p. 166). Es decir, el argumento crítico de Einstein en los experimentos imaginarios de 1927 y 1930 se asentaba en las bases del funcionamiento del diseño experimental imaginario, de manera que cuando se evidenció, durante las respectivas discusiones, el «fallo técnico» subyacente en el entramado del experimento, el argumento se debilitó y cayó. El resultado de estas discusiones conduciría a Einstein a robustecer el experimento imaginario porque ello significaba fortalecer el argumento de su crítica. Dicho fortalecimiento, sin embargo, no siempre pasaba por definir con más detalle la configuración experimental.

Las discusiones entre Niels Bohr y Albert Einstein durante las Conferencias de Solvay de 1927 y 1930 compartieron un denominador común más allá del tema en discordia y la localización geográfica de los encuentros: el mediador de aquellas discusiones fue el físico austríaco Paul Ehrenfest, amigo personal de Einstein a la vez que partidario de la nueva mecánica cuántica que encarnaba como líder Niels Bohr, con quien también guardaba una buena amistad. La relación de estos tres

físicos sería fundamental desde que Ehrenfest lograra poner en contacto a Einstein y Bohr en 1920 hasta el final de las vidas de cada uno. Sin embargo, el papel de Paul Ehrenfest como eje de una relación entre dos *antagonistas*, con programas científicos diferentes y modos de hacer ciencia completamente distintos, no sólo sería de gran importancia por su función mediadora sino también por la ausencia de dicha función cuando, en 1933, en la sala de espera de la consulta de un médico, Paul Ehrenfest acabó con su vida y la de su hijo con el disparo de un arma.

Ya a principios de la década de los años veinte, e incluso antes, Ehrenfest hizo de puente entre Einstein y Bohr, escribiendo cartas a uno para contarle de lo que hacía el otro, sus opiniones con respecto a las líneas de investigación de cada uno y las valoraciones que hacía de sus cualidades humanas. La admiración por uno y la amistad con el otro, aunado a su temperamento sumiso y a la idea, sin duda errada, de que él era un físico menor, harían de Paul Ehrenfest el eslabón perfecto para mantener, durante los primeros años de la discusión en torno a la mecánica cuántica, el papel de árbitro y mediador entre las ideas de Albert Einstein y Niels Bohr.

Ehrenfest conoció a Einstein en Praga en 1912 y a Bohr en mayo de 1918. Desde 1919 intentó reunirlos, en repetidas ocasiones, debido a la admiración que sentía por ellos y a lo fructífero que, sabía, podría ser un encuentro de tales magnitudes. Es a partir de la visita de Einstein a Ehrenfest en Leiden en 1919 cuando Einstein se dedica a estudiar con mayor profundidad y atención los trabajos de Bohr. Sin embargo, el primer encuentro entre Bohr y Einstein se sucedió sin la intervención directa de Ehrenfest: el 27 de abril de 1920, Bohr impartió una conferencia sobre su más reciente trabajo *On the Series Spectra of the Elements*, en la Sociedad Alemana de Física, gracias a una invitación de Max Planck (Klein, 2010, p. 320). Einstein formaba parte de la audiencia. Las primeras impresiones de Einstein sobre Bohr, referidas

en una carta a Ehrenfest el 4 de mayo de 1920, fueron positivas, de admiración y amistad.

Más tarde, en torno al Congreso de Solvay de 1921, Ehrenfest se preparaba para impartir el informe de Bohr sobre sus trabajos más recientes, después de que el propio Bohr, y poco antes Einstein, notificaran su imposibilidad de asistir al encuentro, que empezaría el primero de abril. El informe que Bohr habría de leer fue enviado a Lorentz, presidente del Congreso, y a Ehrenfest, cuya intención era reconstruir lo mejor posible las ideas de Bohr a través de una recolección de notas que Kramers, en ese tiempo trabajando con Bohr en Copenhague, le enviaría por carta, de manera que Einstein, que en principio asistiría al evento, pudiera tener de buena mano una panorámica de las nuevas ideas de Bohr. Sin embargo, aunado a la ausencia de Einstein, el informe de Bohr, que sería enviado en dos borradores, quedó incompleto: la segunda parte nunca fue terminada, y Ehrenfest ofreció un informe donde apenas se bosquejaban las ideas del Principio de Correspondencia, que debía ser tratado con detalle en el borrador de esa segunda parte que Bohr nunca envió a Ehrenfest (Klein, 2010).

El papel de mensajero, intermediario, árbitro, revitalizó a Ehrenfest y lo puso en el vértice de una discusión que crecería aun después de su muerte y que lo mismo le traería ese nuevo ímpetu a su participación en los eventos vanguardistas de la física como también una serie de conflictos internos sobre su implicación con cada uno de los bandos en disputa. Pais recoge una conversación que Samuel Goudsmit tuvo con Ehrenfest a mediados de 1927, en la que Ehrenfest, entre lágrimas, le dijo que se veía obligado a decidir entre las posiciones de Bohr y Einstein, y que sólo podría estar de acuerdo con la de Bohr (Pais, 1979).

Bohr también tuvo palabras para hacer un breve resumen de la participación de Ehrenfest en la discusión con Einstein: «Recuerdo también cómo en la cima de la discusión, Ehrenfest, en su manera afectuosa de bromear con los amigos, con un tono jocoso, señaló la aparente similitud entre la actitud de Einstein [frente a la nueva mecánica cuántica] y la de los oponentes de la teoría de la relatividad; pero, al instante, Ehrenfest añadió que él no sería capaz de encontrar alivio en su propia mente antes de que la concordia con Einstein fuera alcanzada» (Bohr, 1949, p. 209). Para Ehrenfest, el entusiasmo y el conflicto irían de la mano en aquellos años. Su mediación entre los dos físicos más destacados de la época ayudó a desmenuzar los argumentos de uno para que fueran más evidentes al otro, y construir, en términos que fueran accesibles a todos, nuevas ideas y formas de explicarlos en aquellos foros que fueron las conferencias de Solvay y la larga saga epistolar que mantuvo tanto con Einstein como con Bohr.

Así, entre 1925 y 1927, la principal vía de comunicación entre Bohr y Einstein, que no pudieron encontrarse personalmente durante esos años y cuya relación no era tan estrecha como la que tenía cada uno con otros físicos que, a la vez que colegas, eran amigos, fue a través de la correspondencia que ambos, cada uno por su parte, mantenía con Paul Ehrenfest.

Aunque Einstein y Bohr mantuvieron correspondencia entre ellos, siempre fue a través de Ehrenfest que se hacían saber, el uno al otro, sobre las novedades de sus concepciones en torno a la polémica de la mecánica cuántica. Era Ehrenfest quien desmenuzaba los argumentos de uno para el otro, en una suerte de diálogo indirecto mediado por el físico austríaco. A pesar de este papel tan importante, la mayor parte de las investigaciones que abordan el diálogo entre Bohr y Einstein o las discusiones en general que tuvieron lugar durante aquellas décadas en torno a la mecánica cuántica toman la figura de Paul Ehrenfest como

secundaria o menor, con nula incidencia: un físico menor que pasó, aunque muy cerca, al lado de dos grandes monumentos de la ciencia. Sin embargo, su participación fue, sin duda, de gran importancia, y su ausencia a partir de 1933 se sintió no sólo en el plano humano y afectivo, sino en la relación entre Einstein y Bohr, en la que una discusión cada vez más intensa y personal se llevaba a cabo en una arena cada vez más distante e impersonal.

Ciertamente, el papel de Ehrenfest como nodo de la correspondencia entre Einstein y Bohr fue fundamental, pero su participación en las discusiones presenciales durante los encuentros de los dos físicos, principalmente durante las conferencias de Solvay de 1927 y 1930, está más allá del simple valor de mediador. Para Landsman (2006), la presencia de Ehrenfest en esos encuentros no sólo cumplió la función de intermediario y árbitro, sino también la de cronista: de los comentarios a manera de sumario de aquellas reuniones, apunta Landsman, los de Bohr, publicados en 1949, son los más conocidos; Bohr, sin embargo, escribe desde la memoria y desde la perspectiva del «vencedor», mientras que Einstein lo hace desde una posición caracterizada por la objeción y la constante proposición de escollos intelectuales. La posición de Ehrenfest, sin embargo, se debate entre la amistad y las convicciones científicas, y son siempre estas últimas las que resultan vencedoras, sin prejuicio de la predilección que sintiera por una u otra personalidad. Una carta de Ehrenfest, fechada el 3 de noviembre de 1927 y dirigida a Goudsmit, Uhlenbeck y Dieke, en Leiden, ofrece una interesante perspectiva interna de lo que estaba pasando en el interior del debate entre Einstein y Bohr durante aquella conferencia de Solvay:

«¡Bruselas-Solvay estuvo bien! Lorentz, Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Kramers, Pauli, Dirac, Schrödinger, De Broglie (...) y yo. BOHR, muy por encima de todos. Al principio no se le comprendió del todo (...), luego, paso a paso, fue derrotándolos a todos. Naturalmente, una vez más, la horrible terminología hechizante de Bohr. Imposible para cualquier otro resumirlo todo. (Pobre Lorentz, haciendo de intérprete entre los ingleses y los franceses, que eran absolutamente incapaces de entenderse los unos a los otros. Resumiendo a Bohr. Y Bohr contestando acongojado.) (Cada noche, a la 1 a.m., Bohr venía a mi habitación SÓLO PARA DECIRME UNA COSA, hasta las tres a.m.) Fue una delicia para mí estar presente durante las conversaciones entre Bohr y Einstein. Era como un juego de ajedrez. Einstein todo el tiempo con nuevos ejemplos. En cierto sentido una máquina de movimiento perpetuo del segundo tipo para romper las RELACIONES DE INCERTIDUMBRE. Bohr, como salido de entre unas nubes de humo filosófico constantemente buscando las herramientas para aplastar un ejemplo tras otro. Einstein, como un muñeco en una caja: saltaba fresco cada mañana. Oh, aquello no tenía precio. Pero me considero, casi sin reservas, por Bohr y contra Einstein. Su actitud hacia Bohr es ahora exactamente como la actitud de los defensores de la simultaneidad absoluta hacia él. (...)!!!!!! BRAVO BOHR !!!!!!» (Ehrenfest a Goudsmit et al., 1927, citado en Landsman, 2006)⁴⁵.

⁴⁵ «Brussels–Solvay was fine! Lorentz, Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Kramers, Pauli, Dirac, Schrödinger, De Broglie (...) and I. BOHR towering completely over everybody. At first not understood at all (...), then step by step

Las dos reuniones de Solvay serían la cumbre de la intervención de Ehrenfest en el diálogo entre Bohr y Einstein y, aunque Einstein mantuvo correspondencia con él después de 1930, a partir de aquella fecha su participación fue diluyéndose con prisa. Las razones, bien conocidas, serían más personales que científicas. La importancia de Ehrenfest, y de otros pocos científicos que pudieron tomar parte de las discusiones que ocurrían durante el desayuno y la cena de aquellos días de Solvay, se refrenda al revisar las transcripciones de las discusiones abiertas después de cada conferencia: la participación de Bohr y Einstein es mínima, casi nula, como si se guardaran, para la discusión personal, íntima, la formulación de sus mejores argumentos. Argumentos que, durante las charlas, Ehrenfest se dedicaba a clarificar para que esa Torre de Babel de la que hablara, según referenciaba Pelsneer, no impidiera la comprensión de uno y otro: en el último día de la conferencia de 1927, Ehrenfest se acercó a la pizarra y evocó la imagen de la Torre de Babel: «Y dijeron:...Vamos, edifiquemos...una torre cuya cúspide pueda alcanzar el cielo; y *hagámonos un nombre*...Y el señor dijo:...Vamos,

defeating everybody. Naturally, once again the awful Bohr incantation terminology. Impossible for anybody else to summarize. (Poor Lorentz as interpreter between the British and the French who were absolutely unable to understand each other. Summarizing Bohr. And Bohr responding with polite despair.) (Every night at 1 a.m. Bohr came into my room just to say ONE SINGLE WORD to me, until three a.m.) It was delightful for me to be present during the conversations between Bohr and Einstein. Like a game of chess. Einstein all the time with new examples. In a certain sense a perpetuum mobile of the second kind to break the UNCERTAINTY RELATION. Bohr from out of philosophical smoke clouds constantly searching for the tools to crush one example after the other. Einstein like a jack-in-the-box: jumping out fresh every morning. Oh, that was priceless. But I am almost without reservation pro Bohr and contra Einstein. His attitude to Bohr is now exactly like the attitude of the defenders of absolute simultaneity towards him. (...!!!!!! BRAVO BOHR !!!!!!» (Ehrenfest to Goudsmit et al., 1927, citado en Landsman, 2006).

descendamos y confundamos su lengua, que no sea posible entender el habla de cada uno» (Génesis 11: 3-7, reportado por Pelsneer, su énfasis; en Bacciagaluppi & Valentini, 2009, pp. 21-22)⁴⁶. La selección de la cita es, por demás, interesante: Ehrenfest no apuntó los pasajes completos sino que seleccionó con precisión las ideas sobre la edificación, la «cúspide que pueda alcanzar el cielo», el «hacerse un nombre» y la «confusión de la lengua»: intentaba ofrecer una imagen de lo que eran aquellas conferencias pero, sobre todo, una imagen del diálogo entre Einstein y Bohr.

Ehrenfest comprendía que el lenguaje de cada uno no utilizaba los mismos mecanismos, y que la forma que tenía cada uno de ver la ciencia tenía bases muy diferentes. «La reunión de Solvay de 1930 fue la última ocasión donde, en discusiones compartidas con Einstein, pudimos beneficiarnos de la estimulante y mediadora influencia de Ehrenfest, pero poco antes de su profundamente triste muerte en 1933 me dijo que Einstein se encontraba lejos de estar satisfecho y que, con su usual precisión, había discernido nuevos aspectos de la situación que fortalecían su actitud crítica» (Bohr, 1949, p. 220)⁴⁷. Por eso la participación de Ehrenfest era necesaria, y por eso su ausencia, cada vez mas notable a partir del final de la conferencia de Solvay de 1930, provocó, aunque fuera de manera indirecta, un cambio radical en la

⁴⁶ «And they said one to another:...Go to, let us build us...a tower, whose top may reach unto heaven; and *let us make us a name*...And the Lord said:...Go to, let us go down, and there confound their language, that they may not understand one another's speech» (Genesis 11: 3-7, reportado por Pelsneer, su énfasis; en Bacciagaluppi & Valentini, 2009, pp. 21-22).

⁴⁷ «The Solvay meeting in 1930 was the last occasion where, in common discussions with Einstein, we could benefit from the stimulating and mediating influence of Ehrenfest, but shortly before his deeply deplored death in 1933 he told me that Einstein was far from satisfied and with his usual acuteness had discerned new aspects of the situation which strengthened his critical attitude» (Bohr, 1949, p. 220).

discusión en torno a la nueva mecánica cuántica: cuando Ehrenfest se alejó de la mediación directa, durante los encuentros de Einstein y Bohr, y de la mediación epistolar, al referir a uno las ideas del otro en el entramado postal que los unía, la polémica se abrió a un espacio que, hasta entonces, había sido poco explotado: la publicación en revistas.

Es cierto que mucho antes de la muerte de Ehrenfest en 1933, como se verá más adelante, varios experimentos imaginarios con relación a la mecánica cuántica habían sido ya publicados. A partir de 1931, de manera breve y aún bajo la influencia, aunque cada vez más débil, de Ehrenfest, la polémica es llevada directamente a las publicaciones especializadas, principalmente en los Estados Unidos.

La ausencia de Paul Ehrenfest como mediador de la discusión, como vínculo de la rivalidad científica entre los programas de Niels Bohr y Albert Einstein, obligó a que la discusión se llevara a cabo de una manera distinta. Los experimentos imaginarios cambiaron de arena a lo largo de todo el desarrollo de la física cuántica, pero quizá sea éste el cambio más sustancial, el de mayor repercusión, y el que llevó tanto a la polémica como a la herramienta de la experimentación imaginaria a alcanzar márgenes más amplios. Ehrenfest sería para Einstein y Bohr lo que Etienne La Boite para Michel de Montaigne: la ausencia que marca el inicio de la escritura.

**CAPÍTULO III. 1931-1935. DISCUSIÓN ABIERTA: EL CASO DEL
EXPERIMENTO IMAGINARIO DE EINSTEIN, PODOLSKY & ROSEN.**

*Mientras siga habiendo ramas del saber
ajenas al experimento,
estará justificada la esperanza.*
Elías Canetti
El Suplicio de las Moscas

Cinco años de cambios. Las visitas de Einstein a Estados Unidos y el largo lustro de las mudanzas. ¿Apertura de la polémica? Los participantes ocultos de la discusión. La voluntad de una oposición a Copenhague.

El primer cambio notable en el contexto de los experimentos imaginarios, más allá del enfoque de la crítica de Einstein hacia la mecánica cuántica, tiene que ver con la *apertura* de un discurso que, en principio, se reducía a unos cuantos elegidos. Aunque a partir de 1931 fueron apareciendo más científicos que, aquí o allá, se sumaban a la discusión libremente, desde unos años antes, como ya se ha visto, algunas voces intentaban hacerse escuchar desde una *periferia* que cada vez se cerraba más en torno al centro neurálgico de la discusión. Como producto de esa *apertura* del discurso y la participación, cambió también la manera de comunicar los experimentos imaginarios; o quizá fue el cambio de formato lo que permitió la entrada de nuevos nombres en la

escena: en lugar de quedar encerrados en los hemiciclos de las conferencias privadas, la correspondencia y los breves encuentros entre los actores principales, las revistas y publicaciones periódicas especializadas, como *The Physical Review*, *Nature*, *Die Naturwissenschaften*, *Science*, entre otras, empezaron a desempeñar un papel fundamental en la proliferación tanto de los argumentos de la discusión como de los experimentos imaginarios. Poco a poco se fueron abandonando esos recintos de torre de marfil y se logró una mudanza a una forma más pública, más inmediata y que recorrería con mayor facilidad todo el orbe.

Quizá uno de los principales motores del cambio fue, en un comienzo, la visita de Einstein al Instituto Tecnológico de California, en Pasadena, donde comenzó a trabajar con colaboradores que hacían carrera en las universidades norteamericanas, junto a los cuales publicó sus primeros artículos en inglés. Más tarde, hacia 1933, Einstein se mudaría definitivamente a Estados Unidos, esta vez a la Universidad de Princeton, en New Jersey, desde donde publicaría el famoso artículo conocido como EPR. Esa distancia sembrada de pronto entre Einstein y Bohr, las principales voces míticas de la polémica, sería el espacio necesario para la entrada de nuevos participantes, y para que, también de una manera casi súbita, el idioma vehicular de la física, hasta entonces el alemán, fuera sustituido, casi definitivamente, por el inglés. El lustro que va de 1931 hasta 1935 estuvo lleno de mudanzas de este tipo. Incluso revistas alemanas como *Die Naturwissenschaften* y *Zeitschrift für Physik* fueron sustituidas como el reducto por excelencia de la física por la norteamericana *The Physical Review*. Así, incluso Bohr, en su respuesta a EPR, utilizó el inglés antes que su danés nativo o su buen alemán.

Fue en esa mudanza definitiva donde quizá Einstein encontró el punto de inflexión necesario para oponerse más intensamente a la Interpretación de Copenhague. En Europa, Einstein no solamente

debatía contra una teoría que, desde la perspectiva matemática, resolvía una gran cantidad de problemas, sino que, además, se oponía a todo un grupo de científicos crecidos en ese modo de ver la física, un grupo sólido y bien conformado, liderado por un Niels Bohr al que ya se le consideraba un *gurú* de la física. Aunque contaba con algunos simpatizantes, sus colegas más cercanos se inclinaron hacia nociones diferentes a la de él: Ehrenfest y Born no sólo aceptaron la Interpretación de Copenhague, sino que participaron activamente en su solidificación, y Schrödinger seguía su propio camino, casi en solitario, compartiendo, sí, puntos en comunión con Einstein, pero llevando a cabo un importante papel en la formulación de la teoría a la que él criticaba. Einstein era un físico de una generación que ya se iba agotando. Su precocidad científica sería, en aquellos años, un peso demasiado grande frente a un veloz rejuvenecimiento de la física: para 1935 Einstein tenía 56 años y, aunque Bohr era sólo seis años menor, Heisenberg y von Weizsäcker contaban apenas con 34 y 23 años respectivamente. Ambos pertenecían a una generación, la que creció con Bohr como maestro, que naciendo a principios del siglo XX se había desarrollado con precocidad en las primeras tres décadas de este siglo. En Estados Unidos, Einstein encontró la complicidad en Tolman (de 54 años), Podolsky (de 39), y Nathan Rosen (de 26), que trabajarían con él intentando, quizá, emular una versión opuesta del grupo de Copenhague. Tal vez Pauli lo entendiese así cuando, en 1935, escribió una carta a Heisenberg en la que hablaba de la, entonces reciente, publicación del artículo de Einstein Podolsky y Rosen, y donde se refería a estos últimos como «no muy buena compañía», y llamaba a Einstein «veterano caballero» (carta de Pauli a Heisenberg, 15 de junio de 1935, citado en Landsman, 2006, p. 228).

Este proceso de cambios vitales, aunado a eventos antes mencionados como la muerte del mediador por excelencia entre

Einstein y Bohr, Paul Ehrenfest, en 1933, o los hechos políticos que convulsionaban Europa, afectó también la forma de hacer y comunicar la física y, por consiguiente, a los experimentos imaginarios. La *apertura* acentuó la existencia de una suerte de centro neurálgico de la discusión, encarnado en Bohr y Einstein y en un grupo periférico. Este último influyó también, aunque, tal vez, indirectamente, en el desarrollo de los acontecimientos y en el papel de los experimentos imaginarios en la física cuántica. Como se ha visto, no se trata de una *apertura* en términos estrictos, pues la discusión no estuvo nunca del todo cerrada. No obstante, a partir de 1931, algo cambió sustancialmente.

1930-1931: ¿Los últimos rescoldos del experimento del microscopio de Heisenberg? Para una defensa del Principio de Incertidumbre. Nieblas, nubes y cámaras de gas. Un cambio de perspectiva.

La figura de Charles Galton Darwin apareció, en 1928, cuando propuso el llamado *Principle of Postponement*. Esta propuesta apareció acompañada de algunos experimentos imaginarios. Fue, quizá, tras su participación en la VI Conferencia de Solvay cuando sus intuiciones respecto a la mecánica cuántica padecieron un cambio. Darwin pasaría de proponer que todos los fenómenos eran explicables mediante la ecuación de onda y que la imagen corpuscular no era necesaria, a subrayar la importancia capital del Principio de Incertidumbre, es decir, el *necesario* proceso de abandono de la física clásica con el fin de adoptar por completo una nueva física que estaría basada en la mecánica cuántica de acuerdo a la Interpretación de Copenhague. Sus artículos fueron conocidos, sin duda, por Einstein, Bohr, Tolman y Heisenberg, y se mantuvo siempre

al tanto de las publicaciones y de las polémicas más novedosas. Su papel como administrador científico comenzaría a desarrollarse en la época de la guerra, y su faceta editorial sería sorprendente: bastaría echar un vistazo a cualquier número de *Proceedings of the Royal Society*, publicado entre 1927 y 1935, para constatar que la presencia de la pluma de Darwin fue apabullante.

En marzo de 1931, Darwin publicó el artículo *Examples of the Uncertainty Principle*, recibido por la junta editorial de la *Royal Society* de Londres el 17 de diciembre de 1930, apenas unos meses después de la VI Conferencia de Solvay. Se trata de una defensa del Principio de Incertidumbre a partir de experimentos imaginarios surgidos a partir de la formulación del experimento del microscopio de Heisenberg. ¿Por qué es importante este artículo? Aunque los experimentos imaginarios que plantea Darwin son variaciones de los experimentos de Heisenberg (1927), su centro de atención se focaliza en la importancia, sobre la que ya se ha hecho hincapié antes, del Efecto Compton, y en el papel fundamental de los instrumentos de medición dentro de los procesos de la física cuántica: para Darwin los instrumentos de medición son el medio por el cual el Principio de Incertidumbre se hace presente en los fenómenos microscópicos. Según Darwin, la concepción de la materia en la nueva física obligaba a una nueva interpretación del papel de los instrumentos de medición: «Ahora que sabemos que la materia posee también propiedades ondulatorias, existe la necesidad de una teoría del poder de resolución de los instrumentos mecánicos, y eso es exactamente lo que proporciona el Principio de Incertidumbre» (Darwin, 1931a, p. 633)⁴⁸. El punto de partida de Darwin es la conjunción del experimento del microscopio de Heisenberg con la idea

⁴⁸ «Now that we know that matter also has wave properties, there is need of a theory of the resolving power of mechanical instruments, and this is exactly what the Uncertainty Principle supplies» (Darwin, 1931a, p. 633).

de que, agregando un dispositivo de medición extra, el experimento tendría un mayor grado de precisión (táctica usada ya por Bohr en las Conferencias de Solvay), aceptando, no obstante, que añadiendo un nuevo dispositivo a la configuración experimental contribuiría a la creación de nuevas variables y, por tanto, a una mayor incertidumbre. Darwin explica el experimento del microscopio de rayos gamma de forma sencilla, dando por imposible cualquier objeción, y procede a formular un experimento imaginario con un electrómetro para dejar claro su punto de vista.

Consideremos, escribe Darwin, el siguiente problema. Un electrón (o cualquier partícula de carga conocida) se encuentra libre en una línea determinada, pero en reposo. Tenemos un electrómetro en un punto fijo sobre dicha línea, con el cual medimos la fuerza eléctrica del electrón, y, a partir de ella, calculamos su posición. Deseamos ver por qué se descarta la posibilidad de realizar el experimento con precisión infinita. Para hacer esto debemos considerar el poder de resolución de los electrómetros, y la forma más fácil de estimar el poder de resolución de cualquier instrumento es aprovecharse de los teoremas de óptica más conocidos. Por tanto, continúa, elegimos un electrómetro óptico, para el cual la estimación es simple. Una forma posible de medir campos eléctricos es observar el efecto Stark que producen. Nuestro electrómetro es, así, un espectro tubular de emisión de líneas que muestra el efecto Stark, y nosotros medimos el desplazamiento de uno de estos (Darwin, 1931a, p. 634)⁴⁹.

⁴⁹ «Consider the following problem. An electron (or any particle of known charge) is free on a certain line, but at rest. We have an electrometer at some fixed point on this line, with which we measure the electric force from the electron, and from this we calculate its position. We want to see how we are prevented from doing the experiment with infinite accuracy. To do this we must consider the resolving power of electrometers, and the easiest way of estimating the resolving power of any instrument is to take advantage of the well-known theorems of optics on the

Para Darwin, el electrómetro falla en la medición de la partícula. Si se considera que el instrumento funciona emitiendo sólo un átomo para reducir su impacto sobre el electrón libre, y se asume que se encuentra en un nivel 1 al principio del experimento y en un nivel 2 al final, entonces, en un tiempo Δt , el átomo del electrómetro cambia del estado 1 al estado 2; así, dado que el átomo posee un momento, debe analizarse el efecto que ocasiona en el electrón libre. En el estado 1, el átomo tendrá un momento M_1 , y un momento M_2 en el estado 2. El momento del átomo será, por tanto, de un valor indefinido entre M_1 y M_2 . Sólo si se cumpliera que $M_1=M_2$, entonces, sería posible una observación sin incertidumbre (Darwin, 1931a, p. 635)⁵⁰. Sin embargo, como el electrón posee, en efecto, un momento diferente en cada estado, el uso de un electrómetro afectaría la medición simultánea de otras magnitudes. Es perceptible, en este punto, la referencia a los experimentos imaginarios de Heisenberg (1927).

Lo mismo ocurre en el segundo experimento que plantea Darwin. Esta vez se propone el uso de un magnetómetro. Se establecen las mismas restricciones que para el caso del electrómetro pero se utiliza, a diferencia del anterior, la influencia del efecto Zeeman: «Ahora consideramos un problema similar para campos magnéticos, esta vez usando la forma generalizada del efecto Zeeman como magnetómetro. Supondremos que un electrón (sin *spin*) se está moviendo a lo largo del eje x en una posición conocida con velocidad aproximada u . Un

subject. We therefore choose an optical electrometer, for which the estimation is simple. A possible way of measuring electric fields is to observe the Stark effect that they produce. No restriction whatever is placed on the magnitude of the Stark effect, and so we may expect that it will represent the resolving power of other electrometers also. Our electrometer is thus a spectrum tube emitting lines which show the Stark effect, and we measure the displacement of one of these» (Darwin, 1931a, p. 634).

⁵⁰ «The rule that there can be no observation without uncertainty is illustrated by the lines for which $M_1 = M_2$ » (Darwin, 1931a, p. 635).

magnetómetro es instalado en el punto $(0, a, 0)$ con el fin de medir la componente a lo largo de z . Los símbolos M , etc., ahora representan el momento magnético del átomo del magnetómetro» (Darwin, 1931a, p.636)⁵¹. Ahora se recuerda que, durante el experimento, el momento del magnetómetro cambia de M_1 a M_2 , lo que produce una inducción electromagnética, hecho que cambiará el resultado de la observación (Darwin, 1931a, p. 636)⁵². De nuevo la incertidumbre aparece en la medida en que el momento, aunque definido en el intervalo M_1 - M_2 , no puede precisarse más allá de dicho intervalo y, dependiendo de cuándo ocurre el cambio de M_1 a M_2 , el desplazamiento que sufre el electrón puede ser mayor si el cambio ocurre pronto, en relación con el tiempo t del experimento, o menor si el cambio ocurre más tarde. La incertidumbre, por tanto, deviene insalvable.

El intervalo M_1 - M_2 del que habla Darwin procede de la idea del paquete de ondas que ya Heisenberg (1927) utilizó en varios experimentos imaginarios, La idea del intervalo M_1 - M_2 , siguió apareciendo con ligeras o importantes modificaciones en años posteriores y jugó un papel importante en la formulación de otros experimentos imaginarios y en el desarrollo de la física cuántica.

Darwin recurrirá a una suerte de *método Bohr*, es decir, pondrá a prueba los experimentos imaginarios ya planteados introduciendo variantes que *los vuelvan más precisos*, con el fin de probar que el uso de

⁵¹ «We now consider a similar problem for magnetic fields, this time using the generalized Zeeman effect as magnetometer. We will suppose that an electron (without spin) is moving along the x -axis in a known position with velocity approximately u . A magnetometer is installed at the point $(0, a, 0)$ so as to measure the component along z . The symbols M , etc., now represent the magnetic moment of the magnetometer-atom» (Darwin, 1931a, p. 636).

⁵² «But we must remember that during the time of the experiment the magnetometer's moment changes from M_1 to M_2 , and this change will give rise to electromagnetic induction» (Darwin, 1931a, p. 636).

una diferente disposición de los elementos no eleva la precisión del diseño experimental, sino que, simplemente, ofrece otras variables incontrolables. Si se considera, dice Darwin, que el electrón se encuentra fijo y a una distancia r del magnetómetro, se tiene aún la imprecisión del momento en el intervalo M_1 - M_2 . Por tanto, la fuerza M que se desea medir en relación con la distancia r entre el magnetómetro y el electrón genera un movimiento de precesión en el electrón que ocurriría varias veces durante el experimento, de manera que sólo sería posible medir la componente de fuerza del momento con respecto al eje en que se sucedería la precesión. Como el magnetómetro establece el ángulo recto de las componentes del vector, resultaría imposible determinar las componentes de magnetización del electrón simultáneamente, aun con el uso de dos magnetómetros «porque el electrón se encontrará en un movimiento de precesión a través de ángulos arbitrarios sobre los dos ejes al mismo tiempo, y por tanto terminará en una dirección bastante arbitraria. Esta es una propiedad bien conocida de la cuantización espacial, conectada con el hecho de que las componentes angulares del momento en direcciones perpendiculares no son conmutativas» (Darwin, 1931a, p. 637)⁵³. Darwin ofrece, al final, la clave la incertidumbre de su doble magnetómetro: las componentes angulares del momento no son conmutativas. Se sostiene, por tanto, lo que el Principio de Incertidumbre establece: las cantidades no conmutativas no pueden medirse simultáneamente con cualquier precisión deseada.

Los argumentos de Darwin, sustentados en una serie de formulaciones matemáticas, se ven reforzados en la última sección del

⁵³ «[...] for the electron will be precessing through arbitrary angles about the two axes at the same time and so will end in a quite arbitrary direction. This is a well-known property of spatial quantisation, connected with the fact that the components of angular momentum in perpendicular directions do not commute» (Darwin, 1931a, p.637).

artículo, donde se ofrece una re-elaboración de un experimento imaginario de Bohr. Esta forma de «exhaustiva revisión» de los experimentos imaginarios será la característica principal de las formulaciones de Darwin, aprendida, quizá, del ejemplo de Bohr y Heisenberg. En el experimento imaginario de la última sección se sostiene que la velocidad y la posición del electrón se han fijado ya previamente mediante otro experimento no especificado como, por ejemplo, la liberación del electrón a través de su paso por una ranura luego de haber caído a través de un voltaje definido, con la correspondiente incertidumbre. La intención es diseñar un experimento en el que las incertidumbres sean tan grandes que puedan ser eliminadas de la ecuación. Cinco magnetómetros son colocados en las esquinas de un pentágono regular. La disposición de Darwin da como resultado una serie de ecuaciones de las cuales pueden obtenerse los resultados de la velocidad, dados por u, v, w , la posición, en x, y, z y el momento m . La intención es lograr un poder de resolución infinito. Sin embargo, la conclusión vuelve sobre la inducción magnética que cada uno de los cinco magnetómetros ejercería sobre el electrón y que, en lugar de que cada carga se anulase mediante la otra, siempre habría una reacción del electrón que sería incontrolable y que ocurriría en un periodo de tiempo demasiado breve como para que fuese posible resolver el problema de la fuerza magnética con respecto al momento del electrón (Darwin, 1931a, p. 638-9)⁵⁴.

⁵⁴ «We shall therefore design a self-contained experiment, from which, assuming infinite resolving power and no reaction, it would be possible to evaluate position and velocity as well as moment. We take a given direction for the moment, say along z . There are then seven unknowns, the position x, y, z and velocity u, v, w of the electron, and the magnitude of its momento [...] we conclude that a set of five magnetometers in the plane of xy will suffice. It does not matter how they are disposed, but for symmetry we may put them at the corners of a regular pentagon. Thus our experiment would work, given infinite resolving power. It may be thought trivial to go into so much detail over the matter, but the whole subject is

Puede que los experimentos que plantea Darwin no resulten del todo convincentes, no ya porque pueda haber en su planteamiento un error de procedimiento, sino por la redundancia y la insistencia con que el Principio de Incertidumbre está presente en todo proceso de medición. El argumento presentado antes pierde consistencia sin su andamiaje matemático (que no se presenta aquí porque la intención de este trabajo queda muy lejos de demostrar si los formalismos son válidos o no, o incluso de su explicación detallada al lector). Sin embargo, lo importante de estas formulaciones dentro del contexto de los experimentos imaginarios en torno al debate de la mecánica cuántica es la presencia de elementos en ellas como *diseño experimental*, *interferencia*, y la relación entre los dos estados de un sistema (recordar el intervalo del momento M_1 - M_2). Estos elementos, en adelante, seguirán cobrando importancia en el debate y en la formulación de experimentos imaginarios.

Darwin elaboraría, alrededor de la fecha de publicación de este artículo, otro texto mucho más claro y explicativo, casi popularizador, que leyó en una conferencia en el Lowell Institute (Darwin, 1931b) que tuvo lugar en el mismo mes de marzo. Se centraría, igualmente, en la defensa del principio de incertidumbre, y algunos de los elementos de aquel experimento serían retomados por otros científicos en discusiones posteriores (por ejemplo, Rosen & Vallarta, 1932). La cuestión importante es el uso que Darwin hace de ciertas nociones, como los

full of pitfalls and it is prudent always to examine a proposed experiment so as to be sure that it Works [...] All five do this [magnetic resonance], and since we have supposed that the impulses are in directions at five equal angles, it happens that the final velocity will be the same as the original. But the times at which the impulses act are quite uncorrelated, so that the electron will have moved its position by an amount uncertain [...] This means that any magnetometer exerts such a reaction on a free electron, that it drives it right away in a shorter time than is necessary in order to resolve the magnetic force due to the moment» (Darwin, 1931a, pp.638-9).

efectos Compton, Doppler y Zeeman, o de instrumentos como los electrómetros y magnetómetros, e incluso de ideas como *configuración experimental* e *interferencia* que, como se ha mencionado antes, se convierten en elementos estandarizados mediante su continuo uso en los experimentos imaginarios, y juegan un papel fundamental en la comunicación entre científicos.

La materia de trabajo de quien formula experimentos imaginarios es el lenguaje, el lenguaje especializado de la física de un momento específico, un lenguaje que, más que en las palabras, se sustentaba en los conceptos. Mientras más se utilizaba un concepto en una disposición experimental imaginaria, más peso específico ganaba dentro del discurso de los debates. Darwin, como otros, colaboraría con este proceso.

Sería a principio de la década de 1930 cuando Darwin comenzaría a cambiar su perspectiva inicial en torno a la mecánica cuántica: si en el artículo de 1928 proponía *posponer* la imagen corpuscular y valerse únicamente de la ecuación de ondas, en el primer artículo de 1931 puede verse que se aproxima más a una aceptación de la imagen corpuscular: ha encontrado un valor diferente para el Principio de Incertidumbre: la estimación del poder de resolución de los instrumentos ópticos con los que se observan y miden los procesos atómicos.

La larga estela del experimento del microscopio de Heisenberg seguiría pesando en Darwin durante mucho tiempo, así como se mantendría presente en otros experimentos imaginarios sutilmente y de soslayo a lo largo de todo el periodo hasta 1935, e incluso más allá.

Pero existe otra forma, contemporánea, del microscopio de rayos gamma. Mientras trabajaba en su disertación doctoral bajo la tutoría de Heisenberg, Karl F. von Weizsäcker diseñó su propio microscopio. El experimento imaginario, contenido en un artículo

publicado en 1931 en *Zeitschrift für physik* y en su tesis doctoral, es el mismo que planteó Heisenberg en 1927. Lo que varía son las conclusiones obtenidas por von Weizsäcker, quien va un poco más allá al decir que cuando un fotón es golpeado por un electrón, y el momento de ambos es conocido antes de la colisión, mediante una medición del momento del fotón después de la colisión, en virtud de la ley de conservación, el momento del electrón después del impacto puede ser inferido. De acuerdo a la mecánica cuántica, explica von Weizsäcker, el electrón debe representarse mediante una onda monocromática plana; si, por su parte, el fotón es dirigido, después del impacto, al plano de la imagen del sistema óptico (microscopio), se determina la posición de su colisión con el electrón, no su momento; por tanto, la posición del electrón cuando ocurre la colisión puede obtenerse y el electrón debe representarse como una onda esférica (von Weizsäcker, 1931, citado en Jammer, 1974, p. 179)⁵⁵. De alguna manera, la sombra del entrelazamiento vuelve a aparecer, ahora, en las conclusiones del experimento imaginario de von Weizsäcker: sería posible, aun después de la interacción entre las partículas, decidir qué magnitud medir, hecho que permitiría inferir el estado del electrón (ya sea una onda plana o esférica, momento o posición, respectivamente) mediante la elección de la medición que se llevará a cabo en el fotón.

⁵⁵ «If a photon is diffracted by an electron and the momenta of both were known before their collision, from a measurement of the momentum of the diffracted photon, by virtue of the conservation laws, the *momentum* of the electron after the impact can be inferred; according to quantum mechanics the electron must consequently be represented by a plane monochromatic wave. If, on the other hand, the photon, after de impact, is directed in the optical system, not to the focal plane but to the image plane of the system, the position of its collision with the electron, and not its momentum, is determined; hence the *position* of the electron at the moment of collision can be ascertained and, according to quantum mechanics, the electron must be represented by a spherical wave, originating from its position» (von Weizsäcker, 1931, citado en Jammer, 1974, p. 179)

El experimento imaginario de von Weizsäcker, una reproducción del microscopio de Heisenberg (1927) pero con una serie de conclusiones alternativas, da pie a interesantes conclusiones sobre los alcances de la formulación de Heisenberg: (1) el principio básico del funcionamiento del microscopio de rayos gamma seguirá utilizándose en los experimentos imaginarios posteriores, como lo hizo, por ejemplo, Darwin (1931a, 1931b) y el propio von Weizsäcker (1931); (2) las referencias a la acción-a-distancia, aunque acaso tímidas en Heisenberg (1927), se van haciendo más evidentes en aquellos que reproducen su experimento imaginario o utilizan sus bases teóricas y técnicas para formular nuevos planteamientos. Pero los primeros años de la década de 1930 serán largos y estarán llenos de experimentos imaginarios, discusiones, publicaciones y correspondencia. La pregunta que emerge aquí es si los rescoldos del microscopio de Heisenberg lograrán encenderse más allá de estas lejanas influencias.

El artículo de Einstein, Tolman y Podolsky: Sobre el conocimiento del pasado y el futuro en la mecánica cuántica. La visita a Pasadena: el primer gesto de un cambio radical en la comunicación científica. La física comienza su mudanza. Breves variaciones epistolares del experimento del fotón y la caja. La complicidad de Ehrenfest.

Después de la Conferencia de Solvay de 1930, Einstein enfocó sus esfuerzos, aparentemente, en dos objetivos fundamentales: (1) encontrar y demostrar la incompletitud de la mecánica cuántica, y (2) construir un bando opositor al ya consolidado grupo de Copenhague. Sobre lo primero, Michel Paty dice que « [...] desde 1927 hasta 1931 Einstein

intentó demostrar las inconsistencias de la mecánica cuántica, utilizando las relaciones de incertidumbre con el objetivo de demostrar, mediante ejemplos físicos, que no pueden ser tan absolutas como la mecánica cuántica lo establece; luego, desde 1931 hasta su muerte, Einstein no buscó ya más inconsistencias, sino que intentó demostrar que la mecánica cuántica estaba incompleta » (Paty, 1995, p. 186). Más allá de si Einstein cambió o no la orientación de su crítica, por el momento surge una pregunta más importante: ¿qué ocurrió en ese punto de inflexión, qué hay de crucial en el año 1931?

Con respecto al segundo punto puede decirse que, hasta entonces, aunque había una cantidad considerable de científicos que se oponían a los preceptos de la mecánica cuántica, había sido Einstein, prácticamente en solitario, quien se enfrentó en público a la escuela de Niels Bohr y al creciente dominio de la cuántica. Ciertamente contaba con aliados, pero cierto también que la mayor parte de la crítica pública surgió y fue sostenida desde un solitario activismo. Quizá por ello, durante la estancia en CalTech (Pasadena), buscó la alianza de Richard C. Tolman y Boris Podolsky para concretar la escritura de un artículo titulado *Knowledge of past and future in Quantum Mechanics*, que se publicaría en marzo de 1931 en *Physical Review*.

La mayor parte de la bibliografía en torno a Einstein o a su discusión con la cuántica pasa por alto la importancia del artículo de 1931 bajo la consideración de que sus resultados son fallidos y de que apenas representa un tropezón en la construcción de la crítica de Einstein. Max Jammer (1974), que le dedica algunas de las páginas más lúcidas, apunta que se trata de «una contribución única» (Jammer, 1974, p. 169), y se dedica luego a un interesante análisis del experimento imaginario. Por su parte, Abraham Pais (1984), escribe apenas las siguientes líneas: «Antes de nada, su comunicación siguiente sobre mecánica cuántica, presentada en febrero de 1931, muestra que había

aceptado la crítica de Bohr. Trata de una nueva variante del experimento del reloj en la caja. Se usa información experimental sobre una partícula para hacer predicciones sobre una segunda partícula. Este trabajo, anticipación del artículo Einstein-Podolsky-Rosen, a comentar más abajo, no requiere ser recordado en sus conclusiones» (Pais, 1984, p. 449-50). Y concluye con lo siguiente: «Los autores se ven *obligados a concluir que no puede haber método para medir el impulso de una partícula que no cambie su valor*, afirmación que es, por supuesto, inaceptable» (Pais, 1984, p, 450, énfasis del autor). Que las conclusiones del artículo sean *inacceptables*, como dice Pais, no significa que no posean un valor digno de consideración: (1) Pais afirma que el artículo con Tolman y Podolsky muestra que Einstein había aceptado la crítica de Bohr, no obstante, parece más bien que Einstein había comprendido que era necesario atacar la cuántica desde el propio lenguaje del grupo de Copenhague, es decir, a través de sus propios argumentos y postulados, (2) es una *variante* del experimento del fotón y la caja: sólo parcialmente, en todo caso es el mismo experimento del fotón y la caja que Ehrenfest refirió a Bohr en la carta, ya revisada, del 9 de julio de 1931 y que, supuestamente, explicaría las verdaderas intenciones del fotón y la caja de Einstein presentados en la VI Conferencia de Solvay. La variación, en este caso, no tiene que ver con el fotón y la caja, sino con un elemento muy importante que, hasta entonces, Einstein no había considerado: una segunda partícula. Aunque no interactúan entre sí durante el experimento (como ya se verá más adelante), las partículas están sujetas a la acción del observador, de manera que Einstein puede, no mediante la interacción entre las dos partículas sino mediante el común punto de origen de ambas, la caja, extrapolar las magnitudes de una partícula a partir de las magnitudes de la otra, y (3) que la solución del experimento sea *inacceptable*, como afirma Pais, no es necesariamente el fallo del artículo, sino la intención de los autores por demostrar lo *inacceptable* del

postulado cuántico a la manera de una *reductio ad absurdum* que, como en el caso del experimento imaginario del gato de Schrödinger (1935), busca evidenciar las limitaciones de la mecánica cuántica al momento de ser aplicada a fenómenos macroscópicos.

Hacia finales de la década de los veinte, Richard C. Tolman trabajaba en una variedad temática dominada por la relación entre la termodinámica y la relatividad. La mayor parte de los artículos que publicó entre 1928 y 1930 tenían interés en conciliar o comunicar la relatividad general y la ley de la conservación de la energía (por ejemplo: *On the equilibrium between radiation and matter in Einstein's closed universe*, 1928; *On the use of the energy momentum principle in General Relativity*, 1928; *On the weight of heat and thermal equilibrium in General Relativity*, 1930). En marzo de 1931, Tolman publicó, junto a Boris Podolsky y Paul Ehrenfest, un artículo escrito durante 1930 y enviado a *Physical Review* a mediados de enero de 1931, titulado *On the gravitational field produced by light*. Fue en el mismo número de la revista, el número 37, donde apareció publicado, en las cartas al editor, el breve artículo titulado *Knowledge of past and future in Quantum Mechanics*, firmado por Einstein, Tolman y Podolsky. Por su parte, Boris Podolsky, que había publicado en 1928 un artículo sobre la dispersión de los átomos de hidrógeno dentro del marco de la mecánica ondulatoria, tenía mucho más interés, al menos en lo que a trabajos publicado respecta, por la física de partículas.

En el número 73 de la revista *Science*, del 27 de marzo de 1931, aparece una breve nota titulada *Knowledge of past and future in Quantum Mechanics*, en la sección de *Science News* (el mismo día en el que C.G. Darwin impartía una conferencia sobre el Principio de Incertidumbre en el Instituto Lowell), sin embargo, no lleva firma personal ni se trata del mismo artículo publicado por Einstein, Tolman y Podolsky en *Physical Review*. Se trata de una suerte de nota publicitaria en la que se aproxima

el contenido del texto original con fines más bien propagandísticos (esto mismo sucedió con EPR días antes de su publicación, mediante una nota breve filtrada en el *New York Times*). La nota comienza de la siguiente manera: «El Profesor Albert Einstein ha concluido que los eventos pasados de cualquier clase no pueden ser descritos con certidumbre precisa» (Science News, 1931, p, 10)⁵⁶. En cierta medida sensacionalista, el segundo párrafo del artículo intenta resumir el cuerpo central del argumento de Einstein, Tolman y Podolsky: «El Profesor Einstein no solamente concluye que existe una incertidumbre en la descripción de lo que ha pasado en el mundo submicroscópico con el que tratan usualmente la mayor parte de las teorías físicas recientes. Él aplica este *desconcertante* principio de incertidumbre [énfasis agregado] a los eventos de cada día tal y como la apertura y cierre de un obturador en una cámara. No podemos saber exactamente el momento justo en que el obturador se abre o se cierra» (Science News, 1931, p. 10)⁵⁷. Citando párrafos enteros del artículo de Einstein, Tolman y Podolsky (ETP), la nota de *Science News* equipara en importancia el principio de incertidumbre de Heisenberg a la teoría de la relatividad de Einstein, y reafirma a Einstein como uno de los precursores de la teoría cuántica, junto a Max Planck, añadiendo que la concepción de que la energía es discontinua representa una de las ideas más fructíferas de la nueva física. La nota concluye con que «Ahora, el Profesor Einstein añade el último bloque de construcción a nuestra concepción de la materia y la energía al

⁵⁶ «Professor Albert Einstein has concluded that past events of any sort can not be described with precise certainty» (Science News, 1931, p. 10).

⁵⁷ «Not only does Professor Einstein conclude that there is an uncertainty in the description of what has happened in the submicroscopic world with which the most recent theories of physics usually deal. He applies this disconcerting principle of uncertainty to such every-day happenings as the opening and closing of a shutter on a camera. We can not know exactly just when a shutter opens or closes» (Science News, 1931, p. 10).

decirnos que tanto el pasado como el futuro son inciertos» (Science News, 1931, p, 10)⁵⁸, para luego cerrar con la mención de los colaboradores, Tolman y Podolsky, presentado brevemente sus credenciales. El carácter del artículo es mayormente publicitario y presenta una imagen más bien curiosa de la tesis que sostienen los tres autores, al agregar aseveraciones como «este *desconcertante* principio de incertidumbre» y «tanto el pasado como el futuro son inciertos». De esta manera el artículo de *Science News* funcionó como un preámbulo incitante a la lectura del texto de ETP y ayudó, aunque en menor medida, al estímulo de una controversia que, por otra parte, no alcanzó cotas demasiado elevadas.

El artículo firmado por Einstein, Tolman y Podolsky comienza con la siguiente aseveración: «Es bien sabido que los principios de la mecánica cuántica limitan las posibilidades de la exacta predicción con respecto a la trayectoria futura de una partícula. Algunas veces se ha supuesto, sin embargo, que la mecánica cuántica permite una descripción exacta de la trayectoria pasada de una partícula» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 780)⁵⁹. En base a esto, los autores afirman que el conocimiento de la trayectoria pasada de una partícula puede conducir a la predicción del futuro comportamiento de la trayectoria de una segunda partícula del mismo tipo, hecho no permitido por la mecánica cuántica. Como consecuencia de esto, puesto de manifiesto gracias a un *experimento ideal*, se demostrará, explican, que los principios

⁵⁸ «Now Professor Einstein adds the latest building block to our conception of matter and energy by telling us that the past as well as the future is uncertain» (Science News, 1931, p. 10).

⁵⁹ «It is well known that the principles of quantum mechanics limit the possibilities of exact prediction as to the future path of a particle. It has sometimes been supposed, nevertheless, that the quantum mechanics would permit an exact description of the past path of a particle» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 780).

de la mecánica cuántica involucran una incertidumbre en la descripción de eventos pasados que resulta análoga a la incertidumbre en la predicción de eventos futuros. Por tanto, afirman los tres autores, se obtiene que esta incertidumbre en la descripción de eventos pasados es resultado de la limitación del conocimiento que puede ser adquirido mediante la medición del momento (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 780)⁶⁰. El enunciado del experimento imaginario es el siguiente (ver Fig. 11):

«Considere una pequeña caja B , [...] que contiene un número determinado de partículas idénticas en agitación térmica y que está provista de dos pequeñas aberturas que se mantienen cerradas por el obturador S . El obturador está diseñado para abrirse automáticamente durante un corto periodo de tiempo y luego volver a cerrarse, y el número de partículas en la caja es tal que al llegar el momento, una partícula abandona la caja y viaja en la dirección SO , hacia un observador situado en O , y una segunda partícula viaja por el camino más largo entre SRO mediante la reflexión elástica del reflector elipsoidal R .

⁶⁰ « [...] the possibility of describing the past path of one particle would lead to predictions as to the future behavior of a second particle of a kind not allowed in the quantum mechanics [...]. It will hence be concluded that the principles of quantum mechanics actually involve an uncertainty in the description of past events which is analogous to the uncertainty in the prediction of future events [...]. And it will be shown for the case in hand, that this uncertainty in the description of the past arises from a limitation of the knowledge that can be obtained by measurement of momentum» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 780).

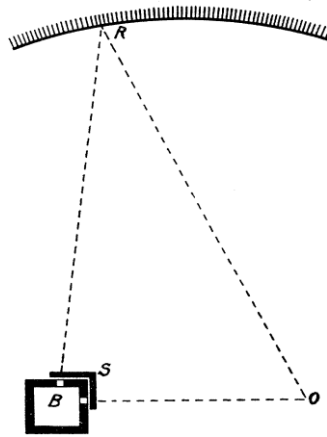


Figura 11. Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, Physical Review, 37, p. 780.

La caja se pesa con precisión antes y después de que el obturador se haya abierto, con el objetivo de determinar la energía total de las partículas que han abandonado la caja, y el observador en O está equipado con medios para observar la llegada de las partículas, un reloj para medir el tiempo de su llegada y algún instrumento para medir el momento. Además, las distancias SO y SRO han sido medidas de antemano con precisión, -la distancia SO será suficiente para que el ritmo del reloj en O no se vea alterado por los efectos gravitacionales relacionados con la medición del peso de la caja, y la distancia SRO será lo suficientemente larga como para permitir una precisa segunda medición de la caja antes de la llegada de la segunda partícula.

Supongamos ahora que el observador en O mide el momento de la primera partícula mientras se aproxima a lo largo de la trayectoria SO , y luego mide el tiempo de su llegada. Desde luego, la última de estas dos observaciones, hecha, por ejemplo, con la ayuda de una luz de rayos gamma, alterará el momento de una manera desconocida. Sin embargo, al saber el momento de la partícula en el pasado, y, por tanto, su velocidad anterior y su energía, parece posible calcular el tiempo en que el obturador debió abrirse mediante el conocimiento del instante de llegada de la primera partícula, y calcular la energía y velocidad de la segunda partícula a partir del conocimiento de la pérdida de energía de la caja cuando el obturador se abrió. Parecería posible, entonces, predecir de antemano tanto la energía como el momento de llegada de la segunda partícula, un resultado paradójico ya que, tanto la energía como el tiempo son cantidades no conmutativas en la mecánica cuántica» (Einstein, Tolman & Podolsky 1931, p. 780-781)⁶¹.

⁶¹ «Consider a small box B , as shown in the figure, containing a number of identical particles in thermal agitation, and provided with two small openings which are closed by the shutter S . The shutter is arranged to open automatically for a short time and then close again, and the number of particles in the box is so chosen that cases arise in which one particle leaves the box and travels over the direct path SO to an observer at O , and a second particle travels over the longer path SRO through elastic reflection at the ellipsoidal reflector R .//The box is accurately weighed before and after the shutter has opened in order to determine the total energy of the particles which have left, and the observer at O is provided with means for observing the arrival of particles, a clock for measuring their time of arrival, and some apparatus for measuring momentum. Furthermore the distances SO and SRO are accurately measured beforehand, -the distance SO being sufficient so that the rate of the clock at O is not disturbed by the gravitational effects involved in weighing the box, and the distance SRO being very long in order to permit an

Una vez explicado el *experimento ideal*, los autores establecen sus conclusiones inmediatamente: « [...] se concluye que los principios de la mecánica cuántica deben considerar una incertidumbre en la descripción de eventos pasados que resulta análoga a la incertidumbre en la predicción de eventos futuros» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 781)⁶². Así, los autores afirman que si resulta imposible medir el momento de una partícula, según lo que establece la mecánica cuántica, sin alterar la medición de su movimiento o su posición y que, por tanto, no es posible reunir suficiente información para realizar una predicción de su comportamiento futuro, también su comportamiento pasado es incierto, ya que, al no poder reconstruir la trayectoria pasada de la partícula ni el tiempo en que se mueve a lo largo de esa trayectoria, se impone una seria limitación para la localización temporal de un fenómeno macroscópico tal como la abertura del obturador:

accurate reweighing of the box before the arrival of the second particle.//Let us now suppose that the observer at O measures the momentum of the first particle as it approaches along the path SO , and then measures its time of arrival. Of course the latter observation, made for example with the help of gamma-ray illumination, will change the momentum in an unknown manner. Nevertheless, knowing the momentum of the particle in the past, and hence also its past velocity and energy, it would seem possible to calculate the time when the shutter must have been opened from the known time of arrival of the first particle, and to calculate the energy and velocity of the second particle from the known loss in the energy content of the box when the shutter opened. It would then seem possible to predict beforehand both the energy and the time of arrival of the second particle, a paradoxical result since energy and time are quantities which do not commute in quantum mechanics» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 780-781).

⁶² «It is hence to be concluded that the principles of the quantum mechanics must involve an uncertainty in the description of past events which is analogous to the uncertainty in the prediction of future events» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 781).

«Debe hacerse notar también que, aunque es posible medir el momento de una partícula y realizar, después, una medición de la posición, esto no proporcionará suficiente información para una completa reconstrucción de la trayectoria anterior de la partícula, ya que se ha demostrado que no puede existir un método para medir el momento de una partícula sin modificar su valor. Finalmente, es de especial interés enfatizar la notable conclusión de que los principios de la mecánica cuántica realmente impondrían limitaciones en la localización en el tiempo de un fenómeno macroscópico tal como la apertura y el cierre de un obturador» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 781)⁶³.

Es decir, la incertidumbre en la observación de la trayectoria de la partícula a causa de la medición de su momento impide la determinación del instante exacto en que el obturador S se abre para dejar salir dicha partícula. Ciertamente, la paradoja resulta evidente. Sin embargo, más allá de considerar la paradoja como el único valor (y, además, errado) del planteamiento de ETP, es posible inferir de la conclusión que, si sólo puede tenerse como resultado de la observación de la partícula una distribución de probabilidad que estime el momento en que la partícula salió de la caja, se conferiría una distribución de probabilidad para la situación espacio-temporal de un hecho establecido en el planteamiento

⁶³ «It is also to be noted that although it is possible to measure the momentum of a particle and follow this with a measurement of position, this will not give sufficient information for a complete reconstruction of its past path, since it has been shown that there can be no method for measuring the momentum of a particle without changing its value. Finally, it is of special interest to emphasize the remarkable conclusion that the principles of quantum mechanics would actually impose limitations on the localization in time of a macroscopic phenomenon such as the opening and closing of a shutter» (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 781).

del experimento (hecho que, ciertamente, es necesario para que toda la configuración experimental imaginaria ocurra) tal como la apertura del obturador. Esto conduce al lector a la pregunta: ¿cómo puede ser que la apertura del obturador sea un hecho probabilístico, siendo que la compuerta *debió* abrirse al inicio del experimento? Lo que plantean los autores no es si la apertura ocurrió o no, sino si es posible determinar el momento preciso en que la apertura y el cierre sucedieron.

Para lograr el objetivo de formular una crítica hacia la descripción de la realidad que realiza la cuántica, Einstein y sus colaboradores debían llegar en algún momento a aplicar esa descripción *fallida* a los procesos macroscópicos, como haría Schrödinger en 1935 con el caso del experimento imaginario del gato: construir una formulación lógica en términos microscópicos y llevarla a su repercusión en términos macroscópicos. En este sentido, el experimento imaginario de Einstein, Tolman y Podolsky no sería tanto una prefiguración de EPR (aunque ya pueden verse rasgos comunes), que no involucra una representación macroscópica específica, sino que se trataría, más bien, de una forma más definida y precisa del experimento del fotón y la caja pero con el interesante agregado de la segunda partícula: ya no sólo debe considerarse la interacción del objeto con los instrumentos de medición, sino de las dos partículas con los instrumentos de medición: la acción-a-distancia comienza a recordar ya al futuro *entrelazamiento*.

La formulación, pese a sus elementos recién incorporados, conserva los recursos que el propio Einstein ya había utilizado anteriormente: la sincronización de relojes, la medición de la cantidad de energía a través del pesaje de un contenedor del cual se desprende la partícula observada, la participación de un observador (como recordatorio de esa necesidad, según Einstein, de conciliar la cuántica con la relatividad), y el uso de sistemas de obturadores, cajas, rendijas y

trayectorias que obligaban al experimentador imaginario a trabajar con la simultaneidad de los fenómenos.

Resulta por demás evidente que el argumento no propone que la apertura o cierre del obturador sea un hecho probabilístico, sino la imposibilidad de localizar con precisión en el tiempo esa ocurrencia, cosa harto diferente de la idea de que el obturador pudiese no abrirse: el obturador se abre, es evidente, pero no puede saberse en qué momento preciso lo hace. En este caso será la forma de la exposición la que produzca el pequeño, casi imperceptible, engaño argumental, elemento que sirve a los propósitos de los autores para que el carácter estadístico se muestre como una condición inaceptable en la descripción de un hecho real, como la apertura del obturador.

El artículo en cuestión, que apareció en las últimas páginas del número 37 de *Physical Review*, terminó por pasar mayormente desapercibido y el eco de sus intenciones no tuvo un gran peso. No obstante, su importancia tiene otros alcances: como en las críticas recibidas durante las conferencias de Solvay de 1927 y 1930, Einstein usó el artículo de 1931 para aprender la lección y construir un *experimento ideal* más robusto y que pudiera causar mucho más revuelo. Lo lograría cuatro años después con la publicación del artículo de EPR. Ahora bien, el artículo de 1931 posee otras características que vale la pena revisar.

Por los años de su escritura, Einstein realizaba una estancia en CalTech, pero con boleto de vuelta a Alemania. Boris Podolsky tenía poco tiempo en los Estados Unidos y, de la misma manera, se encontraba en el Instituto Tecnológico de California como investigador visitante. Richard Tolman, por otro lado, tenía ya mucho más tiempo en CalTech y conocía de sobra el trabajo de Einstein, aunque no así, quizá, el de Podolsky. El resultado, pues, fue un extraño y breve artículo escrito casi tal y como fueron enunciados los experimentos imaginarios en las conferencias de Solvay, con un grado importante de oralidad y

escasez matemática, de forma breve, contundente y, tal vez, un tanto incompleta a la espera de la réplica, lo que fortalece su carácter de frontera en la forma de comunicar los experimentos imaginarios. Poco después, el equipo se separaría. Entonces, la figura de Tolman sería fundamental: años después, en 1933, recomendó a Boris Podolsky, que por entonces había vuelto a Rusia, para un puesto en el equipo de física teórica de la universidad, petición que, una vez aceptada, el propio Tolman notifica a Podolsky en una carta fechada en 16 de marzo de 1933. ¿Qué sentido hay, entonces, en la terna de autores de un artículo que pasó por la comunidad científica del momento sin pena ni gloria?, ¿es posible que la principal intención de Einstein fuera la de ensayar una suerte de preparación que lo llevaría, más tarde, junto a Podolsky y Rosen, a la publicación del artículo de 1935?, o bien, ¿intentaba conformar un grupo de científicos que se opusiera a la sólida escuela de Copenhague?

ETP llevó la discusión de la mecánica cuántica desde los privados salones de las conferencias de Solvay hasta las, podría decirse, *menos* privadas revistas científicas norteamericanas, las cuales ya llevaban esperándola con ansias un par de años.

Los detalles técnicos y teóricos usados por Einstein tanto en los experimentos imaginarios de las conferencias de Solvay como en el artículo de ETP serían una especie de *leitmotiv* que lo seguiría durante muchos años. En su correspondencia con Paul Ehrenfest se hace referencia a una variación del experimento del fotón y la caja (tomada aquí de Jammer, 1974) que, como dice el propio Jammer «en lugar de atacar directamente las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, intentó derivar de ellas una paradoja lógica» (Jammer, 1974, p. 170). El

razonamiento de Einstein en la correspondencia con Ehrenfest es el siguiente:

«Asuma que la caja con el reloj y el fotón ha sido pesada, y el fotón, subsecuentemente, liberado; entonces uno tiene la elección de repetir la medición de la caja -y así uno conocería con exactitud la energía emitida- o bien de abrir la caja, leer el reloj y comparar la lectura que ha sido perturbada por el proceso de medición con la escala estándar de tiempo -y entonces uno podría predecir el momento exacto de su llegada después de ser reflejada por un espejo fijo en una posición a una distancia conocida:

Sin interferir de ninguna manera con el fotón entre su salida y su posterior interacción con instrumentos de medición adecuados, somos, entonces, capaces de realizar predicciones precisas pertenecientes *tanto* al momento de su llegada *como* a la cantidad de energía liberada mediante su absorción. No obstante, como el formalismo mecánico-cuántico sostiene que la especificación del estado de una partícula aislada no puede incluir al mismo tiempo una conexión bien definida con la escala del tiempo y una determinación precisa de la energía, parece que este formalismo no ofrece los medios para una descripción adecuada» (citado en Jammer, 1974, p. 170-1)⁶⁴.

⁶⁴ «Assume the box with the clock and the photon has been weighed and the photon subsequently released; one then has the choice either of repeating the weighing of the box –and then one would know the exact energy emitted– or of opening the box, and reading the clock and comparing the reading which had been disturbed by the weighing process with the standard time scale –and then one could predict the exact moment of its arrival after it has been reflected by a fixed

Se trata del mismo razonamiento que Ehrenfest haría llegar a Bohr en la carta del 9 de julio de 1931, donde intentaba explicar las intenciones de Einstein con el experimento del fotón y la caja que planteó el año anterior en Solvay. Poco puede decirse sobre un argumento que parece ya repetitivo, salvo el hecho de que sería esa repetición constante lo que iría puliendo el argumento y el diseño experimental para llegar a ser lo que en 1935 se conocería como el experimento imaginario de EPR. Debe hacerse mención sobre el hecho de que la acción-a-distancia sigue apareciendo como una suerte de evidencia de que la mecánica cuántica es una teoría incompleta.

En la carta enviada a Bohr en 1931, Ehrenfest le explica que la intención de Einstein ya no es utilizar el experimento del fotón y la caja como un argumento en contra de las relaciones de incertidumbre, sino con un propósito distinto. Esta formulación se haría pública en noviembre de ese año en un coloquio en la Universidad de Berlín al que Einstein asistió invitado por Max Von Laue, y que sería referenciada en un breve sumario en *Zeitschrift für Angewandte Chemie* (1932) bajo el título *Über die Unbestimmtheitsrelation*. La descripción que hace Ehrenfest a Bohr de este experimento imaginario (recogido también en Jammer, 1974) es la siguiente:

mirror at a known distant position: // Without in any way interfering with the photon between its escape and its later interaction with suitable measuring instruments, we are, thus, able to make accurate predictions pertaining *either* to the moment of its arrival *or* to the amount of energy liberated by its absorption. Since, however, according to the quantum-mechanical formalism, the specification of the state of an isolated particle cannot involve both well-defined connection with the time scale and an accurate fixation of the energy, it might thus appear as if this formalism did not offer the means of an adequate description» (citado en Jammer, 1974, p. 170-1).

«1. Coloque el puntero del reloj a las 0 horas y haga que, cuando la posición del puntero marque las 1000 horas, el obturador se abra por un corto intervalo de tiempo.
2. Pese la caja durante las primeras 500 horas y atorníllela firmemente al marco de referencia fundamental.
3. Espere 1500 horas para asegurarse de que el cuanto ha dejado la caja en dirección al reflector fijo (espejo), situado a una distancia de $\frac{1}{2}$ año luz.
4. Ahora deje al interrogador elegir qué predicción quiere: (a) o bien el tiempo exacto de llegada del cuanto reflejado, o (β) el color (energía) de dicho cuanto. En el caso (a), abra la, todavía firmemente atornillada, caja y compare la lectura del reloj (el cual durante las primeras 500 horas estuvo afectado, debido a la fórmula del corrimiento a rojo gravitacional [redshift]) con el tiempo estándar y descubra el estándar de tiempo correcto para la posición del puntero en “1000 horas”; luego, el tiempo exacto de llegada puede ser calculado; en el caso (β), pese la caja de nuevo para la posición de 500 horas; entonces la cantidad exacta de energía puede ser determinada» (carta de Ehrenfest a Bohr, 9 de julio de 1931, versión tomada de Jammer, 174, p. 171)⁶⁵.

⁶⁵ «1. Set the clock's pointer to time 0 hour and arrange that at the pointer position 1000 hours the shutter will be released for a short time interval. // 2. Weigh the box during the first 500 hours and screw it firmly to the fundamental reference frame. // 3. Wait for 1500 hours to be sure that the quantum has left the box on its way to the fixed reflector (mirror), placed at a distance of $\frac{1}{2}$ light-year away. // 4. Now let the interrogator chose what prediction he wants: (a) either the exact time of arrival of the reflected quantum, or (β) the color (energy) of it. In case (a) open the still firmly screwed box and compare the clock reading (which during the first 500 hours was affected, due to gravitational red-shift formula) with the standard time and find out the correct standard time for the pointer position “1000 hours;”

En la carta, Ehrenfest explica a Bohr que la intención de Einstein con esta variación del experimento del fotón y la caja era la de construir una *máquina* que eyectara un proyectil y que, una vez el proyectil abandonara la máquina, un *interrogador* pediría al *maquinista* que inspeccionara la máquina y que predijera qué valor a de una magnitud A o bien qué valor b de una magnitud B obtendría el interrogador al someter el proyectil a una medición A o a una medición B , respectivamente, cuando el proyectil regresase después de un periodo de tiempo bastante largo, al ser reflejado por un espejo distante. Se asume que A y B son cantidades no conmutativas, tal y como lo son la posición y el momento, considerando que las cantidades A y B pueden ser la energía del fotón y su tiempo de llegada (Jammer, 1974, p. 171).

Así, explicaba Ehrenfest, dependiendo de qué medición elijamos hacer, otorgamos al fotón diferentes estados teóricos, uno con energía definida, otro con un tiempo de llegada definido. Es crucial, continúa, que, al realizar la medición del peso de la caja, ésta se encuentre separada de la reflexión del fotón, porque entonces la elección de un proceso de medición no afectará el estado real del fotón, lo que significa que el estado real del fotón cuando regrese será uno, y el mismo, a pesar de las mediciones realizadas en la caja. Esta es la visión de Einstein sobre la mecánica cuántica, concluye Ehrenfest. No obstante, mediante la mecánica cuántica se ha asociado dos estados teóricos diferentes a un estado real de la partícula, lo que sólo es posible si la descripción que la teoría cuántica hace de los estados reales es incompleta (carta de

then the exact time of arrival can be computed; in case (β) weigh the box again for 500 hours; then the exact energy can be determined» (carta de Ehrenfest a Bohr, 9 de julio de 1931, versión tomada de Jammer, 174, p. 171).

Ehrenfest a Bohr, 9 de julio de 1931, *Bohr Scientific Correspondence, Archive for History of Quantum Physics*, citado en Howard 1990, p. 98)⁶⁶.

Los *estados teóricos* a los que se refiere Ehrenfest no son otra cosa que las funciones de onda que representan uno y otro estado del sistema, según la descripción mecánico-cuántica, una idea que Einstein intentaría expresar con mayor detalle cinco años después en el documento de EPR y que, sin embargo, tampoco quedaría suficientemente clara (ya se hablará sobre esto más adelante). Es en torno a estas nociones donde reside el origen de unos de los conceptos más polémicos del periodo: el *criterio de realidad*, propuesto en EPR como piedra angular a partir de la cual se juzga la incompletitud de la mecánica cuántica.

Esa asignación de dos representaciones teóricas para un mismo estado del sistema será también objeto de revisión de otros científicos mediante otros experimentos imaginarios que irán apareciendo a lo largo de los años siguientes y que, de alguna manera, culminarán, aunque sin llegar a un final cerrado, en el documento que Erwin Schrödinger

⁶⁶ «Let the photon leave the box and be reflected back from a great time and distance, say one-half light year. At about the time when the photon is reflected, we can either weigh the box or check the clock, making possible our predicting either the exact time of the photon's return or its energy (literally, its color), which is to say that, depending upon which measurement we choose, we ascribe a different theoretical state to the photon, one with definite energy, one entailing a definite time of arrival. Crucial is the fact that the event of performing the measurement on the box –weighing it the second time or checking the clock– is space-like separated from the event of the photon's distant reflection, because then our choice of a measurement to perform can have no effect on the real state of affairs of the photon, meaning that the photon's real state of affairs when it returns will be one and the same, regardless of the measurement we performed on the box. This is all just quantum mechanics, in Einstein's view. But then quantum mechanics has associated two different theoretical states with one real state of affairs, which is possible only if the quantum theory's state descriptions are incomplete» (carta de Ehrenfest a Bohr, 9 de julio de 1931, *Bohr Scientific Correspondence, Archive for History of Quantum Physics*, citado en Howard 1990, p. 98).

publicó en 1935, y que contiene el famoso experimento imaginario del gato.

El valor, pues, de estas formulaciones reside en el entramado general de los experimentos imaginarios: una red que irá modificándose con los años para conducir a la gestación del concepto de *entrelazamiento*.

Cintilaciones, microscopios y diálogos *galileanos* para una defensa del Principio de Incertidumbre. La imposibilidad de escapar del indeterminismo. Incertidumbre Vs. Indeterminación: la naturaleza conflictiva de los términos. Una Torre de Babel Cuántica.

En junio de 1931 Charles Galton Darwin termina su conversión hacia la doctrina de la Complementariedad. Si bien antes había tratado de *postponer* la imagen corpuscular, ahora, en el cuarto documento de una serie de conferencias tituladas *The New Conceptions of Matter*, impartidas en el Lowell Institute en marzo de 1931, Darwin se centra en la dualidad onda-partícula y en cómo ninguna de las dos nociones explica, por sí sola, el comportamiento de la materia de forma completa y aceptable (Darwin, 1931b). La afirmación de que los electrones se comportan de una u otra forma dependiendo de la configuración experimental utilizada para observarlos, se expone así:

«Sea lo que sea aquello que llamamos materia puede ser sometido a varios experimentos, algunos de los cuales están diseñados para mostrar propiedades ondulatorias y otros propiedades corpusculares; pero si diseñamos un experimento que muestre las propiedades ondulatorias, el

experimento nos aparta al mismo tiempo de la observación de las propiedades corpusculares, y viceversa» (Darwin, 1931b, p. 654)⁶⁷.

En su artículo, Darwin plantea un experimento imaginario y hace referencia a otros dos, el experimento del microscopio de rayos gamma de Heisenberg y un experimento considerablemente parecido al de Einstein, Tolman y Podolsky pero sin referenciar su autoría.

El texto comienza reconociendo que la evidencia experimental demuestra que los electrones se comportan como ondas, pero que en ocasiones pueden presentar un comportamiento corpuscular, y que esta dualidad conduce a que la primera explicación no es del todo satisfactoria (Darwin, 1931b, p. 653).

El experimento imaginario que Darwin plantea se basa en la unión de dos experimentos diferentes que permitirían, al realizarse simultáneamente, mostrar tanto el comportamiento ondulatorio como el corpuscular de la materia. Dado que el texto es el resultado de una conferencia con carácter divulgativo, el discurso oral no es sólo uno de sus elementos clave: la narración está estructurada para mantener la atención del escucha y cada pauta narrativa sigue una trayectoria especial: la retención de información y el orden de las ideas buscan el desenlace revelador de cada problema propuesto. Su planteamiento es el siguiente:

«Existen sustancias que poseen la propiedad del centelleo cuando son golpeadas por los electrones. Una pantalla *de*

⁶⁷ «Whatever the thing is that we call matter, it can be submitted to various experiments, some of which are devised to show wave properties and some particle properties; but if we devise an experiment which shows the wave properties, that experiment debars us from observing the particle properties at the same time, and vice versa» (Darwin, 1931b, p. 654).

centelleos se hace mediante el ligero espolvoreo de cristales de sulfato de zinc sobre una hoja de cristal; cuando uno de estos cristales es golpeado por un electrón, emite una débil chispa que puede ser vista en la oscuridad mediante una lente de aumento. Cuando una pantalla de esta naturaleza es expuesta a un chorro de electrones, los centelleos aparecen irregularmente por toda la superficie. La inferencia natural a partir de este experimento es que el rayo de electrones es como una lluvia cayendo sobre la pantalla y cada centelleo se produce cuando una gota golpea contra la pantalla. Al parecer, tenemos una sencilla y completa prueba de que los electrones son pequeñas balas que viajan a lo largo de una línea desde el origen hasta el destino» (Darwin, 1931b, p. 653-4)⁶⁸.

Ya ha explicado que, mediante el centelleo, se demuestra la imagen corpuscular. No obstante, en el primer párrafo Darwin ya avanzó que la evidencia empírica demuestra que los electrones poseen un comportamiento ondulatorio, entonces ¿cuál de las dos imágenes es la *correcta*?, se plantea. Por ello, el experimento imaginario de Darwin continúa:

⁶⁸ «There exist substances which have the property of scintillation when struck by electrons. A scintillating screen is made by lightly powdering a sheet of glass with zinc sulphide crystals; when one of these crystals is struck by an electron it emits a faint spark, which can be seen in the dark with the help of a magnifying lens. When such a screen is exposed to a stream of electrons, scintillations appear irregularly all over it. The natural inference from this experiment is that the stream is like a shower of rain falling on the screen, and each scintillation is produced when a single drop hits the screen. We seem to have a perfect and complete proof that the electrons are little bullets each traveling along a line from source to target» (Darwin, 1931b, p. 653-4).

«Este experimento nos dice que el electrón es una bala en una parte del rayo, mientras que no podríamos explicar los experimentos de Thompson sin suponer que el electrón atravesó dos agujeros al mismo tiempo, como solamente una onda podría hacerlo. Para mostrar la contradicción con mayor fuerza, podemos combinar ambos experimentos en uno; aunque este experimento no se ha llevado a cabo en realidad, no existe una sombra de duda sobre lo que sería descubierto si fuera posible prácticamente. Si enviamos un chorro de electrones a través de dos pequeños agujeros muy cercanos uno al otro y luego buscamos centelleos, deberíamos encontrar que todavía se presentan como chispas aisladas, pero las chispas tendrían lugar sólo en ciertas zonas, y ninguna en absoluto en la zona entre los espacios donde la teoría de difracción predice oscuridades. Pero si después tapamos uno de los dos agujeros, destruiríamos la interferencia y obtendríamos centelleos en toda el área. La forma directa de explicar lo que ha ocurrido es que el chorro de electrones era una onda cuando pasó a través de los dos agujeros, pero que milagrosamente se convirtió en una partícula al golpear la pantalla» (Darwin, 1931b, p. 654)⁶⁹.

⁶⁹ «This experiment tells us that the electron is a bullet in one part of the stream, while we could not explain Thomson's experiments without supposing that the electron went through two holes at the same time, as only a wave can do. To bring out the contradiction still more strongly we may combine both experiments into one; though this experiment has not actually been done, there is not a shadow of doubt what would be found if it were practically possible. If we sent out a stream of electrons through two small holes close together and then looked for scintillations, we should find these still appearing as isolated sparks, but the sparks would all occur in certain bands, and none at all in between at the places where the diffraction theory predicts darkness. But if we afterwards block one of the two

La combinación de ambos experimentos es una de las propuestas interesantes de Darwin: una especie de expresión experimental de la Complementariedad. Por ello afirma que la «elucidación de esta contradicción es verdaderamente el punto central de la nueva teoría cuántica» (Darwin, 1931b, p. 654)⁷⁰. Aunque sigue refiriéndose a la dualidad onda-partícula como una contradicción, Darwin ha cambiado su esquema original de 1928 por una defensa del Principio de Complementariedad, y hace uso de la herramienta experimental imaginaria para lograr la demostración de que *ningún* arreglo experimental puede mostrar simultáneamente las manifestaciones de la imagen corpuscular y la imagen ondulatoria, imágenes que, sin embargo, se obtienen por separado en diferentes experimentos; por tanto, ambas imágenes son necesarias y complementarias. Ahora bien, Darwin, asistente a la VI Conferencia de Solvay, fue testigo de los encuentros entre Bohr y Einstein, por lo que comprendía el valor de la réplica en el uso de los experimentos imaginarios, de manera que buscó reformular sus planteamientos para explicar que experimentos *más precisos* no proporcionarán otros resultados:

«Supongamos, por ejemplo, que queremos asegurarnos que fue una partícula la que atravesó los dos agujeros. Deberíamos instalar una pantalla de centelleo sobre uno de los agujeros, y cuando viésemos un centelleo deberíamos decir que fue una partícula la que atravesó el agujero. Pero

holes, we shall destroy the interference and shall get scintillations everywhere. The crude way of saying what has happened is that the electron stream was a wave when it was going through two holes, but has miraculously turned itself into a particle when it hits the screen» (Darwin, 1931b, p. 654).

⁷⁰ «The elucidation of this contradiction is really the central point of the new quantum theory» (Darwin, 1931b, p. 654).

al hacerlo deberíamos evitar que la partícula atravesase [la pantalla] y, por tanto, no deberíamos obtener interferencias en el otro lado. A continuación, trataríamos de mejorar el experimento, imaginando que nuestra pantalla es tan delgada que el electrón puede producir un centelleo y aun así atravesarla. ¿Podríamos entonces no obtener así ninguna interferencia entre esta parte de la onda del electrón y la parte que atravesó el agujero no obstruido? Fallaríamos porque, aunque el electrón atravesara el primer agujero, el solo acto de provocar el centelleo alteraría la fase de la onda, y si esta fase cambiase, no podría haber interferencia» (Darwin, 1931b, p. 654)⁷¹

El resultado que finalmente obtiene Darwin posee dos caras: (1) por un lado, en el primer caso, el experimento combinado explica la posibilidad de que aplicando las dos formas de configuración puedan observarse las dos formas de comportamiento de un electrón, sea dicho, onda y partícula, y (2) por otro lado, el segundo caso intenta demostrar que, si se aplicase la configuración experimental propuesta en (1), no sería posible observar las dos formas de comportamiento del electrón ya que, aunque complementarias, la disposición de los medios de observación

⁷¹ «Suppose, for instance, that we wanted to make sure that it really was particles that were going through our holes. We should set a scintillating screen over one of them, and whenever we saw a scintillation we should say that there was a particle coming to that hole. But in doing so we should have prevented the particle going through and so obviously should not get interference on the other side. Next we might try to improve the experiment, by imagining our screen was so thin that the electron could produce a scintillation on it and still get through. Could we not then get interference between this part of the electron wave and the part that went through the other hole unimpeded? We should fail, because, though the electron wave has got through the first hole, the mere act of exciting the scintillation will alter the phase of its wave, and if this phase changes there can be no interference» (Darwin, 1931b, p. 654).

requeridos para percibir una de las formas del electrón no permite observar la otra propiedad; es decir, la configuración experimental para ver el comportamiento ondulatorio impide percibir el comportamiento corpuscular. Aunque pueda parecer obvio, lo que Darwin afirma posee peculiaridades interesantes: hasta ahora no ha hablado de magnitudes (momento, posición, etc.), sino de imágenes, formas de comportamiento ya sea corpuscular ya sea ondulatorio. Su razonamiento es más cercano al de Bohr que al de Heisenberg. Para Bohr, el asunto en cuestión es la dualidad onda-partícula, mientras que para Heisenberg es la incertidumbre. Por ello, Darwin afirma que «debemos convencernos de que no puede ser inventado un experimento que requiera, a la vez, que el electrón se comporte como una partícula y como una onda» y que «el principio guía que establece este resultado se llama Principio de Incertidumbre», que logra «sortear el conflicto entre ondas y partículas» (Darwin, 1931b, p. 654)⁷². ¿Cuál es, entonces, la discusión? Las objeciones de Einstein en Solvay tenían que ver con la imposibilidad de medir simultáneamente magnitudes no conmutativas, y Bohr no recurrió a la Complementariedad para rebatir las críticas de Einstein. ¿Cuál es, pues, la intención de Darwin al ejemplificar el Principio de Incertidumbre mediante la dualidad onda-partícula?

Darwin habla de un conflicto entre las *dos mitades* del mundo, una corpuscular y otra ondulatoria: «Existen dos mitades del mundo [two half-worlds] y cada una nos proporciona una visión parcial del mundo entero; están relacionadas una con la otra y son interdependientes, pero se expresan en lenguajes diferentes» (Darwin,

⁷² «We must convince ourselves that no experiment can be invented which should at the same time require the electron to behave like a particle and like a wave. The guiding principle which establishes this result is called the uncertainty principle, and we shall discuss this and with its help shall see how the conflict between wave and particle is always avoided» (Darwin, 1931b, p. 654).

1931b, p. 655)⁷³. Aunque parece que su disertación no lleva a ningún lugar, o que se aleja demasiado de la discusión central que ocupa este trabajo, se verá que hay en todo esto la estructura narrativa de la que se hablaba antes: la intención fundamental que persigue el autor se hace esperar casi dramáticamente, pero conducirá, sin duda, a un punto importantísimo de la discusión. ¿A dónde quiere llegar? La intención de Darwin es abordar la idea del paquete de ondas.

La onda, como imagen de una *mitad del mundo*, es causada por el movimiento de la partícula y, de la misma manera, la partícula viaja dentro de la onda, donde es *imposible* (énfasis del autor) determinar su localización exacta y su velocidad (Darwin, 1931b, p. 656)⁷⁴. Es así como Darwin pasa de la dualidad onda-partícula a la *imposibilidad* de la medición simultánea de dos magnitudes no conmutativas: que dado que los experimentos de Thompson explican que la longitud de onda es inversamente proporcional a la velocidad de la partícula, apunta Darwin, y que la regla de Broglie para determinar la longitud de onda de cualquier partícula es dividir el valor del cuanto entre el momento de la partícula, para observar la longitud de onda será importante tener un momento pequeño, lo que a su vez significa una baja velocidad o una partícula muy ligera, por lo que la relación entre el aspecto corpuscular y el aspecto ondulatorio de la materia impide, concluye Darwin, con las relaciones de interdependencia entre ambas, que podamos observarlas simultáneamente sin perturbar a una de ellas (Darwin, 1931b, p. 655)⁷⁵.

⁷³ «There are two half-worlds, each of which gives a partial view of the whole world; they are related to one another and interdependent, but they are expressed in different languages» (Darwin, 1931b, p. 655).

⁷⁴ «The point of the new outlook is that though we think of a particle as associated with the wave, it is impossible to know where in the wave it is, and impossible to say exactly how fast it is moving» (Darwin, 1931b, p. 656).

⁷⁵ «Thomson and others have experimented with electrons which, regarded from the particle aspect, have various speeds, and have found that the wave-length is inversely proportional to the speed;[...] Theory, however, clearly indicates what the

Ahora, esas *dos mitades* del mundo lo conducen al problema de la medición en la mecánica cuántica.

El experimento imaginario aparece, entonces, en un diálogo con estilo galileano en el que el autor entrevista a un *físico escéptico* que afirma que es posible observar un electrón y medir al mismo tiempo su posición y velocidad con la precisión que se desee. En el diálogo, el físico escéptico habla de un microscopio de rayos X que posee una longitud de onda de un millar de millón de pulgada, y que le permitirá fijar en el objetivo al electrón (Darwin, 1931b, p. 657)⁷⁶. El experimento, a decir del físico escéptico, no funciona: mientras fija el microscopio, el electrón da un salto y desaparece. Luego, sucede así cada vez que quiere iniciar el procedimiento. El problema, le explica Darwin, no es el microscopio en sí, ni su disposición previa al proceso de observación. El problema, afirma, es la observación en sí, el problema es observar el electrón. Darwin le dice que para observar el electrón es necesario lanzar sobre él un haz de luz que, invariablemente, alterará el estado original del electrón, y lo pondrá en movimiento, de manera que será imposible hacer una medición de su estado sin perturbar sus propiedades, por lo que concluye diciendo que «No hay escapatoria del principio de incertidumbre» (Darwin, 1931b, p. 657)⁷⁷. ¿Por qué? Porque el

relation will be between speed and wave-length; [...] The rule for finding the wave-length of any particle is to divide the quantum by the momentum of the particle, [...] In order to observe the wave aspect easily, we want to get long waves, and that means small momentum, and small momentum can be got either by having low velocity or else very light particles [...]

 (Darwin, 1931b, p. 655).

⁷⁶ «Let us therefore imagine that we have a skeptical experimenter, who refuses to believe in the wave theory, and sets to work to show that he can fix the position and speed of an electron at the same time with as high accuracy as he pleases. Our experimenter claims to have got an electron precisely fixed and at rest [...] I invented a special X-ray microscope. It has a wave-length of a thousand millionth of an inch.» (Darwin, 1931b, p. 657).

⁷⁷ Aquí se presenta la transcripción completa del diálogo con el experimento imaginario: «**Q.** How did you know the electron was there? // **A.** I saw it. // **Q.**

instrumento de medición siempre se elige siendo más ligero o más débil que el objeto medido, explica, pero esto no puede ser así cuando el objeto que se observa es la cosa más ligera que hay, un electrón (Darwin, 1931b, p. 657)⁷⁸. Es la interacción de los instrumentos de

An electron is a pretty small thing and not easy to see. How did you manage? // **A.** I had a microscope. // **Q.** Even a microscope can only see things of the size of a wave-length of light. You can't be much of a precisian if you say you knew exactly where it was from that. I thought you said you would guarantee to know exactly where it was. // **A.** Yes, but you see I had taken a course in optics at the University, and so I was not caught out as easily as that. I invented a special X-ray microscope. It has a wave-length of a thousand millionth of an inch. Of course there are the cosmic rays with still shorter wavelength, but nobody seems to know where they come from, so they would not be very handy. Any how I think I have done fairly well. // **Q.** Well, I haven't yet heard of an X-ray microscope on the market, but I suppose there will be one soon. Perhaps it would be pedantic to want you to do better. What did you see? // **A.** It was rather tiresome to get it going, but when I had done so an annoying thing happened. I knew the electron was there or thereabouts, because I had put it there; and it was at rest because otherwise it would have gone off while I was getting the microscope ready. Well, I was adjusting the microscope, and the electron was coming into focus beautifully, when it seemed to give a jump and run away. So that experiment was spoilt and I had to start again. // **Q.** Did you have better luck next time? // **A.** No. It was most curious; exactly the same thing happened every time. I think there must be something wrong with the microscope stage. I am going to have a shot to improve it. But as the microscope was certainly right in principle for seeing things to a thousand millionth of an inch, and as the electron stayed there all the time I was focussing it seems to me that I must be right. It is only a matter of overcoming the troublesome details that turn up in all experiments. // **Q.** It is not a matter of troublesome detail and there is nothing wrong with your microscope stage. Your trouble is not with the electron being there and staying there, it is with the seeing of it. You can't see the electron without light to see it by, and the light disturbs the electron and drives it away. It does not matter how many different experiments you design, you will always get caught out in one way or another. There is no escape from the uncertainty principle» (Darwin, 1931b, p. 657).

⁷⁸ «The measuring instrument is always chosen lighter or weaker than the object measured; but this can not be done when the object is the lightest thing that there is, an electron» (Darwin, 1931b, p. 657).

medición la que introduce la incertidumbre en las mediciones, es la conclusión a la que Darwin quiere llegar.

El problema yace, pues, en la acción del Efecto Compton, explica Darwin, como si siguiera un libreto escrito primero por Bohr y luego por Heisenberg: si vamos a ver un objeto en el microscopio, añade, ese objeto debe reflejar la luz y, por consecuencia, retrocederá, de manera que el solo acto de ver el electrón garantiza que lo pondremos en movimiento: incluso si se encontraba en reposo antes, no puede estarlo después (Darwin, 1931b, p. 658)⁷⁹.

Pero Darwin no se queda ahí, y se pregunta: ¿hay otros experimentos que logren derrotar al Principio de Incertidumbre? Por ello plantea un tercer experimento imaginario que hace referencia, como el del microscopio, a otros experimentos imaginarios anteriores, principalmente al enunciado por Einstein en 1927 en la Conferencia de Solvay, y que tiene, como se verá en los párrafos siguientes, relación con otros experimentos contemporáneos (Fig. 12):

«Si, por ejemplo, tenemos un obturador con un pequeño agujero en él, y una fuente de electrones en un lado, y si encontramos uno [electrón] en el otro lado, sabemos que debió venir a través del agujero, así que podemos precisar su posición de esa manera. Debemos trabajar con más detalle la configuración experimental. El experimento puede realizarse de la siguiente manera. Tenemos un par de placas paralelas ABC y FGH. Los electrones comienzan en reposo en ABC y caen bajo la influencia de una fuerza en

⁷⁹ «We may now return to our experiment with the microscope, and we know where the trouble lies. [...]If we are to see an object, that object must have scattered light, and must itself recoil in consequence. So the mere fact that we see the electron guarantees that it is set in motion; even if it was at rest before we saw it, it can not be so afterwards» (Darwin, 1931b, p. 658).

FGH. Se moverán exactamente en dirección paralela a AF. [...] Cuando un electrón ha salido del agujero en G, nos dice, por tanto, cuál es su posición en lo que respecta a la dirección GF, pero no dice nada de su posición con respecto a la dirección GM. Por tanto, nuestro interés está en la velocidad en la dirección GF y no nos interesa cuál puede ser su componente en la dirección GM. Ahora, a la izquierda de G sabemos que el movimiento del electrón ocurre a lo largo de BG, que equivale a decir que su componente en la dirección GF es cero. Parece que hemos derrotado el principio de incertidumbre dado que sabemos que la velocidad es cero y la posición es tan precisa como lo deseamos considerando que el agujero en G es suficientemente pequeño. Pero solamente sabemos que el electrón estaba en la línea BG y no en la línea AF porque sale de G, y al salir sufrirá una desviación, digamos a lo largo de la línea GN, y así adquirirá un componente de velocidad transversalmente que es indeterminado en cuanto a la cantidad. De nuevo, el solo hecho de determinar la posición ha introducido una velocidad indeseada. Hay que tomar en cuenta que si el agujero es demasiado grande no se produce mucha desviación y la incertidumbre en la velocidad es muy poca pero contrarrestando esta ventaja está el hecho de que no hay un conocimiento muy preciso de la posición; mientras que con un agujero muy pequeño podemos fijar la posición con precisión, pero al precio de una fuerte desviación y, por tanto, de una gran incertidumbre en la velocidad del electrón una vez que salga» (Darwin, 1931b, p. 659)⁸⁰.

⁸⁰ «If, for example, we have a shutter with a very small hole in it, and have a source

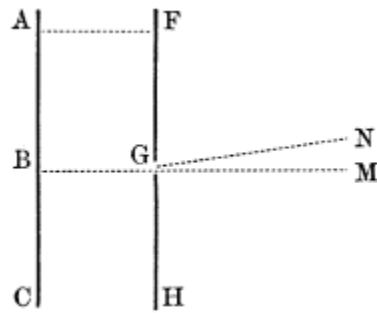


Figura 12. Darwin, 1931b, *Science*, Vol. 73, No. 1903, p. 659.

of electrons on one side, then if we find one on the other, we know it must have come from the hole, and so we can locate its position in that way. We must work out the experimental arrangements a little more carefully. The experiment might be done in this way. We have a pair of parallel plates ABC and FGH. Electrons start at rest from ABC and fall under the influence of a force towards FGH. They will move exactly in directions parallel to AF. The idea behind the experiment is a little more complicated than before because it is necessary to consider the different directions separately. When an electron has emerged from the hole at G, it thereby tells us what its position is as far as concerns the direction GF, but says nothing about its position in the direction GM. So our interest is in the velocity in the direction GF and we do not care what the component in the direction GM may be. Now to the left of G we know the electron's motion to be along BG, that is to say its component in the direction GF is zero. We seem to have conquered the uncertainty principle since we know the speed to be zero and the position is given as accurately as we please by taking the hole at G small enough. But we only know that the electron was on the line BG and not on the line AF because it emerges at G, and in emerging it will be diffracted, say along the line GN, and so will acquire a component of velocity transversely, and one which is uncertain in amount. Once again the mere fact of finding the position has introduced an unwanted velocity. Notice too that if the hole is rather large there is not much diffraction and so very little uncertainty in the velocity, but to counterbalance this advantage there is no very precise knowledge of the position; while, on the other hand, with a very small hole we can fix the position accurately, but pay for it by strong diffraction and so great uncertainty in the speed of the electron after it has emerged» (Darwin, 1931b, p. 659).

La semejanza con el experimento imaginario de la doble rendija es notoria, y, sobre todo, con el experimento imaginario de Kennard (1928). La doble rendija de Darwin, sin embargo, se somete a una prueba distinta que la de Einstein, Kennard o Ruark (1928): la medición del ángulo de desviación del electrón al pasar por la rendija:

«Es verdad que el electrón sufrió una desviación, pero, ¿no podemos medir el ángulo en que se ha desviado? Si podemos hacerlo, podremos derrotar el principio de incertidumbre, no al evitar el efecto del instrumento de medición, sino al medirlo. Podemos proceder, por ejemplo, como sigue. El electrón alteró su trayectoria al pasar a través de G. Una fuerza de alguna naturaleza será necesaria para producir esta deflexión, y esto reaccionará sobre el obturador y lo empujará hacia la dirección contraria. Si después medimos esta reacción, podemos deducir qué trayectoria ha tomado el electrón, y eso es justamente lo que queremos saber. La forma más simple de observar la reacción es hacer que el obturador sea muy ligero para que, cuando el electrón pase, sea puesto en movimiento. [...] Pero si el obturador no está fijo, ¿cómo sabemos dónde está la rendija en el momento en que el electrón pasa? Hemos determinado la cuestión del momento satisfactoriamente, pero al hacerlo hemos perdido la posibilidad de ubicar la posición. Debemos intentarlo de nuevo, y diseñar un plan para deducir la posición. Entonces, enviamos un rayo de luz a través del agujero y, al observar este rayo, podemos decir dónde está el agujero.

Seguramente, ahora sabemos tanto la posición como el momento al mismo tiempo. Pero no, hemos olvidado algo, ya que el rayo de luz se comportará de la misma forma en que lo hizo en el caso del microscopio; sufrirá una desviación hacia el agujero y comenzará a imprimir impulsos al obturador. No hay manera de saber si el impulso que observamos pertenece al electrón o al rayo de luz, de manera que hemos recuperado la medida de la posición, pero al precio, una vez más, de perder la medida del momento» (Darwin, 1931b, p. 659)⁸¹.

Al sobrecargar de variaciones los experimentos imaginarios, lo que Darwin intenta demostrar es que es posible, al realizar una observación, detectar los fallos que nos impiden obtener al mismo tiempo las

⁸¹ «It is true that the electron has been diffracted, but can we not measure through what angle it has turned? If we can do so we can conquer the uncertainty principle, not by avoiding the effect of the observing instrument, but just as successfully by measuring it. We might proceed for example as follows. The electron has altered its course in passing through G. A force of some kind must be necessary to produce this deflection, and this will react on the shutter and tend to push it in the opposite direction. If then we measure this reaction we can assert what path the electron has taken, and this is what we want to know. The simplest way of observing the reaction is to make the shutter free and very light, so that as the electron passes it will be set in motion. We adopt this method. But if the shutter is free, how do we know where the slit is at the moment the electron is passing? We have settled the question of the momentum satisfactorily, but in doing so have lost the position. We must try again, and devise a plan by which to know the position. We therefore send a beam of light through the hole and by watching this beam we can see where the hole is. Surely we now know both position and momentum at the same time. But no, we have forgotten something, for the light itself will behave in the same way as it did in the microscope; it will be diffracted at the hole and will itself start giving impulses to the shutter. There is no way of knowing whether the impulse we observe belongs to the electron or to the light, so that we have regained the measurement of the position, but have paid the price by once more losing the momentum» (Darwin, 1931b, p. 659).

medidas de la posición y el momento con la precisión deseada y que, al detectar esos fallos, siempre se pueden incorporar nuevos aditamentos al aparato de medición que nos permitan sobreponernos a los primeros fallos, pero, como afirma Darwin, cada nueva pieza agregada al aparato de medición, cada nuevo elemento de la configuración experimental, introducirá nuevas variables al proceso que provocarán nuevos fallos y nuevas imprecisiones. Entonces, vuelve a confirmar Darwin, «No hay escapatoria del principio de incertidumbre» (Darwin, 1931b, p. 659).

Como si se dirigiera a los autores de ETP, Darwin concluye, hacia el final de su conferencia, que «El principio de incertidumbre concierne esencialmente sólo al futuro» y que «podemos instalar instrumentos que nos dirán todo lo que queramos saber sobre el pasado» (Darwin, 1931, p. 659)⁸², lo que conduce al planteamiento del último de sus experimentos imaginarios:

«Supongamos, por ejemplo, que tenemos dos obturadores, cada uno provisto con un pequeño agujero, y una fuente de electrones hacia la izquierda de ambos. Los agujeros están normalmente cerrados, pero por un breve espacio de tiempo, primero abro el que se encuentra en el obturador izquierdo y, un determinado tiempo después, hago lo mismo con el que se encuentra a la derecha. Busco electrones a la derecha de ambos obturadores. Si veo uno, puedo estar bastante seguro de que viajó a lo largo de la línea entre los agujeros y que le tomó un tiempo definido hacerlo; es decir, puedo saber su posición y velocidad con precisión. Lo que el principio [de incertidumbre] afirma es

⁸² «The uncertainty principle is essentially only concerned with the future; we can install instruments which will tell us as much about the past as we like» (Darwin, 1931b, p. 659).

que este conocimiento no tiene ninguna utilidad en la predicción de lo que ocurrirá después, ya que no proporciona ningún conocimiento de cómo el electrón será desviado al salir del segundo agujero» (Darwin, 1931b, p. 659-660)⁸³.

La preocupación final de Darwin, sin embargo, más allá de los alcances del Principio de Incertidumbre y la dualidad onda-partícula, tiene que ver con la que sería una de las luchas interminables de Einstein con la cuántica: la dicotomía entre determinismo e indeterminismo. ¿Qué implicaciones puede tener el Principio de Incertidumbre con el determinismo y el indeterminismo si su aplicación nos impide predecir comportamientos futuros de las partículas?, parece preguntarse Darwin.

Estamos acostumbrados, explica el autor, a creer que un *pleno conocimiento* del presente nos permitirá predecir el futuro con bastante precisión, y que, cuando vemos derrotados nuestros «intentos proféticos», lo atribuimos a la ignorancia y a la creencia de que, con un mayor conocimiento del presente, nuestras predicciones habrían tenido un mejor resultado. Sin embargo, aunque acepta el carácter probabilista de la cuántica, no concede que ello conlleve a una *liberación* de las

⁸³ «Suppose, for example, that we have two shutters, each provided with a very small hole, and a source of electrons to the left of both. The holes are usually blocked up, but for a very short space of time I first open the one in the left shutter, and at a definite time later I do the same for the one on the right. I look for electrons to the right of both shutters. If I see one, I can be quite certain that it went along the line between the holes and took a definite time in doing so; that is to say, I can know its position and speed precisely. What the principle asserts is that this knowledge is no use in predicting what is going to happen later, for it gives no knowledge of how the electron will be diffracted on emerging from the second hole» (Darwin, 1931b, p. 659-60).

fronteras del determinismo (Darwin, 1931a, p. 660)⁸⁴. Que el comportamiento de las partículas elementales se rija por el principio de incertidumbre no quiere decir, para Darwin, que el universo entero sea indeterminista.

El soliloquio de Darwin, que había comenzado como una larga disertación en torno del Principio de Complementariedad y que continuó como una serie de ilustraciones experimentales imaginarias del Principio de Incertidumbre, lo condujo a tratar el conflicto entre el determinismo y el indeterminismo, el libre albedrío, la voluntad y las predicciones futuras: es ahí donde reside la génesis de un pequeño debate que luego ocuparía también las arenas más famosas de la discusión: el lenguaje de la nueva física.

La física atómica no sólo exigiría a los científicos una forma de aproximación a los fenómenos diferente a las formas clásicas: exigiría un nuevo lenguaje, una nueva concepción de los métodos pero también de las palabras y los nombres y las relaciones de los objetos que se estudian. Si a esta exigencia se agrega la disgregación de idiomas en que se desarrolló la física (alemán, francés, danés, inglés, japonés, italiano, etc.) y los saltos que diversos físicos dieron de un idioma a otro, puede verse cómo se erige en medio de todo una Torre de Babel en la que las palabras que explican la física cuántica se confunden como una bruma.

Después de la publicación de los dos textos de Darwin (1931a, 1931b), las revistas norteamericanas fueron el lugar de encuentro de una

⁸⁴ «We are accustomed to take it for granted that a full knowledge of the present would enable us confidently to predict the future. When we are defeated in our attempts at prophecy, we attribute it to ignorance, with the tacit assumption that with more knowledge of the present we could have done better» (Darwin, 1931b, p. 660).

discusión en torno a conceptos como incertidumbre, causalidad e indeterminación. Los participantes, Stern, Compton, Noyes, Margenau y Miller, publicaron sus contribuciones en diferentes revistas a lo largo de 1931 y 1932. Es importante recordar que, hasta antes de 1931, la discusión *principal* entre Bohr y Einstein no había abordado los terrenos de la causalidad como lo haría tras la publicación del artículo de Einstein, Tolman y Podolsky. A partir de 1931 esta arista de la discusión aparecería con intensidad, desde la causalidad más mecánica en la predicción de comportamientos futuros de partículas elementales hasta estiradas discusiones en torno al libre albedrío.

En abril de 1931, Alexander W. Stern envió una carta al editor de *Physical Review* en la que hacía referencia al artículo de Darwin (1931a). Stern intenta explicar que el Principio de Incertidumbre no está relacionado con la causalidad en el mundo físico porque la incertidumbre de la que habla no se ancla al proceso de observación de los fenómenos, sino a los fenómenos mismos (Stern, 1931, p. 1187). El autor se pregunta: «¿No es mejor dejar la *condición-de-indeterminación*⁸⁵ [*indeterminateness*, énfasis agregado] en donde la encontramos en la naturaleza en lugar de atribuirla a la inevitable perturbación introducida cuando realizamos una observación, aunque no sepamos cómo es que esta perturbación introduce la *indeterminación* [*indeterminacy*, énfasis agregado]?» (Stern, 1931, p. 1186)⁸⁶. Más adelante, en 1935, un artículo publicado por Grete Hermann abordaría las cuestiones del lenguaje en la definición de la incertidumbre y la indeterminación, en clara conexión

⁸⁵ Se utiliza aquí la frase *condición-de-incertidumbre* para intentar evocar el término en inglés *indeterminateness*, que no posee una traducción literal en una sola palabra pero cuyo significado se entiende como «la condición de lo que posee incertidumbre».

⁸⁶ «Is it not better to leave the *indeterminateness* in nature where we find it, rather than to attribute it to the inevitable perturbation introduced when making an observation, although we do not know how this perturbation introduces the *indeterminacy*?» (Stern, 193, p. 1186)

con el debate, para entonces, ya generalizado. La introducción necesaria del lenguaje es, para Stern, el comienzo de las dificultades en la mecánica cuántica. Evocando a Darwin, (1931a) expresa que el Principio de Incertidumbre es el medio por el cual esta problemática se vuelve evidente (Stern, 1931, p. 1187). No hay, sin embargo, un fallo a la causalidad en la mecánica cuántica, dice Stern. Apoyándose en Darwin concluye que la causalidad es una forma conceptual que nos permite aprehender la naturaleza a través del pensamiento (Stern, 1931, p. 1187). Su artículo, sin embargo, se queda en el plano de la disertación y la diatriba.

En agosto de 1931, Arthur H. Compton escribió, en la sección de cartas de *Science*, una nota breve titulada *The uncertainty principle and free will*. Compton, a diferencia de Stern, sí propone un experimento imaginario, muy breve, a la manera del gato de Schrödinger. Hay algo en la formulación de Compton que deviene importante.

Compton está de acuerdo con que la discusión en torno al Principio de Incertidumbre y el albedrío es una cuestión de orden filosófico y no físico. Considera, sin embargo, que las razones que ofrece Darwin (1931b) para que el Principio de Incertidumbre no quiebre la causalidad no son las adecuadas. El enunciado que más critica Compton es el siguiente: «la teoría física predice fiablemente que los millones de millones de electrones concentrados en la materia-en-concreto [matter-in-bulk] se comportarán [...] de forma regular, y que, para encontrar un caso de considerable apartamiento del promedio, deberíamos esperar durante un periodo de tiempo bastante fantástico más largo aún que la edad estimada del universo» (Darwin, 1931b, p. 660)⁸⁷. A esto, Compton responde que Darwin pasa por alto el hecho de

⁸⁷ «[...] physical theory confidently predicts that the millions of millions of electrons concerned in matter-in-bulk will behave [...] regularly, and that to find a case of noticeable departure from the average we should have to wait for a period

que existe un tipo de evento a gran escala que resulta errático por las propias irregularidades concernientes al Principio de Incertidumbre, es decir, eventos que dependen, en determinado momento, del resultado de eventos a pequeña escala (Compton, 1931, p. 172)⁸⁸. El breve experimento imaginario que plantea Compton es el siguiente:

«Como un mero ejemplo físico uno puede pasar un rayo de luz a través de un par de aberturas que le proporcionarán una difracción tal que existe una posibilidad igual de que el fotón entre por una de dos celdas fotoeléctricas. Mediante determinados amplificadores puede disponerse que si el fotón entra en la celda A, una barra de dinamita haga explosión (o que tenga lugar cualquier otro evento a gran escala); si el primer fotón entra en la celda B, se accionará un interruptor que evitará la explosión de la dinamita. ¿Cuál será, entonces, el efecto de hacer pasar el rayo de luz a través de las ranuras? Las posibilidades de que la explosión ocurra o no son las mismas. Es decir, el resultado es impredecible desde las condiciones físicas» (Compton, 1931, p. 172)⁸⁹.

of time quite fantastically longer than the estimated age of the universe» (Darwin, 1931b, p. 660).

⁸⁸ «He apparently overlooks the fact that there is a type of large-scale event which is erratic because of the very irregularities with which the uncertainty principle is concerned. I refer to those events which depend at some stage upon the outcome of a small-scale event» (Compton, 1931, p. 172).

⁸⁹ «As a purely physical example, one might pass a ray of light through a pair of slits which will so diffract it that there is an equal chance for a photon to enter either of two photoelectric cells. By means of suitable amplifiers it may be arranged that if the first photon enters cell A, a stick of dynamite will be exploded (or any other large-scale event performed); if the first photon enters cell B a switch will be opened which will prevent the dynamite from being exploded. What then will be the effect of passing the ray of light through the slits? The chances are even

La intención de Compton es la de explicar que un evento microscópico como el paso de un electrón a través de una celda fotoeléctrica puede provocar, a su vez, la ocurrencia de un evento a gran escala. El argumento central es, sin duda, el mismo que utilizará Schrödinger en 1935 en su experimento del gato. ¿Cuál es la diferencia? Compton no critica la validez macroscópica del principio de incertidumbre, sino la forma en que Darwin explica que el problema del libre albedrío no se soluciona a través del Principio de Incertidumbre porque tendríamos que esperar una cantidad «fantástica» de tiempo para percibir, en un sistema macroscópico, sus efectos. Compton ve en la ocurrencia de eventos a pequeña escala una especie de *efecto dominó* que puede alcanzar a los eventos a gran escala si la incertidumbre se acumula mediante una serie de *efectos amplificadores*. La formulación de Compton, como se verá más adelante, prefigura una forma de experimento imaginario utilizada, como ya se dijo, por Schrödinger y por Einstein hacia 1935, en que la incertidumbre en eventos microscópicos afectaba el devenir de eventos macroscópicos.

Decidir si Compton acierta o no en su respuesta a Darwin no es la intención de este trabajo. Sí lo fue, sin embargo, de Noyes y de Margenau quienes, en otro número de *Science* publicado en diciembre de 1931, ofrecieron una réplica al texto de Compton. En este pequeño debate, más filosófico que físico, se vislumbra la forma que tomaría, años después, el debate en torno a la publicación, en 1935, del artículo firmado por Einstein, Podolsky y Rosen.

La intervención de Noyes (1931), profesor de la Universidad de Illinois, tiene mucha relación con aquella primera crítica que Stern

whether or not the explosion will occur. That is, the result is unpredictable from the physical conditions» (Compton, 1931, p. 172).

publicó al texto de Darwin (1931a). Se trata de una aclaración sobre el lenguaje con el que se enuncia lo *indeterminado* y lo *indeterminable*. Para Noyes, que algo sea *indeterminable*, es decir, que posea un comportamiento que no podamos predecir, no quiere decir que sea *indeterminado*, es decir, que no suceda gracias a una serie de condiciones que tienen lugar, digamos, hoy, y que producen un efecto, digamos, mañana, aunque nosotros seamos incapaces de explicar o identificar cuáles son esas condiciones (Noyes, 1931, p. 595). Para esto, Noyes apunta: «Puede ser una “posibilidad eventual” que el fotón del que escribe el Profesor Compton entre en una de las dos celdas fotoeléctricas, pero es ilógico suponer, para este caso, que el camino del fotón no esté determinado por condiciones complejas de un carácter tal cuya predicción es imposible. El hecho de que un evento tan pequeño pueda producir tremendos resultados no tiene conexión con la cuestión de si el evento es determinado o no» (Noyes, 1931, p. 595)⁹⁰. Acepta que puede ser que la discusión en torno al libre albedrío pertenezca más a la disciplina de la filosofía que a la de la física, aunque esto dependerá de la definición que se tenga de las ciencias físicas: «Es verdad si incluimos en la ciencia solamente aquellas cosas que son plenamente conocidas y que pueden ser matemáticamente demostradas» (Noyes, 1931, p. 596)⁹¹.

Henry Margenau (1931), de la Universidad de Yale, participa también de esta discusión en el mismo número de *Science* que Noyes. En otra nota breve, Margenau señala la importancia de la noción de

⁹⁰ «It may be an "even chance" whether the photon of which Professor Compton writes will enter one or the other of two photoelectric cells, but it is illogical to suppose, for that reason, that the conduct of the photon is not determined by complex conditions of such a character that prediction is impossible. The fact that so minute an event may produce tremendous results has no connection with the question whether the event is determinate or not» (Noyes, 1931, p. 595).

⁹¹ «It is true if we include in science only those things which are fully known and can be mathematically demonstrated» (Noyes, 1931, p. 596).

Compton de que el Principio de Incertidumbre puede ser acumulativo en pequeña escala y repercutir en eventos a gran escala (Margenau, 1931, p. 596), sin embargo, ya de entrada niega la relación entre el Principio de Incertidumbre y el problema del libre albedrío. Margenau critica los conceptos del *destino del electrón* y de la *libertad de elección* en el amplificador que recibe la señal en el experimento imaginario de Compton. Para Margenau, estas consideraciones son de orden metafísico y fallarían en un examen mucho más detallado que el que ofrece Compton (Margenau, 1931, p. 596). Margenau sostiene que el problema del libre albedrío compete a la filosofía y no a la física porque está en directa relación con el problema de las motivaciones humanas, por lo que no hay una «conexión inteligible» entre el problema del libre albedrío y las nociones del Principio de Incertidumbre en la mecánica cuántica.

Sin embargo, la controversia no terminó ahí. Al año siguiente, Robert C. Miller (1932) escribió una nota en *Science* en respuesta al breve texto de Noyes y al texto de Compton. Sin mencionar a Darwin en absoluto y sin citar ningún experimento imaginario, se ocupa solamente de la diferenciación entre los términos *indeterminable* e *indeterminado*. Recurriendo a la filosofía de Hume, Miller escribe que una secuencia de eventos, aunque sea repetida con asiduidad, no proporciona prueba alguna de la conexión causal (Miller, 1932, p. 413)⁹². Debe señalarse, continúa Miller, que esta suposición no justifica la idea simple de que el evento que precede en el tiempo es la causa, mientras que el que sigue es el efecto. Por tanto, continúa, cuando se dice que dos eventos están relacionados causalmente, tanto desde el punto de vista filosófico como

⁹² «Sequence of events, however oft repeated, affords no proof of causal connection» (Miller, 1932, p. 413).

desde el científico, sólo se puede decir que existe un alto grado de probabilidad de que uno no ocurra sin el otro (Miller, 1932, pp. 413-4)⁹³.

Miller aborda una discusión muy lejana ya de las intenciones iniciales de Darwin (1931a, 1931b), e incluso bastante distante del artículo de Compton (1931), pero aborda una cuestión que preocupará en gran medida a Einstein y que parte, sin duda, de algunas de las aseveraciones de Heisenberg en 1927, concretamente, de las dedicadas a explicar que el Principio de Incertidumbre representa el fin de la causalidad (Heisenberg, 1927). No obstante, Miller no se deja llevar demasiado lejos y concluye que, si la teoría cuántica ha prestado algún servicio a la causa del libre albedrío, éste es únicamente el de mostrar que las razones para creer en el determinismo no son tan buenas como se suponía (Miller, 1932, p. 414)⁹⁴.

Aunque en el caso de esta breve discusión sólo pueden contarse los experimentos imaginarios de Darwin y de Compton, es posible ver cómo funcionará, más adelante, en las revistas norteamericanas, la discusión en torno a la completitud de la mecánica cuántica. La polifonía será clave, como lo había venido siendo desde 1930 tras la VI Conferencia de Solvay, para entender el curso de estas discusiones: la mezcla de idiomas, de procedencias geográficas, de antecedentes científicos, educativos y profesionales, de preferencias filosóficas y técnicas, etc., harían de las discusiones en torno a la mecánica cuántica un foro que, como en las actas de los congresos de

⁹³ «[...] it should be pointed out that this assumption does not justify the ordinary idea that the event which precedes in time is the cause, while that which follows is the effect [...] When we say that two events are causally related, all that we can mean from either the philosophical or scientific standpoint is that there is a high degree of probability that one will not occur without the other» (Miller, 1932, pp. 413-414).

⁹⁴ «If quantum theory has rendered any service to the cause of free will, it is primarily that of showing that some of the reasons for believing in determinism are not as good as was formerly supposed» (Miller, 1932, p. 414).

Como y Solvay, semeja una Torre de Babel donde cada quien da a cada cosa un nombre diferente.

1932: El formalismo matemático como sustento del experimento imaginario. El experimento ideal de Rosen y Vallarta. La conjunción entre el Principio de Incertidumbre y la Relatividad General: una intención de sometimiento. Otra forma de la dualidad, otra noción de la complementariedad.

En mayo de 1932 aparece publicado en *Physical Review* el artículo titulado *Relativity and the Uncertainty Principle*, bajo la autoría del físico estadounidense Nathan Rosen y el mexicano José Manuel Sandoval Vallarta. Rosen, nacido en Estados Unidos, de ascendencia judía y mayormente conocido por sus trabajos en torno a la estructura de la molécula de hidrógeno y por ser el asistente de Einstein desde 1935 hasta 1945 en Princeton, conoció a Vallarta en el Tecnológico de Massachusetts, donde ambos eran estudiantes. Vallarta obtuvo el doctorado en 1926 con la tesis titulada *El modelo atómico de Bohr desde el punto de vista de la Relatividad General y el cálculo de perturbaciones*. Ambos pertenecen a una misma generación de físicos teóricos mayormente formados en las universidades estadounidenses, con algunas breves incursiones en los campos europeos. Herederos de las polémicas de sus maestros, se adjuntaron, aunque con timidez, a la discusión que en aquellos años dominaba el panorama de la física.

El trabajo en cuestión, recibido en la revista hacia finales del mes de marzo de 1932, se adosa a la problemática de conjugar las dos grandes teorías del momento: relatividad y cuántica, pero, más precisamente, simultaneidad e incertidumbre, es decir, la *simultaneidad*

definida por Einstein y la *incertidumbre* definida por Heisenberg. El artículo propone «un experimento ideal simple para medir simultáneamente la posición y el momento de un electrón libre, a la vez que su energía cinética y el instante en que esta energía cinética es medida, tomando en cuenta la velocidad finita de la propagación de la luz tal y como se expone en la transformación de Lorentz» (Rosen & Vallarta, 1932, p. 569)⁹⁵. La intención de fondo, explican, es llamar la atención sobre la posibilidad, mas no la necesidad, de conciliar la relatividad y la cuántica. Así como la mecánica relativista, afirman los autores, proviene de la definición que Einstein hace del concepto de simultaneidad, así el corazón de la cuántica se encuentra en la definición del principio de incertidumbre, de Heisenberg. De esta forma, continúan, cualquier intento para probar la consistencia (o inconsistencia) interna de la mecánica relativista o cuántica se reduce a la investigación de si es posible o no que la definición relativista de simultaneidad sea consistente con las relaciones de incertidumbre, o viceversa (Rosen & Vallarta, 1932, p. 570)⁹⁶.

Para los autores, dicha proposición inicial, la conciliación de la Incertidumbre y la Simultaneidad, posee dos vías de solución que conducirían a definir un principio regulador de la mecánica cuántica-relativista: (1) considerando la validez de la definición de simultaneidad

⁹⁵ «A simple ideal experiment to measure simultaneously the position and momentum of a free electron, also its kinetic energy and the instant when this kinetic energy is measured, taking into account the finite velocity of propagation of light as embodied in the Lorentz transformation, is proposed» (Rosen & Vallarta, 1932, p. 569).

⁹⁶ «Just as relativistic mechanics follows from Einstein's definition of simultaneity, so the kernel of quantum mechanics is found in Heisenberg's uncertainty principle. Hence any attempt to prove the inner consistency (or inconsistency) of relativistic and quantum mechanics reduces in essence to an investigation of whether or not the relativistic definition of simultaneity is consistent with the uncertainty relations, or vice versa» (Rosen & Vallarta, 1932, p. 570).

dada por Einstein y, por tanto, la de la transformación de Lorentz, habría que diseñar un experimento ideal, del tipo del experimento del microscopio de rayos gamma de Heisenberg, con el objetivo de deducir las relaciones de incertidumbre de acuerdo con el concepto de simultaneidad previamente aceptado; o bien (2) asumir la validez inicial de las relaciones de incertidumbre para luego dilucidar las modificaciones necesarias en el concepto de simultaneidad, donde la primera es la solución que persiguen los autores (Rosen & Vallarta, 1932, p. 570)⁹⁷.

Los autores apuntan que tomando en consideración que la transformación de Lorentz tiene una importancia fundamental en los fenómenos atómicos y asumiendo que las fuerzas gravitacionales juegan un papel menor en el mundo atómico, el punto de partida para el diseño del experimento ideal tendrá su base en la transformación de Lorentz, con la diferencia, afirman, de que ellos tomarán en cuenta la velocidad finita de propagación de la luz (Rosen & Vallarta, 1932, p. 570)⁹⁸. Así,

⁹⁷ «This remark opens up two possible methods of attack of the problem of discovering a suitable guiding principle in relativistic quantum mechanics: either one postulates the validity of Einstein's definition of simultaneity (and hence of the Lorentz transformation) and tries to devise an ideal experiment, of the nature of Heisenberg's experiment with a gamma-ray microscope, to deduce the uncertainty relations, or one assumes the uncertainty relations and then attempts to see what modifications are necessary in the definition of simultaneity» (Rosen & Vallarta, 1932, p. 570).

⁹⁸ «There are as a matter of fact good reasons to suppose that the Lorentz transformation plays a fundamental part in atomic phenomena and therefore should be taken as the starting point of any new discussion. Experimentally we know that such phenomena play their parts in the same space-time as other physical processes, we further know that gravitational forces play a very small part in the atomic world and, on the theoretical side, that the laws governing atomic processes must be independent of the frame of reference [...] The difference between our analysis and previous ones is that we try in this way to take into account the finite velocity of propagation of light in an experiment otherwise

después de la justificación teórica de su análisis, los autores describen el experimento imaginario:

«Un observador O envía una línea espectral, emitida por un solo átomo, de frecuencia media ν_1 y anchura natural de $\Delta\nu_1$ (de aquí en adelante llamada la “señal”) hacia un electrón libre lejano (i.e. moviéndose en línea recta con velocidad uniforme). La señal puede o no regresar al observador; podemos, sin embargo, asumir, sin incurrir en dificultades lógicas, que sí regresa. La señal que regresa es una línea espectral de frecuencia media ν_2 y anchura natural $\Delta\nu_2$, y llega [de vuelta al observador] después de un tiempo T . En general $\nu_1 \neq \nu_2$ y $\Delta\nu_1 \neq \Delta\nu_2$ debido a la interacción entre la señal y el electrón (efectos Doppler y Compton). Se requiere, primero, encontrar el momento p y la posición x del electrón al momento en que recibe la señal, y el producto $\Delta p \Delta x$ de las incertidumbres en la medición de p y x ; después, la energía cinética E y el instante t en que esa energía fue medida, y el producto de $\Delta E \Delta t$ de las incertidumbres en la medición de E y t .

Dos señalamientos metodológicos esenciales deben hacerse al comienzo. El primero se refiere al uso de la transformación de Lorentz. Por razones ya establecidas asumimos su validez con el objeto de correlacionar eventos en el sistema de referencia del electrón con eventos en el marco de referencia del observador. Al hacerlo, somos completamente conscientes de las dificultades en lo que

similar to Heisenberg's experiment with a gamma-ray microscope» (Rosen & Vallarta, 1932, p. 570).

conciene a la sincronización de relojes considerados como sistemas mecánico-cuánticos que ya han sido discutidos por Schrödinger. Sin embargo, mientras que él está interesado en encajar la relatividad en el marco de la mecánica cuántica, nosotros usamos aquí un punto de vista inverso y, por tanto, sus dificultades no nos afectan.

El segundo señalamiento se refiere al argumento general para el cálculo de incertidumbres en nuestro experimento [aquí los autores hacen referencia al siguiente artículo: C. G. Darwin, *Examples of the Uncertainty Principle*, Proc. Roy. Soc. of London A130, 632, 1931, que ya fue revisado antes]. Comenzamos a partir de la noción de partícula, asumiendo una colisión frontal entre un fotón (o grupo de fotones) y un electrón gobernado por las leyes clásicas de la conservación de la energía y el momento. En segundo lugar, introducimos la noción de onda asumiendo que el observador envía un tren de onda finito que regresa a él, tras la interacción con el electrón, como un tren de onda finito. En tercer lugar, demostramos que la observación reacciona sobre el objeto observado de tal manera que estropea la condición inicial. El cuarto y más importante punto es ver por qué la reacción es indeterminada dentro de ciertos límites.

Finalmente, dado que la señal llega al observador *después* de que la interacción haya sucedido, nuestra determinación del momento y la posición se refiere necesariamente a un evento que ha tenido lugar en el pasado, es decir, nuestra determinación debe referirse también a las correspondientes incertidumbres. Desde el punto de vista relativista parece inevitable que las relaciones

de incertidumbre, siendo válidas, deban sostenerse tanto para el pasado como para el futuro.

En el presente ejemplo, la combinación de la noción de onda con la noción de partícula proporciona los efectos Doppler y Compton; la observación, inevitablemente, estropea la condición inicial debido a la colisión entre la señal y el electrón, y la reacción es indeterminada dentro de ciertos límites que serán calculados aquí debido a que ni sabemos con exactitud dónde dentro del tren de onda finito se encuentran los fotones, ni tampoco, como consecuencia de ello, dónde o cuándo dentro del tren de onda finito ha tenido lugar la colisión» (Rosen & Vallarta, 1932, p. 571-572)⁹⁹.

⁹⁹ «An observer O sends a spectral line, emitted by a single atom, of mean frequency ν_1 and natural width $\Delta\nu_1$; (hereafter called the “signal”) towards a remote free electron (i.e., moving in a straight line with uniform velocity). The signal may or may not return to the observer; we may, however, assume without incurring logical difficulties that it does return. The returning signal is a spectral line of mean frequency ν_2 and natural width $\Delta\nu_2$, arriving after a time T . In general $\nu_1 \neq \nu_2$ and $\Delta\nu_1 \neq \Delta\nu_2$ because of the interaction between signal and electron (Doppler and Compton effects). It is required, first, to find the momentum p and the position x of the electron at the time when it received the signal, and the product $\Delta p \Delta x$ of the uncertainties in the measurement of p and x ; second, the kinetic energy E and the instant t when this kinetic energy was measured, and the product $\Delta E \Delta t$ of the uncertainties in the measurement of E and t . // Two essential methodical remarks may properly find expression at the outset. The first refers to the use of the Lorentz transformation. For reasons already stated we assume the validity of the latter in order to correlate events in the electron’s reference system with events in the observer’s frame of reference. While doing so we are fully aware of the difficulties attending the synchronization of clocks considered as quantum mechanical systems which have already been discussed by Schrodinger. However, whereas he is interested in fitting relativity into the framework of quantum mechanics, we take here the converse point of view and therefore his difficulties do not concern us here. // The second remark refers to the general argument for the calculation of the uncertainties of our experiment. We start from the particle

Ya en estas primeras líneas los autores aceptan una restricción relacionada con el Principio de Incertidumbre: la interacción de “la señal” con el electrón que se desea observar provoca un cambio en la señal cuando ésta regresa al observador. Es decir, se tiene, en primer término, un observador dotado de un instrumento que envía una señal, entiéndase una onda, hacia un electrón; el electrón, por su parte, se mueve uniformemente dentro de un rango determinado como marco de referencia, por tanto, atendiendo a la Teoría de la Relatividad, puede considerarse que el electrón se encuentra en reposo. Entonces, el observador envía la señal hacia el electrón, con la intención de obtener mediciones específicas, y la señal regresa al observador después de un periodo de tiempo. La señal, al regresar, no posee las mismas características que cuando se envió en principio. La intención de Rosen y Vallarta es realizar una medición de la señal antes y después de la interacción con el electrón para establecer la diferencia entre cada uno

picture, assuming a head-on collision between a photon (or a group of photons) and an electron governed by the classical laws of conservation of energy and of momentum. Secondly we introduce the wave picture assuming that the observer sends out a finite wave train which returns to him, after the interaction with the electron, as a finite wave train. Thirdly we show that the observation reacts on the observed object so as to spoil the initial state. The fourth and most important point is to see why the reaction is indeterminate within certain limits. // Finally, since the signal reaches the observer after the interaction has taken place, our determination of the momentum and position necessarily refers to an event which has taken place in the past, and so do the corresponding uncertainties. From the relativistic point of view it seems unavoidable that the uncertainty relations, if valid, must hold for the past as well as the future. // In the present example the combination of the wave picture with the particle picture gives the Doppler and Compton effects, the observation unavoidably spoils the initial state because of the collision between signal and electron, and the reaction is indeterminate within limits to be presently calculated because we do not know just where within the finite wave train the photons are, nor as a consequence just where or when within the wave trains the collisions take place» (Rosen & Vallarta, 1932, p. 571-572)

de los dos instantes: en esa diferencia se establece el intervalo, con límites inferior y superior, en el cual se encuentra la información del estado del electrón. Para explicarlo de una forma más visible, si se deja caer una piedra en un recipiente con agua, el golpe de la piedra provocará una serie de ondas que viajarán por la superficie del líquido hasta golpear con los bordes del recipiente, para así regresar hasta el punto de origen: las ondas, al volver, serán más grandes que las ondas originales.

La diferencia consiste en dotar de una importancia mayor al haz de luz que se utiliza para observar el electrón, “la señal”, por un lado, y en aceptar la incertidumbre como parte del proceso, para medirla y establecer un intervalo en el cual se sitúan las mediciones que interesan al observador. Es decir, la reacción del electrón ante la señal emitida por el observador es indeterminada sólo dentro de ciertos límites: estos límites definirán el paquete de ondas. Aceptar la incertidumbre como un rasgo inherente del proceso les permite establecer ese rango de acción donde, *se sabe*, se encuentra la información del electrón.

En los siguientes párrafos, Rosen y Vallarta detallan un andamiaje matemático que dota al experimento imaginario de un respaldo formal y les permite establecer que el paquete de ondas posee un límite superior y uno inferior: si el electrón viaja cerca del inicio del paquete de ondas su valor, pues, es el mayor posible; o bien, si viaja cerca del final, su valor es el menor posible. Asumiendo esto, los autores intentan definir los valores posibles de T , el tiempo transcurrido desde que “la señal” es enviada hasta el momento en que regresa; y x , que es la posición del electrón en el momento en que se sucede la interacción con “la señal” (Rosen & Vallarta, 1932, p. 573). Para esto sería necesario conocer los valores de t , el tiempo de duración de la onda, y de β , el coeficiente de la velocidad del electrón durante la interacción con “la señal”: si el electrón viaja al inicio del paquete de ondas, t y β tendrán sus

valores más grandes, y si el electrón viaja al final, tendrán sus valores más pequeños. Sin embargo, no es posible saber dónde viaja el electrón. Los valores, por tanto, se encuentran determinados dentro de ese intervalo.

Para Rosen y Vallarta, la clave se cifra en el marco de referencia: cuando comienza el experimento, el observador posee un marco de referencia, así como el electrón se mueve, también, en un sistema de referencia propio, de manera que las incertidumbres no pueden exceder los límites de esos marcos de referencia. Se tiene, por tanto, a manera de conclusión, una incertidumbre *relativa* al sistema de referencia, es decir, *limitada* a un intervalo calculable (Rosen & Vallarta, 1932, p. 573).

El experimento imaginario de Rosen y Vallarta es un extraño ejercicio que lleva hasta sus últimas consecuencias las ideas que Darwin planteó en sus dos artículos de 1931, y que busca concordar con las conclusiones del artículo de Einstein, Tolman y Podolsky, afirmando que, si los resultados de la medición se obtienen cuando la señal llega al observador, la interacción ya ha sucedido antes, lo que significa que la incertidumbre se asocia no con la predicción sino con el estado pasado del electrón, por lo que las relaciones de incertidumbre se asociarían tanto a eventos pasados como a eventos futuros (Rosen & Vallarta, 1932, p. 571).

Se trata de un experimento imaginario que *no tiene solución*, es decir, que no busca la solución de una paradoja, de una contradicción o de un problema en concreto, sino que tiene como principal objetivo proporcionar las bases sobre las cuales la interpretación relativista de la mecánica cuántica que intentan los autores puede ser posible. El experimento imaginario describe una situación o fenómeno sobre el cual se diseñará un formalismo matemático: la verdadera fortaleza que persigue el artículo. La intención, en el fondo, posee un carácter mucho más teórico: si la mecánica cuántica se *sometiese* a la teoría de la

relatividad, la incertidumbre quedaría reducida a un intervalo cuyos límites podrían ser conocidos. La dualidad que observan Rosen y Vallarta no tiene tanto que ver con las imágenes corpuscular y ondulatoria como con la dualidad, mayor y más trascendental, desde su punto de vista, entre cuántica y relatividad o, más concretamente, entre la relatividad y la incertidumbre, como el propio título del artículo refiere. Sería esto, tal vez, lo que atrajo a Einstein para que, poco después, Nathan Rosen se convirtiera en su colaborador y asistente personal.

El artículo de Rosen y Vallarta no suscitó mayores intereses, y la dupla de físicos terminó por separarse. Rosen emigró a Princeton y Vallarta regresó a México. Sin embargo, algo queda de esta relación, de este experimento imaginario: la “señal”, al regresar al observador, le “lleva”, mediante el cambio que sufrió al interactuar con el electrón, la información de la partícula: el observador no mide al electrón, sino a la señal, de manera que, tiempo después de la interacción, y a una cierta distancia de la partícula, hacer una observación sobre la “señal” proporciona información sobre el electrón.

¿Prefiguración del experimento imaginario de Einstein, Podolsky y Rosen o del concepto de *entrelazamiento*?

Inicio del éxodo. Einstein y Rosenfeld: 1933. La oralidad de los experimentos imaginarios. El inicio del argumento central de la paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen. Una recapitulación hecha muchos años después.

Lejos de la integración de los principios de la Relatividad con las Relaciones de Incertidumbre que intentaran en 1932 Nathan Rosen y

José Manuel Sandoval Vallarta, Einstein vuelve a aparecer en el panorama de la discusión al año siguiente, cuando decide dejar Europa definitivamente para instalarse en Estados Unidos. El éxodo tuvo varias escalas antes del destino final y, en 1933, se encontró en Bélgica, de camino al puerto de South Hampton, como asistente a una conferencia impartida por Leon Rosenfeld. El panorama político ya dejaba entrever lo que en años venideros sería inevitable. En aquellos tiempos, es importante recordar, Einstein ya era un personaje público con peso internacional, y su fama, bien extendida, mantenía los reflectores virados hacia él y su polémica con la mecánica cuántica.

De esta manera, en 1933, volvió a esgrimir un experimento imaginario para atacar la mecánica cuántica y sus *extrañas consecuencias*. Del encuentro en Bruselas da cuenta el propio Rosenfeld, muchos años después, en un texto titulado *Niels Bohr in the thirties*, incluido en el volumen *Niels Bohr, His life and work as seen by his friends and colleagues* (1967). Einstein no publicó nunca dicho experimento imaginario y poco hablaría de él en su correspondencia. El propio Rosenfeld encontraría extraño aquel asomo argumental de Einstein que, sin hablar de la conferencia impartida, se lanzó al ruedo con la narración del experimento. De esta manera, sin muchos preámbulos, Rosenfeld relata lo siguiente:

«Tuve la oportunidad, poco después de la culminación de nuestro trabajo en electrodinámica cuántica [con Niels Bohr] en 1933, de impartir una conferencia sobre este tema en Bruselas, precisamente en el momento en que Einstein se encontraba ahí, antes de emigrar a Princeton. Él asistió a la conferencia y siguió el argumento con la mayor atención; no hizo ningún comentario directo, pero colocó sobre la mesa la discusión sobre el tema general del significado de la

teoría cuántica. Él no tenía ninguna duda ya sobre la lógica de la argumentación de Bohr; pero todavía sentía la misma inquietud que antes (“Unbehagen” fue la palabra) cuando se enfrentaba con las extrañas consecuencias de la teoría. “¿Qué diría usted en la siguiente situación?, me preguntó. “Suponga que dos partículas son puestas en movimiento cada una en dirección hacia la otra con un mismo, y muy grande, momento, y que interactúan entre sí por un periodo de tiempo muy corto cuando pasan por posiciones conocidas. Considere ahora a un observador que se aferra a una de las partículas, muy lejos de la región de interacción, y mide su momento; luego, a partir de las condiciones del experimento, obviamente será capaz de deducir el momento de la otra partícula. Si, en cambio, elige medir la posición de la primera partícula, será capaz de decir dónde está la segunda partícula. Esta es una deducción perfectamente correcta y directa a partir de los principios de la mecánica cuántica; pero ¿no resulta muy paradójica? ¿Cómo puede ser influenciado el estado final de la segunda partícula mediante una medición realizada en la primera después de que toda interacción física ha cesado entre ellas?”» (Rosenfeld, 1967, p. 127-8)¹⁰⁰.

¹⁰⁰ «I had occasion, shortly after the completion of our work on quantum electrodynamics, in 1933, to give a lecture on this subject in Brussels, just at the time when Einstein was staying there, before emigrating to Princeton. He attended the lecture and followed the argument with the closest attention; he made no direct comment on it, but put at once the discussion on the general theme of the meaning of quantum theory. He had no longer any doubt about the logic of Bohr's argumentation; but he still felt the same uneasiness as before (“Unbehagen” was his word) when confronted with the strange consequences of the theory. “What would you say in the following situation?” he asked me. “Suppose two particles are set in motion towards each other with the same, very large, momentum, and they

Aunque puede parecer simple el argumento que Einstein planteó a Rosenfeld durante aquella conferencia, no lo es en realidad. Rosenfeld, por su parte, explica a grandes rasgos el planteamiento de Einstein pero no referencia ninguna discusión ni ninguna respuesta por su parte. Si Rosenfeld intentó refutar las nociones de Einstein, no hay registro de ello. Al tratarse de una conferencia única, no hay registro ni actas que conserven una transcripción de lo que ahí se dijo. No es posible, por tanto, saber si la polémica fue más allá. Sin embargo, el argumento en sí mismo ya dice mucho sobre las intenciones de Einstein y la gestación del experimento imaginario de EPR, así como sobre la construcción teórica a su alrededor. ¿Qué es lo que puede verse aquí? El elemento fundamental es, sin duda, el sistema de dos partículas que interactúan entre sí durante un momento y que, al dejar de interactuar, una de ellas es sometida a un proceso de medición que proporcionaría, también, información sobre la otra, propiciando una acción-a-distancia. El enunciado planteado por Einstein puede considerarse como el cuerpo central del experimento imaginario del artículo de 1935, al que se agregarán condiciones iniciales y restricciones más bien de tipo filosófico, y que son, en gran medida, los puntos de mayor polémica y el centro de muchos de los artículos que se publicaron con respecto a la crítica que Einstein, Rosen y Podolsky hicieron de la mecánica cuántica

interact with each other for a very short time when they pass at known positions. Consider now an observer who gets hold of one of the particles, far away from the region of interaction, and measures its momentum; then, from the conditions of the experiment, he will obviously be able to deduce the momentum of the other particle. If, however, he chooses to measure the position of the first particle, he will be able to tell where the other particle is. This is a perfectly correct and straightforward deduction from the principles of quantum mechanics; but is it not very paradoxical? How can the final state of the second particle be influenced by a measurement performed on the first, after all physical interaction has ceased between them?» (Rosenfeld, 1967, p. 127-8).

(de esto se hablará más adelante). En el texto en que Rosenfeld refiere el experimento imaginario de Einstein, el autor pasa inmediatamente después a tratar el caso de EPR, y poco más dice sobre ello, sin embargo, acepta que, aunque al principio aquello parecía una simple llamada de atención sobre ciertas características incompletas que subyacían en el centro de la mecánica cuántica, años después, en 1935, Einstein le daría un lugar de mayor importancia a estas ideas: «No tuve la impresión de que en aquel momento Einstein viera en este caso, claramente presentado con todas las apariencias de una paradoja, otra cosa que una ilustración de las cualidades poco familiares de los fenómenos cuánticos. Dos años después, sin embargo, le proporcionó un papel mucho más prominente en un artículo escrito conjuntamente con Podolsky y Rosen; combinado con un “criterio de realidad”, sería ahora usado con la intención de exponer una imperfección esencial de la teoría cuántica» (Rosenfeld, 1967, p. 128)¹⁰¹. Parece que a Rosenfeld le bastó echar un vistazo hacia atrás y recordar aquella participación de Einstein en 1933 para relacionar sin lugar a dudas el experimento imaginario planteado entonces con el experimento imaginario de EPR. No estaba equivocado. Se trata del primer momento en que la formulación experimental considera dos partículas que interactúan entre sí, y éste es el verdadero cambio en la crítica de Einstein hacia la cuántica: la introducción del concepto de *acción-a-distancia*¹⁰². Basta hacer

¹⁰¹ «I had not the impression that Einstein at that time saw in this case, clearly presented with all the appearances of a paradox, anything else than an illustration of the unfamiliar features of quantum phenomena. Two years later, however, he gave it a much more prominent role in a paper written jointly with Podolsky and Rosen; combined with a “criterion of reality”, it was now used with the intention to expose an essential imperfection of quantum theory» (Rosenfeld, 1967, p. 128).

¹⁰² Cabe hacer un señalamiento: el término *acción-a-distancia*, tal y como lo veía Einstein, aparece en la famosa carta a Max Born fechada en el 3 de marzo de 1947, mucho después de EPR, no obstante, aquí se utiliza, y se utilizará, para referir el

un poco de memoria para darse cuenta de que, antes de 1931, ninguna de las formulaciones de Einstein contenía dos partículas y que, en el artículo junto a Tolman y Podolsky (1931), donde sí hay dos partículas, no se contempla la interacción entre ellas. Resulta interesante señalar que, en el primer experimento imaginario revisado aquí (Heisenberg, 1927) sí se contempla la interacción entre dos partículas, el fotón del haz de rayos gamma del microscopio y el electrón, aunque no se hace ninguna referencia a la acción-a-distancia: interesa más la acción del Efecto Compton.

Rosenfeld vio, en aquel experimento imaginario de Einstein, un elemento nuevo que no formaba parte de sus críticas anteriores. ¿De dónde venía la conclusión de la acción-a-distancia y el uso del sistema de dos partículas? En todo caso, Rosenfeld, pasados los años, conociendo ya los detalles del artículo de EPR y los hechos posteriores de la discusión, después incluso de la muerte de Einstein y de Bohr, hace un análisis del planteamiento de Einstein en aquella conferencia de 1933:

«En el caso de las dos partículas, es verdad que una medida llevada a cabo en la primera no provoca ninguna perturbación física en la otra partícula; sin embargo, sí influye radicalmente en el tipo de afirmación verificable que somos capaces de hacer sobre la segunda. No hay nada paradójico en esto: ninguna “influencia” misteriosa está implicada en esto más allá del hecho común que nuestras expectativas racionales de posibles ocurrencias están condicionadas por la naturaleza y forma de nuestro conocimiento de las circunstancias bajo las cuales tales ocurrencias tienen lugar. En la terminología que hemos

tipo de interacción del que hablaba Einstein tanto en la conferencia de Rosenfeld como en EPR.

usado antes, cada medida que decidimos realizar en la primera partícula define un “fenómeno” diferente, correspondiente al mismo sistema de dos partículas observadas bajo diferentes condiciones, y que corresponde, por tanto, a una cantidad diferente de control sobre la correlación entre las dos partículas cuya interacción temporal ha producido. Debemos, en primer lugar, darnos cuenta de que mientras no realicemos ninguna medida no tendremos ningún control sobre esta correlación: no hay fenómeno sobre el cual podamos hacer ninguna afirmación sensata en absoluto. Debemos realizar alguna medición si queremos que el sistema sea objeto de consideración y comunicación» (Rosenfeld, 1967, p. 130)¹⁰³.

Para Rosenfeld todo resulta muy claro: sin medición, sin observación, no hay información ni inferencias sobre el sistema. Sin embargo su

¹⁰³ «In the case of the two particles, it is true that a measurement performed on the first particle does not cause any direct physical disturbance of the other particle; but it does radically influence the kind of verifiable statement we are able to make about the latter. There is nothing paradoxical about this: no more mysterious “influence” is here involved than the commonplace fact that our rational expectations of possible happenings are conditioned by the nature and extent of our knowledge of the circumstances under which such happenings take place. In the terminology we have used before, each measurement we decide to perform on the first particle defines a different “phenomenon”, corresponding to the same system of two particles observed under different conditions, and corresponding also, therefore, to a different amount of control over the correlation between the two particles which their temporary interaction had brought about. We must first of all realize that so long as we do not perform any measurement, we have no control at all over this correlation: there is no phenomenon about which we could make any sensible statement whatsoever. We have to make some measurement if we want the system to be at all an object of consideration and communication» (Rosenfeld, 1967, p. 130)

respuesta viene dada 34 años después, es decir, con la referencia de EPR y del resto del debate como ventaja. Es importante apuntar que fue Rosenfeld quien ayudó a Niels Bohr en la escritura de la respuesta, en 1935, al artículo de EPR. Rosenfeld desestima sin mayores preocupaciones la acción-a-distancia que plantea Einstein bajo el mismo argumento que Bohr en su respuesta a EPR: no se trata sino de la relación entre la partícula observada y el instrumento de medición. Ya en ETP, en 1931, se proponía que, a partir de la medición que el observador realiza sobre una de las partículas, es posible obtener la información sobre el instante en que se abrió el obturador de la caja, de donde la partícula ha salido. (Einstein, Tolman & Podolsky, 1931, p. 780-1). Sin embargo, en ETP, los autores no consideran esta acción-a-distancia como un elemento perturbador, como muestra de que la mecánica cuántica presenta un comportamiento paradójico. Lo que se busca en ETP, en cambio, es asentar que, si la incertidumbre funciona para eventos futuros, funcionará también para eventos ocurridos en el pasado, idea que abordaron también Rosen y Vallarta en 1932, quienes también incluyeron una suerte de acción-a-distancia en su experimento imaginario: la “señal”, tiempo después de interactuar con el electrón, proporcionaba información de su comportamiento (Rosen & Vallarta, 1932). El experimento de Einstein de 1933 es diferente. Se centra por completo en la acción-a-distancia: la incertidumbre y la posibilidad o imposibilidad de medir simultáneamente magnitudes no conmutativas han quedado atrás (por el momento) y queda el fenómeno en cuestión, en este caso concreto también teórico, liberado de todo embalaje técnico, casi desnudo.

Si se quiere hablar del *cambio* de la crítica de Einstein hacia la cuántica, que algunos autores como Jammer (1974), Pais (1984) y Paty (1995) sitúan entre 1930 y 1931, quizá sea más preciso aventurarse a decir que dicho cambio sucede entre la gestación de ETP en 1930-1931

y el experimento imaginario presentado a Rosenfeld en 1933. Es ahí donde el verdadero cambio surte efecto en las formulaciones de Einstein: se asiste al primer asomo del entrelazamiento en sus experimentos imaginarios.

Uno de estos cambios es, precisamente, el hecho de prescindir casi por completo de los detalles técnicos que, principalmente en los años de Solvay, fueron el eje de la réplica de Bohr y el medio por el cual las formulaciones de Einstein fueron refutadas. Incluso, como se ha visto, el *éxito* de la refutación que hizo Bohr en las dos conferencias de Solvay se cifró en la definición detallada del diseño experimental propuesto por Einstein, la casi milimétrica descripción de los procesos y de los instrumentos que tomaban parte en la experimentación imaginaria. En 1933 Einstein diseñó un experimento imaginario sin elementos técnicos: una evocación cruda del fenómeno sin considerar que para la escuela de Copenhague el *fenómeno* debe involucrar también la instrumentación y el diseño experimental. El *cambio* en la crítica de Einstein a la cuántica no fue teórico ni ideológico, sino *técnico*: cambió la forma de diseñar los experimentos imaginarios que daban cuerpo a su crítica.

Ciertamente, los experimentos imaginarios no son en sí mismos la crítica de Einstein sino una herramienta para llevar a cabo dicha crítica; no obstante, su uso a lo largo de los años hizo que la propia crítica se encarnara en los experimentos imaginarios. Por este motivo, separarlos no sólo resulta difícil, sino también anacrónico.

Para el caso del experimento de 1933, Rosenfeld, partidario de la nueva mecánica cuántica, no expresó, como se dijo anteriormente, una respuesta inmediata (o al menos esa respuesta no está referida en la narración de aquel encuentro). No obstante, en el texto de 1967, Rosenfeld expone sus conclusiones con respecto al arreglo experimental esgrimido por Einstein:

«Ahora, si observamos la posición de la primera partícula, la correlación entre las posiciones de las dos partículas puede usarse para decirnos dónde está la otra partícula; pero no tenemos posibilidad alguna de hacer uso de la correlación entre el momento de las dos partículas porque (como se expresa en las relaciones de incertidumbre) hemos perdido el control sobre el momento de la primera partícula al medir su posición; en tal medición no podemos evitar un intercambio de momento desconocido entre la partícula y el aparato. Si observamos el momento de la partícula, ocurre a la inversa: mantenemos el control sobre la correlación del momento, pero lo perdemos sobre la correlación de la posición» (Rosenfeld, 1967, p. 130)¹⁰⁴.

La respuesta de Rosenfeld, a la luz del paso del tiempo, no es sino una repetición de los argumentos de Bohr que en 1935 dieron respuesta a EPR. Su argumento se resume en el inevitable intercambio de momento entre la partícula y el instrumento de medición utilizado, como se especifica en el Principio de Incertidumbre, y en que una medición con respecto a la posición va en detrimento de la posibilidad de conocer el momento de la partícula. En la formulación de Einstein se observa una falta de detalles técnicos que especifiquen (1) ¿cómo se determina el

¹⁰⁴ «Now, if we observe the position of the first particle, the correlation between the positions of the two particles can be used to tell us where the other particle is; but we have no possibility of making use of the correlation between the momenta of the particles, because (as expressed by the indeterminacy relation) we have lost control over the momentum of the first particle by measuring its position; in such measurement we cannot avoid an unknown exchange of momentum between the particle and the apparatus. If we observe the momentum of the first particle, it is the other way round: we retain control over the momentum correlation, but we lose that over the position correlation» (Rosenfeld, 1967, p. 130).

punto de localización del encuentro de las dos partículas?, y (2) ¿qué tipo de medición realiza el observador para determinar la posición de una y otra partícula?, hecho que orilla a Rosenfeld a dotarla de un esqueleto experimental, así como lo hizo Bohr durante las conferencias de Solvay y en su respuesta a EPR en 1935: rediseñar el experimento imaginario con el fin de hacerlo más aprehensible, más *refutable*. De esto se hablará más adelante.

Años después, Max Born escribiría sobre la crítica de Einstein hacia la cuántica: «El motivo detrás de este programa es la muy conocida actitud filosófica de Einstein. Él cree que la mecánica cuántica es insatisfactoria porque describe, no el comportamiento de un mundo objetivo, sino las reacciones de los objetos físicos ante las condiciones experimentales» (Born, 1973, p. 254). El hincapié de Rosenfeld residía, precisamente, en esa relación del mundo físico con los objetos propios de la experimentación: es ahí donde se encuentran las relaciones de incertidumbre.

Ahora bien: para Fine (1996), lo que Einstein aprendió de la discusión con Bohr en la Conferencia de Solvay de 1930 fue la noción de que no podría evitar la aplicación del Principio de Incertidumbre, y que su crítica debía centrarse en explicar lo que dicha «doctrina de la perturbación» podía generar en términos de la realidad física (Fine, 1996, p. 31). En este sentido, el experimento del artículo publicado junto a Tolman y Podolsky es el primer intento de ello: Einstein no busca sortear las relaciones de incertidumbre, sino llevar dichas relaciones a la realidad macroscópica, donde producen un absurdo que no podría formar parte de ninguna teoría científica (el carácter probabilístico de la medición del instante de apertura del obturador). Sin embargo, el argumento del artículo de 1931 causó poco impacto y, aunque no le rodeó ningún fracaso controversial ni ninguna discusión pública, el andamiaje experimental resultó ser débil. Para 1933 la intención, como

se ha visto, era otra. Habiendo aprendido la lección del experimento imaginario de 1931, dejó a un lado los efectos macroscópicos y se centró en el proceso de medición de los fenómenos microscópicos. De ahí que las cajas, obturadores y relojes desaparecieran en la formulación de 1933, así como el detalle de los procedimientos de medición: el nivel de idealización no iba hacia la precisión, sino hacia la abstracción. El experimento presentado a Rosenfeld, por tanto, es a la vez completo e incompleto: es decir, completo en el sentido de que contiene todos los valores experimentales de la formulación que sirve a los propósitos de Einstein para demostrar la extrañeza de la acción-a-distancia, e incompleto en el sentido de que, para entonces, el contenido de premisas y condiciones iniciales que aparecería dos años más tarde en el artículo publicado junto a Podolsky y Rosen aún no formaba parte de la construcción.

¿Un experimento imaginario fallido? Karl Popper y su participación en la polémica. El último eslabón antes de la publicación de EPR. Una comunicación con Albert Einstein. 1934: La lógica del descubrimiento científico.

La discusión desbordaría los límites de la física para abordar la filosofía y hacer de la polémica una cuestión que interesaría a un público y unos participantes más amplios y variados. Es el caso de la contribución de Karl Popper, quien hizo su incursión con un experimento imaginario que gozó de una extraña suerte y de una corta vida.

El experimento apareció en un artículo publicado en noviembre de 1934 en *Die Naturwissenschaften*, y está firmado en agosto de ese año, en Viena, bajo el título *Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen*. Adjunto al

texto puede leerse una respuesta escrita por von Weizsäcker. El documento ocupa casi una página entera escrita a dos columnas, mientras que la respuesta se remite apenas a una columna, ni siquiera completa. Al parecer, al momento de su publicación no causó mucho revuelo; sin embargo, a efectos de esta investigación resulta de vital importancia.

En diciembre de ese mismo año aparece publicado el primer trabajo extenso de Popper, *Logik der Forschung*, resultado de su cercanía con el grupo del Círculo de Viena mientras trabajaba como profesor de una escuela secundaria. Es en una de las últimas secciones del libro donde el joven profesor se aventura a hacer una crítica de la mecánica cuántica, y, en concreto, del Principio de Incertidumbre, mediante un experimento imaginario. La mayor parte de la bibliografía que hace referencia a este ejercicio experimental lo considera un fracaso, un intento fallido, y el mismo Popper le dio la categoría de *pecado de juventud*, siendo eliminado de las subsecuentes ediciones del libro mientras se le sustituía por una versión corregida y mejorada. Sin embargo, es la primera versión la que interesa aquí.

Los primeros artículos publicados por Popper entre 1925 y 1932 trataban principalmente de tópicos educacionales. Fueron publicados en la revista *Die Quelle*, a invitación del Dr. Eduard Burger, editor de la revista (1927, 1931, 1932), a excepción del primero, publicado en *Schulreform* en 1925 y de cariz más filosófico. Entre 1930 y 1932 escribe *Die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie (The two fundamental problems of the theory of knowledge)*. Este primer libro sería publicado, después de varias correcciones y recortes exigidos por la casa editorial *Springer*, bajo el famoso título *Logik der Forschung*. En noviembre de 1934, el libro estaba terminado y con las revisiones de las pruebas de imprenta finalizadas.

Cuando, en el verano de 1934, Popper envió la versión publicable de su artículo sobre el Principio de Incertidumbre a *Die Naturwissenschaften*, el consejo editorial reconoció el potencial de los planteamientos pero dudó de su solidez científica y, por ello, decidieron enviar el manuscrito a Heisenberg con el fin de que diera su opinión y agregara un comentario a la publicación. Heisenberg, sin embargo, pasó el documento a su alumno, von Weizsäcker, quien, a su vez, escribió a Popper recomendando que no publicara el artículo. Popper pensaría que estaba siendo tratado como un novato y que sus argumentos no habían sido comprendidos por Heisenberg. Decidió mantener el artículo en la revista y, hacia principios de diciembre de 1934, envió a Heisenberg, en contra de las recomendaciones de la casa editorial *Springer*, una copia de *Logik der Forschung*. Pocos días después, el libro fue publicado.

Al revisar la bibliografía en busca de referencias al experimento imaginario de Popper, lo más común es encontrarse con una variación del experimento de 1934, pero que se publicó en 1982 en el libro *Teoría cuántica y el cisma de la física*. Esta reelaboración del experimento imaginario de 1934, aunque más conocida, es más bien un epílogo de éste alimentado con las reflexiones posteriores a la crítica que recibió Popper y con la experiencia de los años siguientes. No obstante, hay un elemento en común entre el experimento imaginario y su reelaboración que, además, comparten con el experimento imaginario planteado en 1935 por Einstein, Podolsky y Rosen, y que ya había prefigurado Einstein en 1933 en aquella conferencia impartida por Leon Rosenfeld en Bruselas: el sistema de dos partículas que interactúan entre sí, esa suerte de entrelazamiento todavía velado. Popper concibió un esquema de medición conjunta basado en mediciones de pares de partículas entrelazadas. El hecho de que esta propuesta fuera defectuosa e insostenible fue notado inmediatamente por von Weizsäcker y, aunque Popper aceptó más tarde esta crítica, él mismo sugirió que este ejemplo

pudo inspirar a Einstein y sus colaboradores para la concepción de su famoso experimento imaginario (Busch, Heinonen, Lahti, 2007, p. 171). Aunque, hasta ahora, el concepto de *entrelazamiento* no ha aparecido en ningún artículo, la idea subyacía ya desde el experimento imaginario de Einstein, Tolman y Podolsky, aunque de una forma que podríamos llamar primitiva o muy básica. La condición de fallido que se le otorgó al experimento imaginario de Popper la proporcionó, en un inicio, von Weizsäcker y sería, más tarde, el propio Einstein, en una carta enviada a Popper, quien señalaría los errores en el planteamiento. En las ediciones posteriores de *Logik der Forschung*, además de eliminar la versión de 1934 del experimento imaginario, Popper agrega la nueva versión corregida y, a modo de apéndice, la transcripción de la nota de Einstein, junto a su versión facsímil.

El artículo comienza con una crítica al Principio de Incertidumbre y a su *basamento* en experimentos imaginarios, aludiendo a que, si es posible diseñar un experimento imaginario que proporcione soporte al Principio de Incertidumbre, deberá haber otro que pueda demostrar sus fallos:

«La interpretación de las desigualdades de Heisenberg se basa en experimentos imaginarios (observación a través del microscopio, etc.), lo que no permite hacer mediciones más precisas, utilizables en pronósticos que sean comprobables. En otras mediciones “no predictivas”, por ejemplo, en la medición del momento de una partícula en su arribo a un lugar precisado con exactitud, las relaciones de incertidumbre no pueden ser utilizadas sin más ni más. En este método de discusión nunca es posible descartar que puede haber otro experimento imaginario que haga ver como posibles (con la utilización de efectos y leyes

conocidos) mediciones predictivas más precisas» (Popper, 1934, p. 807)¹⁰⁵.

Lo que busca Popper es explicar que, si el Principio de Incertidumbre encuentra solidez en un método argumentativo como el de los experimentos imaginarios, se abre de par en par la puerta a la posibilidad, y a la necesidad, de una discusión, ya que el principal fundamento del uso de dicho método es, como señala Popper, el de la discusión abierta. Quizá, de ser que el Principio de Incertidumbre se sustentara en un experimento *real* para el que fuera necesario una habilidad y una infraestructura más específica, la participación de Popper habría resultado imposible. Tal vez fuese ahí donde comenzasen los *pecados de juventud*.

El experimento imaginario que plantea Popper es el siguiente:

«Un rayo de electrones [designado por] A y un haz de rayos x [designado por] B , se cruzan (también son posibles otras combinaciones de rayos). A sería un rayo paralelo monocromático; B llegaría al lugar B' a través de una

¹⁰⁵ «Die Interpretation der Heisenbergschen Ungleichungen stützt sich auf Gedankenexperimente (Beobachtung durch ein Mikroskop usw.), die genauere, für *nachprüfbar* Prognosen verwendbare Messungen nicht gestatten. Auf andere, „*nichtprognostische*“ Messungen, z. B. Messung des Impulses eines Teilchens beim Eintreffen an einem genau gemessenen Ort, können die Ungenauigkeitsrelationen nicht ohne weiteres angewendet werden. -- Bei dieser Methode der Diskussion kann natürlich nie ausgeschlossen werden, daß doch noch ein Gedankenexperiment aufgefunden wird, das genauere prognostische Messungen (unter Verwendung bekannter Effekte und Gesetzmäßigkeiten) als möglich erscheinen läßt» (Popper, 1934, p. 807). La traducción del texto de Popper del alemán al español se hizo especialmente para este trabajo. El encargado fue el Dr. Enrique Martínez, editor de la Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Doctor en Letras Germánicas por la Universidad de Berlín.

pequeña rendija y formaría ondas esféricas monocromáticas; A y B son, por tanto, “casos puros”. Ahora observamos dos pequeños rayos parciales (A) y (B) que se seccionan (cortan) en S , sin tener que aislar técnicamente esos rayos parciales de los rayos A y B con cualquier dispositivo [...] El momento ($a1$) de A sería conocido, asimismo el momento parcial ($b1$) de B . De esta manera, conocemos también los vectores de momento $a1$ y $b1$ de los rayos parciales (A) y (B) (antes de una eventual colisión de las partículas en S). Escogemos ahora una dirección SX y observamos aquellas partículas de (A) que, después del choque, volaron en esa dirección. Posteriormente podemos calcular su momento $a2$, así como el vector de momento $b2$ de aquellas partículas de (B) que chocaron en S con las partículas de (A) que volaron en la dirección SX (efecto Compton). Coloquemos ahora un aparato en X (como un contador construido para el efecto) que registre tanto los momentos parciales de las partículas llegadas de la dirección SX , como también el instante de su arribo; de esta forma podremos calcular en cualquier momento parcial ($a2$) *la posición y el momento* de aquella partícula (B) que ha chocado con la correspondiente partícula (A) en S (así como el lugar S de la colisión que se desplaza, con la variante $/a2/$, en la recta elegida SX). En la dirección SX , la *precisión* de este cálculo no está supeditada [...] a ninguna limitación fundamental del tipo de las relaciones de incertidumbre (imprecisión); ello presupone que el momento parcial y el instante del *arribo* de una partícula –medición “no pronosticada”– pueden medirse con arbitraria precisión (una condición cuya admisibilidad

se debatirá en otra parte). El cálculo tiene el carácter de un pronóstico comprobable, porque podemos colocar un segundo aparato de registro en la órbita de las partículas dispersas (B) –quizá en Y – con el vector de momento b_2 , y saber, con su ayuda, si los impactos pronosticados b_2 ocurren o no en el tiempo calculado. Este experimento remite a la posibilidad de hacer pronósticos más precisos para mediciones de posición y momento “no predictivas” que sean más certeros, más precisos» (Popper, 1934, p. 807)¹⁰⁶.

¹⁰⁶ «Ein Elektronenstrahl A und ein Licht-(Röntgen-) Strahl B werden gekreuzt (auch andere Kombinationen von Strahlen sind möglich). A sei ein monochromatischer Parallelstrahl, B falle an der Stelle B_1 durch einen schmalen Spalt und bilde monochromatische Kugelwellen; A und B sind also “reine Fälle”. Wir betrachten nun zwei schmale, einander bei S schneidende Teilstrahlen $[A]$ und $[B]$, ohne diese Teilstrahlen jedoch aus den Strahlen A und B durch irgendwelche Vorrichtungen (Blenden od. dgl.) technisch zu isolieren. Der Impuls a_1 von A sei bekannt, ebenso der Impulsbetrag b_1 von B . Wir kennen daher auch die Impulsvektoren a_1 und b_1 der Teilstrahlen $[A]$ und $[B]$ (vor einem etwaigen Zusammenstoß der Teilchen bei S). Wir wählen nun eine Richtung SX und betrachten jene Teilchen von $[A]$, die nach dem Zusammenstoß in diese Richtung fliegen. Wir können dann deren Impuls a_2 berechnen sowie den Impulsvektor b_2 jener Teilchen von $[B]$, die mit den in die Richtung SX fliegenden $[A]$ -Teilchen bei S zusammengestoßen sind (Compton-Effekt). Stellen wir nun bei X einen Apparat auf (etwa einen entsprechend konstruierten Spitzenzähler), der die Impulsbeträge der arts der Richtung SX eintreffenden Teilchen sowie den Zeitpunkt des Eintreffens registriert, so können wir zu jedem beliebigen registrierten Impulsbetrag a_2 Ort und Impuls jenes $[B]$ -Teilchens berechnen, das mit dem betreffenden $[A]$ -Teilchen bei S zusammengestoßen ist (sowie den Ort S des Zusammenstoßes, der sich mit variierendem a_2 auf der gewählten Geraden SX verschiebt). Die Genauigkeit dieser Berechnung ist für die SX -Richtung (bei geeigneter Anordnung) keiner grundsätzlichen Beschränkung von der Art der Ungenauigkeitsrelationen unterworfen; dabei wird vorausgesetzt, daß Impulsbetrag und Zeitpunkt eines einfallenden Teilchens –“nichtprognostische” Messung- beliebig genau meßbar ist (eine Voraussetzung, deren Zulässigkeit an anderer Stelle diskutiert wird). Die Berechnung hat den Charakter einer nachprüfbaren Prognose. Denn wir können auf der Bahn der mit dem berechneten Impulsvektor b_2

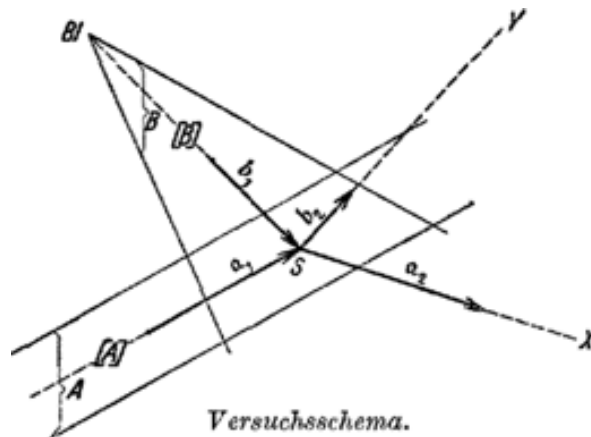


Figura 13. Popper, *Die Naturwissenschaften*, 1934, p. 807.

En sí mismo, el experimento imaginario de Popper es bastante más confuso que los ejemplos anteriores. Teniendo en cuenta la referencia más reciente, la conferencia de Rosenfeld en 1933 y el experimento de Einstein, esta formulación de Popper es radicalmente diferente. En todo caso, se asemeja más al primero de los dos artículos de Darwin (1931a), así como al experimento imaginario de Rosen y Vallarta (1932), ambos tratados en este capítulo. La diferencia es evidente. ¿Por qué? Es interesante, antes de seguir con el análisis del texto de Popper, sugerir un poco a qué pueden deberse estas similitudes y diferencias.

gestreuten $[B]$ -Teilchen -etwa bei Y- einen zweiten Registrierapparat aufstellen und mit seiner Hilfe prüfen, ob die prognostizierten b_2 Einschläge zur berechneten Zeit eintreffen oder nicht. Das angegebene Experiment führt also die Möglichkeit genauer Prognosen. auf die gewisser genauer "*nichtprognostischer*" Orts- und Impulsmessungen zurück» (Popper, 1934, p. 807)

Los experimentos imaginarios diseñados para enunciarse oralmente son producto de un arreglo más visual, aprehensible, breve y con repercusiones bastante evidentes. Los experimentos imaginarios diseñados para una publicación poseen una extensión mayor, un sustento matemático más sólido (que no necesariamente abundante) y sus conclusiones son menos evidentes, menos *visibles*. Esto puede parecer obvio. No obstante, si se revisa, por ejemplo, el artículo de Heisenberg de 1927, se verá, como ya se señaló en su momento, que el experimento imaginario del microscopio aparece al inicio del artículo, a pesar de que el documento cuenta con una sección, larga, donde se consignan los experimentos imaginarios que propone el autor. Lo mismo ocurre en el caso del gato de Schrödinger en 1935: el gato aparece en una de las primeras secciones, lejos del experimento imaginario que el autor propone para sustentar su sistema de ideas. Tanto en el caso de Heisenberg como en el de Schrödinger, microscopio y gato son relativamente breves en comparación con los experimentos imaginarios propuestos en las secciones correspondientes. Se puede señalar también a los experimentos planteados por Darwin en la conferencia en el Lowell Institute (1931b) y al experimento de Einstein en la conferencia de Rosenfeld (1967) en Bruselas. El formato de presentación del experimento imaginario incide directamente en su efecto sobre el público al que va dirigido, es decir, en su función primordial, lo que a su vez influye en su diseño o, al menos, en la explicación del diseño. Al leer el artículo de Heisenberg de 1927, se aprecia que comienza por algunas consideraciones teóricas que conducen al experimento del microscopio mucho antes de llegar a la sección de experimentos imaginarios: el lector avanza por el texto con el ejemplo del microscopio asentado ya en su razonamiento, lo que condiciona la lectura de todo el documento. Lo mismo será válido para el gato de Schrödinger: el gato *acompaña* al lector a lo largo de todo el

artículo. Esto es importante en la medida en que el experimento imaginario no es solamente la corporización de una serie de ideas y teorías sino que también es una herramienta de persuasión y retórica y, como tal, el uso domina a la forma.

Ahora bien, es importante advertir que, en 1934, Popper hacía sus primeras incursiones en los debates filosóficos sobre la mecánica cuántica y que su interés venía dado, principalmente, en relación a los problemas que ésta planteaba en torno a la teoría del conocimiento; por ello, la mayor parte de su cuerpo teórico en relación con la mecánica cuántica es posterior al experimento imaginario de 1934 e, incluso, posterior a la publicación de EPR. Ésta es la razón por la cual no se tomarán en consideración en el presente trabajo esos argumentos posteriores, así como tampoco toda la construcción teórica de Popper que resulte posterior al artículo publicado en *Die Naturwissenschaften*. De la misma forma, la mayor parte de la bibliografía que se ocupa de la participación de Popper en la discusión en torno a la mecánica cuántica apela a las publicaciones posteriores a 1934, aun cuando éstas hacen referencia, por mínima que sea, al artículo que aquí se revisa. En el afán de seguir un orden cronológico, no se tomarán tampoco en cuenta esas publicaciones. El objetivo de esta decisión es, en la medida de lo posible, estudiar el experimento imaginario de 1934 no como parte del pensamiento de Popper sino como parte del objeto de estudio de esta investigación.

Max Jammer explica que el punto de partida de Popper fue el de una especie de queja hacia Heisenberg por no continuar con su proyecto de eliminación de la mecánica cuántica de las cantidades experimentales inaccesibles de los *no-observables* y, por tanto, por no haber *purgado* la teoría de sus elementos metafísicos (Jammer, 1974, p. 174). Para probar esto, Popper definió la *trayectoria* como el conjunto de las coordenadas de posición y momento para un intervalo de tiempo dado, y apuntó que,

al combinar los resultados de (1) dos mediciones consecutivas de la posición o (2) una medición del momento seguida por una medición de la posición, o (3) una medición de la posición seguida por una medición del momento, la *trayectoria* de una partícula para todo el periodo entre las dos mediciones puede ser establecida con precisión a pesar de las relaciones de incertidumbre (Jammer, 1974, p. 174).

Con el fin de que el experimento imaginario se comprenda mejor, puede decirse que Popper propone, en primer término, la interacción de dos rayos de luz A y B ; el momento a_1 del rayo A es conocido, y dado que la anchura de onda del rayo B también es un dato determinado, la magnitud de su momento b_1 también se conoce. Dos rayos más estrechos compuestos, cada uno, de partículas A y B chocan en el punto S . Cuando se selecciona una dirección definida para el rayo de partículas B , el momento b_1 puede calcularse. Luego, para calcular a_2 y b_2 , Popper aplica las leyes no estadísticas de conservación de la posición y el momento a las partículas de A que, después de la colisión, siguieron por la trayectoria SX , de manera que, a cada partícula de A desplazada hacia SX con momento a_2 , corresponde una partícula de B con momento b_2 desplazada en la dirección SY calculable. De manera que la medición, con precisión arbitraria (la parte central del experimento), sucede después de esta colisión, cuando se coloca un aparato, por ejemplo un contador Geiger, que podrá registrar los momentos parciales de las partículas llegadas de la dirección SX , así como el instante de su llegada y, de esa forma, apunta Popper, será posible calcular la posición y el momento de cualquier partícula de B que haya chocado con una partícula de A en el punto S , y el propio lugar S de la colisión. Sería posible, afirma Popper, confirmar esta información colocando otro contador Geiger en la órbita de las partículas dispersas de B , por ejemplo, en la trayectoria Y (Popper, 1934, p. 807; ver también Jammer, 1974, p. 177).

Resulta, por demás, interesante, ver que el experimento imaginario de Popper propone que las mediciones de posición y momento se sucedan después de la colisión de las partículas de A y B , y que la información obtenida de la medición aplicada a un grupo de partículas ayude a obtener información sobre otro grupo de partículas. El eco de esta noción, que el propio Popper no recalca demasiado, podrá verse al año siguiente en el experimento imaginario de EPR. Aunque el concepto de *entrelazamiento* no esté explicitado en el texto, su significado se evoca acertadamente entre los vericuetos del planteamiento de Popper. Dicho planteamiento es, quizá, demasiado rebuscado para un experimento imaginario que bien podría explicarse diciendo que dos rayos de electrones colisionan en un punto determinado, y que, tras la colisión, cada uno es desviado en una dirección diferente con un momento diferente al que tenían antes del choque. La medición ocurriría, pues, un tiempo después del encuentro, no en la colisión misma. Reduciendo, así, la formulación, el experimento imaginario de Popper es muy parecido al de Einstein en 1933.

Sin embargo, hay una idea importante que aparece en el artículo de Popper que no se ha mencionado hasta ahora: la intención de diseñar un *caso puro* en el cual la medición sin incertidumbres, o con incertidumbres despreciables, sea posible. Es decir, Popper intentó diseñar, más que un experimento imaginario, un caso en el cual las tendencias, o los elementos objetivos del sistema, es decir, aquellos elementos que no dependen del observador, superaran a los elementos subjetivos, los que dependen del conocimiento que el observador tiene o puede tener sobre el sistema (Heisenberg, 1958). El *caso puro* de Popper era su único argumento en el experimento imaginario, de ahí la debilidad que von Weizsäcker, primero, y Einstein, después, encontrarían en la formulación.

Como von Weizsäcker no pudo disuadir a Popper de la publicación del artículo en *Die Naturwissenschaften*, envió un PostScript en el que señalaba los errores del experimento imaginario. En resumidas cuentas, von Weizsäcker (1934) sostenía que la reconstrucción de la trayectoria de la partícula de A precedida de la medición del momento en X es imposible, ya que, para dicha medición, haciendo uso del efecto Doppler con una frecuencia de radiación muy baja (para minimizar el desplazamiento de la partícula), sería necesaria una duración considerablemente larga, precisamente debido a la baja frecuencia, de manera que la velocidad promedio durante este intervalo de tiempo no puede conocerse con precisión (von Weizsäcker, 1934, p. 808; ver también Jammer, 1974, p. 177). Es decir, Popper plantea el uso de un rayo de luz de frecuencia muy baja que *apenas* perturbe la partícula que se está observando, de manera que pueda realizarse una segunda medición para determinar su posición actual y sus posiciones anteriores a la colisión con el rayo de luz de baja frecuencia. Lo que von Weizsäcker mantiene es que ese rayo de baja frecuencia requiere de un tiempo demasiado largo para actuar sobre la partícula que se está observando, de manera que, tras ese intervalo de tiempo sumamente largo, la posición que se quería medir habría quedado ya demasiado lejos en el tiempo como para estimarla con precisión (von Weizsäcker, 1934, p. 808). Parece ser que la refutación que propone von Weizsäcker no convenció a Popper quien, alentado por el violinista Adolf Busch, amigo de Einstein, le envió a éste una copia del artículo y un ejemplar de *Logik der Forschung* hacia finales de noviembre de 1934. La segunda y, quizá, definitiva refutación del experimento imaginario de Popper llegó de la mano de Einstein en una carta escrita en septiembre de 1935.

Popper no sólo envió a Einstein el artículo publicado en *Die Naturwissenschaften* y un ejemplar de *Logik der Forschung*, sino también un artículo de naturaleza similar que nunca se publicó y que contiene un

experimento imaginario que Einstein refuta, escuetamente, en la carta. Junto a dicha refutación aparecen dos valiosas anotaciones: (1) un breve experimento imaginario propuesto por Einstein para explicar su punto de vista con respecto a las formulaciones de Popper, y (2) un breve resumen del argumento de EPR que, para entonces, ya había sido publicado: EPR se envió a la junta editorial de *Physical Review* en marzo de 1935 y fue publicado en mayo de ese mismo año. La carta de Popper fue enviada hacia el 30 de noviembre de 1934, y la respuesta de Einstein hacia el 11 de septiembre de 1935. Esto no puede aclarar, aún, si Einstein leyó el artículo de Popper al mismo tiempo, o antes, que trabajaba en la construcción de EPR, y qué tanto esa lectura pudo o no influir en dicha construcción. Jammer (1974) explica que la correspondencia que mantuvo con Nathan Rosen y con la viuda de Boris Podolsky tampoco ayuda a esclarecer el asunto: Rosen (en una carta personal a Jammer) afirma que habría sido posible que el trabajo de Popper llegara a Einstein antes de la construcción de EPR; la viuda de Boris Podolsky, por su parte, niega la posibilidad de que aquel artículo llegara a los tres autores antes del primer borrador del artículo (ver Jammer, 1974, p. 178; nota al pie, 30).

Al experimento imaginario publicado en *Die Naturwissenschaften*, Einstein dedicó muy poco. Se limitó a argüir que no creía «que [fuera] factible un *caso puro* que nos permitiera pronosticar con una precisión *inadmisibile* la posición y el impulso de un cuanto luminoso» (Carta de A. Einstein a K. Popper, septiembre de 1935; en Popper, 1962, p. 426), es decir, que creía que Popper no se estaría yendo muy lejos de la habitual afirmación, hecha ya antes por otros como Rosen y Vallarta (1932), de que es posible una configuración experimental que permita medir con precisión arbitraria la posición y el momento de una partícula. Esto dice más del pensamiento de Einstein en aquellos años que de las propias ideas de Popper. Del experimento imaginario que Popper diseñó en el

artículo que envió a Einstein, que nunca fue publicado, sólo se tiene lo que el propio Einstein dice de él: «Tengo por ineficaces en principio los medios que usted propone (una pantalla con obturador instantáneo justamente con un equipo selectivo de filtros de vidrio), por la razón de que creo firmemente que semejante filtro haría *borrosa* la posición, como ocurre con una red espectroscópica.» (Carta de A. Einstein a K. Popper, septiembre de 1935; en Popper, 1962, p. 427, énfasis de Einstein), para lo que Einstein propone, a manera de ejemplo, un breve experimento imaginario:

«Mi argumentación es como sigue. Figúrese usted una señal luminosa breve (posición exacta) que, para poder ver cómodamente los efectos producidos por el filtro de absorción, considero analizada de un modo puramente formal en un gran número de trenes de onda monocromáticos; W_n . El equipo de filtros de absorción eliminará todos los W_n (colores) excepto W_1 ; mas este grupo de ondas tendrá una extensión considerable (una posición borrosa), debido a ser casi monocromático: lo cual quiere decir que la acción del filtro necesariamente hace *borrosa* la posición» (Carta de A. Einstein a K. Popper, septiembre de 1935; en Popper, 1962, p. 426, énfasis de Einstein).

Einstein se refiere a que la búsqueda de un *caso puro* no es el camino más adecuado para diseñar un experimento imaginario que pueda rebatir los principios de la mecánica cuántica. Ésa había sido, de alguna manera, la intención de Einstein desde 1927 hasta 1931, y que habría abandonado tras el artículo con Tolman y Podolsky.

Apenas dos párrafos más abajo, Einstein afirma que el trabajo con Podolsky y Rosen ya ha sido escrito (para entonces ya había sido publicado) pero que, desafortunadamente, no puede enviarle una copia. No obstante, explica a Popper, en resumidas cuentas, el argumento teórico y la configuración experimental:

«Cabe preguntarse si, desde el punto de vista de la teoría cuántica actual, el carácter estadístico de nuestros resultados experimentales *es meramente efecto de una intervención desde el exterior –incluyendo la medición–*, mientras que los sistemas como tales –descritos por una función ψ – se conducen en sí mismos de un modo determinista. [...] Pero puede preguntarse también: ¿no hemos de interpretar la función ψ , que en cuanto al tiempo cambia –según la ecuación de Schrödinger– de un modo determinista, como una descripción *completa* de la realidad física, y, con ello, que la intervención desde el exterior (insuficientemente conocida) sea totalmente responsable de que las prognosis tengan solamente un carácter estadístico?

Llegamos al resultado de que no puede interpretarse la función ψ como una descripción completa del estado físico de un sistema» (Carta de A. Einstein a K. Popper, septiembre de 1935; en Popper, 1962, p. 426, énfasis de Einstein).

Einstein ofrece a Popper el sustento teórico de EPR en una versión sencilla y poco detallada para pasar, de inmediato, a la descripción del experimento imaginario, no sin antes enunciar (como se aprecia en las últimas líneas de la cita anterior) lo que se quería demostrar mediante EPR: que la función ψ no es una representación de la realidad.

«Consideramos un sistema compuesto que consta de los sistemas parciales A y B, los cuales se encuentran en interacción mutua sólo durante un tiempo limitado.

Sea conocida la función ψ del sistema compuesto *antes* de la interacción (por ejemplo, un choque entre dos partículas libres); entonces la ecuación de Schrödinger nos da la función ψ del sistema compuesto *después* de aquélla.

Ahora (después de la interacción), se llevará a cabo sobre el sistema parcial A una medición (lo más acabada posible) que, sin embargo, es posible realizar de modos diversos según las variables a conocer (con precisión) —por ejemplo, el impulso *o bien* la coordenada espacial—. La mecánica cuántica nos da entonces la función ψ para el sistema parcial B que será, *en cada caso, distinta según qué medición se elija ejecutar sobre A.*

Como no es razonable suponer que el estado físico de B dependa de qué medición yo haya llevado a cabo sobre el sistema A, que está [ya] enteramente separado de aquél, esto quiere decir que, al mismo estado físico B, le pertenecen dos funciones distintas. Puesto que una descripción *completa* de un estado físico tiene que ser necesariamente una descripción *unívoca* (descontando superficialidades tales como unidades, elección de las coordenadas, etc.), no puede interpretarse la función ψ como la descripción *completa* de aquel estado.

Naturalmente, un teórico cuántico ortodoxo dirá que no existe una descripción completa, de modo que tendremos solamente la descripción estadística de un *agregado* de sistemas, y no de *un* sistema. Pero,

primeramente, ha de *decirlo* (y, en segundo término, no creo que nos convenza duraderamente con una descripción tan vaga de la Naturaleza).

Es de advertir que las prognosis (exactas) a las que puedo llegar para el sistema B (de acuerdo con la libre elección de la forma de medir A), pueden estar bien entre sí como lo están las mediciones de impulso y de posición. Así pues, no se puede eludir fácilmente la concepción de que el sistema B tenga un impulso y una coordenada especial determinados; pues lo que puedo predecir tras haber elegido libremente [esto es, sin interferir con ello], tiene que existir, asimismo, en la realidad» (Carta de A. Einstein a K. Popper, septiembre de 1935; en Popper, 1962, p. 427-8, énfasis de Einstein).

El experimento imaginario que Einstein plantea a Popper es una versión de EPR con las modificaciones que Einstein habría agregado al borrador final si lo hubiera revisado. El centro del planteamiento que ofrece a Popper tiene que ver, más que con la medición simultánea de magnitudes no conmutativas, con la asignación de dos funciones de onda a un mismo estado del sistema. Es ahora cuando se recuerda el experimento imaginario de Einstein que Ehrenfest refirió a Bohr en una carta fechada en 9 de julio de 1931, y que hablaba de la asignación de dos *estados teóricos* a un mismo estado del sistema. El problema de la asignación de dos funciones ψ para un mismo estado del sistema se abordará con más detalle en la siguiente sección, cuando se hable específicamente de EPR.

En una nota previa a la carta de Einstein, Popper (1962) explica que fue esta carta la que «acaba sucinta y decisivamente» con el experimento imaginario publicado en 1934. Sin embargo, hay tres

elementos interesantes que deben rescatarse del artículo de Popper y que están en estrecha relación con los elementos del experimento imaginario de la carta de Einstein: (1) el proceso de medición ocurre *después* de la interacción entre las partículas de los rayos A y B del ejemplo de Popper, no inmediatamente después, sino después de un lapso de tiempo *considerable*, tal y como describe Einstein en el experimento de EPR, pero también en ETP, y como también lo hacen Rosen y Vallarta (1932); (2) las dos partículas que interactúan, tanto en el experimento de Popper como en el de EPR, forman parte de un conjunto (llámese sistema) y la interacción se da entre dos partículas libres del sistema; y (3) la interacción entre las dos partículas establece una relación entre ellas a la manera del concepto posterior de entrelazamiento que identifica, lo que Popper no señalaría en su artículo pero Einstein sí en EPR, como acción-a-distancia.

Einstein, Podolsky y Rosen: 1935. Una paradoja. La cumbre de la crítica de Einstein hacia la mecánica cuántica. Discusión abierta, discusión incompleta. El modelo de discusión de los experimentos imaginarios.

Unperformed experiments have no results
Asher Peres

En abril de 1934, Einstein publicó en *Philosophy of Science* un artículo titulado *On the method of theoretical physics*. Se trata de una conferencia impartida en 1933 en la Universidad de Oxford en el marco de *The Herbert Spencer Lecture*, en el mes de junio. La conferencia comienza con

la siguiente sentencia: «Si ustedes desean aprender cualquier cosa acerca de los métodos que utiliza un físico teórico, yo les daría un consejo: No escuchen sus palabras, examinen sus logros. Pues para el investigador en este campo, las construcciones de su imaginación devienen tan necesarias y tan naturales que es capaz de tratarlas no como creaciones de sus pensamientos sino como realidades dadas» (Einstein, 1934, p. 163)¹⁰⁷. Aunque, de entrada, Einstein plantea un texto divulgativo sobre el trabajo del físico teórico, el texto termina convirtiéndose en una suerte de manifiesto personal de lo que la física debe perseguir y un resumen brevísimo sobre el estado de cosas en la mecánica cuántica. Después de una sencilla introducción en torno a la forma en que la *razón* y la *experiencia* interactúan en el desarrollo de la ciencia, Einstein concluye que el pensamiento lógico puro no puede proporcionarnos un conocimiento preciso del mundo de la experiencia: todo el conocimiento sobre la realidad comienza y termina con la experiencia, y las conclusiones obtenidas mediante procesos racionales puros están, en cuanto a lo que compete a la *Realidad*, completamente vacías (Einstein, 1934, p. 164)¹⁰⁸. Así, la importancia de este artículo resulta fundamental para comprender los postulados iniciales que se propondrán, en la primavera de 1935, en el artículo de EPR. Puede verse que gran parte del sustento teórico que aparece en los párrafos iniciales del texto de EPR fue expuesto por Einstein en esta conferencia que tuvo lugar antes

¹⁰⁷ «If you wish to learn from the theoretical physicist anything about the methods which he uses, I would give you the following piece of advice: Don't listen to his words, examine his achievements. For to the discoverer in that field, the constructions of his imagination appear so necessary and so natural that he is apt to treat them not as the creations of his thoughts but as given realities» (Einstein, 1934, p. 163).

¹⁰⁸ «Pure logical thinking can give us no knowledge whatsoever of the world of experience; all knowledge about reality begins with experience and terminates in it [...] Conclusions obtained by purely rational processes are, so far as Reality is concerned, entirely empty» (Einstein, 1934, p. 164).

de tener cualquier contacto con el experimento imaginario o con las ideas de Karl Popper. Aunque aquí no hay rastro alguno de las ideas que dieron lugar a la disposición experimental de EPR, sí es posible extraer las ideas que, al ser aplicadas a dicho arreglo experimental, provocarían los resultados postulados por los tres autores.

Por ejemplo, y aún antes de revisar el texto de EPR en sí mismo, es posible decir que la idea del *criterio de realidad* puede estar expresada en sentencias como ésta: «La razón proporciona la estructura al sistema; los datos de la experiencia y sus relaciones mutuas deben corresponder exactamente con las consecuencias en la teoría» (Einstein, 1934, p. 165)¹⁰⁹. Para Einstein, las leyes y los conceptos formulados por la actividad científica deben corresponderse con las consecuencias que se ven en la naturaleza y, si no es así, puede ser que funcionen de manera adecuada como medios de resolución de problemas y explicación de algunos fenómenos determinados, sin embargo, no proporcionarían una imagen real de la naturaleza cuyos elementos básicos de representación sean simples pero sin renunciar a una adecuada descripción de los elementos de la experiencia (Einstein, 1934, p. 165)¹¹⁰. Para ejemplificar sus ideas, Einstein utiliza el ejemplo de Newton diciendo que fue el primer creador de un sistema comprensible de física teórica. Siempre creyó que las leyes y conceptos propios de su sistema podían ser derivados de la experiencia, y que la célebre frase «*hypotheses non fingo*» sólo era una expresión de esta creencia (Einstein, 1934, p. 166)¹¹¹.

¹⁰⁹ «Reason gives the structure to the system; the data of experience and their mutual relations are to correspond exactly to consequences in the theory» (Einstein, 1934, p. 165).

¹¹⁰ «It can scarcely be denied that the supreme goal of all theory is to make the irreducible basic elements as simple and as few as possible without having to surrender the adequate representation of a single datum of experience» (Einstein, 1934, p. 165).

¹¹¹ «Newton, the first creator of a comprehensive and workable system of theoretical physics, still believed that the basic concepts and laws of his system

Einstein dice: «Uno puede ver, a partir de la manera en que formuló sus ideas, que Newton bajo ninguna circunstancia se sintió cómodo con el concepto de espacio absoluto, el cual comportaba el [concepto] de reposo absoluto; porque estaba convencido de que la experiencia no mostraba nada que se correspondiera con ese concepto. Tampoco se sintió bien con la introducción de la acción a distancia. Pero el enorme éxito práctico de su teoría pudo evitar que los físicos de los siglos XVIII y XIX reconocieran el carácter ficticio de los principios de su sistema» (Einstein, 1934, p. 166)¹¹². A través de la mención a Newton y de la evidente referencia que se hace a la teoría de la relatividad como una teoría que sí hizo caso de los datos empíricos para formular sus postulados, Einstein intenta justificar su opinión sobre la mecánica cuántica como una teoría que no representa la realidad y que, por tanto, es incompleta como imagen del mundo, aun a pesar de que, como herramienta matemática, sea útil en ciertos casos. Es posible extrapolar que su intención es la de demostrar que, como la teoría cuántica no se ajusta a los conceptos empíricos que se tienen del mundo, se trata de una teoría incompleta. Para esto, en las últimas líneas del texto, Einstein añade:

«Únicamente se espera que, si realizamos una medición,
estas funciones determinen en una forma matemática las

could be derived from experience; his phrase 'hypotheses non fingo' can only be interpreted in this sense» (Einstein, 1934, p. 166).

¹¹² «One can see from the way he formulated his views that Newton felt by no means comfortable about the concept of absolute space, which embodied that of absolute rest; for he was alive to the fact that nothing in experience seemed to correspond to this latter concept. He also felt uneasy about the introduction of action at a distance. But the enormous practical success of his theory may well have prevented him and the physicists of the eighteenth and nineteenth centuries from recognizing the fictitious character of the principles of his system» (Einstein, 1934, p. 166).

probabilidades de encontrar esos objetos en un lugar particular o en una estado de movimiento particular. Esta concepción es, lógicamente, excepcional, y ha conducido a importantes éxitos. Pero desafortunadamente nos fuerza a emplear un continuum en el cual el número de dimensiones no es el mismo que el de la física anterior, es decir 4, sino que tiene dimensiones que aumentan sin límite en tanto aumenta el número de partículas que constituyen el sistema que está bajo examen. Yo no puedo evitar confesar que mi concordancia con esta interpretación no tiene más que una significación transitoria. Todavía creo en la posibilidad de proporcionar un modelo de la realidad, es decir, una teoría que pueda representar los propios eventos y no solamente la probabilidad de su ocurrencia. Por otro lado, me parece acertado que tenemos que renunciar a la noción de una localización absoluta de las partículas en un modelo teórico» (Einstein, 1932, p. 168-9)¹¹³.

Para Einstein, una teoría probabilística sólo podría ser una herramienta matemática provisional (Paty, 1995, p. 191) y, si lograba demostrar que

¹¹³ «These functions are only supposed to determine in a mathematical way the probabilities of encountering those objects in a particular place or in a particular state of motion, if we make a measurement. This conception is logically unexceptionable, and has led to important successes. But unfortunately it forces us to employ a continuum of which the number of dimensions is not that of previous physics, namely 4, but which has dimensions increasing without limit as the number of the particles constituting the system under examination increases. I cannot help confessing that I myself accord to this interpretation no more than a transitory significance. I still believe in the possibility of giving a model of reality, a theory, that is to say, which shall represent events themselves and not merely the probability of their occurrence. On the other hand, it seems to me certain that we have to give up the notion of an absolute localization of the particles in a theoretical model» (Einstein, 1934, p. 168-9).

su aplicación a la «realidad física» generaba una contradicción, entonces, su carácter de teoría explicativa de la naturaleza se vería en serio peligro, y esto era lo que intentaba hacer desde el experimento imaginario publicado en 1931 junto con Tolman y Podolsky. Si su breve participación en aquella conferencia impartida por Leon Rosenfeld en Bruselas en 1933 fue un anticipo del diseño experimental imaginario de lo que luego, en 1935, sería EPR, el texto de 1934 sobre el método de la física teórica era el compendio de su sustento teórico.

Ya asentado en Princeton, y con Nathan Rosen como asistente, Einstein trabajó, hacia la primavera de 1935, en el famoso artículo de EPR, que sería enviado al consejo editorial de *Physical Review* en marzo de ese año, y publicado apenas un par de meses después, en mayo. El título del artículo, normalmente conocido como EPR, es *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* La bibliografía crítica en torno a este artículo es numerosa, y las interpretaciones y consideraciones que ha suscitado, así como las polémicas y los debates, son tan amplios y distendidos en el tiempo que sería necesaria una investigación específicamente dedicada a ellos para proporcionar una visión más o menos amplia de dicho contexto. Lo que se intentará hacer aquí es, como antes, situarse en el propio contexto de EPR, realizar un breve análisis de su estructura, su sustento teórico y su diseño experimental y hacer una revisión a lo inmediatamente colindante, temporalmente hablando, con el artículo.

El texto se compone de 3 partes evidentes: (1) una breve introducción que consta, a su vez, de dos premisas y una conclusión; (2) una primera parte en la que se expone todo el planteamiento teórico que sustenta al experimento imaginario: las primeras ecuaciones que buscan asentar el formalismo de los enunciados axiomáticos iniciales y (3) una segunda parte que detalla el experimento imaginario mediante el cual se *viola el criterio de realidad* y se evidencia, como conclusión, que la mecánica

cuántica, al no ser una representación fiel de la realidad física, es una teoría incompleta, aun a pesar de ser una herramienta útil para algunos casos¹¹⁴. No obstante el orden formal del artículo, es posible dividir el texto en dos grandes unidades temáticas: (a) el bagaje teórico, que comprende la introducción y la primera parte; y (b) el diseño experimental imaginario. Para su comentario en el presente estudio se seguirá la clasificación formal establecida por los autores. La primera parte del artículo, (1) la introducción, apunta lo siguiente:

«En una teoría completa existe un elemento correspondiente a cada elemento de la realidad. Una condición suficiente para la realidad de una cantidad física es la posibilidad de predecirla con certeza, sin perturbar el sistema. En la mecánica cuántica, en el caso de dos cantidades físicas descritas por operadores no conmutativos, el conocimiento de una compromete el conocimiento de la otra. Entonces, o bien (1) la descripción de la realidad dada por la función de onda en la mecánica cuántica no es completa, o (2) estas dos cantidades no pueden tener realidad simultánea. Las consideraciones del problema de realizar predicciones concernientes a un sistema en base de las mediciones hechas en otro sistema que previamente ha interactuado con él conducen al resultado de que, si (1) es falso, entonces, (2) también es falso. Por tanto, se concluye que la descripción de la

¹¹⁴ Para otras esquematizaciones del texto de EPR, ver Jammer (1974) y Fine (1996).

realidad presentada por una función de onda no es completa» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777)¹¹⁵.

Teniendo la cercana referencia del artículo de Einstein (1934) escrito para la conferencia Herbert Spencer, llevaba a cabo en Oxford en 1933, puede encontrarse el vínculo entre el asiento teórico presentado en esta introducción y muchas de las ideas que aparecen en aquel artículo. Basta recordar que Einstein explicaba: «La razón proporciona la estructura al sistema; los datos de la experiencia y sus relaciones naturales deben corresponder exactamente con las consecuencias en la teoría» (Einstein, 1934, p. 165), una manera apenas diferente de explicar las nociones de la introducción de EPR, los conceptos de realidad objetiva, y la *dicotomía* entre razonamiento puro y conocimiento empírico. De hecho, las primeras líneas de EPR tienen estrecha relación con la cita anterior, extraída del texto de Einstein (1934): «Cualquier consideración seria de una teoría física debe tener en cuenta la distinción entre la realidad objetiva, que es independiente de cualquier teoría, y los conceptos físicos con los que la teoría opera. Estos conceptos están destinados a corresponderse con la realidad objetiva y es por medio de estos conceptos que nos hacemos una imagen de la realidad» (Einstein,

¹¹⁵ «In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777).

Podolsky & Rosen, 1935, p. 777)¹¹⁶. Dos son las preguntas que los tres autores se plantean para llegar a considerar exitosa una teoría física: «(1) “¿Es correcta la teoría?” y (2) “¿Es completa la descripción que la teoría proporciona?”» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777). Con estas preguntas, el inicio de EPR evidencia una gran influencia del texto que Einstein escribió en 1933 y publicó en 1934.

Esta primera parte introductoria (1) también establece una de las claves del artículo: la medición simultánea de dos cantidades físicas descritas por operadores no conmutativos. El hecho de que, a decir de los autores, el conocimiento de una comprometa el conocimiento de la otra conducirá al establecimiento de la acción-a-distancia como una consecuencia que va en contra de la lógica de las ciencias físicas; hecho que también es señalado por Einstein en el artículo de 1934: «Newton [...] también se sintió incómodo con respecto a la introducción de la acción-a-distancia» (Einstein, 1934, p. 166)¹¹⁷.

Ya en la segunda parte (2), apenas unas líneas bajo la introducción, los preceptos de *The method of theoretical physics* (1934) siguen apareciendo como sostén teórico del artículo: «Lo correcto de la teoría es juzgado mediante el grado de acuerdo entre las conclusiones de la teoría y la experiencia humana. Esta experiencia, que nos permite hacer inferencias sobre la realidad, en física toma la forma del experimento y la medición» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777)¹¹⁸. Puede, por ejemplo, compararse esta cita con la siguiente

¹¹⁶ «Any serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777).

¹¹⁷ «Newton [...] also felt uneasy about the introduction of action at a distance» (Einstein, 1934, p. 166).

¹¹⁸ «The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone

extraída del texto de Einstein de 1934: «El pensamiento lógico puro no puede proporcionarnos en absoluto un conocimiento del mundo de la experiencia; todo el conocimiento sobre la realidad comienza con la experiencia y termina con ella» (Einstein, 1934, p. 164)¹¹⁹. Es importante recordar que, al inicio del texto de 1934, al final del primer párrafo, Einstein explica que para el físico teórico, las construcciones de su imaginación devienen tan necesarias y naturales que no las trata como meras construcciones de sus pensamientos, sino como realidades dadas (Einstein, 1934, p. 163)¹²⁰, de manera que el experimento imaginario es parte de esa experiencia del mundo real que debe ser aprehendido para que los conceptos de la teoría puedan tener el carácter de *completos* en cuanto a su descripción de la realidad.

Es en esta segunda parte (2) donde Einstein, Podolsky y Rosen establecen los conceptos que suscitarían mayor polémica y serían el objeto de las críticas posteriores. Se trata, en primer lugar, de la *condición de completitud*, que regresa a las ideas planteadas en los primeros párrafos del artículo y les proporciona una cohesión de axioma: «Sea cual sea el significado asignado al término *completo*, el siguiente requerimiento para una teoría completa parece ser necesario: *cada elemento de la realidad física debe tener una contraparte en la teoría física*. Llamaremos a esto la condición de completitud» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p.777)¹²¹. Como se

enables us to make inference about reality, in physics takes the form of experiment and measurement» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777).

¹¹⁹ «Pure logical thinking can give us no knowledge whatsoever of the world of experience; all knowledge about reality begins with experience and terminates in it» (Einstein, 1934, p. 164).

¹²⁰ «For to the discoverer in that field, the constructions of his imagination appear so necessary and so natural that he is apt to treat them not as the creations of his thoughts but as given realities» (Einstein, 1934, p. 163).

¹²¹ «Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality*

ha notado antes, estas nociones no sólo aparecen, aunque brevemente, en la introducción de EPR sino también en el artículo de Einstein de 1934. El segundo concepto establecido por los tres autores es el *criterio de realidad*. Se describe de la siguiente manera:

«Una definición completa de la realidad es, sin embargo, innecesaria para nuestro propósito. Estaremos satisfechos con el siguiente criterio, que consideramos razonable. *Si, sin perturbar en cualquier forma un sistema, podemos predecir con certeza (i.e., con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física.* Nos parece que este criterio, aunque lejos de agotar todas las formas posibles de reconocer la realidad física, al menos nos proporciona una forma de hacerlo siempre que las condiciones establecidas se sucedan. Sin considerarlo como necesario, sino meramente como una suficiente condición de realidad, este criterio está de acuerdo tanto con las ideas de realidad clásicas como con las de la mecánica cuántica» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777-8)¹²².

must have a counterpart in the physical theory. We shall call this the condition of completeness» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p.777).

¹²² «A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If without in anyway disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.* It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one such way whenever the conditions set down in it occur. Regarded not as necessary, but merely as a sufficient, condition of reality, this criterion is in agreement with classical as well as quantum-mechanical ideas of reality» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777-8).

De esta manera, mediante una sencilla formulación matemática de la función de onda de una partícula y sus magnitudes observables, los tres autores llegan a la conclusión de que, debido a que la medición directa de un observable perturba el estado inicial dado por la función de onda, el conocimiento de otro observable será comprometido, por lo que, en mecánica cuántica, concluyen, «*cuando el momento de una partícula es conocido, sus coordenadas no poseen realidad física*» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 778)¹²³. El método de EPR consiste en repetir una y otra vez que la causa de la descripción incompleta que la mecánica cuántica hace de la realidad no es sino el mismo formalismo de la teoría:

«Más generalmente, se muestra en la mecánica cuántica que, si los operadores correspondientes a dos cantidades físicas, digamos A y B , no son conmutativos, es decir, si $AB \neq BA$, entonces, el conocimiento preciso de uno compromete tal tipo de conocimiento del otro. Incluso cualquier intento de determinar aquel último experimentalmente alterará el estado del sistema en tal manera que destruirá el conocimiento del primero» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 778)¹²⁴.

Hasta ahora han sido planteados los elementos pertenecientes a la primera y a la segunda parte del artículo. Tal y como se establece arriba,

¹²³ «[...] *when the momentum of a particle is known, its coordinate has no physical reality*» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 778)

¹²⁴ «More generally, it is shown in quantum mechanics that, if the operators corresponding to two physical quantities, say A and B , do not commute, that is, if $AB \neq BA$, then the precise knowledge of one of them precludes such a knowledge of the other. Furthermore, any attempt to determine the latter experimentally will alter the state of the system in such a way as to destroy the knowledge of the first» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 778).

estas dos partes podrían ser consideradas como la primera unidad temática del documento: un andamiaje teórico muy similar al artículo de Einstein de 1934.

La tercera parte tiene un anclaje diferente a las dos anteriores: no se trata del artículo de 1934 donde no hay asomo de una configuración experimental: se trata, en cambio, como se dijo en su momento, de la participación de Einstein en la conferencia que impartió Leon Rosenfeld en 1933 en Bruselas, y a la que Einstein asistió cuando se dirigía al puerto de South Hampton para partir definitivamente hacia Estados Unidos. En aquella conferencia, Einstein propuso un experimento imaginario donde se efectúa una medición en un sistema tras haber interactuado, por un breve periodo de tiempo, con otro sistema similar, de tal manera que una medición precisa de un observable del primer sistema permitiría extrapolar la magnitud de un observable del segundo sistema, con precisión arbitraria según las leyes de conservación, pero en contra de lo que establece el postulado cuántico (Rosenfeld, 1967, p. 127-8). Einstein preguntaría a Rosenfeld si aquello no era paradójico. Sin embargo, las intenciones que tenía Einstein para esa configuración experimental cobran un sentido más completo cuando se analizan bajo la luz de (1) los preceptos teóricos de las primeras dos partes de EPR y (2) la presencia del formalismo matemático.

En primer lugar, el experimento imaginario de EPR establece la existencia de dos sistemas, I y II, que interactúan entre sí durante un periodo de tiempo que va desde $t = 0$ hasta $t = T$, después del cual no existe ninguna otra interacción entre los dos sistemas. Se supone, también, que el estado de cada uno de los sistemas era conocido antes de $t = 0$ y que, mediante el uso de la ecuación de Schrödinger, es posible calcular el estado del sistema conjunto I+II para cualquier tiempo t mayor que T ; sin embargo, no es posible calcular el estado de

sólo uno de los dos sistemas después de la interacción (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 779)¹²⁵. No obstante, la mecánica cuántica permite, mediante la *reducción del paquete de ondas*, calcular el estado de cada sistema después de la interacción. Ahora bien, los autores añaden una consecuencia de este procedimiento: al realizar dos mediciones diferentes sobre el primer sistema, el segundo sistema estará definido por dos funciones de onda diferentes (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 779)¹²⁶.

Si, en todo caso, es posible asignar dos funciones de onda diferentes a un mismo estado del sistema, entonces, es posible que esas dos funciones de onda sean funciones propias de dos operadores no conmutativos correspondientes a las cantidades físicas reales P y Q . A partir de este momento se propone que los dos sistemas son dos partículas y que A y B son respectivamente el momento y la posición de la primera partícula, por tanto, realizando una medición en A o B es posible predecir, con precisión y sin perturbar el segundo sistema, el valor de la cantidad P o el valor de la cantidad Q , respectivamente,

¹²⁵ «For this purpose let us suppose that we have two systems, I and II, which we permit to interact from the time $t = 0$ to $t = T$, after which time we suppose that there is no longer any interaction between the two parts. We suppose further that the states of the two systems before $t = 0$ were known. We can then calculate with the help of Schrödinger's equation the state of the combined system I + II at any subsequent time; in particular for any $t > T$. [...] We cannot, however, calculate the state in which either one of the two systems is left after the interaction» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 779).

¹²⁶ «We see therefore that, as a consequence of two different measurements performed upon the first system, the second system may be left in states with two different wave functions. On the other hand, since at the time of measurement the two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system. This is, of course, merely a statement of what is meant by the absence of an interaction between the two systems. Thus, *it is possible to assign two different wave functions [...] to the same reality* (the second system after the interaction with the first)» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 779).

posición y momento del segundo sistema. De acuerdo con el criterio de realidad, añaden, en el primer caso debe considerarse la cantidad P como un elemento de la realidad y, en el segundo caso, la cantidad Q , también, como un elemento de la realidad (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p.780)¹²⁷. Es decir, en suma, si una magnitud posee un *estado* dado por la función ψ , entonces esa magnitud es real; por tanto, como apuntan los autores, si un sistema posee dos funciones ψ asociadas cada una a una magnitud producto de la *reducción del paquete de ondas* con el fin de calcular el estado del sistema después de la interacción, entonces, cada una de esas magnitudes posee realidad y, si esto es así para dos operadores no conmutativos, entonces, ambos operadores poseen realidad simultánea, contradiciendo los preceptos de la mecánica cuántica.

La conclusión a la que se llega en los últimos párrafos de EPR es que la descripción de la realidad física que propone la función ψ es incompleta:

«Previamente hemos probado que o (1) la descripción mecánico-cuántica de la realidad dada por la función de onda no es completa o (2) cuando los operadores correspondientes a dos cantidades físicas no son conmutativos, las dos cantidades no pueden tener realidad simultánea. Comenzando, entonces, por la suposición de que la función de onda sí proporciona una descripción completa de la realidad física, hemos llegado a la conclusión

¹²⁷ «Thus by measuring either A or B we are in a position to predict with certainty, and without in any way disturbing the second system, either the value of the quantity P [...] or the value of the quantity Q [...]. In accordance with our criterion of reality, in the first case we must consider the quantity P as being an element of reality, in the second case the quantity Q is an element of reality» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p.780).

de que dos cantidades físicas con operadores no conmutativos [sí] pueden tener realidad simultánea. Por tanto, la negación de (1) conduce a la negación de la única alternativa restante (2). Estamos forzados, por tanto, a concluir que la descripción mecánico-cuántica de la realidad proporcionada por la función de onda no es completa» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 780)¹²⁸.

Sin la intención de hacer aquí una refutación de EPR, sino un análisis, a la luz de esto se concluye que una de las claves principales del experimento imaginario sería, pues, la *reducción del paquete de ondas*: ya entre 1930 y 1931 Einstein había coqueteado con la idea de la asignación de dos *estados teóricos* a un mismo estado del sistema, tal y como Ehrenfest lo refirió a Bohr en la carta del 9 de julio de 1931. Puede verse, entonces, que a aquella configuración experimental imaginaria que Einstein lanzó a Leon Rosenfeld en Bruselas en 1933 se le agregó, no sólo un sostén teórico, sino también una importante vuelta de tuerca: la inclusión de la *reducción del paquete de ondas* en el proceso de la experimentación.

A raíz de ello resulta importante el artículo de 1934 publicado por Popper en *Die Naturwissenschaften*, y la carta en la que Einstein le respondió refutando aquel experimento imaginario, donde explicó que

¹²⁸ «Previously we proved that either (1) the quantum-mechanical description of reality given by the wave function is not complete or (2) when the operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality. Starting then with the assumption that the wave function does give a complete description of the physical reality, we arrived at the conclusion that two physical quantities, with noncommuting operators can have simultaneous reality. Thus the negation of (1) leads to the negation of the other only alternative (2). We are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 780).

toda la configuración era errada dado que no era posible realizar una medición simultánea de los operadores no conmutativos y que basar el argumento en un *caso puro* no era suficiente (Carta de A. Einstein a K. Popper, septiembre de 1935; en Popper, 1980, p. 427-8). Ése es el obstáculo que Einstein, Podolsky y Rosen intentaron sortear en el artículo de 1935, mas no a través de diseños técnicos sino a través del propio formalismo matemático de la teoría: sustituyeron el *caso puro*, es decir, la medición simultánea, por la *realidad simultánea* de las dos cantidades. Es de notar que, en la carta que Einstein escribe a Popper, falta una referencia fundamental del artículo de EPR: precisamente la mención de la importancia de la reducción del paquete de ondas. En el resumen que Einstein ofrece a Popper, la explicación se basa en el hecho de que la medición conduce a que el estado físico del sistema II (llamado B en la carta de Einstein) está descrito por dos funciones de onda, y que esta dualidad no la permite el formalismo de la mecánica cuántica:

«Como no es razonable suponer que el estado físico de B dependa de cuál medición se haya llevado a cabo sobre el sistema A, que está [ya] enteramente separado de aquél, esto quiere decir que al mismo estado físico B pertenecen dos funciones distintas. Puesto que una descripción *completa* de un estado físico tiene que ser necesariamente una descripción *unívoca* (descontando superficialidades tales como unidades, elección de las coordenadas, etc.), no puede interpretarse la función ψ como la descripción *completa* de aquel estado» (Carta de A. Einstein a K. Popper, septiembre de 1935; en Popper, 1962, p. 427-8).

Sin hacer ninguna referencia a la reducción del paquete de ondas, la explicación que Einstein dio a Popper consiste en que no es completa la descripción de la realidad mediante la función ψ porque produce una representación *binívoca* del estado de un sistema, es decir, una representación de un mismo estado del sistema mediante dos funciones diferentes.

En la bibliografía que estudia el texto de EPR la atención se centra tanto en el criterio de realidad y en la condición de completitud como en la interacción de los dos sistemas. Sin embargo, aunque el procedimiento de la reducción del paquete de ondas no ocupa parte importante en los estudios referentes a EPR, es posible que sea ahí donde se cifre buena parte de la importancia del experimento imaginario: es el único elemento del artículo que no ha aparecido en las versiones preliminares de la formulación experimental ni en los andamiajes teóricos del artículo expresados, por ejemplo, en *The method of theoretical physics* (Einstein, 1934). De hecho, el criterio de completitud basado en la necesaria representación *unívoca* del estado del sistema, que aparece en la carta a Popper, no se menciona explícitamente en EPR: en la condición de completitud los autores refieren que todo elemento de la realidad física debe poseer una contraparte en la teoría: una forma ligeramente diferente a la explicación que Einstein refirió a Popper: una diferencia sutil, sí, pero sustancial. Entonces, la reducción del paquete de ondas otorgaría dos funciones al mismo sistema, de manera que cada una de ellas sería una función propia para un operador distinto, es decir, una función para el momento y una función para la posición, ambas magnitudes reales del sistema, con existencia simultánea, pero que se expresan mediante dos funciones diferentes. Por tanto, un mismo estado del sistema posee dos elementos diferentes de la teoría. Es necesario profundizar un poco en esto.

Tras la publicación de EPR se sucedieron una serie de respuestas que fueron publicadas, en su mayoría, en revistas norteamericanas. Aunque el estudio de dichas respuestas es materia de trabajo del siguiente capítulo, con el fin de obtener una visión más amplia de la importancia que se ha señalado en torno a la reducción del paquete de ondas y a la asignación de dos funciones a un mismo estado del sistema, se dedicará aquí un espacio a la carta que Einstein escribió a Schrödinger en junio de 1935.

Fechada el 19 de junio (ver Fine, 1996, p. 35), la carta explica que, tras muchas discusiones, el texto original de EPR fue escrito por Podolsky y que los argumentos principales quedaron *ocultos bajo la erudición del discurso*. Muchos estudios se han dedicado a tratar esa conocida afirmación, así como la posibilidad de la existencia de un borrador original que contuviera las ideas de Einstein sin pasar por el tamiz de ninguno de los colaboradores. Por otro lado, existen al menos otras cuatro versiones de EPR publicadas por Einstein a posteriori: (1) en *Physics and Reality*, inmediatamente en 1936; (2) en sus *Notas autobiográficas* (Einstein, 1984), escrita en 1947 y publicada en 1949 en el libro de Schlipp *Albert Einstein, Philosopher-Scientist* (1951); (3) en el mismo volumen compilado por Schlipp, Einstein escribe una réplica a las críticas, una suerte de reflexión final ante los textos que contiene el volumen: *Remarks concerning the essays brought together in this co-operative volume* (Einstein, 1951), donde se consigna otra versión de EPR; y (4) en un artículo publicado en 1948 en la revista *Dialectica*, titulado *Quantum-mechanics and reality*. En las versiones, sin embargo, no ha cambiado demasiado la perspectiva inicial de EPR en términos generales. Por cuestiones de contexto, solamente la versión de 1936 en *Physics and Reality* será revisada en este trabajo, en el siguiente capítulo.

Por tanto, volviendo a la carta dirigida a Schrödinger en junio de 1935, Einstein describe el caso de la asignación *biunívoca* de la función ψ .

Establece, primero, lo que él llama el *Principio de Separación*, que contiene dos enunciados: (1) los sistemas separados espacialmente poseen su propio estado individual real, y (2) los estados reales de los sistemas separados espacialmente pueden ser modificados sólo mediante influencias físicas propagadas con velocidades subliminales finitas. A continuación, explica lo que él le exige a una teoría cuántica completa: las funciones de onda que describen sistemas reales deben estar correlacionadas *uno-a-uno* con los estados individuales reales de esos sistemas. Ésta es la condición de completitud de Einstein: ligera pero sustancialmente diferente a la expresada en EPR. Tras esto, discute el experimento imaginario del artículo original, enfatizando que, al tomar la elección de medir observables diferentes de un sistema I, que es miembro de un par de sistemas separados espacialmente y que han interactuado con anterioridad, es posible asignar diferentes funciones de onda, $\psi(x_2)$ o $\varphi(x_2)$, al otro miembro del par, el sistema II. Por otro lado puede asumirse, añade Einstein, que la descripción dada por la función de onda en la teoría cuántica proporciona una descripción completa de los sistemas descritos sólo si (1) las funciones de onda están correlacionadas *uno-a-uno* con los estados reales de los dos sistemas, y (2) si el *Principio de Separación* se mantiene. Sin embargo, concluye, el resultado del experimento imaginario establece que, al obtener las mediciones sobre el sistema I, el sistema II resulta con una representación de *muchos-a-uno*, es decir, que dos funciones de onda representan un mismo estado del sistema II, debido a la reducción del paquete de ondas que se utiliza para calcular el estado del primer sistema tras la interacción. Entonces, o bien la descripción que hace de la realidad la función de onda es incompleta o bien el *Principio de Separación* es falso (carta de Einstein a Schrödinger, 19 de junio de 1935, ver Moore, 1989; Fine, 1996; Howard, 1985; Deltete & Guy, 1991).

El error, para Einstein, se hallaba en esa representación *biunívoca* después de la reducción del paquete de ondas, necesaria para determinar el estado del sistema II tras la interacción con el sistema I. Así, el problema que EPR, o que Einstein, buscaba en la descripción de la realidad dada por la función de onda era esa posibilidad de violar su condición de completitud para una teoría en la cual «cada elemento de la realidad física debe tener una contraparte en la teoría física» (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935, p. 777): a la luz de la asignación *biunívoca*, el criterio de completitud de EPR cobra otro sentido.

Se puede apuntar, brevemente, que estas nociones del andamiaje teórico de EPR encuentran un referente importante en la obra de Ernst Mach: en un trabajo sobre el principio de conservación de la energía, publicado en 1872, Mach escribe: «En una teoría completa, a todos los detalles del fenómeno deben corresponder detalles de la hipótesis, y todas las reglas para estas cosas hipotéticas deben también ser directamente transferibles al fenómeno» (Mach, 1872, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, Praga, J G Calve; citado en Lando & Bringuier, 2008, p. 314)¹²⁹. El criterio que Mach exige a una teoría completa es el mismo al que Einstein hace referencia en su texto de 1934 y el mismo que describe en la carta a Karl Popper citada antes, que resulta ser el principio subyacente del criterio de completitud de EPR.

¹²⁹ «Bei einer vollständigen Theorie müssen ja allen Details der Erscheinung, Details der Hypothese entsprechen und es müssen sich alle Regeln für diese hypothetischen Dinge, auch direct auf die Erscheinung übertragen lassen. (In a complete theory, to all details of the phenomenon, details of the hypothesis must correspond, and all rules for these hypothetical things must also be directly transferable to the phenomenon)» (Mach, 1872, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, Praga: J G Calve, citado en Lando & Bringuier, 2008, p. 314).

Ahora bien, el *Principio de separación* es el anclaje del entrelazamiento en EPR. Revisando de nuevo los dos puntos mencionados antes se entiende que hay en el principio de separación esa alusión a la acción-a-distancia: el principio de separación establece, pues, que (1) los sistemas separados espacialmente poseen su propio estado individual real, y (2) los estados reales de los sistemas separados espacialmente pueden ser modificados sólo mediante influencias físicas propagadas con velocidades subluminales finitas; es decir, no *debería* haber relación alguna entre los sistemas que provocara, *después* de la interacción, que una medición realizada en uno modificara el estado del otro. Las objeciones de Einstein, puede verse finalmente, se dividen así: por un lado la descripción biunívoca que se opone al criterio de completitud y, por otro, la acción-a-distancia, que viola el principio de separabilidad: en su formulación a Schrödinger, la primera es consecuencia de la segunda. Quizá fue ahí donde el físico austriaco vio el germen fundacional del concepto de *entrelazamiento*.

En suma, la formulación de EPR abre un nuevo episodio del debate en torno a la completitud de la mecánica cuántica. La formulación más abstracta del experimento imaginario marcaría un nuevo rumbo para la discusión en el cual el peso de los preceptos teóricos sería mayor que el de los propios experimentos imaginarios.

**CAPÍTULO IV. EPÍLOGO DE UNA POLÉMICA: REACCIONES
POSTERIORES A EPR. EL CASO DEL GATO DE SCHRÖDINGER.**

*Si alejarse es preciso para mirar y entender
aproximarse es preciso para pertenecer*

Jorge Fernández Granados
Principio de incertidumbre

El primer desencanto con EPR: la correspondencia entre Albert Einstein y Erwin Schrödinger. Nuevas paradojas: *ball-in-the-box* y *gunpowder*. Apertura definitiva de la discusión. ¿Diálogo entre científicos o soliloquios autoinmunes? Una nueva generación de físicos se enfrenta a la *antigua* polémica. Kemble y Ruark: inmediatez en la respuesta.

Ya antes se ha hablado de la carta que Einstein escribió a Schrödinger luego de la publicación de EPR, en la que refería su descontento con el hecho de que las ideas centrales del artículo habían quedado ocultas bajo la erudición con que Podolsky escribió el documento. Se han revisado también dos versiones en las que Einstein ofrece su propia explicación, personal e individual, de EPR, y la conclusión que se obtuvo es que ciertamente su principal elemento, aunque no velado, sí quedó en un segundo plano: la asignación de dos funciones de onda diferentes a un mismo estado del sistema.

En la correspondencia que mantiene con Schrödinger, entre los meses de junio y octubre de 1935, Einstein vuelve a explicar las ideas en torno a la incompletitud de la mecánica cuántica mediante la evocación de una serie de experimentos imaginarios. La correspondencia es extensa y produce en Schrödinger una reacción importante: a partir de esas discusiones con Einstein, el físico austriaco publicaría el artículo titulado *Discussion of Probability Relations between Separated Systems* (1935a) y el más conocido texto *The present situation in quantum mechanics* (1935b), donde expone el experimento imaginario del gato. Antes de revisar cualquier respuesta al artículo de EPR es importante repasar esta correspondencia ya que contiene algunos experimentos imaginarios que darían forma a los que más tarde ese mismo año publicaría Erwin Schrödinger. Además, se trata de la primerísima reacción a la publicación de EPR: la reacción del propio Einstein, que a su vez modificaría y publicaría al año siguiente en *Physics and Reality* (1936) y luego, como ya se dijo, en diferentes textos publicados entre 1947 y 1949.

La carta que da inicio a esta discusión fue escrita por Schrödinger y enviada el 7 de junio de 1935 (el artículo de EPR apareció publicado el 15 de mayo de ese año), mientras se encontraba realizando una estancia en la universidad de Oxford. La carta fue recibida por Einstein después de que él mismo escribiera a Schrödinger el 17 de junio, aún antes de recibir la carta inicial. Más tarde, el día 19, contestaría a la carta del 7 de junio y sería en esta misiva en la que Einstein haría patente su disgusto con el resultado final de la escritura del artículo, achacando, como se ha dicho, su *oscura* redacción a Boris Podolsky. Arthur Fine (1996) señala que entre los documentos de Einstein no se encuentra ninguna versión preliminar del artículo de EPR, y que esto podría ser un indicador de que, en efecto, Einstein no tuvo acceso ni a borradores ni a la versión final del artículo antes de su publicación. En

cierta medida esto convierte al propio Einstein en una suerte de público lector de EPR, y sus cartas a Schrödinger, así como las posteriores reelaboraciones del experimento imaginario, son a la vez una especie de réplica al diseño final del documento.

Si antes se señaló que los experimentos imaginarios de Einstein habían ido cambiando con el paso de los años de manera tal que los elementos más experimentales iban perdiendo definición en las configuraciones imaginarias hasta lograr el grado de abstracción de EPR, ahora, el ejercicio experimental imaginario presentado a Schrödinger representa un nuevo cambio donde los elementos macroscópicos tienen una relevancia mayor en la formulación del experimento y en las conclusiones finales. Esta nueva forma pudo haber influido en la construcción de algunos experimentos imaginarios que Schrödinger publicó ese mismo año.

El planteamiento de Einstein en la carta del 19 de junio, conocido como *ball-in-the-box*, es el siguiente: Considere la posibilidad de una bola dentro de una de dos cajas cerradas. Una descripción incompleta de esta *realidad* podría ser, por ejemplo: «La probabilidad de que la pelota esté en la primera caja es del 50%». Una descripción completa sería, por ejemplo: «La pelota está en la primera caja». Por tanto una descripción incompleta es una afirmación probabilística, con una probabilidad menor que la unidad, que ocurre en circunstancias en las que es posible decir algo más sobre el sistema. Esto parece una idea elemental e intuitiva de la incompletitud, dice Einstein, sin embargo ¿cómo es posible saber si hay algo más que pueda decirse con respecto al sistema?, ¿el resultado medido, por así decirlo, aparece con la medición o, en cambio, la medición simplemente refleja lo que ya está ahí? No se puede sortear la cuestión sin asumir que hay algo más, dice Einstein, al tiempo que propone asumir el ya mencionado principio de separación (*Trennungsprinzip*): «El contenido de la segunda

caja es independiente de lo que ocurre con la primera caja». Si se asume la ley de la conservación, explica Einstein, entonces las bolas no se crean ni se destruyen, por tanto es posible descubrir, al buscar en la primera caja, si la pelota está o no en la segunda caja. Y concluye que si una teoría sólo permite afirmaciones probabilísticas, entonces se trata de una teoría incompleta. De esta forma, dada la ley de la conservación, el principio de separación implicaría el carácter incompleto de la teoría (Carta de Einstein a Schrödinger, 19 de Julio de 1935, ver Fine, 1996, p. 36)¹³⁰.

Este principio de separación, del que se habló en el capítulo anterior, busca una descripción del sistema *Caja 1* que no deba depender del sistema *Caja 2* ya que, según la explicación de Einstein, una descripción probabilística demanda una acción-a-distancia: si el estado

¹³⁰ «Consider a ball located in one of two closed boxes. An incomplete description of this “reality” might be, for example, “The probability is one-half that the ball is in the first box.” A complete description would be, for example: “The ball *is* in the first box.” Thus an incomplete description is a probabilistic assertion, with probability less than unity, *made in circumstances in which there is some further truth that could be told*. This seems like an elementary and intuitive idea for incompleteness, but how are we to know whether there is some further truth to be told? That is, of course, the problem of measurement disturbance: does the measured result, so to speak, arise with the measurement or, rather, does the measurement simply reflect what is already there? // Einstein addresses this issue in the letter by continuing with the illustration as follows. He acknowledges that one cannot sort things out without assuming something more, and he then proposes to assume a principle of separation (Trennungsprinzip): “the contents of the second box are independent of what happens to the first box.” // If one assumes an obvious conservation law, the balls are neither created nor destroyed, then I can find out by looking in the first box whether or not the ball is in the second box. (If I find it in the first box, it is not in the second box. If I do not find it in the first box, it is in the second box.) If my theory only allows, in these circumstances, probabilistic assertions (with probability less than unity), then my theory is incomplete. Thus, given the conservation law, the principle of separation would imply the incompleteness of my theory» (Carta de Einstein a Schrödinger, 19 de Julio de 1935, ver Fine, 1996, p. 36).

de la *Caja 1* es la probabilidad del 50% de que la bola esté ahí, esta afirmación la correlaciona inmediatamente con la *Caja 2* ya que el 50% restante de la descripción de la *Caja 1* reside en que la bola esté o no en la *Caja 2*. Einstein continúa en la carta a Schrödinger:

«Ahora describo el siguiente estado de cosas: *La probabilidad es de 1/2 de que la pelota esté en la primera caja. ¿Es esta una descripción completa?*

NO: Un enunciado completo es: la pelota *está* (o no está) en la primera caja. Así es como la caracterización del estado de cosas debe aparecer en una descripción completa.

SI: Antes de que abra la caja, la pelota no está, bajo ninguna circunstancia en *una* de las cajas. Estar en una caja definida sólo resulta cuando levanto las tapas» (Carta de Einstein a Schrödinger, 19 de junio de 1935, ver Fine, 1996, p. 69)¹³¹.

¹³¹ «Now I describe a state of affairs as follows: *The probability is 1/2 that the ball is in the first box. Is this a complete description? // NO:* A complete statement is: the ball *is* (or is not) in the first box. That is how the characterization of the state of affairs must appear in a complete description. *// YES:* Before I open them, the ball is by no means in *one* of the two boxes. Being in a definite box only comes about when I lift the covers. */// Nun beschreibe ich einen Zustand so: Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Kugel in der ersten Schachtel ist ist 1/2.-Ist dies eine vollständige Beschreibung? // Nein:* Eine vollständige Aussage is: die Kugel *ist* in der ersten Schachtel (order ist nicht). So muss also die Charakterisierung des Zustandes bei vollständiger Beschreibung aussehen. *// Ja:* Bevor ich den Schachteldeckel aufklappe, ist die Kugel gar nicht in *einer* der beiden Schachteln. Dies Sein in einer bestimmten Schachtel kommt der dadurch zustande, dass ich den Deckel aufklappe.» (Carta de Einstein a Schrödinger, 19 de junio de 1935, ver Fine, 1996, p. 69).

El problema de la perturbación de los fenómenos mediante la medición es la manera mediante la cual Einstein expresa su disconformidad con las consecuencias del Principio de Incertidumbre. A la luz de estas formulaciones, tan cercanas a la publicación de EPR, parece claro que las ideas de Einstein no quedaron completamente bien expresadas en el artículo. Este cambio en la formulación experimental así como la considerable diferencia entre los planteamientos teóricos no viene dada en consecuencia de una refutación: la respuesta de Bohr, la más importante de todas las respuestas a EPR, no se publicaría sino hasta octubre de ese año. De manera que estos experimentos imaginarios contenidos en la correspondencia con Schrödinger son una especie de respuesta de Einstein a EPR: el actor se convirtió en público. Al no estar convencido del resultado del artículo, y antes de esperar cualquier respuesta, Einstein formuló su propia oposición a EPR: no con una intención de refutar, sino con la intención de corregir aquello que no quedó suficientemente claro o que no obedecía a los verdaderos preceptos de su crítica.

En este sentido, el 8 de agosto de aquel año, Einstein remitió otra carta a Schrödinger en la cual planteó el experimento imaginario del barril de pólvora. Se trata de un ejemplo más elaborado que el anterior de *ball-in-the-box*, y que prefigura completamente el experimento imaginario del gato de Schrödinger. De hecho, la formulación es la misma: si se cambia el barril de pólvora por el sistema del caso del gato, las conclusiones obtenidas serían las mismas. La intención es abordar el contenido teórico de *ball-in-the-box* afinando las consecuencias de la representación probabilística del sistema mediante la inclusión de un concepto que en las formulaciones de Schrödinger será fundamental: la *superposición de estados*. Esta superposición, aunque usada por Einstein por primera vez en este experimento imaginario, es un concepto que se podría deducir ya desde la carta que Einstein escribió a Popper en 1934,

y desde luego también a partir del experimento de *ball-in-the-box*, aunque es aquí donde esta superposición se vuelve más visible, o al menos Einstein busca explicarlo con más detalle. El experimento del barril de pólvora o *gunpowder* es el siguiente:

«El sistema es una sustancia en equilibrio químico inestable, tal vez una carga de pólvora que, debido a fuerzas intrínsecas, puede arder espontáneamente, y donde la duración media de vida de todo el sistema es de un año. En principio, esto puede ser representado fácilmente de forma mecánico-cuántica. En el comienzo, la función ψ caracteriza un estado macroscópico razonablemente bien definido. Sin embargo, de acuerdo con tu ecuación, después del curso de un año, este no es en absoluto el caso. En cambio, la función ψ describe entonces una especie de mezcla de sistemas no-explotado y explotado. Mediante ningún arte de interpretación puede esta función ψ transformarse en una descripción adecuada de un estado de cosas real; ya que en la realidad no hay un punto medio entre explotado y no explotado» (Carta de A. Einstein a E. Schrödinger, 8 de agosto de 1935, citada en Fine, 1996, p. 78)¹³².

¹³² «The system is a substance in chemically unstable equilibrium, perhaps a charge of gunpowder that, by means of intrinsic forces, can spontaneously combust, and where the average life span of the whole setup is a year. In principle this can quite easily be represented quantum-mechanically. In the beginning the ψ -function characterizes a reasonably well-defined macroscopic state. But, according to your equation, after the course of a year this is no longer the case at all. Rather, the ψ -function then describes a sort of blend of not-yet and of already-exploded systems. Through no art of interpretation can this ψ -function be turned into an adequate description of a real state of affairs; [for] in reality there is just no intermediary between exploded and not exploded. /// Das System se eine Substanz in einem chemisch labilen Gleichgewicht, etwa ein Haufen Schiesspulver, der sich durch

En el caso de *ball-in-the-box* parecía ser *soportable* que se explicara mediante probabilidades la ubicación de la pelota en una de las dos cajas, aunque ello resultara, a decir de Einstein, insuficiente como descripción de la realidad y, por tanto, condujera a que dicha descripción proporcionada por la función ψ no pueda considerarse completa. No obstante, la superposición del experimento del barril de pólvora y las consecuencias derivadas a partir de la inestabilidad del sistema (cualidad más propia del comportamiento de los sistemas atómicos) genera que los dos estados, que son mutuamente excluyentes, existan al mismo tiempo en la descripción que la función ψ hace de ellos. La clave que Schrödinger encontraría en este experimento imaginario remite inmediatamente a una característica primordial del experimento del gato: la inestabilidad del sistema. En la formulación de Einstein es precisamente la inestabilidad del barril de pólvora lo que produce la superposición, es decir, en *ball-in-the-box* no se sucede la superposición porque no hay en la formulación un plazo que el sistema debe cumplir: este plazo será, en el barril de pólvora, el detonante de la superposición: cumplido el plazo de vida del sistema no puede saberse en qué momento el barril explotará, de manera que la función ψ contempla al mismo tiempo los dos estados: explotado y no-explotado, hasta el

innere Kräfte entzünden kann, wobei die mittlere Lebensdauer von der Größenordnung eines Jahres sei. Dies lässt sich im Prinzip ganz leicht quantenmechanisch darstellen. Im Anfang charakterisiert die ψ -Funktion einen hinreichend genau definierten makroskopischen Zustand. Deine Gleichung sorgt aber dafür, dass dies nach Verlauf eines Jahres gar nicht mehr der Fall ist. Die ψ -Funktion beschreibt dann vielmehr eine Art Gemisch von noch nicht und von bereits explodiertem System. Durch keine Interpretationskunst kann diese ψ -Funktion zu einer adäquaten Beschreibung eines wirklichen Sachverhaltes gemacht werden; in Wahrheit gibt es eben zwischen explodiert und nicht-explodiert kein Zwischending» (carta de A. Einstein a E. Schrödinger, 8 de agosto de 1935, en Fine, 1996, p. 78).

momento en que un observador acude al sistema y comprueba su estado, es entonces cuando ocurre el colapso de la función de onda: de las dos representaciones sólo queda una. El colapso o reducción de la función de onda ya estaba presente en las formulaciones de Einstein desde 1931 y, como se ha visto, se encontraba en estrecha relación con la asignación biunívoca de la función. Aquí, sin embargo, no se trata de dos funciones de onda distintas para un solo estado del sistema, como lo propuso antes en la correspondencia con Ehrenfest y con Karl Popper, sino que la función conjunta del sistema se compone de dos posibles estados del mismo sistema, representados mediante una distribución que asigna un 50% de probabilidad a que el barril estalle y un 50% a que no estalle.

La superposición de estados sería, en este último experimento imaginario de la correspondencia entre Einstein y Schrödinger, el elemento más importante, y el que determinaría, en buena medida, las posteriores formulaciones del físico austriaco. La evolución de los experimentos imaginarios de Einstein hasta este momento no sólo ha consistido en un cambio del formato del diseño experimental que va desde el detalle técnico a los ejemplos macroscópicos contra-intuitivos, pasando por la abstracción de EPR: también se ha transformado la dirección de su crítica, los elementos teóricos que sustentan y dan forma a sus argumentos. Pero esta serie de cambios no es un trayecto paralelo, es decir, tanto los experimentos imaginarios han hecho cambiar los objetivos de la crítica, como la crítica ha modificado el diseño de los experimentos imaginarios.

Pero Schrödinger tenía voz propia en aquella discusión. Aunque sus ideas no eran perfectamente concordantes con las de Einstein, compartía más en común con él que con Bohr y la escuela de Copenhague. En el mes de julio, en medio de la correspondencia con

Einstein y en el punto de primera efervescencia de EPR, Schrödinger escribió a Pauli:

«Ahora ‘estado’ es una palabra que todo el mundo usa, incluso el santo PAM [Dirac], pero esto no lo hace más rico en contenido... Yo digo: diferentes funciones-psi sin duda corresponden a diferentes condiciones factuales o estados. No considero que ello sea una fuga ilegítima del dogma de la realidad. Pero me gustaría saber...si de verdad piensas que el caso de Einstein...no da nada qué pensar absolutamente, sino que es claro, simple y evidente. Así es como piensa al principio todo aquel con quien he hablado al respecto, porque han aprendido bien su Credo de Copenhague, Unum Sanctum. Por lo general vuelven tres días después diciendo: lo que dije recientemente estaba, desde luego, bastante equivocado...O bien (como Szilard) Primer debo pensar qué debo prohibirte. Sin embargo, aún no he recibido una explicación clara de por qué todo es tan claro y simple...» (carta de Schrödinger a Pauli, julio de 1935, en Moore, 1989, p. 306)¹³³.

¹³³ «Now ‘state’ is a Word that everyone uses, even the holy PAM [Dirac], but that does not make it any richer in content...I say: different psi-functions correspond definitely to different factual conditions, or states. I don’t consider that to be an illegitimate dragging-in of the reality dogma. But I should like to know...whether you really think that the Einstein case...gives absolutely nothing to think about, but is quite clear and simple, and self evident. This is how everyone I have spoken to about it thinks at first, because they have learned well their Copenhagen Credo in Unum Sanctum. Three days later the usually come back with: what I recently said was naturally quite wrong...Or (like Szilard) I must first think over what I must forbid you. But I’ve not yet received a clear explanation of why everything is so clear and simple...» (carta de Schrödinger a Pauli, julio de 1935, en Moore, 1989, p. 306).

Schrödinger encontraba en EPR, más que una refutación de la mecánica cuántica, un punto de partida. No parecía estar convencido de que el artículo lograra su cometido, aunque le interesaba ese punto de inflexión que sí evidenciaba que había todavía algo más en qué pensar, algo más de qué hablar.

La discusión privada entre Einstein y Schrödinger daría más de qué hablar ese mismo año cuando el físico austriaco publicó sus ideas sobre el estado de la mecánica cuántica, donde finalmente acuñó el concepto de entrelazamiento.

Edwin Kemble fue el primero en publicar una respuesta a EPR el 25 de mayo de 1935, en la sección *Letters to the Editor*, de *Physical Review*.

La respuesta de Kemble, titulada *The Correlation of Wave Functions with the States of Physical Systems*, aunque breve, se centra en uno de los elementos que han sido más comentados en este trabajo: la asignación de dos funciones de onda a un mismo estado del sistema. Es importante empezar diciendo que la intención de Kemble es la de refutar las conclusiones de EPR centrándose en lo que, según Einstein, es el verdadero núcleo del argumento de EPR y que quedó, como explicaría a Schrödinger en su correspondencia ya revisada, oscurecido por la prosa de Boris Podolsky.

Kemble no presenta un experimento imaginario nuevo, ni siquiera una variación del que los tres autores plantean en EPR, sino que utiliza el mismo planteamiento para explicar que el error de los autores reside en que la reducción del paquete de ondas proporciona, sí, en efecto, dos funciones de onda, pero que dichas funciones resultan correspondientes a dos estados diferentes del sistema, y no a uno, como se refiere en el artículo. Una misma configuración experimental,

imaginaria en este caso, proporciona dos resultados diferentes dependiendo de la interpretación que de sus premisas y conclusiones haga uno u otro observador.

Escribe Kemble que «si esto fuera verdad [la asignación de una misma función de onda a dos estados diferentes del sistema luego de la reducción del paquete de ondas], significaría que la descripción mecánico-cuántica es errada y a la vez incompleta, ya que cada función de onda diferente involucra una diferente predicción con respecto al comportamiento futuro del sistema descrito, y los autores del artículo citado arriba [Einstein, Podolsky y Rosen] claramente intentan referirse con la frase “la misma realidad” al mismo sistema en el mismo estado físico» (Kemble, 1935, p. 973)¹³⁴. Así, apelando al Efecto Compton, Kemble afirma que es posible encontrar la *falacia* en el argumento de EPR, ya que después de una interacción entre dos sistemas con una energía total definida, o un momento lineal definido, es posible inferir, a partir de los valores medidos de la energía o el momento de un sistema después de la colisión, cuál sería el valor de la cantidad correspondiente en el otro sistema (Kemble, 1935, p. 974). La reducción del paquete de ondas, explica Kemble, es el procedimiento mediante el cual se toma en consideración la correlación existente entre dos partículas que interactúan, y *desde luego* otorga una función de onda diferente para el estado de dada una de las partículas. Por ejemplo, teniendo en cuenta la interacción entre un electrón y un fotón, y haciendo caso del Efecto Compton, la reducción del paquete de ondas describe mediante una función al electrón que debido a la interacción retrocede con un ángulo específico, y mediante otra función diferente al fotón con el que chocó,

¹³⁴ «[...] if this were true, it would mean that quantum-mechanical description is erroneous as well as incomplete, for each different wave function involves a different prediction regarding the future behavior of the system described and the authors of the above paper clearly intend to phrase “the same reality” to refer to the same system in the same physical state» (Kemble, 1935, p. 973).

el cual a su vez presenta una dispersión descrita por valores angulares distintos (Kemble, 1935, p. 974). En resumen, no hay tal asignación *biunívoca* a partir de EPR ya que no se trata del *mismo estado*, explica el autor, sino de una función diseñada a partir de la probabilidad de ocurrencia de dos eventos distintos relacionados con el mismo estado, cuya descripción es, por tanto, diferente. De manera que dicha correlación describe la probabilidad del estado conjunto del sistema en un determinado momento.

La participación de Kemble inicia una nueva forma de interacción propiciada por el uso de los experimentos imaginarios. Aquellos que en un principio eran público de una discusión o una polémica que les llegaba con cierto rezago temporal debido a la difícil inmediatez comunicativa podían ahora pasar de ser espectadores a convertirse en actores importantes del debate porque el experimento imaginario, publicado en un medio de mayor alcance, permitía vencer las barreras de los círculos científicos más cerrados que, a finales de la década de los años veinte, se ubicaba mayormente en el centro de Europa. Aunque las razones de la migración de la discusión en torno a la cuántica desde los foros europeos hasta los foros norteamericanos es diversa y no posee una explicación unívoca, uno de los factores más importantes es la propia migración de Einstein y sus causas científicas no sólo al territorio americano, sino al idioma inglés y a las revistas especializadas norteamericanas. Si bien es cierto que los motivos de Einstein para su cambio definitivo de residencia son una mezcla de razones científicas, personales y políticas (no en ese orden de importancia) que provocaron que la discusión pasara de un continente a otro, de un foro a otro, de una lengua a otra, con todas las dificultades y ventajas del cambio, ese cambio propició, pues, la participación de muchos otros científicos que en sus propios predios seguían, en la esfera privada que les pertenecía, las polémicas de la esfera privada a la que

eran ajenos. Así, la discusión, hecha pública al menos en una esfera privada de especialistas mucho más amplia, alcanzaría cotas de discusión que, si bien seguían dejando fuera de la arena de debate a un gran número de científicos, permitiría la potenciación de una de las características más importantes del uso de los experimentos imaginarios como herramienta importantísima de la física teórica: la inmediatez.

Esta cualidad de inmediatez, de la que se hablará más adelante, permitió que pocos días después de que Kemble firmara su nota sobre EPR, otro físico norteamericano firmara, con fecha del 2 de julio de ese mismo año, un artículo titulado *Is the Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Complete?* Se trataba de Arthur E. Ruark, jefe del Departamento de Física de la Universidad de Carolina del Norte, cuya nota apareció, al igual que la de Kemble, en la sección de *Letters to the editor*, de *Physical Review*.

Ruark (1935) señala que el experimento imaginario de EPR podría aplicarse a tres sistemas, o incluso a un número infinito de sistemas, y que sin embargo, esto no cambiaría la proposición de los tres autores. Puede verse aquí, tal vez, el primer camino que intentó Ruark para lograr la refutación de EPR. Su propuesta, aunque simple, deviene sumamente importante: el sistema I puede ser un instrumento de medición aplicado a A , que sería una magnitud medible del sistema, y por tanto, eso lo hace incapaz de utilizarse para medir cualquier magnitud de B , otra de las magnitudes del mismo sistema, por lo que no puede afirmarse que A y B no tienen una realidad simultánea, sino que no pueden ser medidos simultáneamente por el mismo instrumento (Ruark, 1935, p. 466). Ruark se basa en un criterio de realidad, dice él, opuesto al de EPR, que es, según él, el que sostienen la mayor parte de los físicos teóricos, y que dice que «una propiedad física de un sistema dado posee realidad sólo cuando es medida, y que la mecánica ondulatoria proporciona una descripción completa y fehaciente de lo

que podemos aprender a partir de las mediciones» (Ruark, 1935, p. 466)¹³⁵. Para Ruark se trata, por tanto, de un problema de mediciones, de instrumentación, que no puede ser resuelto mediante el uso de argumentos teóricos, y que por el momento se trata de una elección personal o de cuestión de diferencias en las definiciones correspondientes (Ruark, 1935, p. 467). Podrá verse, más adelante, que la reflexión de Ruark frente a EPR contiene ciertos elementos que se encontrarán luego en la respuesta más famosa al artículo de Einstein, Podolsky y Rosen, el texto publicado por Niels Bohr ese mismo año.

La inmediatez en la respuesta que permiten los experimentos imaginarios se expresa notablemente en estas primeras réplicas a EPR. Ya se había visto, en el caso de las conferencias de Solvay, la mecánica del uso de experimentos imaginarios en la discusión oral. Aquí comienza una etapa diferente. Si bien es cierto que ya en otros casos antes de 1931 se encuentran experimentos imaginarios publicados en artículos, como el caso del microscopio de Heisenberg (1927), es a partir de EPR que la discusión escrita alcanza las cotas más altas. 1935 sería el año en que la discusión incluiría más participantes y aunque quizá hay menos experimentos imaginarios diferentes, la cantidad de réplicas públicas es mucho mayor, como ya comienza a verse.

¹³⁵ «[...] a physical property of a given system has reality only when it is actually measured, and that wave mechanics gives a faithful and complete description of all we can learn from measurements» (Ruark, 1935, p. 466).

La respuesta de Niels Bohr a EPR: la aceptación de un reto sin conclusión. Reconstrucción de un experimento imaginario. La persuasión y la retórica de Bohr. De las salas de Bruselas a las páginas públicas norteamericanas.

El ser humano está condenado a ser libre

Jean-Paul Sartre

El existencialismo es un humanismo

En Octubre de 1935 apareció la respuesta más significativa a EPR: el artículo, firmado por Niels Bohr, quizá el principal aludido por la publicación de los tres autores, lleva el mismo título: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, y fue publicado en la misma revista *Physical Review*.

La respuesta de Bohr es un texto más extenso que el propio artículo de EPR. Se trata de una amalgama de teoría, lenguaje y experimentos imaginarios (a los que Bohr llama *arreglos experimentales* o *ejemplos*) que busca no sólo rebatir la tesis fundamental de EPR, sino que intenta promover el concepto de *complementariedad* como herramienta para salvar cualquier crítica en torno a la completitud de la mecánica cuántica, y que en este caso se opone al *criterio de realidad física* que explican los tres autores. ¿Cuáles son, pues, los tres elementos fundamentales del artículo de Bohr, que se han mencionado unas líneas arriba? En el caso de la teoría, el texto se sostiene mayormente en el Principio de Complementariedad y en el Principio de Incertidumbre; en el caso del lenguaje, Bohr, un reconocido maestro del discurso y la persuasión, cuestiona el fundamento con el cual los tres autores han configurado los conceptos centrales del artículo (el criterio de realidad

física, la condición de completitud, etc.), y propone, él mismo, conceptos como *arreglo experimental*, o bien, explicita la diferencia, bien conocida aunque a veces pasada por alto, entre física atómica y mecánica cuántica; establece la importancia del problema de la medición en la mecánica cuántica, y evoca el concepto de *renunciación*, en referencia con el principio de causalidad de la física clásica; además, es importante señalar que el texto de Bohr, a diferencia del de Einstein, Podolsky y Rosen, no cuenta con formulaciones matemáticas en su cuerpo principal, sino que las agrega en notas a pie de página, de manera que no interrumpen el flujo del discurso, su ritmo persuasivo, su cadencia serena y reflexiva. Aunado a esto, la respuesta de Bohr posee una diferencia considerable: ante el artículo de EPR, que consta de cuatro páginas, Bohr ofrece siete páginas de reflexión y experimentación imaginaria, siete páginas donde, y esto es interesante también, el artículo de EPR se menciona de manera explícita sólo en cuatro ocasiones. En cuanto a lo concerniente a los experimentos imaginarios utilizados como el tercer elemento del artículo, Bohr propone, de entrada, dos ejemplos que demuestran, desde su perspectiva, que el principio de incertidumbre es insalvable en la manera en que Einstein, Podolsky y Rosen intentan demostrar.

El artículo comienza con la idea de que es necesario que los conceptos utilizados en torno a la mecánica cuántica no comporten ningún tipo de ambigüedad:

«El grado en el cual un significado sin ambigüedades puede ser atribuido a una expresión tal como “realidad física” no puede, desde luego, deducirse a partir de concepciones *a priori*, sino que, -como los autores del artículo citado

enfatan- debe estar fundada en un uso directo de los experimentos y las mediciones» (Bohr, 1935, p. 696)¹³⁶.

Desde el primer párrafo, Bohr intenta establecer que el problema bajo discusión es el problema de la experimentación y la medición de los fenómenos cuánticos (la perturbación de la que también Einstein hablaría en sus cartas a Schrödinger) y no una cuestión de completitud, incompletitud o incoherencia de la teoría, de manera que focaliza la discusión en un punto que, esencialmente, sería el más débil del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen. De manera que poco después refrenda esta intención de tratar el problema de la medición y la instrumentación en la cuántica como eje central del texto:

«De hecho, la *interacción finita entre el objeto y las agencias de medición* condicionada por la propia existencia del cuanto de acción implica –dada la imposibilidad de controlar la reacción del objeto sobre el instrumento de medición si estos están para cumplir su propósito- la necesidad de una renunciación final al ideal clásico de causalidad y una revisión radical de nuestra actitud hacia el problema de la realidad física» (Bohr, 1935, p. 697)¹³⁷.

¹³⁶ «The extent to which an unambiguous meaning can be attributed to such an expression as “physical reality” cannot of course be deduced from *a priori* philosophical conceptions, but –as the authors of the article cited themselves emphasize- must be founded on a direct appeal to experiments and measurements» (Bohr, 1935, p. 696)

¹³⁷ «Indeed the *finite interaction between the object and measuring agencies* conditioned by the very existence of the quantum of action entails –because of the impossibility of controlling the reaction of the object on the measuring instruments if these are to serve their purpose- the necessity of a final renunciation of the classical ideal of causality and a radical revision of our attitude towards the problem of physical reality» (Bohr, 1935, p. 697).

La llamada *renunciación* será un concepto fundamental para Bohr no sólo para rebatir las propuestas de EPR sino también para fortalecer la imagen de la Interpretación de Copenhague como una teoría novedosa que sorteaba los obstáculos de las viejas formas de concebir el mundo.

Bohr no hace ninguna referencia directa al arreglo experimental presentado en EPR. Contrario a otros autores que revisaron el artículo de Einstein, Podolsky y Rosen, Bohr presentó dos experimentos imaginarios diferentes, no relacionados con EPR, y cuya forma de descripción es, incluso, más detallada que la de los tres autores. Ambos experimentos imaginarios parten de un mismo arreglo original ligeramente modificado para el segundo experimento imaginario. Cabe ahora hacer la diferenciación entre los conceptos de *experimento imaginario* y *arreglo experimental*. El arreglo experimental es la disposición de los elementos físicos o técnicos donde se llevará a cabo un proceso de observación de un fenómeno. El experimento imaginario sería, por tanto, la simulación, mediante los estándares físicos aceptados, del fenómeno y su observación, así como la extracción de las conclusiones que de ello se deriven. Así, es posible que un arreglo experimental sirva a los propósitos de diferentes experimentos imaginarios, y por tanto de diferentes conclusiones, y sería el anclaje real, o al menos verosímil, del experimento imaginario, basado en los principios estandarizados y aceptados por la comunidad científica, tal y como ya se habló en el primer capítulo.

En el caso de la respuesta de Bohr a EPR, se presenta un arreglo experimental del cual se extraen, luego de pequeñas modificaciones, dos experimentos imaginarios ligeramente diferentes. El primero de ellos es el que sigue:

«Comencemos con el caso simple de una partícula pasando a través de una rendija en un diafragma, el cual puede formar parte de un arreglo experimental más o menos complicado. Aún si el momento de esta partícula es completamente conocido antes de que incida en el diafragma; la difracción de la onda plana en torno a la rendija, dada la representación simbólica de su estado, implicará una incertidumbre en el momento de la partícula después de que haya pasado el diafragma, la cual [la incertidumbre] es mayor en tanto que la rendija sea más estrecha. Ahora, el ancho de la rendija, de cualquier valor siempre que sea más grande en comparación con la longitud de onda, puede ser tomado como la incertidumbre Δq de la posición de la partícula relativa al diafragma en una dirección perpendicular a la rendija. Incluso, es simple ver a partir de las relaciones de de Broglie entre el momento y la longitud de onda que la incertidumbre Δp del momento de la partícula en esta dirección está correlacionada con Δq mediante el principio general de Heisenberg

$$\Delta p \Delta q \sim h,$$

el cual, en el formalismo cuántico, es una consecuencia directa de la relación de conmutación para cualquier par de variables conjugadas. Obviamente la incertidumbre Δp está conectada inseparablemente con la posibilidad de un intercambio de momento entre la partícula y el diafragma; y la interrogante de principal interés para nuestra discusión es hasta qué punto el momento intercambiado de esta forma puede tomarse en cuenta en la descripción del fenómeno que será estudiado mediante el arreglo experimental en

cuestión, en el cual el paso de la partícula a través de la rendija puede considerarse como el estado inicial.

Asumamos primero que, en lo que corresponde a experimentos habituales en el notable fenómeno de la difracción del electrón, el diafragma está fijado rígidamente a un soporte que define el marco espacial de referencia, tal y como otras partes del aparato—digamos un segundo diafragma con varias rendijas paralelas a la primera y una placa fotoeléctrica—. Entonces el momento intercambiado entre la partícula y el diafragma, junto con la reacción de la partícula con los otros cuerpos, pasará hacia adentro de este soporte común, y nosotros, por tanto, nos habremos alejado de cualquier posibilidad de tomar en cuenta separadamente estas reacciones en predicciones con respecto al resultado final del experimento, —digamos la posición de la mancha producida por la partícula en la placa fotográfica. La imposibilidad de un análisis más preciso de las reacciones entre la partícula y el instrumento de medición no es, de hecho, una peculiaridad del procedimiento experimental descrito, sino una propiedad esencial de cualquier arreglo diseñado para el estudio de fenómenos del tipo que nos ocupa, donde tenemos que lidiar con la característica de *individualidad*, completamente ajena a la física clásica. De hecho, cualquier posibilidad de tomar en cuenta el momento intercambiado entre la partícula y los elementos separados del aparato nos permitiría de una vez extraer conclusiones correspondientes al “curso” de tal fenómeno, -digamos, a través de qué precisa rendija del segundo diafragma pasa la partícula en su camino a la placa fotoeléctrica- el cual sería

completamente incompatible con el hecho de que la probabilidad de que la partícula alcance un elemento dado del área sobre esta placa está determinado no por la presencia de ninguna rendija en particular, sino por las posiciones de todas las rendijas del segundo diafragma dentro del alcance de la onda asociada que ha sido difractada desde la rendija del primer diafragma» (Bohr, 1935, p. 697-8)¹³⁸.

¹³⁸ «Let us begin with the simple case of a particle passing through a slit in a diaphragm, which may form part of some more or less complicated experimental arrangement. Even if the momentum of this particle is completely known before it impinges in the diaphragm, the diffraction by the slit of the plane wave giving the symbolic representation of its state will imply an uncertainty in the momentum of the particle, after it has passed the diaphragm, which is the greater the narrower the slit. Now the width of the slit, at any rate if it is still large compared with the wave-length, may be taken as the uncertainty Δq of the position of the particle relative to the diaphragm, in a direction perpendicular to the slit. Moreover, it is simply seen from de Broglie's relation between momentum and wave-length that the uncertainty Δp of the momentum of the particle in this direction is correlated to Δq by means of Heisenberg's general principle // $\Delta p \Delta q \sim h$ // which in the quantum-mechanical formalism is a direct consequence of the commutation relation for any pair of conjugate variables. Obviously the uncertainty Δp is inseparably connected with the possibility of an exchange of momentum between the particle and the diaphragm; and the question of principal interest for our discussion is now to what extent the momentum thus exchanged can be taken into account in the description of the phenomenon to be studied by the experimental arrangement concerned, of which the passing of the particle through the slit may be considered as the initial stage. // Let us first assume that, corresponding to usual experiments on the remarkable phenomena of electron diffraction, the diaphragm, like the other parts of the apparatus, -say a second diaphragm with several slits parallel to the first and a photographic plate,-is rigidly fixed to a support which defines the space frame of reference. Then the momentum exchanged between the particle and the diaphragm will, together with the reaction of the particle on the other bodies, pass into this common support, and we have thus voluntarily cut ourselves off from any possibility of taking these reactions separately into account in predictions regarding the final result of the experiment, -say the position of the spot produced by the particle on the photographic plate. The impossibility of a closer analysis of the

Como puede verse, el arreglo experimental, es decir, el contexto en el que sucede el experimento imaginario, así como el propio experimento que presenta Bohr, no tiene semejanza alguna con el experimento imaginario utilizado por los autores de EPR. En primer término, el diseño de Bohr es un tanto más elaborado que el de EPR: la descripción de los elementos que conforman el arreglo experimental es, sin duda, más precisa; por otro lado, el sustento teórico, que en EPR va a caballo con la formulación del experimento imaginario, en parte quizá por la brevedad del artículo, en el caso de Bohr aparecerá más tarde: el físico danés no ofrecerá ninguna reflexión importante sino hasta que explique el segundo experimento imaginario:

«Mediante otro arreglo experimental, donde el primer diafragma no está conectado rígidamente con las otras partes del aparato, sería posible*, al menos en principio, medir su momento con cualquier precisión deseada antes y después del paso de la partícula y, por tanto, predecir el momento de la partícula después de que ha pasado a través

reactions between the particle and the measuring instrument is indeed no peculiarity of the experimental procedure described, but is rather an essential property of any arrangement suited to the study of the phenomena of the type concerned, where we have to do with a feature of *individuality* completely foreign to classical physics. In fact, any possibility of taking into account the momentum exchanged between the particle and the separate parts of the apparatus would at once permit us to draw conclusions regarding the "course" of such phenomena, - say through what particular slit of the second diaphragm the particle passes on its way to the photographic plate -which would be quite incompatible with the fact that the probability of the particle reaching a given element of area on this plate is determined not by the presence of any particular slit, but by the positions of all the slits of the second diaphragm within reach of the associated wave diffracted from the slit of the first diaphragm» (Bohr, 1935, p. 697-8).

de la rendija. De hecho, tales mediciones del momento requieren solamente una aplicación no ambigua de las leyes clásicas de la conservación del momento, aplicadas por ejemplo a los procesos de colisión entre el diafragma y algún cuerpo de prueba, cuyos momentos se controlan adecuadamente antes y después de la colisión. Es verdad que tal control dependerá esencialmente de un examen del curso espacio-temporal de algunos procesos a los cuales las ideas de la mecánica clásica pueden aplicarse; sin embargo, si todas las dimensiones espaciales y los intervalos de tiempo usados son lo suficientemente grandes, esto no conlleva claramente a una limitación con respecto al control preciso del momento de los cuerpos de prueba, sino sólo a una renuncia en cuanto a la precisión del control de su coordinación espacio-temporal. Esta última circunstancia es, de hecho, bastante análoga a la renuncia del control del momento del diafragma fijo en el arreglo experimental discutido arriba, y depende, en última instancia, de la demanda de una explicación puramente clásica del aparato de medición, el cual implica la necesidad de permitir una latitud correspondiente a las relaciones de incertidumbre mecánico-cuánticas en nuestra descripción de su comportamiento.

*(*Nota al pie en el original:* La obvia imposibilidad de llevar a cabo realmente, con las técnicas experimentales a nuestra disposición, tales procedimientos de medición tal y como son discutidos aquí y en adelante, claramente no afecta el argumento teórico, dado que los procedimientos en cuestión son esencialmente equivalentes con los procesos atómicos, como el efecto Compton, donde una aplicación

correspondiente del teorema de conservación del momento está bien establecida)» (Bohr, 1935, p. 698)¹³⁹.

En apenas un par de páginas Bohr ha puesto de manifiesto los puntos centrales de su tesis: (1) la incertidumbre como consecuencia de los procesos de interacción en los fenómenos atómicos; (2) el proceso de observación de un fenómeno es un proceso de interacción entre el fenómeno y el instrumento de medición; Bohr se cuida mucho de no utilizar la palabra *perturbación* (notoria e importante en EPR), y en cambio utiliza una suerte de eufemismo al hablar de *interacción*; (3) es necesario reconocer un distanciamiento con las nociones de la física

¹³⁹ «By another experimental arrangement, where the first diaphragm is not rigidly connected with the other parts of the apparatus, it would at least in principle* be possible to measure its momentum with any desired accuracy before and after the passage of the particle, and thus to predict the momentum of the latter after it has passed through the slit. In fact, such measurements of momentum require only an unambiguous application of the classical law of conservation of momentum, applied for instance to a collision process between the diaphragm and some test body, the momentum of which is suitably controlled before and after the collision. It is true that such a control will essentially depend on an examination of the space-time course of some process to which the ideas of classical mechanics can be applied; if, however, all spatial dimensions and time intervals are taken sufficiently large, this involves clearly no limitation as regards the accurate control of the momentum of the test bodies, but only a renunciation as regards the accuracy of the control of their space-time coordination. This last circumstance is in fact quite analogous to the renunciation of the control of the momentum of the fixed diaphragm in the experimental arrangement discussed above, and depends in the last resort of the claim of a purely classical account of the measuring apparatus, which implies the necessity of allowing a latitude corresponding to the quantum-mechanical uncertainty relations in our description of their behavior. // (*Nota al pie en el original: The obvious impossibility of actually carrying out, with the experimental technique at our disposal, such measuring procedures as are discussed here and in the following does clearly not affect the theoretical argument, since the procedures in question are essentially equivalent with atomic processes, like the Compton effect, where a corresponding application of the conservation theorem of momentum is well established)» (Bohr, 1935, p. 698).

clásica, mas no se refiere a las nociones de fenómeno, realidad, causalidad (elementos que tampoco utiliza mucho en el texto), sino que se refiere a la relación entre el fenómeno observado y los medios con que es observado; (4) como dice en la nota al pie (en la página 698), la imposibilidad *real* del experimento (imaginario) no altera el sentido del argumento a partir del arreglo experimental, ya que éste se basa en constantes teóricas aceptadas (como el efecto Compton); (5) la importancia del concepto de *renunciación* con respecto tanto a los conceptos de la mecánica clásica, pero sobre todo, con respecto al proceso de observación de los fenómenos: al observar una magnitud debemos renunciar a la posibilidad de observar otra: elegir es descartar; (6) como consecuencia de (5), un instrumento de medición utilizado en un arreglo experimental específico para determinado proceso de observación no puede utilizarse, luego, para un proceso de medición diferente; (7) por tanto, el arreglo experimental debe modificarse, o repetirse, para cada nuevo experimento; y (8) finalmente, quizá con el objetivo de cerrar el discurso en cierta medida, Bohr va modificando el arreglo experimental de manera que se demuestre que, incluso con las modificaciones al experimento imaginario, sigue cumpliéndose el principio de incertidumbre.

El sustento teórico de las nociones con que Bohr explica el fenómeno referido en su experimento imaginario, contrario a lo esperado en una respuesta de este tipo, no funciona como una defensa del supuesto ataque que EPR significa para la mecánica cuántica. Bohr, al establecer un nuevo experimento imaginario, explica las minucias de dicho fenómeno y construye un nuevo punto de partida. En este sentido, su texto no es tanto una respuesta como una versión alternativa de EPR, es decir, no rebate los argumentos de los tres autores, sino que, valiéndose del mismo título con el que ellos intentan una crítica a la mecánica cuántica, elabora un nuevo sustento teórico para los

fenómenos atómicos y, a la vez, un nuevo sustento experimental imaginario para los conceptos de *renunciación* y *complementariedad*.

Sobre los dos arreglos experimentales, Bohr plantea de forma explícita las implicaciones del concepto de *renunciación*, que no tiene que ver, necesariamente, con una renunciación al principio de causalidad.

«La principal diferencia entre los dos arreglos experimentales bajo consideración es, pues, que en el arreglo adecuado para el control del momento del primer diafragma, este cuerpo ya no podrá ser usado como un instrumento de medición para el mismo propósito que en el caso previo, sino que debe, con respecto a su posición relativa al resto de aparatos, ser tratado, tal y como la partícula al atravesar la rendija, como un objeto sujeto a investigación, en el sentido de que las relaciones de incertidumbre mecánico-cuánticas deben ser tomadas en cuenta explícitamente también respecto a su posición y momento [del diafragma]. De hecho, aún si conocemos la posición del diafragma relativa al marco espacial antes de la primera medición de su momento, y aún si su posición después de la última medición puede ser establecida con precisión, perdemos el conocimiento de su posición cuando la partícula pasa a través de la rendija debido al incontrolable desplazamiento del diafragma durante cada proceso de colisión con los cuerpos de prueba. Todo el arreglo es, por tanto, obviamente inadecuado para estudiar el mismo tipo de fenómeno tal y como en el caso previo. En particular puede mostrarse que, si el momento del diafragma se mide con una precisión tal que permita conclusiones definidas a pesar del paso de la partícula a

través de alguna rendija del segundo diafragma, entonces incluso la mínima incertidumbre en la posición del primer diafragma compatible con tal conocimiento [el paso de la partícula] implicará la total desaparición de cualquier efecto de interferencia –a pesar de las zonas de impacto permitidas para la partícula en la placa fotoeléctrica–al cual la presencia de más de una rendija en el segundo diafragma daría lugar en caso de que las posiciones de todos los aparatos estuvieran fijadas de forma relativa a cada una de las otras.

En un arreglo adecuado para la medición del momento del primer diafragma es más claro que incluso si hemos medido este momento antes del paso de la partícula a través de la rendija, después de este paso estamos todavía con una *elección libre* sobre si deseamos saber el momento de la partícula o su posición inicial relativa al resto de los aparatos. En la primera eventualidad sólo necesitamos hacer una segunda determinación del momento del diafragma, dejando para siempre desconocida su posición exacta cuando la partícula ha pasado. En la segunda eventualidad sólo necesitamos determinar su posición relativa al marco espacial con la inevitable pérdida del conocimiento del momento intercambiado entre el diafragma y la partícula. Si el diafragma es suficientemente grande en comparación con la partícula, podríamos todavía diseñar el procedimiento de medición en tal manera que el diafragma, después de la primera determinación de su momento, permanezca en descanso en alguna posición desconocida relativa a las otras partes del aparato, y la subsecuente fijación de su posición podría entonces

simplemente consistir en el establecimiento de una conexión rígida entre el diafragma y el soporte común» (Bohr, 1935, p. 698-9)¹⁴⁰.

¹⁴⁰ «The principal difference between the two experimental arrangements under consideration is, however, that in the arrangement suited for the control of the momentum of the first diaphragm, this body can no longer be used as a measuring instrument for the same purpose as in the previous case, but must, as regards its position relative to the rest of apparatus, be treated, like the particle traversing the slit, as an object of investigation, in the sense that the quantum-mechanical uncertainty relations regarding its position and momentum must be taken explicitly into account. In fact, even if we knew the position of the diaphragm relative to the space frame before the first measurement of its momentum, and even though its position after the last measurement can be accurately fixed, we lose, on account of the uncontrollable displacement of the diaphragm during each collision process with the test bodies, the knowledge of its position when the particle passed through the slit. The whole arrangement is therefore obviously unsuited to study the same kind of phenomena as in the previous case. In particular it may be shown that, if the momentum of the diaphragm is measured with an accuracy sufficient for allowing definite conclusions regarding the passage of the particle through some selected slit of the second diaphragm, then even the minimum uncertainty of the position of the first diaphragm compatible with such a knowledge will imply the total wiping out of any interference effect -regarding the zones of permitted impact of the particle on the photographic plate- to which the presence of more than one slit in the second diaphragm would give rise in case the positions of all apparatus are fixed relative to each other. //In an arrangement suited for measurements of the momentum of the first diaphragm, it is further clear that even if we have measured this momentum before the passage of the particle through the slit, we are after this passage still left with a *free choice* whether we wish to know the momentum of the particle or its initial position relative to the rest of the apparatus. In the first eventuality we need only to make a second determination of the momentum of the diaphragm, leaving unknown forever its exact position when the particle passed. In the second eventuality we need only to determine its position relative to the space frame with the inevitable loss of the knowledge of the momentum exchanged between the diaphragm and the particle. If the diaphragm is sufficiently massive in comparison with the particle, we may even arrange the procedure of measurements in such a way that the diaphragm after the first determination of its momentum will remain at rest in some unknown position relative to the other parts of the apparatus, and the subsequent fixation of this

Puede verse que dicha *renunciación* no implica en ninguna medida la idea de la realidad de una partícula cuando no se observa, ni el principio de separabilidad, ni el de no-localidad, sino la relación entre objeto observado e instrumento de medición, en términos no de perturbación sino de elección de las magnitudes y los procedimientos de medida, lo que, en consecuencia, conduce a la *renuncia* a medir las magnitudes que no se han seleccionado. Ahora bien, como se decía antes, Bohr parte de EPR, sí, pero lo hace como si EPR no fuera una objeción, casi como si EPR no existiera. Por tanto, su concepto de renunciación está diseñado específicamente para los procesos de medición: se *renuncia* a medir con precisión arbitraria el momento y la posición de una partícula durante un mismo y único proceso de observación, es decir, el observador se ve obligado a elegir *libremente* la observación de una u otra de las magnitudes en cuestión. Casi prefigurando a Sartre diez años antes, Bohr parecía decir: el observador está condenado a ser libre.

Pareciera como si al titular su artículo de la misma forma que el de los tres autores, Bohr eliminara el primero por completo, ocupando su lugar, y ofreciendo una respuesta positiva a la interrogante planteada en el propio título. Parece haber una intención de suplantación del artículo original, una suerte, si se permite, de superposición. Sólo hasta la página cuatro, Bohr referencia directamente el experimento planteado en EPR. Sin embargo, lo hace mediante un arreglo experimental diferente, evocando un experimento imaginario también diferente:

«El particular estado mecánico-cuántico de dos partículas libres, para el cual ellos [EPR] proporcionaron una expresión matemática explícita, puede ser reproducido, al

position may therefore simply consist in establishing a rigid connection between the diaphragm and the common support» (Bohr, 1935, p. 698-9).

menos en principio, mediante un simple arreglo experimental que comprende un diafragma rígido con dos rendijas paralelas, las cuales son muy estrechas comparadas con su separación, y a través de las cuales pasa una partícula con un momento inicial dado independientemente de la otra. Si el momento de este diafragma se mide con precisión tanto antes como después del paso de las partículas, debemos conocer, de hecho, la suma de las componentes, perpendiculares a las rendijas, del momento de las dos partículas, así como la diferencia de sus coordenadas iniciales de posición en la misma dirección; mientras que, desde luego, las cantidades conjugadas, por ejemplo la diferencia de las componentes de sus momentos y la suma de sus coordenadas de posición, son completamente desconocidas. En este arreglo, por tanto, es claro que una sola medida subsecuente de una de las partículas determinará automáticamente la posición o el momento, respectivamente, de la otra partícula con cualquier precisión deseada; al menos si la longitud de onda correspondiente al movimiento libre de cada partícula es suficientemente corto comparado con el ancho de las rendijas. Como señalaron los mencionados autores, estamos por tanto enfrentados en este punto con una completa libertad de elección sobre si queremos determinar una u otra de las cantidades anteriores mediante un proceso que directamente no interfiere con la partícula en cuestión» (Bohr, 1935, p. 699)¹⁴¹.

¹⁴¹ «The particular quantum-mechanical state of two free particles, for which they give an explicit mathematical expression, may be reproduced at least in principle by a simple experimental arrangement, comprising a rigid diaphragm with two parallel

La única forma de correlación que señala Bohr es la que existe entre el objeto medido y el instrumento de medición: no entra en la discusión del principio de separabilidad, en la acción-a-distancia ni en cualquier otro concepto formulado por Einstein en su crítica a la cuántica. Es posible, dice, que obtener la medición de una magnitud de cualquiera de las dos partículas no significa otra cosa que establecer una correlación entre su comportamiento y algún instrumento que defina el marco de referencia (Bohr, 1935, p. 699-700). Lo importante para el caso es el establecimiento de esa correlación, la necesaria presencia del instrumento de medición y la elección que realiza el observador de vigilar una u otra magnitud cada vez. Bohr no reconstruye el experimento imaginario de Einstein, Podolsky y Rosen, sino que, como se dijo antes, diseña uno diferente que pone de manifiesto la importancia de un instrumento entre el tránsito de las dos partículas, más allá de la importancia dada en EPR a la interacción entre dichas partículas. Incluso, los elementos del diseño experimental semejan en buena medida a los dispositivos utilizados en la refutación del

slits, which are very narrow compared with their separation, and through each of which one particle with given initial momentum passes independently of the other. If the momentum of this diaphragm is measured accurately before as well as after the passing of the particles, we shall in fact know the sum of the components perpendicular to the slits of the momenta of the two escaping particles, as well as the difference of their initial positional coordinates in the same direction; while of course the conjugate quantities, i.e., the difference of the components of their momenta, and the sum of their positional coordinates, are entirely unknown. In this arrangement, it is therefore clear that a subsequent single measurement of one of the particles will automatically determine the position or momentum, respectively, of the other particle with any desired accuracy; at least if the wavelength corresponding to the free motion of each particle is sufficiently short compared with the width of the slits. As pointed out by the named authors, we are therefore faced at this stage with a completely free choice whether we want to determine the one or the other of the latter quantities by a process which does not directly interfere with the particle concerned» (Bohr, 1935, p. 699).

experimento imaginario del fotón y la rendija, en 1927. Esta libertad de elección es lo que conduce, afirma Bohr, a la discriminación entre diferentes procedimientos experimentales que permiten, sin ambigüedades, el uso de los conceptos complementarios clásico (Bohr, 1935, p. 699). Tanto la posición como el momento, al ser medidos, lo serán siempre con respecto al marco de referencia definido por los instrumentos de medición. Y lo explica de la siguiente manera:

«Al permitir que un momento esencialmente incontrolable pase de la primera partícula al mencionado soporte nos alejamos, mediante este procedimiento, de cualquier posibilidad futura de aplicar la ley de conservación del momento al sistema que consiste en el diafragma y las dos partículas, y por tanto hemos perdido nuestra única base para una aplicación sin ambigüedades de la idea la predicción del momento con respecto al comportamiento de la segunda partícula. A la inversa, si elegimos medir el momento de una de las partículas perdemos, mediante el incontrolable desplazamiento inevitable en tal medición, cualquier posibilidad de deducir a partir del comportamiento de esta partícula la posición del diafragma en relación con el resto de los aparatos, y por tanto no tenemos fundamento en absoluto para realizar predicciones con respecto a la localización de la otra partícula» (Bohr, 1935, p. 700)¹⁴².

¹⁴² «By allowing an essentially uncontrollable momentum to pass from the first particle into the mentioned support, however, we have by this procedure cut ourselves off any future possibility of applying the law of conservation of momentum to the system consisting of the diaphragm and the two particles and therefore have lost our only basis for an unambiguous application of the idea of momentum in predictions regarding the behavior of the second particle.

Poco a poco, Bohr se va acercando, desde un texto que rozaba apenas la propuesta de los autores de EPR, a tratar de lleno, pero con una cierta sutileza, el tema central de la objeción interpuesta a la mecánica cuántica. Su argumentación, como se ha dicho, no parte de la crítica hecha por los tres autores, sino que su diseño experimental incorpora elementos que el diseño experimental de EPR, aparentemente, pasa por alto, o bien deja fuera (como el instrumento de medición, el marco de referencia, etc.). No obstante, Bohr no pasa por alto las nociones de EPR en la última parte de su texto, e incluso va un poco más allá y deja en el aire una pequeña referencia al artículo publicado, cuatro años antes, por Einstein, Tolman y Podolsky (1931), y que tiene que ver con la predicción del comportamiento futuro del sistema:

«Desde luego no hay, en un caso como el considerado antes, ninguna duda sobre la perturbación mecánica del sistema bajo investigación durante la última etapa crítica del procedimiento de medición. Sin embargo, todavía en esta etapa existe esencialmente la cuestión de *una influencia en las propias condiciones que definen los posibles tipos de predicción con respecto al futuro comportamiento del sistema*. Dado que estas condiciones constituyen un elemento inherente de la descripción de cualquier fenómeno al cual el término “realidad física” puede ser relacionado propiamente, vemos que la argumentación de los mencionados autores no justifica su conclusión de que la descripción mecánico-

Conversely, if we choose to measure the momentum of one of the particles, we lose through the uncontrollable displacement inevitable in such a measurement any possibility of deducing from the behavior of this particle the position of the diaphragm relative to the rest of the apparatus, and have thus no basis whatever for predictions regarding the location of the other particle» (Bohr, 1935, p. 700).

cuántica es esencialmente incompleta» (Bohr, 1935, p. 700)¹⁴³.

Bohr aplicará esta misma especie de breve reclamo unas líneas más adelante cuando, luego de caracterizar el Principio de Complementariedad como una reconciliación entre las nuevas leyes de la física y las leyes clásicas, explique con una breve referencia el fallo que encontró en el experimento imaginario presentado por Einstein en 1930 en la VI Conferencia de Solvay, conocido como *photon-in-a-box*:

«De hecho, es solamente la mutua exclusión de cualesquiera dos procedimientos experimentales, permitiendo la definición sin ambigüedades de las cantidades físicas complementarias, lo que da lugar a las nuevas leyes físicas, la coexistencia de las cuales puede, a primera vista, parecer irreconciliable con los principios básicos de la ciencia. Es justo esta situación completamente nueva con respecto a la descripción de los fenómenos físicos, la que la noción de *complementariedad* intenta caracterizar [...] Además, la transferencia del momento, discutida arriba, entre el objeto y los cuerpos que definen el marco espacial, veremos pues, en tales arreglos, debe considerar un eventual intercambio

¹⁴³ «Of course there is in a case like that just considered no question of a mechanical disturbance of the system under investigation during the last critical stage of the measuring procedure. But even at this stage there is essentially the question of *an influence on the very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behavior of the system*. Since these conditions constitute an inherent element of the description of any phenomenon to which the term “physical reality” can be properly attached, we see that the argumentation of the mentioned authors does not justify their conclusion that quantum-mechanical description is essentially incomplete» (Bohr, 1935, p. 700).

de energía entre el objeto y los mecanismos-de-tipo-reloj»
(Bohr, 1935, p. 700)¹⁴⁴.

Esa sencilla referencia no sólo recuerda la totalidad del debate entre Einstein y Bohr, que se sucede desde 1927, al menos de manera pública, sino que también evoca, en cierta medida, la forma en que el Principio de Incertidumbre afecta a los mecanismos de observación. Más adelante, el cierre ofrecido por Bohr posee dos partes fundamentales: (1) la distinción entre la descripción clásica de los fenómenos físicos y la descripción mecánico-cuántica, basada, como se verá a continuación, en el concepto de discriminación; y (2) la comparación entre la mecánica cuántica, como descripción de la naturaleza, y la teoría de la relatividad:

(1)

«Esta necesidad de discriminación en cada arreglo experimental entre aquellas partes del sistema físico en consideración, las cuales son tratadas como instrumentos de medición, y aquellas que constituyen los objetos bajo investigación puede decirse que forma una *distinción principal*

¹⁴⁴ «In fact, it is only the mutual exclusion of any two experimental procedures, permitting the unambiguous definition of complementary physical quantities, which provides room for new physical laws, the coexistence of which might at first sight appear irreconcilable with the basic principles of science. It is just this entirely new situation as regards the description of physical phenomena that the notion of *complementarity* aims at characterizing [...] Besides the transfer of momentum, discussed above, between the object and the bodies defining the space frame, we shall therefore, in such arrangements, have to consider an eventual exchange of energy between the object and these clock-like mechanisms» (Bohr, 1935, p. 700).

entre la descripción clásica y la mecánico-cuántica de los fenómenos físicos» (Bohr, 1935, p. 701)¹⁴⁵.

(2)

«La dependencia en el sistema de referencia, en la teoría de la relatividad, de todas las lecturas de escalas y relojes puede incluso ser comparada con el intercambio esencialmente incontrolable de momento o energía entre los objetos de las mediciones y todos los instrumentos que definen el sistema de referencia espacio-temporal, el cual, en la teoría cuántica, nos enfrenta con la situación caracterizada por la noción de complementariedad. De hecho, esta nueva característica de la filosofía natural significa una revisión radical de nuestra actitud en lo que respecta a la realidad física, la cual puede ser paralela a la modificación fundamental de todas las ideas en cuanto al carácter absoluto de los fenómenos físicos, traída a cuenta por la teoría general de la relatividad» (Bohr, 1935, p. 702)¹⁴⁶.

¹⁴⁵ «This necessity of discrimination in each experimental arrangement between those parts of the physical system considered which are to be treated as measuring instruments and those which constitute the objects under investigation may indeed be said to form a *principal distinction between classical and quantum-mechanical description of physical phenomena*» (Bohr, 1935, p. 701).

¹⁴⁶ «The dependence on the reference system, in relativity theory, of all readings of scales and clocks may even be compared with the essentially uncontrollable exchange of momentum or energy between the objects of measurements and all instruments defining the space-time system of reference, which in quantum theory confronts us with the situation characterized by the notion of complementarity. In fact this new feature of natural philosophy means a radical revision of our attitude as regards physical reality, which may be paralleled with the fundamental modification of all ideas regarding the absolute character of physical phenomena, brought about by the general theory of relativity» (Bohr, 1935, p. 702).

De esta manera es posible ver que cuando Bohr *contestaba* a EPR no establecía un diálogo con el artículo de los tres autores, sino que continuaba *su* diálogo con Einstein, ese diálogo empezado muchos años antes. Del texto de Bohr se pueden extraer diversas conclusiones de suma importancia que tienen que ver con las nociones de la complementariedad y los conceptos de *discriminación* y *renunciación*. No obstante, aquí se propone resaltar como uno de los elementos más importante del artículo de Bohr su función en el contexto de la discusión, su carga retórica y su papel como bandera argumentativa. Es de notar la intención de cerrar el discurso en torno a la completitud de la mecánica cuántica mediante la intención de ubicar las objeciones presentadas en EPR como parte del problema de la instrumentación en mecánica cuántica y, sobre todo, la voluntad de anulación de EPR mediante dos flancos básicos (a) la construcción de un artículo con voluntad de *suplantar* EPR, ocupar su lugar y redirigir la discusión hacia otros campos, y (b) mediante una precisión en la descripción instrumental del experimento imaginario que no está presente en EPR. Además de cualquier valoración sobre errores o aciertos en materia de argumentos, una discusión se lleva a cabo, también, en el plano de los recursos de la persuasión: más que una respuesta a EPR, como se dijo antes, se trata de una versión paralela a EPR, un cauce distinto, no un eslabón más de la discusión, sino un recurso de la discusión en sí mismo. Podría decirse, incluso, que el artículo de Bohr no está dirigido a Einstein, Podolsky y Rosen, sino que apela a un público mayor (no en una manera divulgativa, sino en cuanto a una correspondencia de dialogo) al cual se ofrece una explicación del funcionamiento de la mecánica cuántica, y no una respuesta a un grupo de científicos. Si, como se aventuró antes, la intención de Einstein de trabajar con Podolsky y Rosen residía en la conformación de un grupo opositor a la

escuela de Copenhague, Bohr desbarata esas intenciones al no *oponerse* a esa visión de la cuántica, sino presentando sus argumentos como si no se debieran a una reacción ante la crítica de los tres autores, como si no hubiera tardado seis semanas componiendo el documento, como si no hubiera abandonado todos sus trabajos en aquel momento para dedicarse, con Rosenfeld, a la redacción del texto que debía formularse como si no fuera una respuesta, pero con capacidad suficiente para responder a cualquier objeción presentada.

La dinámica de la discusión había cambiado ya: la impersonalidad de la escritura marcaba la justa y necesaria distancia para que otros participantes se incorporaran al debate. Distancia entre Bohr y Einstein, porque aunque es cierto, como se ha visto, que nunca fue un debate entre dos científicos aislados del resto, resulta errático señalar que la discusión en torno a la mecánica cuántica se sucedió siempre entre Bohr y Einstein, también es verdad que los polos principales del debate a lo largo de los años han sido estos dos físicos. No obstante, cuando la forma de comunicación cambió, se propició la apertura que quizá muchos otros físicos esperaban para adentrarse en la polémica: los miembros de aquel público atento se convirtieron en actores cuando el debate salió de las salas de Solvay para ocupar las páginas de las revistas.

La primera participación pública de Schrödinger y la primera mención del entrelazamiento. Otras respuestas tardías a EPR: Wolfe, Furry, Margenau. La voz femenina en la mecánica cuántica: Grete Hermann. La fosa y los públicos de la física cuántica en las décadas de 1920 y 1930. La discusión que unifica al actor y al espectador.

En el mes de octubre de 1935 aparece la primera participación pública de Erwin Schrödinger. Aunque atento al desarrollo de la polémica y participativo en las conversaciones epistolares, Schrödinger se había mantenido al margen de la discusión pública. Sin embargo, la publicación de EPR y el posterior intercambio epistolar con Einstein incidieron en la conformación de algunos conceptos, la concepción de algunas ideas y la final construcción de dos artículos de gran importancia. En el primero, titulado *Discussion of probability relations between separated systems* (1935a), aborda por primera vez el concepto de *entrelazamiento*. En el segundo artículo, que se revisará más adelante, Schrödinger (1935b) refiere el famoso experimento imaginario del gato.

El primer texto de la participación de Schrödinger (1935a), publicado originalmente en inglés debido a que entonces se encontraba haciendo una estancia en Oxford, es, más que una respuesta directa, una reacción ante EPR. De entrada Schrödinger escribe:

«Cuando dos sistemas, cuyo estado conocemos mediante sus respectivas funciones, entran en una interacción física temporal debido a las fuerzas conocidas existentes entre ellos, y cuando después de un tiempo de mutua interacción los sistemas se separan otra vez, entonces ya no podrán ser descritos en la misma manera que antes, a saber, dotando a

cada uno de ellos con una función propia. Yo no llamaría a esta *un* [rasgo], sino *el* rasgo característico de la mecánica cuántica, aquel que alienta su total separación de las líneas de pensamiento clásico. Mediante la interacción las dos funciones (función ψ) se han entrelazado [entangled]. Para des-entrelazarlas [disentangle them] debemos reunir información mediante experimentos, aunque sepamos tanto como cualquiera puede saber sobre todo lo que ha ocurrido. De cada sistema, tomado por separado, todo el conocimiento previo puede haberse perdido completamente, dejándonos sólo con un privilegio: restringir los experimentos a sólo uno de los sistemas. Después de restablecer una función mediante la observación, la otra puede ser inferida simultáneamente. En lo que sigue, la totalidad de este procedimiento puede ser llamado *el des-entrelazamiento* [*the disentanglement*, se utiliza el guión para agregar énfasis]. Su importancia siniestra se debe a que se encuentra relacionado con todos los procesos de medición, y por tanto forma parte de la base de la teoría cuántica de la medición, amenazándonos, así, con al menos un *regressus in infinitum*, dado que es notable que el procedimiento en sí mismo involucra la medición» (Schrödinger, 1935a, p. 555)¹⁴⁷.

¹⁴⁷ «When two systems, of which we know the states by their respective representatives, enter into temporary physical interaction due to the known forces between them, and when after a time of mutual influence the systems separate again, then they can no longer be described in the same way as before, viz. by endowing each of them with a representative of its own. I would not call that *one* but rather *the* characteristic trait of quantum mechanics, the one that enforces its entire departure from classical lines of thought. By the interaction the two representatives (or ψ -functions) have become entangled. To disentangle them we must gather further information by experiment, although we knew as much as

De entrada, como se decía, Schrödinger reproduce el experimento imaginario de EPR en un par de líneas, de una forma muy resumida y concreta. Lo importante aquí es, sin duda, la primera aparición pública del concepto de *entrelazamiento*. Schrödinger usa inicialmente la palabra en inglés *entanglement*, pero luego recurrirá a otras palabras para denominar el mismo fenómeno. Si bien es cierto que en la correspondencia mantenida con Einstein durante el tiempo inmediatamente posterior a la publicación de EPR, Schrödinger ya utilizó este término (*Verschränkung*) para referirse a las correlaciones existentes entre dos partículas que interactúan y luego se separan tal y como sucede en el experimento imaginario de EPR, esta será la primera vez que hace uso del término frente al dominio público de la comunidad científica.

Parece que las ideas de Schrödinger están muy claras: las funciones ψ se entrelazan mediante la interacción que tiene lugar al inicio del experimento imaginario. Al observador le interesa desentrelazar las funciones para obtener la descripción de cada partícula individualmente, por lo que es necesario realizar una medición en uno de los sistemas: entonces se sucede el colapso de la función ψ o la reducción del paquete de ondas (que ya se había mencionado antes, en EPR, por ejemplo). La medición restablece la función ψ y permite inferir la función del otro sistema. El problema que ve Schrödinger no es el

anybody could possibly know about all that happened. Of either system, taken separately, all previous knowledge may be entirely lost, leaving us but one privilege: to restrict the experiments to one only of the systems. After reestablishing one representative by observation, the other one can be inferred simultaneously. In what follows the whole of this procedure will be called *the disentanglement*. Its sinister importance is due to its being involved in every measuring process and therefore forming the basis of the quantum theory of measurement, threatening us thereby with at least a *regressus in infinitum*, since it will be noticed that the procedure itself involves measurement» (Schrödinger, 1935a, p. 555).

entrelazamiento en sí, sino el hecho de que el entrelazamiento está asociado a los procesos de medición, es decir, a la interacción entre los elementos observados y los instrumentos de medición, y que sólo mediante la medición pueda llevarse a cabo el des-entrelazamiento, lo que introduciría una nueva interacción entre dos partículas, por tanto aparecería un nuevo entrelazamiento, y así *ad infinitum*.

Schrödinger establece que «el entrelazamiento consiste en que uno y sólo uno de los observables (o conjunto de observables conmutativos) de un sistema está determinado únicamente por un observable definido (o conjunto de observables conmutativos) del otro sistema» (Schrödinger, 1935a, p. 558)¹⁴⁸. En el caso del experimento imaginario de EPR, dice el autor, el entrelazamiento sería de una naturaleza diferente, por así decirlo: «*Cualquier* observable (o conjunto, etc.) de un sistema está determinado por un observable (o conjunto, etc.) del otro [sistema]» (Schrödinger, 1935a, p. 558)¹⁴⁹. Según Schrödinger, esta noción queda clara luego de plantear un experimento imaginario que parte, de alguna manera, de la formulación original de EPR, y que termina con una analogía que más adelante, en el segundo artículo publicado aquel año (Schrödinger, 1935b) sería retomado.

Se tienen dos sistemas, No. 1 y No. 2, cada uno de ellos con dos variables x y p , correspondientes al momento y la posición de cada uno de los sistemas (entiéndase x_1 y p_1 para el primer sistema y x_2 y p_2 para el segundo). Se supone entonces, dice Schrödinger, que los sistemas no deben interactuar entre ellos. El *entrelazamiento* es tal que los dos observables conmutativos que se eligen para describir el sistema

¹⁴⁸ «Then one can say that the entanglement consists in that one and only one observable (or set of commuting observables) of one system is uniquely determined by a definite observable (or set of commuting observables) of the other system. This is the general case» (Schrödinger, 1935a, p. 558).

¹⁴⁹ «*Every* observable (or set, etc.) of one system is determined by an observable (or set, etc.) of the other one» (Schrödinger, 1935a, p. 558)

compuesto poseen valores numéricos definidos (x' y p') que se han de conocer. La función de onda ψ del sistema compuesto es una función de los valores propios de x y p , los cuales involucran a x' y p' como parámetros que desaparecen en cualquier lugar excepto en el punto en que los primeros son iguales a los segundos. A partir de la diferencia entre x_1 y x_2 es posible obtener x , y así también para los valores de p . Sin embargo, cada *una* de las *cuatro* observaciones en cuestión (x_1, p_1, x_2, p_2), al llevarse a cabo en la realidad, des-entrelaza el sistema, otorgando una función de onda para cada una de las mediciones. Una *segunda* observación, sea donde sea que ocurra y en cualesquiera de los sistemas, no produce un cambio en la función del *otro* sistema. Sin embargo, dado que es posible predecir ya sea x'_1 o p'_1 sin interferir en el sistema No. 1, entonces, el sistema No. 1, como un estudiante haciendo un examen, no puede saber cuál de las dos preguntas se le va a hacer primero (si x'_1 o p'_1): por tanto parece que el estudiante está preparado para, *de cualquier manera*, proporcionar la respuesta correcta a la *primera* pregunta que se le haga. Se concluye, dice Schrödinger, que el estudiante debe saber las dos respuestas, lo que representa un conocimiento impresionante, con independencia del hecho de que después de proporcionar su primera respuesta, el estudiante está tan cansado y desconcertado que todas las respuestas siguientes están equivocadas (Schrödinger, 1935a, pp. 558-9, en la nota al pie se transcribe la formulación completa)¹⁵⁰.

¹⁵⁰ Aquí se presenta la formulación completa de Schrödinger, incluyendo las ecuaciones «For simplicity's sake we suppose each of the two systems to have one degree of freedom only. Let the q -numbers x_1, p_1 y x_2 y p_2 denote coordinate and momentum of the first and of the second system respectively. [...] // The two systems are of course supposed not to interact with each other. The entanglement is to be such that the two *commuting* observables // $x = x_1 + x_2, p = p_1 + p_2$, (9) // which we choose to represent the state of the *composed* system, have definite numerical values, say x' y p' respectively, which we supposed to be known. The representative ψ of the composed system is a function of the eigenvalues of x and p , which involves x' y p' as parameters and vanished everywhere except in that

Es posible extraer de aquí varias conclusiones interesantes con respecto a la discusión. Por un lado, el *entrelazamiento* es para Schrödinger una manera de explicar la correlación entre los sistemas. Por otro lado, es posible obtener la magnitud del observable de un sistema mediante una medición de la magnitud del correspondiente observable del otro sistema entrelazado. Y, por último, las magnitudes de los dos observables no conmutativos de un mismo sistema poseen realidad simultánea, sin embargo, cuando se obtiene el valor de una mediante una medición directa se pierde la posibilidad de conocer el valor de la otra. Por tanto, su corrección hacia el experimento imaginario de EPR consiste en el énfasis que hace, en la explicación previa, sobre el hecho de que *sólo uno* de los observables del sistema está determinado *sólo* por su correspondiente en el otro sistema, y no, como en EPR, donde *cualquiera* de los observables de un sistema está determinado por *cualquiera* de los observables del otro.

point where the former are equal to the latter. [...] According to our assumptions ψ must have the properties // $x\psi = x'\psi$ and $p\psi = p'\psi$. (10) // We shall use no others. // From (9) the variable x can be observed by observing x_1 and x_2 separately, because the latter commute. The difference of the observed values, x'_1 and x'_2 say, must be equal to x' : // $x'_1 - x'_2 = x'$. (11) // Hence x'_1 can be predicted from x'_2 and *vice versa*. Similarly // $p'_1 - p'_2 = p'$, (12) // so that the result of measuring p_1 serves to predict the result for p_2 and *vice versa*. But of course every *one* of the *four* observations in question, when actually performed, disentangles the system, furnishing each of them with an independent representative of their own. A *second* observation, whatever it is and on whichever system it is executed, produces no further change in the representative of the other system. // Yet since I can predict *either* x'_1 *or* x'_2 without interfering with the system No. 1 and since system No. 1, like a scholar in examination, cannot possibly know which of the two questions I am going to ask it first: it so seems that our scholar is prepared to give the right answer to the *first* question he is asked, *anyhow*. Therefore he must know both answers; which is an amazing knowledge, quite irrespective of the fact that after having given his first our scholar is invariably so disconcerted or tired out, that all the following answers are “wrong”» (Schrödinger, 1935a, pp. 558-9).

El sumario, al final del artículo, es mucho más esclarecedor, con relación a la intención general del autor:

«Las relaciones de probabilidad que pueden ocurrir entre dos sistemas separados físicamente se discuten aquí bajo la noción de que su estado es conocido mediante una función en común. Las *dos familias* de observables, en relación con el primero y segundo sistema respectivamente, están ligadas mediante al menos *un emparejamiento* entre dos miembros definidos, uno de cada familia. La palabra *emparejamiento* [*match*] es corta para establecer que los valores de los dos observables en cuestión determinan cada uno al otro, y por tanto (dado que la presente etiquetación es irrelevante) pueden ser tomados como *equitativos*. En general, existe sólo un emparejamiento, pero puede haber más. Si, además del primer emparejamiento, existe un segundo entre [observables] canónicos conjugados del primer emparejamiento, entonces existen infinidad más de emparejamientos, cada función del primer par canónico emparejada con la misma función del segundo par canónico. En consecuencia existe una correspondencia completa de uno-a-uno entre *esas* dos ramas (de las dos familias de observables) las cuales se relacionan con los dos grados de libertad en cuestión. Si no *hay* otros, la correspondencia uno-a-uno persiste mientras el tiempo avanza, pero los observables del primer sistema (digamos) cambian sus parejas en la forma en que el último, por ejemplo, los observables del segundo sistema, experimentan

una cierta transferencia-por-contacto continua»
(Schrödinger, 1935a, p. 563)¹⁵¹.

Resulta interesante el uso del término *emparejamiento* (*match*), para referirse también al concepto de *entrelazamiento* (*entanglement*). Por ahora, Schrödinger no se decanta especialmente por ninguno de los dos nombres, al menos en inglés. De la misma manera, tampoco se ocupa demasiado de la parte teórica de EPR: le interesa más el experimento imaginario. Será sólo hasta su siguiente participación en la discusión sobre la cuántica cuando abordará con mayor detalle el concepto de entrelazamiento, así como las cuestiones de la completitud y la descripción de la naturaleza.

Ahora bien, Schrödinger presta bastante atención al proceso de *des-entrelazamiento* (*disentanglement*), que tiene lugar cuando se realiza una medición sobre uno de los observables del sistema entrelazado y como consecuencia de ello a cada uno de estos observables se les confiere una ecuación de onda distinta. Este *des-entrelazamiento* cumple la función que,

¹⁵¹ «The probability relations which can occur between two separated physical systems are discussed, on the assumption that their state is known by a representative in common. The *two families* of observables, relating to the first and to the second system respectively, are linked by at least *one match* between two definite members, one of either family. The word *match* is short for stating that the *values* of the two observables in question determine each other uniquely and therefore (since the actual labeling is irrelevant) can be taken to be *equal*. In general there is but one match, but there can be more. If, in addition to the first match, there is a second one between canonical conjugates of the first mates, then there are infinitely many matches, every function of the first canonical pair matching with the same function of the second canonical pair. Thus there is a complete one-to-one correspondence between *those* two branches (of the two families of observables) which relate to the two degrees of freedom in question. If there *are* no others, the one-to-one correspondence persists as time advances, but the observables of the first system (say) change their mates in the way that the latter, i.e. the observables of the second system, undergo a certain continuous contact-transformation» (Schrödinger, 1935a, p. 563).

en otras formulaciones, se le otorga a la reducción o el colapso de la función de onda. Basta recordar que tanto en EPR, como en Rosen y Vallarta (1932), entre otros, la reducción del paquete de ondas juega un papel importante a la hora de la asignación de funciones de onda separadas a los observables del sistema.

La inmediatez en la réplica que permite el uso de experimentos imaginarios dio lugar, como se ha dicho antes, a una serie de respuestas en su mayoría publicadas en la misma revista *Physical Review* en la que Einstein, Podolsky y Rosen publicaron el artículo inicial. Muchas de estas respuestas fueron breves (ya se han revisado antes los textos de Kemble (1935) y Ruark (1935) en este mismo capítulo) y apenas ofrecen una perspectiva de la postura de cada autor. Una de estas breves respuestas es la del físico Hugo C. Wolfe. Publicada en *The Physical Review Letters to the Editor*, consta apenas de media página escrita a dos columnas y contiene la opinión personal del autor sin mayores elaboraciones formales o teóricas. Se trata, solamente, de un dictamen de posicionamiento: Wolfe elige su bando y lo expresa públicamente con la intención, como él mismo dice al final, de que ello pueda servir para diseminar el punto de vista con el cual él concuerda: el punto de vista de Bohr.

Para Wolfe, las partículas poseen una realidad física independiente de la medición que pueda realizarse en ellas, y afirma que la mecánica cuántica no se ocupa del *estado* de una partícula en *cualquier momento* (o en todo momento), sino que se ocupa del *conocimiento del estado* de una partícula al momento en que se realiza una medición (Wolfe, 1935, p. 274). Su conclusión final, que en suma no agrega nada nuevo a la discusión, parte de la reproducción, en su forma más simple, del

experimento imaginario de EPR: «Dos sistemas han interactuado y luego se separan. Nada que hagamos al primer sistema después de esto afecta el “estado” del segundo. Pero las mediciones en el primer sistema afectan nuestro conocimiento del segundo sistema y por tanto afectan la función de onda que describe ése conocimiento. Diferentes mediciones en el primer sistema nos proporcionan diferente información sobre el segundo y por tanto diferentes funciones de onda y diferentes predicciones así como resultados de mediciones en el segundo sistema» (Wolfe, 1935, p. 274)¹⁵². Puede parecer una reproducción de sin más implicaciones, y si no fuera por la aclaración de su simpatía por la noción de Bohr, podría pensarse que es un partidario de las ideas de EPR. Sin embargo su formulación posee un detalle interesante: Wolfe señala que las mediciones no afectan al *estado* de la partícula, sino a la función de onda que describe su estado: la perturbación, en su opinión, no afecta a la partícula, sino a la información que se obtiene de la partícula y a la manera en que el formalismo representa esa información. La repetición de la idea «no cambia el “estado” del sistema sino nuestro conocimiento de ese “estado”» es de suma importancia en su estrategia, por demás simple y directa. La de Wolfe es, de todas las respuestas a EPR, las más sencilla y breve, y la que menos propone en materia de novedad: su enfoque es simple, sin matices ni escaramuzas, y su reproducción del experimento imaginario no agrega nuevos elementos al diseño.

¹⁵² «Two systems have interacted and then separated. Nothing that we do to the first system after this affects the “state” of the second. But measurements on the first system affect our knowledge of the second and therefore affect the wave function which describes that knowledge. Different measurements on the first system give us different information about the second and therefore different wave functions and different predictions as to the results of measurement on the second system» (Wolfe, 1935, p. 274).

En 1936 aparece publicado un texto de W. H. Furry, profesor de física de la Universidad de Harvard. El documento, que se titula *Note on the Quantum-Mechanical Theory of Measurements*, fue escrito en 1935, después de la publicación de la respuesta de Bohr, y fue recibido por el consejo editorial de *Physical Review* en el mes de noviembre. Consta de siete páginas en las que el autor construye una refutación a EPR a partir de una llamada *Suposición A*, en la cual intenta encuadrar las intenciones centrales de Einstein, Podolsky y Rosen. Parte de la afirmación de que en el ejemplo de los dos sistemas que interactúan durante un periodo de tiempo, el sistema uno se convierte en el instrumento de medición más adecuado para usarse sobre el sistema dos (Furry, 1936a, p. 395).

Para lograr su cometido, Furry lleva a cabo un extenso y detallado planteamiento matemático en el cual expone la demostración de lo que él llama la *Suposición A*. Partiendo del experimento imaginario planteado en EPR Furry extrae el siguiente enunciado:

«*Suposición y método A*. Asumimos que durante la interacción de los dos sistemas, cada sistema realiza una transición a un estado definido, en el cual se encuentra ahora; el sistema I se encuentra en uno de los estados $\varphi_{\lambda k}$, y el sistema II en uno de los estados $\varepsilon_{\rho k}$. Estas transiciones no están determinadas causalmente, y no hay manera de encontrar *cuáles* transiciones ocurrieron, salvo mediante la realización de una medición adecuada. En ausencia de mediciones sólo sabemos que las posibilidades de las diferentes transiciones son respectivamente ω_k , y que si el sistema I está en el estado $\varphi_{\lambda i}$, el sistema II está en el estado $\varepsilon_{\rho i}$ » (Furry, 1936a, pp. 395-6)¹⁵³.

¹⁵³ «*Assumption and method A*. We assume that during the interaction of the two systems each system made a transition to a definite state, in which it now is, system

La *Suposición A* resulta, según Furry, del análisis del experimento imaginario de EPR, y resume la crítica a la cuántica que exponen los tres autores, en la cual se considera que un sistema, luego de que haya dejado de interactuar, posee propiedades reales independientes. Sin embargo, como ya se ha visto antes, esta no es la postura crítica de EPR, cuyo argumento se basa solamente en la existencia de la correlación entre los dos componentes del sistema, y no en la *Suposición A* (ver Jammer, 1974, p. 223-5). Por lo que, de entrada, el texto de Furry sigue un camino errático.

El documento es largo y complejo, la prosa puede resultar confusa y, en algunos momentos, entrecortada, yendo del discurso estrictamente científico a la prosa ligeramente coloquial, casi oral, y constantemente pierde el rumbo. Una vez deducida la *Suposición A* se pone a prueba con otro experimento imaginario propuesto con la intención de demostrar que dicha *Suposición A* es inconsistente con la mecánica cuántica. El experimento imaginario comienza con la proposición de que el sistema I es usado como instrumento de medición del sistema II, de manera que luego de la interacción, explica Furry, es posible realizar una medición en el sistema I y obtener una inferencia sobre el estado del sistema II. Considera entonces la medición de un protón mediante un microscopio de electrones. La intención es calcular un componente transversal del momento del electrón mediante el uso del Efecto Doppler después de su encuentro con el protón con el fin de medir su momento con precisión. Por otro lado, continúa Furry, sólo

I being in one of the states φ_{k} and system II in one of the states ϵ_{pk} . These transitions are not causally determined, and there is no way of finding out *which* transitions occurred, except by making a suitable measurement. In the absence of measurements we know only that the possibilities of the different transitions are respectively ω_k , and that if system I is in the state φ_i system two is in the state ϵ_{pi} » (Furry, 1936a, pp. 395-6).

hace falta dejar que el electrón viaje imperturbable hacia la placa fotoeléctrica con el fin de que nos permita inferir con precisión considerable la correspondiente coordenada del protón (Furry, 1936a, p. 398). Es aquí donde Furry hace uso de su *Suposición A*, diciendo que durante la colisión entre el electrón y el protón, el protón sufre una transición a un estado con un momento bien definido. Este estado, explica Furry, puede determinarse mediante una medición efectuada sobre el electrón. Luego se lleva a cabo una segunda medición en la cual se mide la posición del protón mediante una medición en el electrón. Para Furry, debido a que el observador es libre de elegir la medición que desee realizar después de la dispersión del electrón, las cantidades de momento y posición deben poseer una realidad simultánea. No obstante, advierte, esa realidad simultánea puede estar en conflicto con el Principio de Incertidumbre. Razón por la cual procede a determinar las expresiones de la incertidumbre para las dos mediciones anteriores. Para lo cual establece que la medición del momento implica una incertidumbre Δp despreciable: el problema, explica Furry, aparece al medir la posición. La determinación de la posición posee tres fuentes de incertidumbre Δx : (1) el poder de resolución finito del microscopio, (2) la imprecisión en el enfoque y (3) la tolerancia en el movimiento del protón entre el instante de la colisión y el instante al cual las predicciones se refieren, por lo cual, concluye Furry, el producto de las incertidumbres en la medición del momento y la posición no está dado por $\Delta p \Delta x \sim h$, sino por $\Delta p \Delta x \sim (m/M)/h$. Por tanto, la *Suposición A* es inconsistente con la mecánica cuántica, debido a que no se cumple el cálculo de las incertidumbres para un sistema libre de interferencia mecánica cuyas propiedades posean realidad independiente (Furry, 1936a, pp. 397-9).

Dado que el punto de partida de Furry obedece a una interpretación imprecisa de las intenciones teóricas de EPR, su

resultado, aunque pueda ser matemáticamente correcto, como señala Jammer (1974, p. 223), no concuerda con el sentido de la discusión. Al parecer, la intención de Furry de utilizar esta *Suposición A* obedece a una voluntad de solidificar su crítica a lo que se explica en EPR. Dicha crítica, no obstante, no es ni una defensa de la descripción de la naturaleza hecha por la mecánica cuántica ni es tampoco una suerte de oposición a la Interpretación de Copenhague. De hecho, lo que Furry intenta es, únicamente, demostrar que la suposición de que un sistema posee cantidades reales independientes después de una interacción mecánica no se corresponde con los preceptos de la mecánica cuántica, en concreto, con las relaciones de incertidumbre. Esto no significa, concluye Furry, que la mecánica cuántica no pueda ser considerada como una forma satisfactoria de correlacionar y describir la experiencia (Furry, 1936a, p. 399).

Más tarde, en marzo de 1936, Furry (1936b) publica en *Physical Review* un segundo documento relacionado con el que escribió a finales de 1935. Esta vez se trata de un texto breve, una suerte de aclaración de aquellos elementos que en las nueve páginas del anterior pudieron quedar un tanto indefinidos. Para entonces ya se ha publicado el largo artículo de Schrödinger (1935b) en el cual se expone el experimento imaginario del gato, y Furry hace referencia tanto a éste, como al texto anterior del físico austriaco (1935a). Sin embargo, la réplica se queda en el señalamiento de las diferencias entre su noción y la de Schrödinger. Sin ahondar en los planteamientos Furry modifica ligeramente su *Suposición A*, y afirma que Schrödinger (1935b) la rechaza para elegir el punto de vista de EPR. No obstante, Schrödinger no menciona ni al texto de Furry ni su *Suposición A*. Debido a que este segundo documento de Furry no agrega nada nuevo a la discusión y no contempla un experimento imaginario, ningún análisis detallado se llevará a cabo.

En noviembre de 1935 Henry Margenau, del Sloane Physics Institute de la Universidad de Yale, entregó el manuscrito de un artículo de tres páginas titulado *Quantum-Mechanical Description*, que sería publicado en *Physical Review* en febrero de 1936.

De entrada, para Margenau, el problema no es una cuestión filosófica sobre la definición de la «realidad», sino que se trata de una discusión en torno a un punto fundamental de la axiología de la mecánica cuántica (Margenau, 1936, p. 240). En la introducción ya se anuncia la intención del autor, que explica que al «retirar un simple postulado mecánico-cuántico comúnmente aceptado, varias dificultades conceptuales de la descripción mecánico-cuántica pueden ser eliminadas» (Margenau, 1936, p. 240). El postulado en cuestión es el siguiente:

«Cuando una (sola) medición se realiza en un sistema físico entonces inmediatamente después de la medición el estado del sistema es conocido con certeza. Esto es, si el sistema se encuentra en un estado φ , la medición provoca que la función de estado se transforme en ψ , donde ψ es un estado propio del operador perteneciente al observable medido. Esta suposición está claramente explicada en la interpretación que hacen Einstein-Podolsky-Rosen de la reducción del paquete de ondas, y si se negara que en general una medición produce un estado propio, su conclusión falla y el dilema desaparece. Nos referiremos a este postulado como I» (Margenau, 1936, p. 241)¹⁵⁴.

¹⁵⁴ «When a (single) measurement is performed on a physical system, then immediately after the measurement the state of the system is known with certainty.

El énfasis en la palabra *sola* establece el camino que sigue su tren de ideas, que es el de enfocar el problema de la medición en la mecánica cuántica desde la óptica probabilística. Es a partir de esa óptica que construye todo su razonamiento y ofrece al lector una suerte de ejemplo sobre lanzamientos de un dado, que refiere específicamente a la teoría de probabilidades en su faceta más elemental. Así, Margenau dice que la «suposición de que una sola medición fija un estado ya sea antes o después del acto de la observación es insostenible desde el punto de vista de cualquier teoría de probabilidades razonable» (Margenau, 1936, p. 242)¹⁵⁵. Y continúa diciendo que «un estado mecánico-cuántico es, por tanto, sinónimo de una distribución de probabilidad. Una distribución de probabilidad, sin embargo, no puede ser establecida mediante una sola medición, sino que requiere de un número muy grande de observaciones» (Margenau, 1936, p. 242)¹⁵⁶. La intención del autor es descalificar EPR por basarse solamente en *una* observación cuando la noción probabilística de la mecánica cuántica exigiría una serie de observaciones, de lo contrario, el observador debería aceptar que el resultado obtenido en un solo proceso de medición se refiere solamente

That is to say, if the system is in a state φ , the measurement causes the state function to transform itself into ψ , where ψ is an eigenstate of the operator belonging to the measured observable. This assumption is clearly involved in Einstein-Podolsky-Rosen's interpretation of the reduction of the wave packet, and if it be denied that in general a measurement produces an eigenstate, their conclusion fails, and the dilemma disappears. We shall refer to the postulate stated as I» (Margenau, 1936, p. 241).

¹⁵⁵ «The assumption that a single measurement fixes a state either before or after the act of observation is untenable from the point of view of any reasonable probability theory» (Margenau, 1936, p. 242).

¹⁵⁶ «A quantum-mechanical state is therefore synonymous with a probability distribution. A probability distribution, however, cannot be fixed by a single measurement, but requires a very large number of observations» (Margenau, 1936, p. 242).

al estado del sistema en el instante preciso de la observación, por lo que nuestro conocimiento se circunscribe únicamente al resultado de una observación, más no al estado del objeto observado en términos más generales.

Para Margenau, por tanto, la fijación de un estado propio de la partícula luego de una sola observación se trata de una concepción propia de la física clásica que no concuerda con la mecánica cuántica y, por tanto, el Postulado I debe ser rechazado (Margenau, 1936, p. 242). Sin más que agregar a la discusión, abordándola desde la perspectiva probabilística, Margenau no hace referencia a conceptos el *criterio de realidad*, el *criterio de completitud* o incluso a la descripción de la naturaleza mediante la función de onda.

Esta serie de artículos, generada principalmente (salvo el caso de Bohr y Schrödinger) en las universidades norteamericanas, reunió a un grupo de físicos que, desde las instituciones estadounidenses, se aproximó a la discusión en torno a la mecánica cuántica gracias a la publicación en *Physical Review* del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen. Wolfe, Ruark, Margenau y Furry no pertenecen a una generación demasiado diferente de la de Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Einstein y tantos otros. Sin embargo, los distancia no sólo la geografía o el idioma, sino la forma de afrontar la física. ¿Qué es lo que diferencia a los físicos norteamericanos de los físicos europeos? Podría decirse que esa forma diferente de afrontar la física tiene que ver con la influencia del pensamiento filosófico en unos y otros. Aunque determinar estas diferencias exigiría una investigación detallada de los programas de estudios de las universidades norteamericanas y europeas, que no concierne a este trabajo, es posible inferir, mediante el discurso de algunos de estos artículos, así como a través las ideas que se abordan, la forma de exponerlas y los intereses que se demuestran según el enfoque de la réplica, que los físicos europeos recurren más a un discurso que

incorpora elementos filosóficos y al despliegue retórico del lenguaje, quizá debido a una formación humanística más intensa, mientras que los físicos norteamericanos recurren a un discurso más práctico, conciso, sin atribuciones filosóficas. Estas conclusiones se remiten únicamente a los textos revisados en este trabajo, y es posible que su validez no sea general. No obstante vale la pena mencionarlo porque dichas diferencias se hacen evidentes en este capítulo principalmente donde se contrastan los dos enfoques científicos.

En medio de toda la polémica en torno a la cuántica existe un texto poco conocido y poco estudiado, publicado por la única mujer que apareció durante toda la etapa de documentación de fuentes realizada para esta investigación. Grete Hermann, egresada de matemáticas y filosofía de las universidades de Göttingen y Freiburg durante la década de los años veinte, publicó en 1935, en *Die Naturwissenschaften*, un artículo titulado *The Foundations of Quantum Mechanics in the Philosophy of Nature*¹⁵⁷. El texto pasó desapercibido mayormente (tal y como el descubrimiento de Hermann de un error lógico en la prueba de von Neumann de la imposibilidad de las variables ocultas, también en 1935), y aunque su participación en la polémica no fue directa, su aportación no pasó completamente desapercibida: su relación profesional con Heisenberg y von Weizsäcker durante su estancia en Leipzig en los primeros años de la década de los treinta sin duda pudo haber diseminado algunas de sus ideas mediante el intercambio directo y mediante el artículo que se estudiará aquí. Quizá la ausencia de este texto en un buen número de los estudios realizados en torno a la

¹⁵⁷ Para este trabajo se utiliza la traducción de Dirk Lumma, señalada en la bibliografía.

historia de la mecánica cuántica (en Jammer, 1974, puede encontrarse una referencia; así como en Lenzen, 1969; y Mehra & Rechenberg, 2001a, 2001b) se deba a que se percibe en él un carácter mucho más filosófico que físico. No obstante, Heisenberg (1971), por ejemplo, le dedicó algunas líneas, al igual que von Weizsäcker (1935).

El caso del artículo de Grete Hermann es interesante porque no se trata de una respuesta a EPR, de hecho, el texto se publica en marzo de 1935, incluso antes que el de Einstein, Podolsky y Rosen. Sin embargo, se incluye aquí fuera de su contexto temporal debido a que en sí mismo el texto es una especie de isla con respecto a la discusión general, y su análisis funciona mejor si se realiza tal y como se sucedió la propia existencia del documento: por los márgenes de la polémica. El texto posee un importante andamiaje filosófico y un experimento imaginario que es una suerte de reformulación del microscopio de Heisenberg (1927). El planteamiento de Hermann, que carece de la presentación de axiomas o principios regidores que soporten su formulación, es el siguiente:

«Permitamos que la posición de un electrón sea determinada solamente por un plano particular; dejemos que su ubicación en este plano sea desconocida. Entonces, de acuerdo con las relaciones de incertidumbre, sólo es posible proporcionar la componente del momento a largo del plano; en la dirección perpendicular al plano, el momento permanece indeterminado.

Una medición de la posición del electrón se lleva a cabo mediante iluminación. La luz dispersada, se asume, pasará por un microscopio y será absorbida por una placa fotográfica. Por simplicidad, asumimos que la intensidad de la luz utilizada para esto es tan reducida que todo el

proceso involucra solamente a un solo cuanto de luz. De acuerdo con la dualidad de las nociones onda y partícula, este cuanto de luz será considerado, por un lado, como un corpúsculo que colisiona con el electrón de acuerdo con las leyes clásicas de la colisión elástica, y por el otro lado será considerado como una onda que, dispersada por el electrón, se comporta ante el microscopio de acuerdo con las leyes clásicas de la óptica.

El principio de conservación del momento se aplica a la colisión del cuanto de luz y el electrón: ambos son dispersados en la colisión; sus cambios de momento son opuestos e iguales.

Con el fin de obtener una imagen enfocada del electrón, colocamos la placa fotográfica en el plano de imagen del microscopio, que corresponde con el plano del objeto y donde, de acuerdo con la teoría clásica, todas las ondas que se originan en un punto del plano del objeto se recombinan en un punto. De manera que usamos la imagen clásica de una onda esférica que se expande desde el punto de colisión hacia todas las direcciones y que, cuando golpea la abertura del microscopio, entra a través de la lente. La abertura completa del microscopio está, así, involucrada en este proceso y, por tanto, no tiene sentido distinguir una dirección en particular en la cual el cuanto de luz fue reflejado por el electrón y por la cual ha entrado en el microscopio. Se entiende así que el cambio en el momento que padeció el electrón durante la colisión tampoco puede ser determinado con precisión. Así que uno tendrá que caracterizar el estado del electrón inmediatamente después de la colisión mediante una función de onda que describa

una posición precisa, aunque [esto signifique que se obtendrá] un momento menos preciso comparado con el que se tenía en el estado previo.

Se logra una descripción de la colisión completamente diferente si no se coloca la placa fotográfica en el plano de la imagen, sino en el plano focal del microscopio. En este caso, también, la placa mostrará una imagen precisa, ya que el cuanto de luz tiene la suficiente energía para excitar solamente a un único átomo en la placa. Este punto de la placa focal golpeada por el cuanto de luz es característica de una dirección particular a lo largo de la cual la luz entró al microscopio. La idea intuitiva de la imagen ondulatoria, que en este caso se usa para interpretar el resultado observado, es la de un haz de rayos paralelos que son recombinados a través de su refracción en un sólo punto del plano focal de las lentes. La dirección a lo largo de la cual el cuanto de luz entró en el microscopio está, por tanto, determinada; sin embargo, la posición en el plano del objeto en el cual se encontraba al comienzo, después de la colisión con el electrón, permanece indeterminada. Si el momento del cuanto de luz antes de la colisión es conocido, entonces el cambio en su momento también está determinado por la dirección del cuanto de luz después de la colisión; y por tanto, de acuerdo con el principio de conservación del momento, el cambio en el momento del electrón también está determinado. Así que, aunque en este caso nada ocurrió en el electrón que no ocurriera en el primer caso, uno debe caracterizar su estado después de la colisión mediante una función de onda con una posición borrosa y un momento relativamente preciso.

La yuxtaposición de estas diferentes posibilidades significa, aparentemente, que es posible llegar a diferentes funciones de onda para el mismo sistema y en el mismo instante de tiempo —a saber, para el electrón en el momento inmediatamente después de la colisión con el cuanto de luz— dependiendo, digamos, en cada marco de observación que se tenga a mano. La caracterización mecánico-cuántica no está, como la clásica, atribuida al sistema físico, como si fuera, “en sí misma”, por ejemplo, independiente de la observación mediante la cual uno adquiere conocimiento sobre él.

¿Qué revisión del principio de causalidad de la física clásica debe hacerse en base a este resultado?» (Hermann, 1935, pp. 40-41)¹⁵⁸.

¹⁵⁸ «Let the position of an electron be determined only by a [particular] plane; let its location in this plane be unknown. Then, according to the uncertainty relations, only the momentum component lying within the plane can be given; in the direction perpendicular [to the plane], the momentum remains undetermined. // A measurement of the electron position is to be carried out by illumination. The deflected light is [assumed] to pass a microscope and to be absorbed by a photographic plate. For simplicity, we assume that the intensity of the light employed for doing this is reduced such that the entire process involves only a single light quantum. In accordance with the dualism of the wave and particle pictures, this light quantum on the one hand is to be considered as a corpuscle which collides with the electron according to the classical laws of the elastic collision, and on the other hand as a wave which, deflected by the electron, evolves in the microscope according to the classical laws of optics. // The principle of momentum conservation applies to the collision of light quantum and electron: both are deflected in the collision; their momentum changes are opposite and equal. // In order to obtain a focused image of the electron, we place the plate in the microscope's image plane which corresponds to the object plane and where, according to classical theory, all wavelets originating in a point of the object plane are recombined in one point. So we use the classical picture of a spherical wave that expands from the point of collision into all directions and that, insofar as it hits the aperture of the microscope, enters through [the microscope's] lenses. The

Este largo planteamiento puede explicarse de la misma manera en que Bohr respondió a EPR apenas meses después de la publicación del artículo de los tres autores: el sistema físico que se observa no puede desligarse del sistema de instrumentación que el científico dispone para

entire aperture of the microscope is thus involved in this process, and therefore it does not make any sense [...] to distinguish a particular direction into which the light quantum was reflected by the electron and along which it entered the microscope. It thus follows that the change in momentum which the electron underwent in the collision cannot be determined precisely either. So one will have to characterize the state of the electron immediately after the collision by a wavefunction that describes a sharp position, yet a momentum which is less sharp compared with [the one in] the previous state. // One reaches a completely different description of the collision if one does not mount the plate in the image plane, but in the focal plane of the microscope. In this case, too, the plate will show a sharp image, for the light quantum only has enough energy to excite a single atom on the plate. This point of the focal plate hit by the light quantum is characteristic of a particular direction along which the light entered the microscope. The [intuitive] idea of the wave picture, which in this case is used to interpret the observed outcome, is accordingly that of a bundle of parallel rays which are recombined through their refraction in a single point of the focal plane of the lenses. The direction along which the light quantum entered the microscope is therefore fixed; yet the position on the object plane at which it started after the collision with the electron remains undetermined. If the momentum of the light quantum before the collision is known, then its change in momentum is also determined by the direction of the light quantum after the collision; and thus, according to the principle of the conservation of momentum, [the change in momentum] of the electron [is determined] as well. So even though in this case nothing happened to the electron that did not happen in the first case, one now has to characterize its state after the collision by a wavefunction with a blurred position and a relatively sharp momentum. // The juxtaposition of these different possibilities apparently means that one can be led to different wavefunctions for the same system and at the same moment in time *—viz.* for the electron at the time immediately after the collision with the light quantum— depending on the, let us say, framework of observation on hand. The quantum-mechanical characterization is not, like the classical one, attributed to the physical system, as it were, “in self”, i.e., independently of the observation through which one acquires knowledge of it. // What revision of the principle of causality of classical physics has to be made on the basis of this result? (Hermann, 1935, pp. 40-41).

lograr la observación. Es decir, la configuración experimental es parte del fenómeno observado. La noción ya resulta familiar. Sin embargo, Hermann se centra, hacia el final de su exposición, en la posibilidad de que diferentes funciones de onda representen matemáticamente un mismo estado del sistema. Esta posibilidad se aborda en los comentarios de Einstein sobre EPR en el marco de la correspondencia con Schrödinger en el verano de 1935, *después* de la publicación del artículo de Hermann.

Centrando sus argumentos en el problema, quizá para entonces ya un tanto añejo, de la causalidad (Einstein, Schrödinger y Bohr ya no lo abordaban en sus discusiones después de la publicación en 1931 del artículo de Einstein, Tolman y Podolsky), Hermann pasa por un lado de lo que sería el verdadero problema de la cuántica según la formulación de EPR que hizo Einstein en la correspondencia con Schrödinger: la asignación de dos funciones de onda distintas para un mismo estado del sistema. Su enfoque, sin embargo, tiene una connotación más filosófica y conceptual que experimental o empírica. La idea planteada en el experimento imaginario conduce a Hermann a decir que el proceso de observación condiciona la forma de ver los fenómenos en la medida en que se aplican diferentes procesos experimentales para obtener diferentes resultados con respecto a las magnitudes deseadas. El problema que se encuentra aquí en torno al criterio de causalidad reside en que al obtener un resultado impreciso de una medición no sería posible predecir el comportamiento futuro de la partícula que se está observando: el propio proceso de observación interfiere en el curso de la partícula y, por tanto, en el desarrollo posterior del curso de eventos. Para Hermann, si el curso de eventos es interrumpido por la observación fijando la partícula en una posición que, aplicando el Principio de Incertidumbre, es imprecisa, entonces no es posible calcular con precisión la proyección futura de su comportamiento. Su

resolución al problema, no obstante, no pasa por la estipulación de principios, como hizo Bohr con el Principio de Complementariedad, ni por la proposición de un criterio, como en EPR, sino por el análisis de los conceptos experimentales asociados a la causalidad. La resolución de Herman a su planteamiento experimental imaginario es la siguiente:

«Dos puntos de las anteriores consideraciones son cruciales para obtener una respuesta: Los límites de la calculabilidad predictiva de eventos futuros ha resultado ser, de hecho, insuperable en principio; aun así no existe una sucesión de eventos para la cual no puedan ser encontradas las causas en el marco del formalismo mecánico-cuántico.

Ambas afirmaciones parecen contradecirse una a la otra. Mientras que la primera establece que los límites inevitables se establecen para la aplicación de las inferencias causales y al control sobre la naturaleza que se presta a los seres humanos, la segunda enfatiza sobre la aplicación sin restricciones de la representación causal a la cual todos los procesos naturales están sujetos siempre con respecto a todos los rasgos físicos que los caracterizan.

La resolución para este conflicto sólo puede tener éxito en base a la discusión de esos conceptos que juegan un papel crucial en los resultados mecánico-cuánticos mencionados: el concepto de calculabilidad predictiva del curso de la naturaleza, por una parte, y el concepto de conexión causal por el otro.

Si la relación entre causa y efecto consiste en nada más que el hecho de que el efecto puede ser previsto cuando la causa es conocida, entonces no existen causas para eventos que, en principio, no pueden ser calculados

predictivamente. La mecánica cuántica presupone y requiere de una explicación basada en leyes naturales también para eventos que no son calculables predictivamente; este hecho, por tanto, muestra que igualar ambos conceptos se basa en una confusión. La conexión causal concierne solamente a la necesaria secuencia de los eventos mismos. La posibilidad de calcularlos predictivamente en base a entender las relaciones causales proporciona el criterio para la correcta aplicación del concepto de causalidad. La mecánica cuántica nos obliga a distinguir cuidadosamente ambos conceptos» (Hermann, 1935, pp. 42-3)¹⁵⁹.

¹⁵⁹ «Two points of the preceding considerations are crucial for an answer: The limits of predictive calculability of future events have indeed turned out to be in principle insurmountable; yet there is no course of events for which no causes could be found in the framework of the quantum-mechanical formalism. // Both claims seem to contradict each other. While the first one states that unavoidable limits are set to the application of causal inferences and to the control over nature lent to human beings, the second one emphasizes the in principle unrestricted applicability of causal representation to which every natural process is always subjected with regard to all physical features that characterize it. // The resolution to this conflict can only succeed on the basis of a discussion of those concepts which play a crucial role in the quantum-mechanical results mentioned: the concept of predictive calculability of the course of nature on the one hand and the [concept of] causal connection on the other hand. // If the relation between cause and effect consists of nothing more than the fact that the effect can be predicted when the cause is known, then there exist no causes for events which can in principle not be calculated predictively. Quantum mechanics presupposes and calls upon an explanation based on natural law also for events which are not predictively calculable; this fact therefore shows that equating both concepts is based on a confusion. The causal connection immediately concerns only the necessary sequence of the events themselves. The possibility of calculating them predictively on the basis of understanding causal relationships provides the criterion for the correct application of the concept of causation. Quantum mechanics forces [us] to distinguish both concepts carefully» (Hermann, 1935, pp. 42-3).

Así, el análisis de Hermann es un análisis conceptual. Para ella, el problema de la causalidad está en la confusión de términos que en el lenguaje de la física se interpretan de la misma manera, y en el lenguaje filosófico son fundamentalmente diferentes: (1) la calculabilidad predictiva y (2) la conexión causal. Según Hermann, el hecho de que la calculabilidad predictiva, es decir, la posibilidad de calcular empírica o matemáticamente el curso de eventos futuros de una partícula observada (en este caso con un microscopio) no conlleva la necesaria desconexión de sus causalidades, es decir, que no sea posible calcular dicho curso de eventos futuros no quiere decir que no existan y no estén conectados entre sí. Por tanto, continúa:

«¿Pero, qué hay con respecto al criterio de causalidad? La mecánica cuántica no ha confiado en dicho criterio de buena manera, y lo extrae, tal y como lo hace la física clásica, de la posibilidad de predecir eventos futuros. En contraste con la física clásica, no obstante, ha desechado la suposición de que cada afirmación causal puede inmediatamente ser probada mediante la predicción de su efecto. Aún para eventos que no pueden ser calculados por adelantado, la mecánica cuántica proporciona una explicación causal y la verifica mediante predicciones. Pero esta verificación es lograda de una manera bastante rotunda: para eventos que no pueden ser calculados predictivamente su causa es inferida retroactivamente; y asumiendo que esta causa existe, uno puede entonces obtener predicciones de eventos futuros cuya ocurrencia puede ser verificada empíricamente. De esta manera el oscurecimiento de la placa en el ejemplo que nos concierne se rastrea hacia la colisión entre el electrón y el cuanto de

luz, de lo cual uno puede inferir el estado del electrón que sigue siendo accesible a la observación [...] Por tanto, la mecánica cuántica no ha contradicho la ley de causalidad en absoluto, sino que la ha clarificado y ha removido de ella otros principios que no están necesariamente conectados a ella» (Hermann, 1935, pp. 42-3)¹⁶⁰.

Así, para Hermann, la mecánica cuántica plantea la posibilidad de inferir, a partir de las mediciones, una causa probable de un efecto que puede verse empíricamente (aunque sea un tanto impreciso), de manera que a partir de esas causas inferidas es posible inferir (de nuevo) el curso de eventos futuros.

¿Cuál es la relación del experimento imaginario de Grete Hermann con los experimentos imaginarios estudiados en relación a las discusiones en torno a la mecánica cuántica? El texto de Hermann pasaría prácticamente desapercibido en su momento. Su trabajo estuvo cerca de los físicos más reconocidos en el momento, y fue publicado en una de las revistas más prestigiadas, donde el debate tenía lugar; sin

¹⁶⁰ «But what about the criterion of causality? Quantum mechanics has to rely on such a criterion as well and extracts it, just as classical physics does, from the possibility of predicting future events. In contrast to classical physics, however, it has dropped the assumption that every causal claim can immediately be tested via the prediction of its effect. Even for events which cannot be calculated in advance, quantum mechanics provides a causal explanation and verifies it via predictions. But this verification is achieved in a [rather] roundabout way: from events which cannot be calculated predictively their cause is inferred retrodictively; and assuming this cause existed, one can then in turn derive predictions of coming events whose occurrence can be verified empirically. In this way the blackening of the plate in the example dealt with is traced back to the collision between electron and light quantum, from which one can infer the electron state that is still accessible to observation [...] Quantum mechanics has therefore not contradicted the law of causality at all, but has clarified it and has removed from it other principles which are not necessarily connected to it» (Hermann, 1935, pp. 42-3).

embargo, su repercusión, en el momento, fue mínima. El interés que despierta aquí el texto de Hermann, además de que constituye uno más de los eslabones de la larga cadena de experimentos imaginarios asociados a las polémicas de la mecánica cuántica, tiene que ver, principalmente, con dos elementos comunes con otros experimentos imaginarios posteriores a EPR: (1) la noción, importantísima, de que el proceso de observación, es decir, la configuración experimental, juega un papel rotundo y fundamental en el conocimiento que puede tenerse del estado de un sistema cuántico, más allá de su propia funcionalidad como medio de observación; esta primera noción nos conduce a la segunda: (2) que a partir de EPR, donde el sistema de medición y la partícula observada (que se usaban en los experimentos imaginarios previos) son sustituidos por dos partículas que, sin más, interactúan entre sí, tanto Hermann como otros autores que ya se han revisado antes, regresan a esa primera forma de descripción del experimento imaginario en la cual una de las dos partículas se considera como un elemento del instrumento de medición, es decir, se opone, a la descripción imprecisa de la configuración experimental de EPR, la precisión de los elementos técnicos. De esta manera, el experimento imaginario de Grete Hermann se encuadra, no sólo por el momento de su publicación o por su temática, en la polémica en torno a la mecánica cuántica, sino también gracias a su construcción experimental y teórica.

Además, es importante prestar atención al hecho de que no todos los documentos publicados en la época en que la discusión ya era un fenómeno público en la comunidad científica mundial se encuentran en el centro neurálgico de la polémica. Es decir, la sola aparición de un experimento imaginario publicado en una revista especializada de elevado prestigio no era razón suficiente para que el argumento expresado ahí fuera tomado en cuenta en la discusión general. Lo que sucedió en el caso del texto de Hermann es una muestra de que el

escenario de la discusión ya se había alejado de los teatros europeos: publicado en alemán, el documento de Hermann ya no se ofrecía de inmediato a la mayor parte de los actores de la polémica que por entonces comenzaba su mudanza al idioma inglés, hecho que marginó, en gran medida, las ideas de la autora y mantuvo su texto en una suerte de anonimato público.

¿Cómo, sin embargo, es posible realizar este análisis si el texto de Hermann se publicó meses antes que el de Einstein, Podolsky y Rosen? El boom de la polémica en torno a la cuántica en lengua inglesa, que tuvo lugar principalmente en revistas norteamericanas, ya había comenzado con la publicación, en 1931, del artículo de Einstein, Tolman y Podolsky, y continuaría luego con otros artículos publicados, antes de EPR, en *Science* (por ejemplo, los textos de C.G. Darwin (1931a y 1931b)). Ciertamente la explosión de ese cambio de idioma llega a su cumbre con la publicación de EPR en mayo de 1935, de manera que luego de ello las respuestas, como se ha visto, se publicaron directamente en inglés (Bohr, 1935; entre otros), o bien, como en el caso de Schrödinger, aparecieron casi simultáneamente, en inglés y alemán, textos de una naturaleza muy similar. Pero el texto de Hermann está enclavado en medio de ese panorama, su primera traducción al inglés data de un ridículamente tardío año de 1999. Ella no realizó viajes académicos a Estados Unidos, Inglaterra o Dinamarca antes de 1935, y cuando salió de Alemania fue debido a razones políticas. Se movía, principalmente, en un ambiente que iba entre la filosofía y las matemáticas, siempre en los lindes de la física teórica.

El caso del experimento imaginario de Hermann resulta interesante por todos estos elementos, y conduce a pensar que a pesar de esa suerte de *democratización* de la polémica, siempre hubo textos y científicos que permanecieron al margen por no encontrarse entre los nombres más reconocidos o bien por no estar en la órbita de las

publicaciones más determinantes del momento. Para cuando Hermann publica su artículo en *Die Naturwissenschaften*, la discusión ya se había mudado casi por completo a *Physical Review*, incluyendo así a físicos como Margenau, Wolfe, Ruark, entre otros, y excluyendo, quizá pasivamente, pero al fin y al cabo excluyendo, a participantes como Grete Hermann. He aquí, pues, un caso de interesante sobre la relación entre ciencia y el público en el seno de la propia comunidad científica.

El panorama de la discusión en torno a la mecánica cuántica ofrece diversas aristas desde donde es posible abordarlo. Sitiado inicialmente en los círculos cerrados de las conferencias de Como y Solvay a finales de la década de los años veinte, donde solamente los que ya habían sido iniciados tiempo atrás en la materia podían acceder a las discusiones, los descubrimientos y la comunicación con los colegas, el espectro de participación se ofrecía por demás reducido, y las discusiones de viva voz eran el método por excelencia para el discurrir de las ideas. Un número relativamente reducido de físicos cercaba los espacios públicos del hacer científico en torno a la cuántica. Los escenarios los reunían cada tanto tiempo y los encuentros y el curso de las ideas se daba mayormente en esos congresos, en visitas a universidades, conferencias, etc. Quienes no tenían una invitación no podían sino ser un público ausente.

Luego, a principios de la década de 1930, la forma de difundir las ideas cambió rotundamente. El movimiento de los físicos se vio limitado por la situación política que se empezaba a gestar en Europa, y comenzó, entonces, el largo éxodo científico hacia Inglaterra, Estados Unidos y otros países. La comunicación padeció las consecuencias del estado de cosas, y el desarrollo común de las actividades académicas y de investigación se vio gravemente alterado (para un panorama de la situación política de la física en tiempos de la Segunda Guerra Mundial ver Kragh, 2007). El modo habitual de hacer ciencia se enfrentó a un

momento de cambio donde las visitas, encuentros y conferencias fueron disminuyendo considerablemente en los ámbitos centroeuropeos. Se redujeron los encuentros entre científicos y, por otro lado, crecieron las conferencias de divulgación, las charlas a públicos no especializados y las publicaciones como medio de comunicación. El público y los actores científicos cambiaron. Aquellos físicos que vieron desde fuera los primeros años de la discusión, y con un obvio desfase de varios años (había que esperar a la publicación de las actas y transcripciones de los congresos y conferencias, que siempre se sucedían dos o tres años después) pudieron entonces, cuando las revistas comenzaron a acoger la polémica, convertirse, primero, en un público activo, y más tarde en actores ellos mismos. La fosa, de la que habla Bernadette Bensaude-Vincent (2000), había sido, durante la década de 1920, tanto la lejanía geográfica entre científicos como el espacio privado de los únicos y exclusivos actores, así como el idioma vehicular de la discusión; sin embargo, a partir de la década de 1930, con el cambio de idioma del alemán al inglés, las publicaciones en revistas de gran tiraje y los movimientos migratorios de científicos, esa fosa fue estrechándose y los que antes jugaban el papel de observadores lejanos pudieron participar directamente en el cotejo. Además, esta mudanza del núcleo de las discusiones desde el centro de Europa hasta Inglaterra y Estados Unidos principalmente, sucedió también en buena medida gracias al apoyo económico de los gobiernos de dichos países a la investigación en física atómica (interesados, desde luego, en la carrera armamentística), los nuevos laboratorios, y la conjunción de un considerable grupo de científicos de diversas nacionalidades que ahora se encontraban en un mismo sitio trabajando en colaboración, redondeó un cambio importantísimo en el desarrollo de la física.

Sin embargo, hubo quienes que no formaron parte de aquel éxodo científico, sino del más amplio y numeroso, y en muchos casos

trágico, éxodo humano, por hacer una escueta diferencia. La participación de Hermann en la oposición al régimen Nazi la llevó a emigrar a Dinamarca en 1936 y más tarde a Francia y luego a Inglaterra. Su marcha no estuvo ligada a conexiones científicas sino a la necesidad de alejarse de los focos de la guerra. A partir de aquello, su trabajo se centraría más en la filosofía e incluso en la política. Su aportación al debate en torno a la cuántica no llegó más lejos porque ya la atención estaba centrándose en los núcleos de habla inglesa, es decir, la fosa no desapareció: se ubicó en otro espacio, y Hermann estaba ahí.

Pero el artículo de Grete Hermann no rompió las barreras de aquella fosa, y sin embargo, pudo hacerlo. La aparente lejanía de su texto con el centro neurálgico de la discusión pudo ser evitada gracias a otro artículo que, sin embargo, no llegó nunca a publicarse, no al menos en el momento en que habría beneficiado al texto de Hermann. La historia, en general, está llena de sucesos como éste.

Después de la publicación de EPR, Wolfgang Pauli, en un intercambio de correspondencia con Werner Heisenberg, le sugirió que escribiera una respuesta al artículo de Einstein, Podolsky y Rosen. Heisenberg, durante aquel verano de 1935, escribe su propia respuesta a EPR. Sin embargo, esta respuesta nunca será publicada. Queda constancia de ella en el *Archives for the History of Quantum Physics* (AHQP-45) y en el volumen editado en 1985 con la correspondencia científica de Pauli (ver Bacciagaluppi & Crull, 2009).

El texto nunca publicado de Heisenberg, titulado *¿Es posible una mecánica cuántica determinista?*, es importante, en estas instancias, por dos motivos fundamentales: (1) además de tratarse de una respuesta a EPR y de contener un experimento imaginario, marcaría el regreso de Heisenberg después de varios años de ausencia en la discusión, y (2) en dicho texto se hace una mención al artículo de Grete Hermann (1935). Sobre el experimento imaginario sólo se dirá que se trata del mismo

experimento imaginario, o de una versión prácticamente idéntica, que Heisenberg refirió a Einstein en una carta en 1927, y que tiene que ver con una partícula α que incide en una rejilla de difracción (y del que ya se habló en un capítulo anterior). Sobre el texto no publicado de Heisenberg se puede decir, siguiendo a Bacciagaluppi & Crull (2009, p. 380), que la idea general pasa por la división conceptual entre el observador y el objeto observado, una división a la que Heisenberg se refiere como *el corte* [*the cut*, en inglés, *Schnitt*, en el original en alemán], es decir, la separación entre las partes del sistema que deben ser tratadas desde la mecánica cuántica y aquellas que deben ser tratadas desde las nociones clásicas. Los dos elementos principales en relación a la idea del *corte* son que (1) la ubicación del corte es arbitraria y (2) que la cualidad estadística sólo puede aparecer en la ubicación del corte. Es decir, si el *corte* es la separación entre los elementos que deben ser tratados según la mecánica clásica y según la mecánica cuántica, es ahí, en la frontera, donde se sucede el carácter probabilístico de la cuántica (Bacciagaluppi & Crull, 2009, p. 381). Más adelante se verá que estas ideas de Heisenberg tienen relación con las nociones en torno al experimento del gato de Schrödinger.

La idea del *corte* es lo que quizá, acercaría las nociones de Heisenberg, en aquel texto no publicado, y las de Hermann. Más allá de la intención de conciliar las diferencias entre la mecánica cuántica y el principio de causalidad, el concepto de la separación entre lo que debe ser cuántico y lo que debe ser clásico subyace en la noción de Hermann. La causalidad retroactiva que proponer Hermann es una suerte de *corte*. Es decir, habría una forma de la causalidad en la concepción clásica, y *otra* forma de causalidad, la retroactiva, propia para la concepción cuántica. Dicho así, la referencia de Heisenberg en la carta a Pauli en 1935, donde le habla del texto de Grete Hermann, no es, en absoluto, gratuita. Sin embargo, la respuesta de Heisenberg a EPR nunca llegó a

publicarse, y la posibilidad de que las ideas de Hermann se proyectaran más allá de aquel ámbito, que ya comenzaba a cerrarse, desapareció.

El mito del gato de Schrödinger: la pieza que logra la continuidad de la discusión. El carácter «interminado» de la polémica. Un pequeño experimento imaginario que soporta el paso de las décadas. Microcosmos vs. Macrocósmos. Los elementos pintorescos. El asesinato del gato: un segundo experimento imaginario.

*Y sí haremos, pues estamos
en mundo tan singular,
que el vivir sólo es soñar;
y la experiencia me enseña,
que el hombre que vive, sueña
lo que es, hasta despertar.*
Pedro Calderón de la Barca
La vida es sueño

En 1935, meses después de la publicación de EPR, luego de las primeras respuestas al artículo de los tres autores, y luego también de la correspondencia mantenida con Albert Einstein, Erwin Schrödinger publicó en *Die Naturwissenschaften* un artículo dividido en tres partes titulado *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik (La situación actual de la mecánica cuántica)*. Schrödinger ya había publicado un texto de similares características en *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, poco antes en ese mismo año. Sin embargo, sería el contenido de este nuevo artículo el que generaría más polémica y pasaría a la historia como

el famoso documento donde se expone el experimento imaginario del gato de Schrödinger.

El artículo¹⁶¹ consta de 15 apartados, relativamente breves, donde el autor parte de la descripción de modelos físicos según la concepción clásica para llegar, finalmente, a la pregunta clave: ¿puede considerarse al entrelazamiento como una cualidad o ley natural, o bien se trata de un efecto de los instrumentos de medición? Schrödinger (1935b) parte exactamente desde donde lo dejó en el artículo previo: el concepto de entrelazamiento.

El texto es una larga disertación que va desde la diferencia entre la física clásica y la mecánica cuántica hasta los efectos más inesperados de la interacción entre dos partículas. El tono general del artículo no es el de una respuesta, una réplica o una demostración, sino el de un esbozo de historia actual, de historia comparada incluso, donde se describen constantemente las diferencias entre la física clásica y la física cuántica. No obstante, esta comparación se sucede sin recurrir a la confrontación directa, de manera que el lector acude a un discurso que es una mezcla de explicación científica y revisión histórica. Es notable la forma sutil en que conceptos como *entrelazamiento* y *superposición* atraviesan todo el texto casi sin llamar la atención hasta que se llega al punto en que es completamente necesario abordarlos directamente.

Al comienzo, luego de un breve párrafo dedicado a los modelos físicos como representaciones de estados reales de los fenómenos, Schrödinger aborda el estado de la interpretación estadística de la mecánica cuántica, sin embargo, lo hace desde una perspectiva más histórica que de debate científico, sin hablar de incompletitud, o de la descripción de la realidad. Escribe Schrödinger:

¹⁶¹ Las citas pertenecen a la traducción al inglés de J.D. Trimmer, publicada en *Proc. Am. Phil. Soc.*, 124:323–338, 1980. Cuando se haga referencia al original en alemán, así se hará saber.

«Esta última interpretación [estadística] es especialmente atractiva para aquellos que están familiarizados con el punto de vista estadístico desarrollado durante la segunda mitad del siglo pasado, sobre todo teniendo en cuenta que fue este punto de vista el que dio luz a la teoría cuántica, a decir, en la forma de un problema central en la teoría estadística del calor: la teoría de Max Planck de la radiación del calor (diciembre de 1899). La esencia de esta teoría es precisamente que uno casi nunca conoce todos los elementos determinantes de un sistema, sino por lo general [conoce] *mucho menos*. Para describir un objeto real en un momento dado, uno se basa, por tanto, no en *un* estado del modelo, sino en un, así llamado, conjunto de Gibbs. Esto es, un conjunto de estados idealizado, es decir, imaginarios, que refleja nuestro limitado conocimiento del objeto real. Se considera, entonces, que el objeto se comporta en la misma forma que un *estado arbitrario* de este conjunto. Esta idea ha tenido una tremenda aceptación. Su mayor triunfo fue en aquellos casos donde no todos los estados del conjunto corresponden a un comportamiento idéntico observado del objeto. Resultó que en ese caso el objeto, de hecho, varía en su comportamiento exactamente como se predijo, ahora esto, ahora aquello [*bald so, bald so*, en el original en alemán] (fluctuaciones termodinámicas)» (Schrödinger, 1935b, p. 326-7)¹⁶².

¹⁶² «The latter interpretation is extremely attractive to those who are familiar with the statistical viewpoint developed during the second half of the last century, especially if one realises that it was this viewpoint that gave rise to the quantum theory, namely in the form of a central problem of the statistical theory of heat:

Dos elementos se señalan de la cita anterior: (1) que el conocimiento que se puede tener de un sistema es un conocimiento limitado, y (2) la fórmula evocada al final del párrafo: «el cuerpo es ahora de esta manera, ahora de aquella», con la que se hace una velada referencia al concepto de la *superposición*.

La conclusión que Schrödinger obtiene al principio del artículo expresa una suerte de dicotomía semejante a las nociones planteadas en la primera parte de EPR: o bien todos los valores poseen realidad en todo momento, o bien sólo poseen realidad en el momento preciso de la observación (Schrödinger, 1935b, p. 326). Lo que ofrece a continuación es ya, de manera concreta y directa, las dudas que produce el tratamiento probabilística de la mecánica cuántica como forma de «modelar» la realidad:

«Las dudas emergen, sin embargo, cuando observamos que la incertidumbre también afecta a las cosas ordinarias que pueden verse y sentirse, donde el término “borroso” es sencillamente erróneo. El estado de un núcleo radioactivo es probablemente borroso en tal grado que ni el momento de la desintegración ni la dirección en la cual la partícula α

Max Planck's theory of thermal radiation, Dec. 1899. The essence of that theory is exactly that one almost never knows all determining elements of a system, but usually *far fewer*. To describe a real object at any given moment, one therefore uses not just *one* state of the model, but rather a so-called *Gibbs ensemble*. This is an ideal, i.e. imaginary, collection of states mirroring our restricted knowledge about the real object. The object then is supposed to behave in the same way as an *arbitrary state* from this collection. This idea has had tremendous success. Its greatest triumph was in those cases where *not* all states from the collection correspond to an identical observed behaviour of the object. It turned out that the object in that case indeed varies in its behaviour exactly as predicted (thermodynamic fluctuations)» (Schrödinger, 1935b, p. 326-7).

abandona el núcleo, se conocen. Dentro del núcleo, la imagen borrosa no nos molesta. La partícula que abandona el núcleo puede visualizarse como una onda esférica con movimiento estable alejándose del núcleo en todas direcciones y que incide en una pantalla cercana en toda su extensión. La pantalla, sin embargo, no se ilumina de una manera constante, tenue. En cambio, se ilumina en *un* instante y en *un* punto en particular. A decir verdad, se ilumina a veces aquí, a veces allá, porque resulta imposible realizar el experimento con un sólo átomo radioactivo» (Schrödinger, 1935b, p. 326)¹⁶³.

El término *borroso* que utiliza el autor para explicar el resultado de la aplicación de las relaciones de incertidumbre a los sistemas macroscópicos, se explica más adelante con detalle, luego del planteamiento del experimento imaginario. Para Schrödinger, existe una forma en que ocurren los fenómenos, una *forma suya*, es decir, una naturaleza intrínseca de los fenómenos, podría decirse incluso una *inmanencia*, sin ahondar demasiado en el caso; y existe, por otro lado, una forma de explicar los fenómenos, que se sucede mediante la formulación intuitiva de esa imagen-modelo de la que se hablaba antes.

¹⁶³ «Doubts arise, however, when we notice that the uncertainty can also pertain to coarse things that can be felt and seen, where the designation "smeared out" is simply wrong. The state of a radioactive nucleus is probably smeared out in such a way and to such an extent that neither the time of its decay nor the direction in which the α -particle leaves the nucleus is determined. Inside the nucleus, this smearing out does not bother us. The particle exiting the nucleus can be visualized as a spherical wave steadily moving away from the nucleus in all directions and hitting a nearby screen in its full extent. The screen does not light up in a steady, dim way, however. Instead, it flashes up in one instant at *one* particular place. To be fair, it flashes sometimes here, and sometimes there, because it is impossible to do the experiment with a single radioactive atom» (Schrödinger, 1935b, p. 326).

En ciertos niveles, para Schrödinger, la imagen de un fenómeno puede ser «borrosa», sin embargo eso no importará, porque su *definición* (dicho como contrapunto de *borroso*) no es necesaria para que elaborar una explicación intuitiva del fenómeno. En cambio, los fenómenos macroscópicos se verifican, como resulta evidente, mediante la observación, son tangibles, y por tanto no requieren de la construcción de una imagen intuitiva, de un modelo. De ahí que la aplicación de un principio, como el Principio de Incertidumbre (hay que señalar que en ningún momento señala al Principio de Incertidumbre como tal, sino que habla simplemente de *incertidumbres*, como tampoco hace referencia a Heisenberg), o de un fenómeno como la *superposición*, a un sistema macroscópico, tenga como consecuencia un problema considerable, ya que su imagen no puede ser concebida como una imagen «borrosa», es decir, la realidad macroscópica no requiere de una imagen, es imagen en sí misma.

En suma, un modelo físico representa un estado de cosas de la naturaleza. Luego, la mecánica cuántica construye modelos para explicar los estados en que se encuentran las partículas elementales. Ahora bien, la forma de explicar esos estados sería mediante una distribución de probabilidades, según lo que establece la mecánica cuántica, de tal guisa que mientras no sea posible realizar una observación del estado real de la partícula, el modelo de su estado la describe probabilísticamente, de manera que, en referencia a su posición, por ejemplo, la partícula puede estar aquí o allá (*bald so, bald so*), proporcionando una imagen borrosa de su posición, un modelo en el cual se *superponen* las dos posibles posiciones de la partícula. La pregunta que Schrödinger se plantea aquí es, entonces, si esas posiciones son reales en todo momento o sólo lo son cuando se realiza una observación de la partícula. Con esto en mente, el autor ofrece el experimento imaginario del gato, o como él mismo lo llama, «un caso bastante ridículo»:

«También se pueden construir casos muy burlescos. Un gato se coloca en una cámara de acero, cerrada, junto con la siguiente máquina infernal (uno debe estar protegido contra la interacción directa del gato): en el tubo de un contador Geiger hay una pequeña cantidad de sustancia radioactiva, tan pequeña que, luego de que transcurre una hora, quizá uno de los átomos se desintegre, o quizá no; si esto sucede, se envía una señal que activa la liberación de un martillo que aplasta un pequeño frasco de ácido prúsico [ácido cianhídrico, cianuro]. Si uno abandona este sistema durante una hora entonces podría decirse que el gato sigue vivo si ningún átomo se ha desintegrado. El primer átomo desintegrado lo habría envenenado. La función ψ de todo el sistema se explicaría de esta forma: que en dicha expresión el gato vivo y muerto están mezclados o “emborrionados entre sí”, a partes iguales» (Schrödinger, 1935b, p. 327)¹⁶⁴.

¹⁶⁴ «It is also possible to construct very burlesque cases. Imagine a cat locked up in a room of steel together with the following hellish machine (which has to be secured from direct attack by the cat): A tiny amount of radioactive material is placed inside a Geiger counter, so tiny that during one hour *perhaps* one of its atoms decays, but equally likely none. If it does decay then the counter is triggered and activates, via a relais, a little hammer which breaks a container of prussic acid. After this system has been left alone for one hour, one can say that the cat is still alive *provided* no atom has decayed in the mean time. The first decay of an atom would have poisoned the cat. In terms of the ψ function of the entire system this is expressed as a mixture of a living and a dead cat» // Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, *so* wenig, daß im Lauf einer Stunde *vielleicht* eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zahlrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde

Schrödinger encuentra, en esa cualidad *borrosa* de los modelos probabilísticos, la coexistencia de los estados posibles del sistema. No hace, como Einstein, un encadenamiento de efectos como en el experimento imaginario del barril de pólvora, sino que, partiendo quizá de una formulación como ésta, Schrödinger identifica como el problema verdadero de la cuestión, la superposición de los estados, y trata de evidenciarlo mediante el experimento imaginario del gato, donde los estados vivo y muerto se superponen cuando se les aplica una representación probabilística. El experimento del gato aparece en el último párrafo de la primera parte del documento, y a manera de conclusión, Schrödinger escribe:

«Es típico de estos casos que una incertidumbre originalmente referida al dominio atómico se vea transformada en una incertidumbre de lo que es ordinario para los sentidos [grobsinnliche], la cual puede entonces ser *resuelta* mediante la observación directa. Esto nos previene de considerar, inocentemente, como válido un “modelo borroso” que ofrezca una imagen del mundo real. Esto no representa nada vago o contradictorio en sí mismo. Es la diferencia entre una fotografía borrosa o fuera de foco y una fotografía de nubes o bancos de niebla [Nebelschwaden]» (Schrödinger, 1935b, p. 327)¹⁶⁵.

lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, daß die Katze noch lebt, *wenn* inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die ψ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind» (Schrödinger, 1935b, p. 327).

¹⁶⁵ «Typical about these cases is that an originally atomic uncertainty has been transformed into a coarse-grained uncertainty, which can then be *decided* by direct

Es aquí donde se aclara, en definitiva, lo que Schrödinger quiere explicar mediante la evocación del concepto de un modelo *borroso* [verwaschen]¹⁶⁶. Para el autor, el resultado que se obtiene del experimento imaginario es que la incertidumbre sólo puede tener valor en el modelo, ya que el al llevar a cabo la observación del fenómeno se elimina cualquier posibilidad de que el resultado obtenido sea «borroso». Pocas líneas más abajo él mismo lo explica: «la incertidumbre no es una borrosidad real, siempre hay casos donde una observación fácilmente ejecutada proporciona el conocimiento faltante (Schrödinger, 1935b, p. 328)¹⁶⁷. En cierta medida, las intenciones de fondo de este experimento imaginario recuerdan a la formulación del concepto de *corte* en la respuesta a EPR que Heisenberg nunca publicó: Schrödinger, similar a Heisenberg, sitúa una frontera entre los elementos macroscópicos y microscópicos de un modelo cuántico probabilístico: la frontera, en su caso, es la observación del estado real del sistema en un momento determinado. El problema es un problema del modelo, no del conocimiento que puede tenerse con respecto a los objetos.

observation. This prevents us from considering a smeared-out model naively as an image of the real world. This does not represent anything vague or contradictory in itself. It is the difference between a blurred or poorly focused photograph and a photograph of clouds and wafts of mist» (Schrödinger, 1935b, p. 327).

¹⁶⁶ [verwaschen], traducido al inglés, pero tratando de evocar su sentido en alemán, sería *smeared out*, *blurred* o *faded*, para lo cual la mejor traducción al español sería *borroso* o *confuso*, aunque en realidad, la traducción literal de [verwaschen] sería, en inglés, *washed out*, lo que en español, literalmente, equivaldría a *deslavado* o *descolorido*. En cambio, el equivalente de *borroso*, en alemán sería [unscharf] y en inglés podría ser *blurred*, *fuzzy* o incluso *unsharp*. Tratando de mantener el sentido que se percibe en el texto original, aquí se usará por [verwaschen] la palabra *borroso*, en español.

¹⁶⁷ «[...] the indeterminacy is not even an actual blurring, for there are always cases where an easily executed observation provides the missing knowledge» (Schrödinger, 1935b, p. 328).

El gato de Schrödinger es uno de los experimentos imaginarios más famosos, y quizá, junto al microscopio de rayos gamma de Heisenberg, sea el experimento imaginario más conocido de todos los relacionados con la mecánica cuántica. Sin embargo, tal vez debido a esa fama, con el paso de las décadas el artículo de Schrödinger se ha reducido, en buena medida, al experimento del gato. De hecho, la formulación ha pasado a ser objeto del imaginario popular, y en muchos casos el estudio del artículo de Schrödinger se limita al estudio del experimento del gato. No es así en todas las referencias, pero resulta curioso que, por ejemplo, en algunos artículos, el gato muere electrocutado (Jammer, 1974; Bub, 1979), y en otros, el dispositivo activado por el contador Geiger da muerte al «maltratado» gato mediante la explosión de una bomba (Schreiber, 1994). El mito del experimento del gato está consignado en las últimas páginas de la primera parte de un total de tres que conforman la disertación del físico austriaco: en las dos partes siguientes las ideas de Schrödinger dejan atrás esa breve y mítica construcción para seguir tratando el estado actual de la mecánica cuántica y, hacia el final, se vale de otro experimento imaginario menos conocido, menos referenciado y, desde luego, nada mítico. La historia se ha encargado de dar importancia a un *caso ridículo*, como el mismo autor lo llamó, que apenas daba paso a lo que en los siguientes párrafos sería el cuerpo central de la argumentación de Schrödinger.

Al inicio de la sexta parte del documento, el autor escribe: «En el párrafo 5 vimos que la incertidumbre no es una verdadera «borrosidad» [Verwaschenheit], ya que existen casos en los que una simple observación puede proporcionar la información faltante»

(Schrödinger, 1935b, p. 329)¹⁶⁸. Esta es la conclusión que Schrödinger extrae del ejemplo del gato. Vale la pena, entonces, volver al inicio del párrafo 5 y ver que el título se aclara en gran medida la intención del autor: «§5. *Sind die Variablen wirklich verwaschen?*», es decir ¿Están las variables realmente borrosas? Ésa es la pregunta con la cual inicia el párrafo en el que se incluye el experimento imaginario del gato. Así, Schrödinger inicia dicha sección diciendo que la función ψ es un constructo matemático abstracto, difícil de visualizar, pero que, en cualquier caso, es una entidad imaginaria [Bedenken] que describe el emborronamiento [Verwaschenheit] de las variables en un momento arbitrario en el tiempo (Schrödinger, 1935b, p. 327)¹⁶⁹. El interés de Schrödinger se centra en la función de onda, en el dominio de su uso, en su condición de modelo físico. El experimento del gato le sirve para hacer, a su manera, el *corte* del que hablaba Heisenberg. Sin embargo, las razones para dicho *corte* no son las mismas: Schrödinger encuentra problemático lo que Bohr intentaría explicar con el Principio de Complementariedad: que deba ser necesario dar un tratamiento clásico a una parte del fenómeno y un tratamiento cuántico a otra parte. Por ello, con un cierto aliento sardónico, Schrödinger escribe:

«Se nos ha dicho que no existe distinción entre el estado real de un objeto y todo lo que podemos saber sobre él, o más precisamente, todo lo que podríamos saber sobre él si

¹⁶⁸ «In § 5 we saw that the uncertainty is not a true fuzziness either because there are cases where a simple observation can supply the missing information» (Schrödinger, 1935b, p. 329).

¹⁶⁹ «As is usual with new concepts, it is an abstract, difficult to visualize mathematical construct, but this is of no importance. In any case, it is an imaginary entity which describes the smearing-out of all variables at an arbitrary moment in time equally clearly and precisely as their values are given in a classical model» (Schrödinger, 1935b, p. 327).

así lo intentásemos. *Objetivo [Factual]*, se dice, es solamente la observación, el experimento, la medición. Cuando, en un determinado momento del tiempo, he obtenido el conocimiento óptimo del estado de un objeto físico tal y como lo permiten las leyes de la física, entonces cualquier otra pregunta sobre el “estado verdadero” debe ser rechazada como *superflua*.

[...]

La realidad rechaza ser copiada por un modelo. Uno, entonces, debe renunciar al realismo inocente y confiar directamente en la tesis incuestionable (para un físico) de que al final la *realidad* reside en la observación y la medición. Entonces, todas nuestras teorías físicas futuras deben basarse completamente en los resultados de las mediciones que, en principio, pueden llevarse a cabo. Nuestro pensamiento debería excluir explícitamente cualquier referencia a otro tipo de realidad o modelo» (Schrödinger, 1935b, p. 327)¹⁷⁰.

Esta es la forma en que Schrödinger caracteriza a la Interpretación de Copenhague. Pero Schrödinger sí cree que existe una diferencia entre el

¹⁷⁰ «We are told that there is no distinction between the true state of an object and all that we know about it, or more precisely, all that we could know about it if we tried. *Factual*, it is said, are only: observation, experiment, measurement. When, at a certain moment in time, I have obtained the optimal knowledge about the state of a physical object as allowed by the laws of physics, then any further question about the "true state" has to be rejected as *superfluous*. Reality refuses to be copied by a model. One therefore has to relinquish naive realism and rely instead directly on the unquestionable thesis that (for a physicist) *reality* in the end lies in observation and measurement. Then all our future physical theories must be based entirely on the results of measurements which can in principle be carried out. Our thinking should explicitly exclude any reference to other types of reality or any model» (Schrödinger, 1935b, p. 327).

estado real de un objeto y todo aquello que puede saberse de él. Por ello, en el caso del gato hay algo más por decir todavía: el gato es parte del sistema, ciertamente, pero no es la *consecuencia* de la desintegración del átomo radiactivo, sino el instrumento de medición por el cual se descubre, al abrir la caja, si la partícula se ha desintegrado o no. Lo que Schrödinger intenta explicar mediante la muerte del gato es que el átomo se ha desintegrado, lo que equivaldría a que el modelo borroso incluye al instrumento de medición, cuyo accionar, según las ideas de Bohr, debe caracterizarse como un modelo clásico, mientras que el fenómeno de la desintegración debe considerarse como un modelo cuántico cuando se describe mediante la función de onda.

La función ψ expresa dos estados puros del sistema que se superponen, de los cuales sólo uno expresará el estado *final* del sistema luego de la observación. La borrosidad, dice Schrödinger, no es un hecho incómodo en la partícula que puede o no desintegrarse, pero sí lo es en el estado del gato. Ahí la borrosidad no es tolerable. La superposición es la borrosidad del modelo:

«Se tiene que dos diferentes catálogos [de valores] que son válidos para el mismo sistema en diferentes circunstancias o en diferentes momentos, pueden quizá superponerse [*overlap*, en inglés; *überdecken*, en alemán; en español puede traducirse también como *solaparse*, o incluso como *abrirse*] pero nunca en tal manera que uno está por completo contenido en el otro [...] No existe una función ψ que contenga los mismos estados que otra, o incluso más [*statements*, en inglés; *Aussagen*, en alemán, aquí se traduce como *estados*]. Por tanto, cuando la función ψ de un sistema cambia, ya sea por sí misma o mediante una medición, la nueva función debe carecer de ciertos estados contenidos

en la [función] original. El catálogo no puede tener solamente nueva información, sino que otra información será cancelada [Streichungen]. Pero el conocimiento no puede perderse. Los estados cancelados infieren, por tanto, que algunos enunciados que previamente eran correctos ahora son falsos [*Die Streichungen heißen also, daß die vorhin richtigen Aussagen jetzt falsch geworden sind*]. Un estado correcto sólo puede convertirse en falso si el sujeto con el cual está relacionado ha cambiado» (Schrödinger, 1935b, p. 329)¹⁷¹.

Este es el único momento en el que Schrödinger menciona explícitamente el concepto de *superposición* (*überdecken*), cuyo significado alude más a un *cubrirse* un estado al otro, es decir, se establece, dentro de la función que expresa a un sistema, dos estados diferentes que representan la probabilidad del resultado de una observación del sistema completo. Cuando uno de los estados se deduce mediante la observación, el otro, dice Schrödinger, resulta falso, o desaparece. El colapso de la función de onda, al otorgar *realidad* a uno de esos estados, determina al otro como falso o errado, o bien, podría ser que resultara inexistente. ¿A dónde conduce esto? Esto conduce la formulación de

¹⁷¹ «It follows that two different catalogues which are valid for the same system in different circumstances or at different times, can perhaps overlap but never in such a way that one is entirely contained in the other. For otherwise it could be completed by additional statements, namely those in its complement. The mathematical structure of the theory satisfies this requirement automatically. There is no ψ function which contains the same statements as another and more besides. Therefore, when the ψ function of a system changes, either by itself or through measurement, the new function must lack certain statements contained in the original. The catalogue cannot only have new entries, it must also have deletions. But knowledge cannot not be forfeited. The deletions therefore infer that some previously correct statements have subsequently become false. A correct statement can only become false if the subject which it concerns has changed» (Schrödinger, 1935b, p. 329).

otra pregunta. Cuando los estados posibles de un sistema están representados por la función ψ y se lleva a cabo una medición para determinar el *estado real* del sistema ¿los valores eran valores reales antes de la medición o adquieren esa realidad mediante la medición?

La función expresa dos estados diferentes de un mismo sistema, cada uno de esos estados posee una probabilidad de *realizarse* en un lapso de tiempo determinado, al final del cual se llevará a cabo una observación que provocará la cancelación de uno de esos estados, y la aceptación del otro, ¿cuál es, pues, la *realidad* de estos estados puros? A partir de estas preguntas se llega a una primera conclusión en torno al experimento del gato de Schrödinger: ni la completitud de la cuántica ni el Principio de Incertidumbre ni el entrelazamiento están relacionados con la muerte del gato. Es importante resaltar que hasta ahora la mayor preocupación de Schrödinger a lo largo del documento es la *borrosidad* del modelo de la función ψ y la superposición de estados puros. Por otro lado puede decirse que la posición de Schrödinger frente a la descripción que la función ψ hace de la realidad tiene que ver, primero, con el hecho de que sólo es aplicable para sistemas que no son aprehensibles de manera ordinaria por los sentidos (la distinción entre macro y microsistema deviene demasiado confusa, por lo que el autor no habla de ellos, sino de fenómenos que son, o no son, aprehensibles de manera ordinaria por los sentidos), y en segundo lugar, la función ψ no sería una descripción de la realidad, sino la descripción de la probabilidad de que un sistema será de una u otra forma una vez que sea sometido a un proceso de medición y observación. Las variables, al parecer, siguen estando *borrosas*.

Es en el parágrafo 10 donde Schrödinger menciona, por primera vez en el texto, la palabra *entrelazamiento* [*entanglement*, en inglés, *Verschränkung*, en alemán]. El término aparece al referir una situación similar a la del experimento imaginario de EPR: la interacción de dos

sistemas que, luego de separarse, mantienen una suerte de conexión entre ellos. Sin más vueltas al asunto Schrödinger afirma que se trataría, por ejemplo, del caso de un objeto medido y del correspondiente instrumento de medición (Schrödinger, 1935b, p. 331). Será en la tercera parte del documento donde Schrödinger aborde el tema del entrelazamiento como principal motivo de interés, señalando que se trata del aspecto más interesante de toda la teoría, y que es precisamente *este* aspecto el que requiere una brecha con el realismo más inocente. Por esta razón, la función ψ no puede de inmediato remplazar el modelo o la cosa real. Y esto no es porque una cosa real o un modelo no pueda en principio someterse a cambios repentinos impredecibles, sino porque desde un punto de vista realista, las mediciones son fenómenos naturales como cualquier otro, y no deberían por sí mismos causar una repentina interrupción en la normal evolución de la Naturaleza (Schrödinger, 1935b, p. 329)¹⁷².

El entrelazamiento no es, pues, el cuerpo central del artículo de Schrödinger, ni una conclusión a la que se llega luego del experimento imaginario del gato: se trata, en cambio, de un elemento presente en la formulación de EPR, aunque quizá pasado por alto por los autores del texto. Es decir, si en EPR no se menciona el entrelazamiento en ningún momento, para Schrödinger sí resulta evidente que se encuentra presente en la formulación del experimento de los tres autores. Para abordar el tema del entrelazamiento, el autor planteará un segundo experimento imaginario, en el párrafo 12, y que por lo general es

¹⁷² «It is the most interesting aspect of the whole theory, and it is precisely *this* aspect that requires a breach with naive realism. For *this* reason, the ψ function cannot immediately replace the model or the real thing. And this is not because a real thing or a model could not in principle undergo sudden unpredictable changes, but because from a realistic point of view, measurements are natural phenomena like any other, and should not by themselves cause a sudden interruption of the regular evolution in Nature» (Schrödinger, 1935b, p. 329).

obviado por la literatura que estudia el caso del artículo de Schrödinger (este experimento imaginario, publicado en la última parte del documento, está a siete párrafos de distancia del experimento del gato, que aparece en la primera de las tres partes), quizá porque carece de elementos *pintorescos* o polémicos como el asesinato de un gato; o porque carece de un planteamiento teórico que cuestione conceptos como la realidad o la completitud de una teoría, como el caso de EPR. En cambio, Schrödinger evoca un ejercicio experimental imaginario que, lejos de la concisión y visualidad del experimento del gato, ofrece amplias dificultades a la hora de enfrentarse a él. Este experimento imaginario es una re-elaboración del presentado en EPR. Sin embargo, la formulación que se ofrece es diferente: carece, como se dijo antes, de los postulados previos en torno al criterio de realidad, o la condición de completitud (el aparato teórico de Schrödinger ya se ha venido exponiendo a lo largo de las tres partes del artículo); no está narrado en los mismos términos que el experimento de EPR, es decir, se evade aún mucho más la configuración experimental (comparado con el experimento del gato, se trata de una construcción confusa y con poca firmeza visual); tampoco ofrece un sustento matemático extenso, y en mitad de la formulación (que además se expone en el párrafo 12 y continua en el 13), Schrödinger utiliza una rara analogía a un caso de carácter más cotidiano, con el fin de *aclarar* lo que se ha ido planteando (esta analogía apreció ya en el artículo publicado por Schrödinger (1953a) poco antes ese mismo año). Además, a manera de colofón, se parte de que el entrelazamiento es un hecho dado desde el comienzo del planteamiento, y que no es la validez del concepto lo que se pone en duda. ¿Qué es lo que cuestiona este segundo experimento imaginario; o bien, qué es lo que quiere demostrar? En primer lugar, deslindar del planteamiento las consideraciones en torno a la completitud de la mecánica cuántica y al criterio de realidad (Schrödinger no habla de esto

en todo el artículo, aunque sí habla de realidad, mas no en los términos en que lo hacen Einstein, Podolsky y Rosen); en segundo lugar, replantear la relación entre los dos sistemas que conforman el planteamiento de EPR, esto a partir de la introducción, desde inicio, del entrelazamiento; en tercer lugar, explicar por qué al obtener una medición (y aquí es donde este experimento se relaciona con el del gato) sobre una magnitud específica no es posible obtener un resultado sobre una segunda medición con respecto a otra magnitud para el mismo sistema, y por último qué significa esto en función de la representación que el modelo hace del propio sistema. El largo planteamiento del experimento imaginario es el siguiente:

«Por simplicidad consideramos dos sistemas con sólo *un grado de libertad*, por ejemplo; cada uno está caracterizado por una variable q para la posición y una variable canónicamente conjugada para el momento p . La imagen clásica sería un punto de masa que sólo podría moverse en una línea como una cuenta en un ábaco. p es el producto de la masa y la velocidad. Para el segundo sistema otorgamos las correspondientes variables mediante Q y P . Ya sea que los dos se muevan o no en la misma línea, eso no nos interesa aquí. Sin embargo, sea cual sea el caso, puede ser útil asumir que q y Q son iguales a cero en diferentes puntos. La igualdad $q=Q$, por tanto, no significa necesariamente que los dos puntos coinciden; los sistemas pueden todavía estar completamente separados.

En el trabajo citado [se refiere al artículo de EPR] se muestra que puede haber un entrelazamiento entre los dos sistemas en un determinado momento del tiempo, al cual nos referiremos constantemente en adelante como

descrito por las ecuaciones $q=Q$ y $p=-P$. Esto es, sé que *cuando* una medición de q se lleva a cabo alcanzando un determinado valor, entonces una medición ejecutada inmediatamente en Q dará como resultado el mismo valor y viceversa. Una sola medición de q o p o Q o P revoca el entrelazamiento y logra el máximo conocimiento sobre *ambos* sistemas. Una segunda medición en el mismo sistema afecta *solamente a ese* sistema, no al otro. Las dos particularidades no pueden, por tanto, ser verificadas al mismo tiempo en el mismo experimento. Sin embargo, la medición puede repetirse mil veces *ab ovo*; cada vez, el mismo entrelazamiento debe reproducirse, y a voluntad verificar una igualdad o la otra. En cada ocasión la igualdad seleccionada se confirmará. Ahora supongamos que en el experimento mil y uno, se decide no hacer más verificaciones, sino que en lugar de ello, medir q en el primer sistema y P en el otro, y los resultados son $q=4$; $P=7$.

¿Existe entonces alguna duda de que para el primer sistema tenemos $q=4$; $p=7$; y que para el segundo sistema $Q=4$; $P=7$? Esto no puede ser verificado por completo en un solo experimento, ya que ése nunca es el caso con las predicciones cuánticas; no obstante es correcto, ya que quien tuviese dudas y decidiera verificarlo, no resultaría decepcionado.

Sin duda, esto es verdad. Cada medición es la primera en cada sistema, y las mediciones en sistemas separados no pueden afectar al otro directamente, eso sería magia. No puede ser pura suerte cuando mil experimentos

muestran que las mediciones recientes deben coincidir»
(Schrödinger, 1935b, p. 332-3)¹⁷³.

Este experimento imaginario, como se ha dicho antes, ha pasado prácticamente desapercibido para la bibliografía crítica que estudia tanto

¹⁷³ «For simplicity we consider two systems with only *one degree of freedom*, i.e. each is characterized by one coordinate variable q , and one canonically conjugate variable, the momentum p . The classical picture would be a point mass which can only move on a line like a bead on an abacus. p is the product of the mass and the velocity. For the second system we denote the corresponding variables by Q and P . Whether the two are threaded on the same string or not, will not concern us here. But, whatever the case may be, it may still be useful to assume that q and Q are zero at different points. The equality $q = Q$ therefore does not necessarily mean that the two points coincide; the systems can still be completely separate. // In the cited work it is shown that there can be an entanglement between the two systems at a certain moment in time, to which we constantly refer in the following, described by the equations $q = Q$ and $p = P$. That is, I know that *when* a measurement of q is performed yielding a certain value, then an immediately executed Q -measurement will result in the same value and vice versa; and *when* a measurement of p is performed yielding a certain value, then an immediately executed P -measurement will result in the negative of that value and vice versa. One single measurement of q or p or Q or P lifts the entanglement and yields maximal knowledge about *both* systems. A second measurement on the same system affects *only that* system, not the other. The two identities can therefore not both be checked in the same experiment. But the measurement can be repeated a thousand times *ab ovo*; each time the same entanglement has to be reproduced and at will one or the other equality checked. Every time the selected equality will be confirmed. // Now suppose that in the thousand-and-first experiment, one decides not to do any more checks, but instead measures q on the first system and P on the other, and the results are $q = 4; P = 7$. // Is there then any doubt that for the first system, we have $q = 4; p = 7$; and for the second system $Q=4; P=7$? This cannot be fully verified in a single experiment, for that is never the case with quantum statements, but it is true nonetheless, because, whoever might have had doubts and decided to check anyway, could not be disappointed. // This is undoubtedly true. Each measurement is the first on its system, and measurements on separated systems cannot affect one another directly, that would be magic. It cannot be pure luck either when a thousand experiments show that fresh measurements must coincide» (Schrödinger, 1935b, p. 332-3).

la discusión en torno a la cuántica como los experimentos imaginarios. En cualquier caso, no puede pasarse por alto aquí, ya que proporciona elementos importantes sobre la discusión, así como sobre la formulación de experimentos imaginarios en términos generales, sobre la opinión final de Schrödinger (final en cuanto a este artículo) y sobre la propia naturaleza del concepto de *entrelazamiento*. En términos de Schrödinger, de acuerdo a este experimento imaginario, el entrelazamiento no equivale a la *acción-a-distancia* de la que habló Einstein, sino a una forma de relacionar los objetos observados y los instrumentos de medición, y que, como una condición física propia de la interacción, relacionada con la medición de magnitudes físicas, llega a su fin luego de que las mediciones proporcionan al observador todo el conocimiento posible acerca de uno de los objetos (el objeto medido). Entonces el uso del otro objeto (el instrumento de medición) resulta innecesario (e inútil) para obtener *más* información sobre el objeto observado: el entrelazamiento desaparece cuando el observador logra obtener toda la información posible sobre el objeto que observa.

Debe aclararse que cuando Schrödinger dice que cada medición es la primera en cada sistema, y las mediciones en sistemas separados no pueden afectar al otro directamente ya que eso sería *magia* (Schrödinger, 1935b, p. 333, énfasis agregado), no se trata de una violación del Principio de Incertidumbre de Heisenberg, sino el hecho de que al realizar una medición, el instrumento utilizado ya obtuvo la información posible del objeto, y su correlación con él, es decir, el entrelazamiento, se agota, ya que, según Schrödinger, el entrelazamiento solamente persiste cuando un objeto posee información del otro. Por tanto, después de una primera medición no puede realizarse una segunda, ya que será necesario restablecer el diseño experimental y realizar *otra* primera medición en la cual el entrelazamiento relacione a los dos

objetos. Esto se aclara mediante una interesante analogía que plantea Schrödinger más adelante.

En el párrafo 13, el experimento imaginario continúa. Es entonces cuando toma la forma de un ejemplo ya planteado en el artículo publicado meses antes (Schrödinger, 1935a), y que busca, mediante la inclusión de una analogía al estilo de la del gato, aclarar las ideas expresadas. Concentremos la atención, dice Schrödinger, en el sistema cuyas variables están dadas por las letras pequeñas p y q , y llamémosle *sistema pequeño*. Entonces, es posible preguntar al sistema pequeño, mediante una medición directa, una de dos preguntas, ya sea sobre q o sobre p . Antes de hacerlo es posible decidir si se obtiene la respuesta a una de estas preguntas mediante una medición en el otro sistema, que se encuentra completamente separado (y que será considerado como un aparato auxiliar). Ahora bien, el sistema pequeño es como un alumno en un examen, que no puede saber cuál de las dos preguntas se le va a formular. A partir de una elevada y arbitraria cantidad de experimentos previos se sabe que el alumno siempre contestará correctamente la primera pregunta que se le haga. Se deduce que el estudiante *sabe* la respuesta a *ambas*. Después de contestar la primera pregunta el alumno está cansado y confuso a tal grado que sus siguientes respuestas no poseen valor. Sin embargo, asegura el autor, este hecho no cambia la conclusión. Por otro lado, dice Schrödinger, ningún profesor de escuela secundaria podría llegar a otra conclusión, por más que se pregunte *qué* hace a estos alumnos tan olvidadizos o estúpidos después de contestar la primera pregunta. No pensaría, por ejemplo, que el hecho de que él haya visto la respuesta en una manual se la haya sugerido al alumno. Tampoco podría pensarse que si el profesor vio la respuesta, después de que el alumno respondió, el texto en el cuaderno del alumno cambiaría hacia su propio favor. Así, continúa Schrödinger, el sistema pequeño debe tener preparada una respuesta

definida tanto para la pregunta q como para la pregunta p . Esta condición de preparación no puede ser afectada ni un poco por cualquier medición que se practique en el sistema auxiliar (en la analogía: que el profesor vea la pregunta en su cuaderno de notas y que al hacerlo estropee con una mancha de tinta el otro lado del cuaderno, donde está la otra pregunta). Quienes abogan por la mecánica cuántica, dice Schrödinger, afirman que después de la medición de Q en el sistema auxiliar, el sistema pequeño tendrá una función ψ en la cual q está bien definido pero p es por completo indeterminado. Y sin embargo, como se dijo antes, esto no ha cambiado ni un poco el hecho de que el sistema pequeño también tiene una respuesta definida preparada para la pregunta p .

Schrödinger continúa explicando que el alumno no solamente tiene preparada siempre una respuesta definida para la pregunta q y para la pregunta p , sino también para otro millar de preguntas: p y q no son las únicas cantidades que pueden ser medidas, concluye (Schrödinger, 1935b, p. 333-4)¹⁷⁴.

¹⁷⁴ «Let us concentrate the attention on the system with variables given by small letters q and p , and call it the "small system". It is as follows. I can ask the small system, through direct measurement, one of two questions, either about q or about p . Before doing so, I may decide to obtain the answer to one of these questions by measurement on the other, fully separate system (to be considered as auxiliary apparatus). Alternatively, I may have the intention to do so later. The small system, like a pupil at an exam, cannot possibly know whether I did so and for which question, or for which one I intend to do so later. From arbitrarily many previous experiments, I know that the pupil will always answer the first question I ask him correctly. It follows that he *knows* the answer to *both*! The fact that answering this first question makes the pupil so tired or confused that his subsequent answers are worthless, does not change this conclusion. No secondary school master would, when this scenario is repeated with thousands of pupils of equal ability, come to any other conclusion, much as he might wonder *what* makes these pupils so stupid or forgetful after answering the first question. He would not think that the fact that he looked up the answer in a handbook himself would have suggested it to the pupil, or indeed, that if he looked it up after the pupil gave an answer, the text in

¿Qué quiere explicar Schrödinger mediante este largo planteamiento? Se trata de evidenciar que al llegar a un resultado obtenido mediante una medición directa sobre una de las dos magnitudes del sistema en cuestión, la otra magnitud no desaparece, sino que no es asequible en tanto que sólo se puede realizar *una* medición. Es decir, si se toma el ejemplo del alumno: sólo es posible formularle una pregunta, y al contestarla correctamente, la segunda respuesta ya no puede obtenerse porque ni siquiera es posible formular la segunda pregunta: podría decirse que el examen ha concluido ya. Pero, ¿qué significa esto?

El alumno conoce las dos respuestas (esto no parece quedar muy claro en el planteamiento) porque en los ensayos, una «elevada y arbitraria cantidad de experimentos», se le han planteado alternativamente las dos preguntas, y siempre contesta correctamente a la primera que se le formula, es decir, alternativamente tanto una pregunta como la otra han ocupado el *lugar* de *primera pregunta*, por lo que el alumno ha contestado *a las dos*, durante los diversos ensayos. Sin embargo, sólo puede dar respuesta a la pregunta que en el examen

the pupil's notebook would have changed in the pupil's favour. // The small system must therefore have a definite answer ready for both the q -question and the p -question, just in case it is the first I am posing directly. This readiness cannot be affected one little bit by any measurement I might make on the auxiliary system (in the analogy: that the teacher looks up the question in his notebook and in doing so spoils the other side, where the other answer is, by an inkblot). Advocates of quantum mechanics claim that after a Q -measurement on the auxiliary system, the small system will have a ψ -function in which " q is sharply defined but p is completely undetermined". // And yet, as we said before, this has not changed one little bit the fact that the small system also has a definite answer ready for the p -question, namely the same as before.// The matter is in fact even more serious. Not only to the q -question and the p -question does the pupil have a definite answer ready, but also to thousands of other questions. And this without us being able to understand the mnemonics with which he achieves this feat. p and q are not the only quantities that can be measured» (Schrödinger, 1935b, p. 333-4).

ocupe el *primer lugar*. Extrapolando esto a las mediciones realizadas en el primer sistema, se obtiene que la primera medición siempre será precisa, y que la segunda no puede llevarse a cabo porque, de alguna manera, el resultado de esa medición se ve alterado luego de la primera. El entrelazamiento se da, como explica Schrödinger, en el momento posterior a la interacción y termina en el momento de la medición. Ahí, después de la medición, ocurre el des-*entrelazamiento* del cual Schrödinger (1935a) había hablado ya en el artículo anterior. En ese mismo artículo utiliza la analogía del estudiante para hablar tanto de la existencia de las dos magnitudes antes de la medición, como de las consecuencias del des-entrelazamiento.

Si en el experimento imaginario de EPR Schrödinger encontró la génesis del entrelazamiento, es en este experimento imaginario donde logra exponer la forma en que concibe el funcionamiento de este concepto. A manera de conclusiones se extraen las siguientes ideas: (1) Schrödinger no aborda el problema de la completitud de la mecánica cuántica, aborda el problema de los modelos físicos en general; (2) la base de su explicación son los conceptos de entrelazamiento, que da por sentado desde el inicio del documento, y el concepto de superposición, que asume como consecuencia de la noción estadística de la mecánica cuántica, y que asocia con la idea de *borrosidad* de las variables; (3) en función de (1) y (2), Schrödinger se pregunta si los valores poseen realidad antes de la medición o solamente después de la medición; (4) el entrelazamiento ocurre entre el objeto medido, al que puede llamarse *sistema pequeño* y el instrumento de medición, al que puede llamarse *sistema auxiliar*; (5) la superposición no se da entre las funciones, sino entre los estados puros representados por las funciones; (6) es posible que la raíz del problema resida en el tratamiento clásico de una parte del fenómeno y en el tratamiento cuántico de otra parte del fenómeno; (7) la interacción de los sistemas provoca el entrelazamiento, el des-

entrelazamiento sucede cuando se lleva a cabo una medición y se obtienen los valores reales de un observable; (8) el entrelazamiento no viola las relaciones de incertidumbre.

En el caso de la medición de q y P , en el segundo experimento imaginario, cuando se obtienen valores de cada observable mediante la medición, dice Schrödinger, el entrelazamiento no puede proporcionar los valores de Q y p según la ley de conservación porque al realizar la primera medición, es decir q , el sistema auxiliar no permite realizar una segunda medición en P , ya que la primera medición de un observable estropea la posibilidad de medir la segunda.

En suma, el experimento imaginario del entrelazamiento es la forma en que Schrödinger une todos los fenómenos conjugados a lo largo del periodo que aquí se estudia y que han atravesado la década por la vertebral de los experimentos imaginarios, para tratar de dar una explicación al estado actual de la mecánica cuántica en el año de 1935.

Aunque publicado en alemán cuando la discusión bullía en las revistas norteamericanas, el texto de Schrödinger llamó la atención de la comunidad científica por diversas razones, entre ellas porque el físico austriaco era uno de los pilares de la teoría cuántica y hasta antes de 1935 no había publicado su opinión al respecto de la discusión en torno a la completitud de la teoría y la descripción de la realidad; y porque el experimento del gato, breve y paradójico, era un elemento fácilmente aprehensible, de descripción sencilla y mucho más visual que cualquier otro experimento imaginario publicado en dicho contexto. Sin embargo, lejos de zanjar la polémica, hecho que no persigue este artículo, Schrödinger la avivó de manera tal que más que un colofón de la controversia se trata de una suerte de nuevo comienzo que abría el camino del trabajo científico hacia el entrelazamiento.

**CAPÍTULO V. CONCLUSIONES. REFLEXIONES FINALES EN TORNO AL
PAPEL DE LOS EXPERIMENTOS IMAGINARIOS EN LA FÍSICA CUÁNTICA.**

*Nunca tenemos conciencia
de estar percibiendo algo importante,
sino de haberlo percibido*
Nicolás Gómez Dávila
Escolios a un texto implícito

La respuesta de Einstein a EPR: *Physics and Reality*, 1936. Una discusión sin final. El entrelazamiento de los experimentos imaginarios. Una propuesta para una investigación posterior: el tiempo en la mecánica cuántica.

Einstein se mantuvo atento a toda la polémica posterior a la publicación de EPR, y después de las sucesivas cartas en las que hizo notar que sus argumentos no estaban del todo bien explicados en el artículo, publicó su propia respuesta a EPR. El actor se convirtió en público y escribió una reelaboración del experimento imaginario en *Physics and Reality*, publicado en 1936 en el *Journal of the Franklin Institute*.

El texto es una interesante mezcla entre lo que Einstein buscaba en EPR y el documento publicado en 1934 en torno al método de la física teórica. Si en EPR ya se encuentran numerosos elementos de aquel documento de 1934, en *Physics and Reality* Einstein afina el discurso y logra un texto redondo, quizá la más sólida exposición de sus ideas en torno a la física y, en particular, al estado de la teoría cuántica en aquel

momento. A la manera del documento de Schrödinger (1935b), Einstein ofrece una visión *actual* de la ciencia. Consciente, como explica, de que los problemas recientemente planteados por la cuántica involucran un discurso filosófico que considera alejado del trabajo del científico, dice: «En un tiempo como el actual, cuando la experiencia nos obliga a perseguir una base más nueva y sólida, el físico no puede simplemente rendir ante el filósofo la contemplación crítica o las bases teóricas» (Einstein, 1936, p. 349)¹⁷⁵. Sin embargo, el propio texto de Einstein se compone de una intención filosófica de comprender la relación entre la física y la realidad cotidiana, como él mismo explica en las primeras líneas (Einstein, 1936, p. 349), y que más adelante aborda conceptos como *comprensión* de la realidad, *experiencia*, entre otros y alude constantemente a la filosofía de Kant.

Pero en el fondo de su discurso reside una sutil respuesta al texto de 1935 de Schrödinger, y en lo que respecta a los modelos en la física, Einstein dice: «Ahora debemos señalar que la diferenciación entre impresiones sensoriales y representaciones no es posible; o, al menos no es posible con absoluta certeza» (Einstein, 1936, p. 350)¹⁷⁶, solamente es necesario, señala, el establecimiento de un conjunto de reglas que den cuerpo a las impresiones sensoriales del mundo exterior, el mundo real (Einstein, 1936, p. 351). Los conceptos de la ciencia, dice Einstein, deben estar conectados con las experiencias de los sentidos, de otra manera, son formulaciones vacías (Einstein, 1936, p. 352), un esquema de ideas científicas que no está de acuerdo con la experiencia intuitiva no representa la realidad y es una mera herramienta. La ciencia, como ha

¹⁷⁵ «At a time like the present, when experience forces us to seek a newer and more solid foundation, the physicist cannot simply surrender to the philosopher the critical contemplation of the theoretical foundations» (Einstein, 1936, p. 349).

¹⁷⁶ «Now we must first remark that the differentiation between sense impressions and representations is not possible; or, at least it is not possible with absolute certainty» (Einstein, 1936, p. 350).

dicho al inicio, *debe* representar a la realidad. Esos conceptos conectados con la experiencia son denominados *conceptos primarios*, en el esquema de Einstein. A partir de esto establece, entonces, que el objetivo de la ciencia es «[...] por un lado, una comprensión, tan *completa* como sea posible, de la conexión entre las experiencias de los sentidos en su totalidad y, por otro lado, el cumplimiento de este objetivo *mediante el uso de un mínimo de conceptos primarios y relaciones*» (Einstein, 1936, p. 352)¹⁷⁷. Sin embargo, señala Einstein, esa totalidad de conceptos primarios y relaciones entre ellos carece de unidad lógica, y el pensamiento científico tiene el deber y la inquietud de encontrar esa unidad (Einstein, 1936, p. 352). Para lograr esto, continúa, se *reducen* las conexiones y los conceptos, y se construye una imagen más simple de la realidad. Dicha imagen, según Einstein, puede mostrar una unidad lógica en sí misma, pero no tendrá una conexión firme con las experiencias del mundo real. De manera que «Así la historia avanza hasta que hemos llegado a un sistema con la mayor unidad concebible, y con la mayor pobreza de los conceptos de la fundamentación lógica» (Einstein, 1936, p. 353)¹⁷⁸. Sin duda se refiere al estado de la mecánica cuántica. Estos sistemas, afirma Einstein, son temporales, y desaparecen cuando se encuentra un sistema mejor.

El documento se convierte, poco a poco, en un recorrido histórico por las teorías de la física donde Einstein va desde la geometría Euclidiana hasta la Teoría de la Relatividad para explicar que, según su concepción del pensamiento científico, la mecánica se ha tomado como

¹⁷⁷ «The aim of science is, on the one hand, a comprehension, as *complete* as possible, of the connection between the sense experiences in their totality, and, on the other hand, the accomplishment of this aim *by the use of a minimum of primary concepts and relations*» (Einstein, 1936, p. 352).

¹⁷⁸ «Thus the story goes on until we have arrived at a system of the greatest conceivable unity, and of the greatest poverty of concepts of the logical foundations» (Einstein, 1936, p. 353).

base de la ciencia física actual, y dicha base conduce a la investigación de los fenómenos atómicos. Dentro del largo espectro de su recorrido, Einstein identifica una física basada en las experiencias de los sentidos, como ya se ha dicho, y una física *fenomenológica*, que se basa en el diseño de un formalismo matemático que genera, o induce, nuevos fenómenos para explicar aquellos fenómenos más simples de la experiencia sensorial; una física en la cual se mezclan diversos conceptos cercanos a la experiencia pero que, por su número y diferencia, son irreconciliables y no permiten una unidad de los fundamentos lógicos (Einstein, 1936, pp. 360-1). Las relaciones entre conceptos primarios que en la experiencia no tienen relación evidente conducen a una mayor elaboración matemática que introduce más problemas de los que resuelve, afirma Einstein: no hay método inductivo que pueda conducir a los conceptos fundamentales de la física (Einstein, 1936, p. 365)¹⁷⁹

Esta revisión histórica es, además del sustento teórico de las nociones de Einstein, una legitimación de sus ideas: parece decir al lector: *La historia me respalda*. Incluso, el respaldo de la formulación histórica se ve reforzado con un punto de apoyo al que Einstein recurre en muchas ocasiones: la Teoría de la Relatividad. La situación más satisfactoria en una teoría física, dice Einstein, se encuentra en casos en los que las nuevas hipótesis fundamentales están sugeridas por la propia experiencia del mundo (Einstein, 1936, p. 365)¹⁸⁰. La Teoría de la Relatividad sería uno de esos casos. La mecánica cuántica, en cambio, no.

Einstein retoma su disertación en torno a la completitud de la mecánica cuántica. A estas alturas ha pasado ya un año de la publicación

¹⁷⁹ «There is no inductive method which could lead to the fundamental concepts of physics» (Einstein, 1936, p. 365).

¹⁸⁰ «The most satisfactory situation is evidently to be found in cases where the new fundamental hypotheses are suggested by the world of experience itself» (Einstein, 1936, p. 365).

de EPR y de la mayor parte de las réplicas. Ahora la objeción de inicio es la incapacidad de la mecánica cuántica, a la que considera una forma de física fenomenológica, de proporcionar la posibilidad de una unificación de la física debido a la incompletitud dadas por el carácter estadístico de sus postulados: «Creo que la teoría puede hacernos caer en un error en nuestra búsqueda de una fundamentación uniforme de la física, porque, según creo, no es una completa representación de las cosas reales [...] La incompletitud de la representación es el resultado de la naturaleza estadística (incompletitud) de las leyes» (Einstein, 1936, p. 374)¹⁸¹. De aquí parte Einstein para señalar algo que hasta ahora no había hecho: «La función de onda no describe, en ningún momento, una condición que pueda ser la de un solo sistema; se relaciona, en cambio, con muchos sistemas, con *un ensamble de sistemas*, en el sentido de la mecánica estadística (Einstein, 1936, p. 375)¹⁸². Este comentario puede ser una referencia al artículo de Schrödinger (1935b) donde se aborda el entrelazamiento, y la relación que establece el físico austriaco entre una función ψ y varios *estados puros*. Einstein prepara el terreno para exponer una nueva versión del experimento imaginario de EPR que, sin embargo, no es demasiado diferente de la versión original o de las posteriores versiones que expuso en su correspondencia (por ejemplo, en la carta a Popper en 1935). No obstante, hay algo diferente. Por una parte, Einstein acepta la refutación de EPR mediante la interpretación de Schrödinger (no hace referencia a ningún texto específico, aunque lo más probable es que se trate del artículo sobre entrelazamiento;

¹⁸¹ «I believe that the theory is apt to beguile us into error in our search for a uniform basis for physics, because, in my belief, it is an *incomplete* representation of real things [...] The incompleteness of the representation is the outcome of the statistical nature (incompleteness) of the laws» (Einstein, 1936, p. 374).

¹⁸² «The ψ function does not in any way describe a condition which could be that of a single system; it relates rather to many systems, to *an ensemble of systems* in the sense of statistical mechanics» (Einstein, 1936, p. 375).

Schrödinger, 1935b): «La ecuación de Schrödinger determina las variaciones de tiempo que sufre el ensamble de sistemas, las cuales pueden existir con o sin acción externa en el sistema individual. Tal interpretación elimina también la paradoja recientemente demostrada por mí y dos colaboradores, y que se relaciona con el siguiente problema» (Einstein, 1936, p. 377)¹⁸³. Por otro lado menciona la posibilidad de variaciones en el sistema individual aunque no existan acciones externas, lo que remite al concepto de *entrelazamiento*, y sin embargo sigue basando su argumentación experimental en la asignación de varias funciones ψ a un mismo estado del sistema. El experimento imaginario es el siguiente:

«Considere un sistema mecánico que consiste en dos sistemas parciales A y B que interactúan el uno con el otro sólo durante un tiempo limitado. La función ψ es conocida antes de la interacción. Entonces, la ecuación de Schrödinger proporcionará la función ψ después de que la interacción tenga lugar. Ahora, determinemos el estado físico del sistema parcial A tan completamente como sea posible mediante la medición. Entonces, la mecánica cuántica nos permite determinar la función ψ del sistema parcial B a partir de las mediciones hechas, y a partir de la función ψ del sistema total. Esta determinación, sin embargo, proporciona un resultado que depende de cuáles de las cantidades físicas (observables) de A se han medido

¹⁸³ «The Schrödinger equation determines the time variations which are experienced by the ensemble of systems which may exist with or without external action on the single system. Such an interpretation eliminates also the paradox recently demonstrated by myself and two collaborators, and which relates to the following problem» (Einstein, 1936, p. 377).

(por ejemplo, coordenadas o momento). Dado que sólo puede haber un estado físico para B después de la interacción que razonablemente no puede considerarse que dependa en las mediciones específicas que hemos realizado en el sistema A separado de B , puede concluirse que la función ψ no está coordinada sin ambigüedades al estado físico. Esta coordinación de varias funciones ψ al mismo estado físico de B muestra de nuevo que la función ψ no puede interpretarse como una (completa) descripción de un estado físico de un solo sistema. Aquí también la coordinación de la función ψ con un ensamble de sistemas elimina todas las dificultades*.

[Nota al pie] *Una medición en A , por ejemplo, involucra una transición a un ensamble de sistemas más estrecho. Éste (por tanto también su función ψ) depende del punto de vista de acuerdo con el cual esta reducción del ensamble de sistemas se lleva a cabo» (Einstein, 1936, p. 377)¹⁸⁴.

¹⁸⁴ «Consider a mechanical system consisting of two partial systems A and B which interact with each other only during a limited time. Let the ψ function before their interaction be given. Then the Schrödinger equation will furnish the ψ function after the interaction has taken place. Let us now determine the physical state of the partial system A as completely as possible by measurements. Then quantum mechanics allows us to determine the ψ function of the partial system B from the measurements made, and from the ψ function of the total system. This determination, however, gives a result which depends upon which of the physical quantities (observables) of A have been measured (for instance, coordinates or momenta). Since there can be only one physical state of B after the interaction which cannot reasonably be considered to depend on the particular measurement we perform on the system A separated from B it may be concluded that the ψ function is not unambiguously coordinated to the physical state. This coordination

El planteamiento experimental imaginario es, sin duda, el mismo que en EPR, y persiste también la asignación de una función ψ a varios estados del sistema. Sin embargo, su objeción no está en el experimento imaginario: esto es lo que cambió. La crítica personal que Einstein sostuvo hacia la mecánica cuántica desde 1927 se había conducido a través de la formulación de experimentos imaginarios, ahora, después de EPR y de los primeros atisbos del entrelazamiento, Einstein ofrecía, sí, un experimento imaginario, pero su objeción a la completitud de la cuántica no estaba ahí: el experimento imaginario estaba derrotado desde su formulación. La objeción estaba hecha desde antes del experimento imaginario: la descripción estadística de los fenómenos que hace la función ψ , por un lado, y su carácter de física fenomenológica, que no parte de las experiencias de los sentidos, sino del propio formalismo de la teoría. El experimento imaginario es, solamente, una forma de ratificar su postura.

¿Qué repercusión puede tener un experimento imaginario que no plantea un problema o una dificultad que la teoría a la que se asocia deba resolver? Esta nueva reelaboración del ejercicio experimental imaginario de EPR no provocó ninguna reacción posterior, ningún eco o reclamo, como ocurrió con la versión original, y dejaría la discusión abierta y en cierta medida incompleta porque Einstein no respondió directamente a ninguno de los artículos que se generaron después de la

of several ψ functions to the same physical state of system B shows again that the ψ function cannot be interpreted as a (complete) description of a physical state of a single system. Here also the coordination of the ψ function to an ensemble of systems eliminates every difficulty.* // [Footnote] *A measurement on A, for example, thus involves a transition to a narrower ensemble of systems. The latter (hence also its ψ function) depends upon the point of view according to which this reduction of the ensemble of systems is carried out» (Einstein, 1936, p. 377).

publicación de EPR. Quizá el programa científico de su crítica se agotó, aunque es mucho más posible que los eventos políticos de finales de la década de 1930 engendraran esa incompletitud de la discusión.

Desde 1927 hasta 1936 los experimentos imaginarios abundaron en el desarrollo de la física cuántica, donde demostraron ser una herramienta de gran utilidad en la comunicación entre científicos y entre científicos y público. Mucho se ha discutido desde la filosofía de la ciencia si esta herramienta permite obtener conocimientos nuevos sobre los fenómenos de la naturaleza si en su formulación sólo permiten el uso de información ya conocida y asimilada. Aquí se ha intentado explicar que esa información *conocida* y *asimilada* se trata de la forma de *estandarización* de los experimentos imaginarios: los elementos que permiten que la formulación experimental sea en principio un planteamiento sólido que se pueda comprender y aprehender en la comunidad científica mediante el uso de conceptos conocidos y aceptados (se ha señalado, por ejemplo, a los efectos Compton, Doppler, Zeeman, entre otros). El debate sobre si es posible extraer conocimientos nuevos mediante el uso de los experimentos imaginarios no se ha abordado en esta investigación. No obstante, la comunicación es una forma de conocimiento, y los experimentos imaginarios se convirtieron, más que en una manera de obtener *nuevos* conocimientos, en una forma de diseminar ideas científicas dentro de una comunidad o un espectro de público. En este sentido, forman una parte central del desarrollo de la física cuántica. La inmediatez que por su naturaleza permiten agilizó esta comunicación y desembocó en un periodo vertiginoso de controversia y discusión que mantuvo en alta tensión las relaciones entre los científicos.

Como ya se apuntó en el cuerpo de este trabajo, estas ideas apuntan a que el concepto de *entrelazamiento* parte de la serie de experimentos imaginarios que, entrelazados ellos mismos, y partiendo de un punto en concreto, fueron compartiendo una serie de elementos y procesos que desembocarían, desde 1927 y hasta 1935, en la formulación de uno de los principales conceptos de la teoría cuántica. Es posible ver, por una parte, el rastro de las ideas que llevarían al entrelazamiento y, por otra parte, la constante presencia de ciertos comportamientos de las partículas que en los diseños experimentales imaginarios no tenían una explicación, hasta que Schrödinger relacionó el fenómeno de la acción-a-distancia con la interacción entre los objetos observados y los instrumentos de medición para cuñar el término no como forma de resolver los problemas presentados por el propio entrelazamiento, sino como causa de dichos fenómenos.

Como herramienta para dar cuerpo a las teorías, programas científicos e ideas en general, los experimentos imaginarios probaron también su valía. La *corporización* de los argumentos mediante los experimentos imaginarios permitió que las teorías se condensaran de manera que su movimiento a lo largo y ancho de la comunidad científica fuera más ágil y sencillo. Requirió, por otra parte, de dos formas de comunicación fundamentales: la oralidad y la escritura. La palabra, pues, cobró un peso específico de basamento: el manejo del lenguaje sería primordial para la formulación de un experimento imaginario que, haciendo uso correcto de la persuasión y la retórica, fuera capaz de remover los terrenos en los que el formalismo matemático estaba bien asentado, o creía estarlo, para que la discusión pudiera sucederse. Sin experimentos reales, sin fenómenos reales a los cuales recurrir con la intención de armarse de argumentos para enfrentar las polémicas, los físicos tenían frente así una narración, una descripción, un proceso discursivo que apelaba a la evocación, la memoria y la imaginación. Sin

poder observar los fenómenos en sí, sin la posibilidad de llevar a cabo en el mundo físico los diseños experimentales a los que se enfrentaban, sin instrumentos reales que sirvieran para el caso, se dedicaron durante estos años, en soledad o en grupo, en torno a los experimentos imaginarios como en torno a una fogata milenaria, a observar detenidamente, cautelosamente, a las palabras.

Dos son las posibilidades que después de esta larga disertación se extraen como potenciales fuentes de futuras investigaciones. En primer término se tiene la serie de experimentos imaginarios en el periodo de 1897 a 1925, relacionados tanto con el inicio de la física cuántica como con la teoría de la relatividad. Como se menciona en la Nota Preliminar de este trabajo, la versión inicial estaba concebida como una suerte de *historia total* de los experimentos imaginarios, y contemplaba el tratamiento de aquellas formulaciones experimentales imaginarias relacionadas con la Teoría de la Relatividad.

Por otro lado, durante la última etapa de la investigación, al tratar el artículo de Schrödinger (1935b) en el cual aparece el experimento del gato, se extrajo la conclusión de que hasta 1931, en el artículo de Einstein, Tolman y Podolsky, las dos variables no conmutativas utilizadas en los experimentos imaginarios eran *posición* y *tiempo*, hecho que cambió, debido a la refutación de Bohr de los experimentos con relojes utilizados en las conferencias de Solvay de 1927 y 1930, para dar lugar a la utilización única y exclusivamente de las variables no conmutativas de *posición* y *momento*. Este cambio significativo, que desviaba el tema central de este trabajo y fue propuesto para futuras investigaciones, se señaló brevemente en el

Capítulo III, y abre la posibilidad de un trabajo en el cual se analice con detalle las causas e implicaciones de este cambio.

Entendiendo que uno de los valores más importantes del trabajo de investigación es la continua búsqueda de conocimientos, estas potenciales líneas de investigación son también fruto del trabajo realizado en esta tesis.

□

Santa Anna, Cerdanyola del Vallès
Verano de 2012

ANEXO

El presente Anexo ofrece al lector una tabla con todos los experimentos imaginarios que se han revisado a lo largo de este trabajo. Contiene el nombre de cada uno, ya sea el nombre comúnmente citado en la bibliografía, o bien, un nombre asignado según el contenido y la intención de cada experimento imaginario. Se adjunta, igualmente, el autor o autores correspondientes, el año de aparición pública y la referencia bibliográfica correspondiente. La intención de este Anexo es servir como base de datos para posteriores investigaciones en torno a los experimentos imaginarios y los debates y controversias de la mecánica cuántica.

TABLA DE EXPERIMENTOS IMAGINARIOS 1927-1936

EXPERIMENTO IMAGINARIO	AUTOR	AÑO	REFERENCIA	
1	Microscópio de Rayos Gamma	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 64.
2	Átomo de hidrógeno	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 65-6.
3	Rayo atómico de Stern-Gerlach: Interferencia	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 70-2.
4	Wave-packet	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 73.
5	Reflection of a beam of electrons at a grating (de Broglie wave-length)	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 76.
6	Quantum-jump	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 77.
7	Resonance fluorescence	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 77-8.
8	Bohr's Thought Experiment	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 78-9.
9	Ehrenfest-Breit's Rotator	Werner Heisenberg	1927	Zeitschrift für Physik, 43, pp. 81-2.
10	Reformulación del Microscopio de Heisenberg	Niels Bohr	1927	Conferencia Centenario de A. Volta. Como, Italia.
11	Reflection of a particle at a	Werner Heisenberg	1927	Carta a Einstein 10 de junio

	grating			
12	Fermi's particle and rotator	Wolfgang Pauli	1927	V Conferencia de Solvay
13	Intercambio de energía	Werner Heisenberg / Max Born	1927	V Conferencia de Solvay
14	Alpha-particle & Wilson's chamber	Max Born	1927	V Conferencia de Solvay
15	Photon and Slit	Albert Einstein	1927	V Conferencia de Solvay
16	Double-Slit	Albert Einstein/ Niels Bohr	1927	V Conferencia de Solvay
17	Double-Slit Reformulated	Albert Einstein/ Niels Bohr	1927	V Conferencia de Solvay
18	Bohr's Interference Phenomenon	Niels Bohr	1927	V Conferencia de Solvay
19	String and Slit	Albert Einstein/ Niels Bohr	1927	V Conferencia de Solvay
20	Clock and Slit	Albert Einstein/ Niels Bohr	1927	V Conferencia de Solvay
21	Slit and microscope	E. A. Ruark	1928	Physical Review, 31, p. 311
22	Condenser and shutter	E. H. Kennard	1928	Physical Review, 31, p. 346
23	β -rays and Wilson's clouds	Charles Galton Darwin	1929	Proceedings of the Royal Society of London A, 124, p. 377.

24	Two-bodies experiment	Charles Galton Darwin	1929	Proceedings of the Royal Society of London A, 124, p. 378
25	Photon in a Box	Albert Einstein	1930	VI Conferencia de Solvay
26	Photon in a Box	Niesl Bohr/ Albert Einstein	1930	VI Conferencia de Solvay
27	Electrómetro	C. G. Darwin	1931	Proc. R. Soc. Lond. A, 130, p. 635
28	Magnetómetro	C. G. Darwin	1931	Proc. R. Soc. Lond. A, 130, p. 636
29	Doble-magnetómetro	C. G. Darwin	1931	Proc. R. Soc. Lond. A, 130, p. 637
30	Microscopio de rayos gamma	K. F. von Weiszäcker	1931	Zeitschrift für Physik, 70, p. 115
31	ETP Two photons in a box	A. Einstein, R. C. Tolman & B. Podolsky	1931	Physical Review, 37, p. 780
32	Photon in a box Reformulado	Albert Einstein	1931	Carta a Paul Ehrenfest, Mayo de 1931
33	Photon in a box- Half light-year	Albert Einstein	1931	Carta de P. Ehrenfest a Niels Bohr, 9 de Julio de 1931/ Zeitschrift für Angewandte Chemie 45, p. 23
34	Pantalla de centelleo y Dualidad onda-partícula	C.G. Darwin	1931	Science, Vol. 73, No. 1903, p. 654
35	Microscopio de	C.G.	1931	Science, Vol. 73, No.

	rayos X	Darwin		1903, p. 657
36	Doble rendija	C.G. Darwin	1931	Science, Vol. 73, No. 1903, p. 659
37	Dos rendijas, dos obturadores	C.G. Darwin	1931	Science, Vol. 73, No. 1903, p. 659-60
38	El fotón y la dinamita	A. H. Compton	1931	Science, Vol. 74, No. 1911, p. 172
39	El observador y la señal	N. Rosen & J.M.S. Vallarta	1932	Physical Review, 40, pp. 571-2
40	Action-at-a-distance	Albert Einstein	1933	Conferencia de Leon Rosenfeld, Bruselas
41	Intersección de dos rayos	Karl Popper	1934	Die Naturwissenschaften, 22, p. 807
42	Obturador y filtros de vidrio	Karl Popper	1934	Carta a A. Einstein, noviembre
43	Señal luminosa-filtros de vidrio	Albert Einstein	1935	Carta a K. Popper, septiembre
44	Interacción de dos sistemas	Albert Einstein	1935	Carta a K. Popper, septiembre
45	EPR	A. Einstein, B.Podolsky & N. Rosen	1935	Physical Review, 47, p. 779
46	Ball in the box	Albert Einstein	1935	Carta a E. Schrödinger, junio
47	Gunpowder	Albert Einstein	1935	Carta a E. Schrödinger, agosto
48	Partícula, rendija, diafragma.	Niels Bohr	1935	Physical Review, 48, pp. 697-8
49	Unfixed diaphragm	Niels Bohr	1935	Physical Review, 48, pp. 698
50	Two particles and a slit	Niels Bohr	1935	Physical Review, 48, pp. 699

51	Entrelazamiento	E. Schrödinger	1935	Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 31, pp. 558-9
52	Assumption A	W. H. Furry	1936	Physical Review, 49, pp. 397-9
53	Microscopio	Grete Hermann	1935	Die Naturwissenschaften, 42, p. 40-41 (trad. De Dirk Lumma, 1999)
54	El corte	Werner Heisenberg	1935	Sin publicar, AHQP-45
55	Schrödinger's Cat	Erwin Schrödinger	1935	Die Naturwissenschaften, 23, p. 811
56	Entanglement	Erwin Schrödinger	1935	Die Naturwissenschaften, 23, p. 846
57	EPR revisited	Albert Einstein	1936	Journal of the Franklin Institute, p. 221

BIBLIOGRAFÍA

- ADAMS, WALTER S. (1931) "The Reason And The Results Of Dr. Einstein's Visit To The California Institute Of Technology", *Science*, Vol. 73, No. 1893, pp. 380-381.
- ARTHUR, R. (1999) "On thought Experiments as A Priori Science", *International Studies in the Philosophy of Science*, 13/3, pp. 215-229.
- ATTI DEL CONGRESSO INTERNAZIONALE DEI FISICI, 11-20 Settembre 1927, Vol. I, (1928) Bologna, Nicola Zanichelli.
- ATTI DEL CONGRESSO INTERNAZIONALE DEI FISICI, 11-20 Settembre 1927, Vol. I, (1928) Bologna, Nicola Zanichelli.
- ATKINSON, D. (2003) "Experiments and Thought Experiments in Natural Science", en GALAVOTTI, M. C. (ed.) (2003) *Observation and Experiment in the Natural and Social Sciences*, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, pp. 209-225.
- BACCIAGALUPPI, G. & CRULL, E. (2009) "Heisenberg (and Schroedinger, and Pauli) on Hidden Variables", *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, vol 40, no. 4, pp. 374-382.
- BACCIAGALUPPI, G. & VALENTINI, A. (2009) *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge, Cambridge University Press.
- BATELAAN, H., GAY, T. J., & SCHWENDIMAN, J. J. (1997) "Stern-Gerlach Effect for Electron Beams", *The Physical Review Letters*, 79/23, pp. 4517-4521.

- BELAVKIN, V. P. (2000) "Dynamical Solution to the Quantum Measurement Problem, Causality, and Paradoxes of the Quantum Century", *Open Sys. & Information Dyn.* 7, pp. 101-129,
- BELLER, M. (1992) "The birth of Bohr's complementarity: The context and the dialogues", *SHPS* 23, pp. 147-180.
- BENNET, J. A., (1989) "A Viol of Water or a Wedge of Glass", in GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S., (eds.), 1989, *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge: Cambridge University Press, pp.
- BENSAUDE-VINCENT, BERNADETTE (1988) "When a Physicist Turns on Philosophy Paul Langevin (1911-39)" *Journal of the History of Ideas* Vol. 49, No. 2 (Apr. - Jun., 1988), pp. 319-338.
- BENSAUDE-VINCENT, BERNADETTE (2000) *L'opinion publique et la science. À chacun son ignorance*, París, Synthélabo. Reeditado con el título *La science contre l'opinion: histoire d'un divorce*, París, Seuil (2003).
- BISHOP, M. (1998) "An Epistemological Role for Thought Experiments", in N. Shanks (Ed.), *Idealization IX: Idealization IN Contemporary Physics*, Amsterdam, Rodopi, pp. 19-33.
- BISHOP, M. (1999) "Why Though Experiments Are Not Arguments", *Philosophy of Science*, 66, pp. 534-41.
- BITBOL, M. & DARRIGOL, O. (eds.) (1992), *Erwin Schrödinger: Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*, París, Editions Frontières.
- BOHM, DAVID (1952) *Quantum Theory*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
- BOHR, N. (1928) "The quantum postulate and the recent development of atomic theory", en ATTI DEL CONGRESSO INTERNAZIONALE DEI FISICI, 11-20 Settembre 1927, Vol. II, (1928), Bologna, Nicola Zanichelli, pp. 565-588, también en *Nature*, 121, pp. 580-90 (1928) y en WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (eds.) 1983, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, pp. 87-126.
- BOHR, N. (1935) "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" *Physical Review*, 48, pp.696-702.
- BOHR, N. (1937) "Causality and Complementarity", *Philosophy of Science*, Vol. 4, No. 3, pp. 289-298.

- BOHR, N. (1949) "Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics", in SCHILPP, A. (ed.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, La Salle, Illinois, Open Court, 1949.
- BOHR, N. (1988) *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza: cuatro ensayos precedidos de una introducción*, Madrid, Alianza Editorial.
- BOHR, N., KRAMERS, H.A. & SLATER, J.C. (1924) "The Quantum Theory of Radiation", *Philosophical Magazine*, 47, 785-802 (1924); Versión en alemán: *Zeitschr. f. Physik*, 24, 69-87 (1924).
- BOKULICH, A. (2001) "Rethinking Thought Experiments", *Perspectives on Science*, 9/3: 285-307.
- BOKULICH, A. (2008) "Paul Dirac and the Einstein-Bohr Debate", *Perspectives on Science*, 16/1, pp. 103-114.
- BOTHE, WALTHER (1926) "Über die Kopplung zwischen elementaren Strahlungsvorgängen", *Zeitschrift für Physik* 37, pp. 547-567.
- BORN, MAX & HEISENBERG, W. (1928) "La mécanique des quanta", en SOLVAY (1928) *Electrons et Photons--Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique Tenu à Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927 sous les Auspices de L'Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars, pp. 143-81.
- BORN, MAX (1928) Contribución a "Discussion générale des idées émises" SOLVAY (1928) *Electrons et Photons--Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique Tenu à Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927 sous les Auspices de L'Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars, pp. 250-253.
- BORN, MAX (1973) *Correspondencia, 1916-1955*, México, Siglo XXI Editores.
- BORSBOOM, D., MELLENBERGH, G. J. AND VAN HEERDEN, J. (2002) "Functional Thought Experiments", *Synthese*, 130, pp. 379-387.
- BRENDEL, E. (2004) "Intuition Pumps and the Proper Use of Thought Experiments", *Dialectica*, 58/1, pp. 88-108.
- BRODY, T. A., CID, R., JIMÉNEZ, J. L., LEVI, D., MARTÍNEZ, J. R., PEREYRA, P., RETCHMAN, R., ROSALES, M. (1976) "La mecánica cuántica y sus interpretaciones", *Revista Mexicana de Física*, 25, p. E31-E62.

- BROWN, J. R. (1986), "Thought Experiments Since the Scientific Revolution", *International Studies in the Philosophy of Science*.
- BROWN, J. R. (1991) *Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, London, Routledge.
- BROWN, J. R. (1993) "Why Empiricism Won't Work", *Proceedings for the Philosophy of Science Association*, 2, pp. 271-279.
- BROWN, J. R (1996) "Thought Experiments", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 1996 Edition)* revisado el 30 de abril de 2012 en: <http://plato.stanford.edu/archives/fall1997/entries/thought-experiment/>
- BROWN, J. R (2002) "Thought Experiments", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2002 Edition)* revisado el 30 de abril de 2012 en: <http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/thought-experiment/>
- BROWN, J. R. (2004) "Why Thought Experiments Transcend Experience", in C. Hitchcock (ed.), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, Malden, MA, Blackwell, pp. 23-43.
- BROWN, J. R (2006) "Thought Experiments", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2002 Edition)* revisado el 30 de abril de 2012 en: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2006/entries/thought-experiment/>
- BROWN, J. R & FEHIGE, Y. (2010) "Thought Experiments", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2010 Edition)*, Edward N. Zalta (ed.), revisado el 30 de abril de 2012 en: <http://plato.stanford.edu/archives/win2010/entries/thought-experiment>
- BROWN, J. R & FEHIGE, Y. (2011) "Thought Experiments", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2011 Edition)*, Edward N. Zalta (ed.), revisado el 30 de abril de 2012 en: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2011/entries/thought-experiment/>
- BRUSH, STEPHEN G. (1980) "The Chimerical Cat: Philosophy of Quantum Mechanics in Historical Perspective", *Social Studies of Science*, Vol. 10, No. 4, pp. 393-447.
- BUNZL, M. (1996) "The Logic of Thought Experiments", *Synthese*, 106/2 (Fall), pp. 227-240.

- BUSCH, P., HEINONEN, T., LAHTI, P. (2007) "Heisenberg's uncertainty principle", *Physics Reports*, 452, pp. 155 – 176.
- CAMILLERI, KRISTIAN (2009) "Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation", *Perspectives on Science*, vol. 17, no. 1, pp. 26-57.
- CAMPBELL, WILLIAM (1931) "Professor Einstein At The California Institute Of Technology, Addresses At The Dinner In His Honor", *Science*, Vol. 73, No. 1893, pp. 376-379.
- CANTOR, GEOFFREY (1989) "The Rhetoric of Experiment", in GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S. (eds.) (1989) *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Cambridge University Press.
- COMPTON, ARTHUR H. (1923) "A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements", *Physical Review*, 21, pp. 483-502.
- COMPTON, ARTHUR H. (1931) "The Uncertainty Principle and Free Will", *Science*, Vol. 74, No. 1911, p. 172.
- CONGRESSO INTERNAZIONALE DEI FISICI, (1928), *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, 11-20 Settembre de 1927 Como, Pavia, Roma*, (Vol. I y II), Bologna, Nicola Zanichelli.
- COOPER, RACHEL (2005) "Thought Experiments", *Metaphilosophy*, 36:3, pp. 328-347.
- DARWIN, CHARLES GALTON (1929) "A Collision Problem in the Wave Mechanics" *Proc. R. Soc. Lond. A*, 124, pp. 375-394.
- DARWIN, CHARLES GALTON (1931a) "Examples of the Uncertainty Principle" *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, Vol. 130, No. 815, pp. 632-639.
- DARWIN, CHARLES GALTON (1931b) "The Uncertainty Principle" *Science*, Vol. 73, No. 1903, pp. 653-660.
- DEBYE, P. (1923) "Zerstreuung von Röntgenstrahlen und quantentheorie" *Zeitschrift fuer Physik*, 24, pp. 161-166.
- DE PABLO, JUAN CANO (2003) "Popper y la Mecánica Cuántica (Comentarios críticos al III Post Scriptum a la lógica de la investigación científica)", *Cuaderno de Materiales, Filosofía y Ciencias Humanas*, No. 18, pp. 35-41.
- DELTETE, R. & GUY, R. (1991) "Einstein and EPR", *Philosophy of Science*, Vol. 58, No. 3, pp. 377-97.

- DEMOURES, FRANÇOIS-XAVIER AND MONNET, ÈRIC (2005) “Le Monde à l'épreuve de l'imagination. Sur «l'Expérimentation Mentale»”, *Revue Tracés*, 9, pp. 37-52.
- DUHEM, P. (1954) *The Aim and Structure of Physical Theory*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- EARMAN, J. ET AL., (eds.) (1994) *Philosophical Problems of the Internal and External World*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press.
- EINSTEIN, A. (1916) “Quantentheorie der strahlung” *Physikalische Gesellschaft, Mitteilungen*, 16, pp. 47–62.
- EINSTEIN, A. (1927) “Bestimmt Schrödinger's Wellenmechanik die Bewegung eines Systems vollständig oder nur im Sinne der Statistik?” *Prussian Academy of Sciences*, 5 May 1927. “Nachtrag zur Korrektur.” (EA 2-100).
- EINSTEIN, A. (1928) Contribución a “Discussion générale des idées émises” SOLVAY (1928) *Electrons et Photons--Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique Tenu à Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927 sous les Auspices de L 'Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars, pp. 253-4.
- EINSTEIN, A. (1930) “Professor Einstein's Address At The University Of Nottingham”, *Science*, Vol. LXXI, No. 1850, pp. 608-810.
- EINSTEIN, A. (1932) “Über die Unbestimmtheitsrelation”, *Zeitschrift für Angewandte Chemie* 45, p. 23 (Abstract).
- EINSTEIN, A. (1934) “On the method of theoretical physics”, *Philosophy of Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 163-169.
- EINSTEIN, A. (1936) “Physics and Reality”, *Journal of the Franklin Institute*, 221, pp. 349-82.
- EINSTEIN, A. (1948) “Quantum mechanics and reality”, *Dialectica* 2, pp. 320-24.
- EINSTEIN, A. (1949) “Remarks Concerning the Essays Brought Together in this Co-operative Volume” en Schilpp, P. A. (ed.) (1951) *Albert Einstein-Philosopher Scientist*. 2nd ed. New York, Tudor Publishing, pp. 671-72.
- EINSTEIN, A. (1954), *Ideas and Opinions*, New York, Bonanza Books.
- EINSTEIN, A. (1984), *Notas autobiográficas*, Madrid, Alianza.

- EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. & ROSEN, N. (1935) "Can Quantum Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?", *Physical Review*, 47, 777-80.
- EINSTEIN, A., TOLMAN, R. C., & ROSEN, N. (1931) "Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics", *Physical Review*, 37, pp. 780-1.
- EINSTEIN A., ROSEN, N. (1935) "The Particle Problem in the General Theory of Relativity", *Physical Review*, 48, pp. 73-77.
- EHRENFEST, P. & BREIT, G. (1922) "Ein bemerkenswerter Fall von Quantisierung" *Zeitschrift für Physik*, 9, pp. 207-210.
- FERMI, E. (1926) "Zur Wellenmechanik des Stossvorganges", *Zeitschrift für Physik*, 40, 399-402.
- FINE, ARTHUR, (1996) *The Shaky Game: Einstein Realism and the Quantum Theory*, Chicago and London, The University of Chicago Press.
- FRANK, P. (1947), *Einstein: His Life and Times*, New York, Knopf.
- FRANKLIN, A. (1986) *The Neglect of Experiment*, New York, Cambridge University Press.
- FRENKEL, J. (1931) "What Does Einstein Mean?", *Science*, Vol. 74, No. 1929, pp. 609-618.
- FORGE, J. (1991) "Thought Experiments in the Philosophy of Physical Sciences", in HOROWITZ, T. & MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD, Rowman and Littlefield, pp. 209-222.
- FURRY, W. H. (1936) "Note on the Quantum-Mechanical Theory of Measurement", *Physical Review*, 49, pp. 393-99.
- GALAVOTTI, M. C. (ed.) (2003) *Observation and Experiment in the Natural and Social Sciences*, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- GALISON, PETER (2005) *Relojes de Einstein, Mapas de Poincaré*, Madrid, Crítica.
- GOODING, D. (1980) "Metaphysics versus Measurement", *Annals of Science*, 37, pp. 1-29.
- GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S., (eds.) (1989) *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Cambridge University Press.
- GOODING, D. & PINCH, T. SCHAFFER, S. (1989) "Introduction: Some uses of experiment", en GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S.,

- (eds.) (1989) *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1-25.
- GOODING, D. (1989) "Magnetic Curves and the Magnetic Field: Experimentation and Representation in the History of a Theory" in GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S., (eds.) (1989) *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 183-216.
- GOODING, D. (1990) *Experiment and the Making of Meaning*, Dordrecht, Kluwer Academic Publisher.
- GOODING, D. (1992) "The Cognitive Turn, or Why Do Thought Experiments Work?", en GIÈRE (ed.) (1992) *Cognitive Models of Science*, Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992, pp. 45-76.
- GOODING, D. (1993) "What is Experimental About Thought Experiments?" in D. HULL, M. FORBES AND K. OKRUHLIK (eds.) *PAS 1992*, vol. 2, East Lansing, MI, Philosophy of Science Association, pp. 280-290.
- GOODING, D. (1994) "Imaginary Science". *British Journal for the Philosophy of Science*, 45/4 (December), pp. 1029-1045.
- GOODING, D. (2001) "Experiment as an instrument of innovation: Experience and embodied thought", *Cognitive Technology: Instruments of Mind, Proceedings.*, pp. 130-140.
- GIÈRE (ed.) (1992) *Cognitive Models of Science*, Minneapolis, University of Minnesota Press.
- HACKING, I. (1983) *Representing and Intervening*, Cambridge: Cambridge University Press.
- HACKMANN, W.D. (1989) "Scientific Instruments: Models of Brass and Aids to Discovery", in GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S., (eds.) (1989) *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 31-59.
- HACYAN, SHAHEN (2006) "Einstein's "Spooky Action at a Distance" in the Light of Kant's Transcendental Doctrine of Space and Time", *Albert Einstein Century International Conference, AIP Conference Proceedings*, Volume 861, pp. 1117-1119.
- HAGGQVIST, S. (1996) *Thought Experiments in Philosophy*, Stockholm, Almqvist & Wiksell International.

- HAGGQVIST, S. (2009) "A Model for Thought Experiments", *Canadian Journal of Philosophy*, 39/1, pp. 55-76.
- HEISENBERG, W. (1927) "Über den anschulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift für Physik*, Volumen 43, 172-198; traducido al inglés en WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (eds.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- HEISENBERG, W. (1958) *Physics and Philosophy*, New York, Harper and Row.
- HEISENBERG, W. (1967) "Quantum Theory and its Interpretation" en ROZENTAL, S. (ed.) (1967) *Niels Bohr, His life and work as seen by his friends and colleagues*, North Holland, Amsterdam; Wiley, New York, pp. 94-108; y en WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (eds.) 1983, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, pp. 56-57.
- HEISENBERG, W. (2004) *La Parte y el Todo. Conversando en Torno a la Física Cuántica*, Madrid, Ellago Ediciones.
- HERMANN, GRETE (1935) "Die Naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik" *Die Naturwissenschaften*, 42, p. 718-21, traducido por Dirk Lumma (1999) "The Foundations of Quantum Mechanics in the Philosophy of Nature, by Grete Hermann" en *The Harvard Review of Philosophy*, VII, pp. 35-44.
- HITCHCOCK CHRISTOPER (ed.) (2004) *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, Oxford, Blackwell.
- HOLTON, G. (1973) *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*, Cambridge, Mass., Harvard University Press.
- HOLTON, G. (1978) *The Scientific Imagination*, Cambridge, Cambridge University Press.
- HOROWITZ, T. AND MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD, Rowman and Littlefield.
- HOWARD, D. (1985) "Einstein on Locality and Separability", *Studies in History and Philosophy of Science* 16, pp. 171-201.
- HOWARD, D. (1990) "Nicht sein kann was nicht sein darf," or the Prehistory of EPR, 1909-1935: Einstein's Early Worries about the Quantum Mechanics of Composite Systems." In *Sixty-two Years of Uncertainty: Historical, Philosophical, and Physical Inquiries into*

- the Foundations of Quantum Mechanics*. Arthur I. Miller (ed.) New York, Plenum Press, pp. 61-111.
- HOWARD, DON (2007) "Revisiting the Einstein-Bohr Dialogue" *Iyyun: The Jerusalem Philosophical Quarterly*, Volume 56, January 2007, p. 57-90.
- HUMPHRIES, P. (1994) "Seven Theses on Thought Experiments", en EARMAN, J. ET AL., (eds.) (1994) *Philosophical Problems of the Internal and External World*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, pp. 205-227.
- IERODIAKONOU, K. (2005) "Ancient Thought Experiments: A First Approach", *Ancient Philosophy*, 25, pp.125-140.
- IRVINE, A., (1991) "Thought Experiments in Scientific Reasoning", en HOROWITZ, T. & MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD, Rowman and Littlefield, pp. 149-166.
- JAMMER, MAX (1966) *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Bar-Ilan University, Israel: Mc Graw-Hill Book Company.
- JAMMER, MAX (1974) *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, New York, London, Sidney, Toronto: John Wiley & Sons.
- JANIS, ALLEN I. (1991) "Can Thought Experiments Fail?", in HOROWITZ, T. AND MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD, Rowman and Littlefield, pp. 113-118.
- KEMBLE, E. C. (1935) "The correlation of wave functions with the state of physical systems" *Physical Review*, 47, pp. 973-4.
- KENNARD, E.H. (1927) "Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen" *Zeitschrift Für Physik*, 44, pp. 326-352.
- KING, P. (1991) "Mediaeval Thought Experiments: The Metamethodology of Mediaeval Science", in HOROWITZ, T. AND MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD, Rowman and Littlefield, pp. 43-64.
- KIRK, C.S., RAVEN, J.E. & SCHOFIELD, M. (1987) *Los Filósofos presocráticos: historia crítica con selección de textos*, Madrid, Gredos.

- KLEIN, MARTIN J. (2010) “Paul Ehrenfest, Niels Bohr, and Albert Einstein: Colleagues and Friends”, *Physics in Perspective*, 12, 307-337.
- KOYRÉ, ALEXANDRE (1968) *Metaphysics and Measurement*. London, Chapman and Hall.
- KOYRÉ, ALEXANDRE (1977) *Estudios de Historia del Pensamiento Científico*, México, Siglo XXI Editores.
- KRAGH, HELGE (2007) *Generaciones Cuánticas. Una Historia de la Física del Siglo XX*, Madrid, Ediciones Akal.
- KRIMSKY, SHLEDON (1973) “The Use and Misuse of Critical Gedankenexperimente“, *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, IV/2, p. 323-334.
- KUHN, T. (1977) “A Function for Thought Experiments”, en *The Essential Tension*, Chicago, University of Chicago Press, pp. 240-265.
- KUHN, T. (1980) *La Teoría del Cuerpo Negro y la Discontinuidad Cuántica, 1894-1912*, Madrid, Alianza Editorial.
- KUHN, T. (2006) *La Estructura de las Revoluciones Científicas*, México: Fondo de Cultura Económica.
- KÜHNE, ULRICH (2005) *Die Methode des Gedankenexperiments*, Frankfurt, Suhrkamp.
- KÜHNE, ULRICH (2009) “A short history of the method of thought experiments in science” *Thought Experiments: A Workshop*, Toronto, 22-23 Mayo, revisado el 15 de junio de 2011 en http://philsci-archive.pitt.edu/4700/1/TE_Toronto090522_kuehne.pdf
- LANDÉ, ALFRED (1965) “Why Do Quantum Theorists Ignore the Quantum Theory?”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 15, No. 60, pp.307-313.
- LANDO, A. & BRINGUIER, E. (2008) “On the classical roots of the Einstein–Podolsky–Rosen paradox”, *European Journal of Physics*, 29, pp. 313–318.
- LANDSMAN, N.P. (2006) “When champions meet: Rethinking the Bohr–Einstein debate”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37, pp. 212–242.

- LAYMON, RONALD (1978) "Newton's Experimentum Crucis and the Logic of Idealization and Theory Refutation", *Studies in History and Philosophy of Science*, 9, 51-77.
- LAYMON, RONALD (1991) "Thought Experiments of Stevin, Mach and Gouy: Thought Experiments as Ideal Limits and as Semantic Domains" en HOROWITZ, T. AND MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD, Rowman and Littlefield, pp. 167-192.
- LENZEN, VICTOR F., (1969) "Concepts and Reality in Quantum Mechanics," *Philosophy of Science* **16**, 4, pp. 279-286.
- LICHTENBERG, G. G. (1990) *Aforismos*, Barcelona, Edhasa.
- LOCKE, D. (1997) *La ciencia como escritura*, Madrid, Cátedra.
- MACH, E. (1960) *The Science of Mechanics*, LaSalle Illinois, Open Court.
- MACH, E. (1976) "On Thought Experiments", en *Knowledge and Error*, Dordrecht, Reidel, pp. 134-147.
- MARGENAU, HENRY (1931) "The Uncertainty Principle And Free Will", *Science*, Vol. 74, No. 1928, p. 596.
- MARGENAU, HENRY (1936) "Quantum-mechanical description", *Physical Review*, 49, p. 240-2.
- MAUDLIN, TIM (2007) "Completeness, supervenience and ontology", *Journal Of Physics A: Mathematical And Theoretical*, 40, pp. 3151-3171.
- MAXWELL, J. C. (1871) *Theory of Heat*, London, Longman.
- MCALLISTER, JAMES (1996) "The Evidential Significance of Thought Experiments in Science", *Studies in History and Philosophy of Science*, 27/2, pp. 233-250.
- MEHRA, JAGDISH. (1975) *The Solvay Conferences on Physics: Aspects of the Development of Physics Since 1911*, Dordrecht, Países Bajos, Reidel.
- MEHRA, JAGDISH. (1987) "Niels Bohr's Discussions with Albert Einstein, Werner Heisenberg, and Erwin Schrödinger: The Origins of the Principles of Uncertainty and Complementarity" *Foundations of Physics*, Vol. 17, No. 5, pp. 461-506.
- MEHRA, JAGDISHN & RECHENBERG, HELMUT (2001a) *The Historical Development of Quantum Theory*, Vol. 6, Parte 1, New York, Springer-Verlag.

- MEHRA, JAGDISHN & RECHENBERG, HELMUT (2001b) *The Historical Development of Quantum Theory*, Vol. 6, Parte 2, New York, Springer-Verlag.
- MICHELSON, ALBERT, A. (1931) "Professor Einstein At The California Institute Of Technology, Addresses At The Dinner In His Honor", *Science*, Vol. 73, No. 1893, pp. 376-379.
- MILLER, ROBERT C. (1932) "Determinism and the wheather", *Science*, Vol. 75, No. 1946, pp. 413-14.
- MILLIKAN, ROBERT A. (1931) "Professor Einstein At The California Institute Of Technology, Addresses At The Dinner In His Honor", *Science*, Vol. 73, No. 1893, pp. 376-379.
- MILLIKAN, ROBERT A. (1931) "The Reason And The Results Of Dr. Einstein's Visit To The California Institute Of Technology", *Science*, Vol. 73, No. 1893, pp. 380-381.
- MOORE, W. (1989), *Schrödinger, Life and Thought*, Cambridge, Cambridge University Press.
- MOUE, A. S., KYRIAKOS, A. M., KARAYIANNI, H. (2006) "Tracing the Development of Thought Experiments in the Philosophy of Natural Sciences", *Journal of General Philosophy of Science*, 37, pp. 61-75.
- NAYLOR, R. H. (1989) "Galileo's Experimental Discourse", in GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S. (eds.) (1989) *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 117-130.
- NERSESSIAN, N. J. (1992) "How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science", in Giere, R. N. (ed.) (1992) *Cognitive Models of Science*, Minneapolis, University of Minnesota Press, pp. 3-45.
- NERSESSIAN, N. (1993) "In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling", in D. Hull, M. Forbes and K. Okruhlik (eds.) (1993) *PAS 1992*, vol. 2, East Lansing, MI, Philosophy of Science Association, pp. 291-301.
- NORTON, J. (1991) "Thought Experiments in Einstein's Work", en HOROWITZ, T. AND MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD., Rowman and Littlefield, pp. 129-148.

- NORTON, J. (1996) "Are Thought Experiments Just What You Always Thought?", *Canadian Journal of Philosophy*, 26, pp. 333-366.
- NORTON, J. (2004a) "On Thought Experiments: Is There More to the Argument?" *Proceedings of the 2002 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Philosophy of Science*, 71, pp. 1139-1151.
- NORTON, J. (2004b) "Why Thought Experiments Do Not Transcend Empiricism?", en HITCHCOCK CHRISTOPER (ed.) (2004) *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, Oxford, Blackwell, pp. 44-66.
- NOYES, W. A. (1931) "The Uncertainty Principle", *Science*, Vol. 74, No. 1928, pp. 595-596.
- PAIS, ABRAHAM (1979) "Einstein and the quantum theory", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 51, No. 4, pp. 863-914.
- PAIS, ABRAHAM (1984) *El señor es sutil...La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Ariel, Barcelona.
- PAIS, ABRAHAM (1991) *Niels Bohr's times: in physics, philosophy and polity*, Oxford: Clarendon Press.
- PATY, MICHAEL, (1995) "The Nature of Einstein Objections to the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics", *Foundations of Physics*, 25, January No. 1, pp. 183-204.
- PAULI, W. (1928) Contribución a "Discussion générale des idées émises" en SOLVAY (1928) *Electrons et Photons--Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique Tenu à Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927 sous les Auspices de L 'Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars, pp. 280-2.
- PERES, ASHER (2002) "Karl Popper and the Copenhagen interpretation", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 33, pp. 23-34.
- PLAGA, R. (2000) "An extension of Popper's experiment can test interpretations of quantum mechanics", *Foundations of Physics Letters*, 13/5, pp. 461-476.
- POPPER, K. (1934) "Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen", *Die Naturwissenschaften*, 22, pp. 807-808.
- POPPER, K. (1962) *La lógica de la investigación científica*, Tecnos, Madrid.
- POPPER, K. (1982) *Quantum Theory and the Schism in Physics : from the "Postscript to the Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, Londres.

- QURESHI, TABISH (2005) "Understanding Popper's experiment", *American Association of Physics Teachers*, 73/6, pp. 541-544.
- RAMSAUER, CARL (1920) "Über den Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen", *Physikalische Zeitschrift*, 21, pp. 576-578.
- REISS, JULIAN (2002) "Causal Inference in the Abstract or Seven Myths About Thought Experiments", *Centre for Philosophy of Natural and Social Science Causality: Metaphysics and Methods, Technical Report 03/03*, pp. 1-43.
- RESCHER, N. (1991) "Thought Experimentation in Presocratic Philosophy" en HOROWITZ, T. AND MASSEY, G. (eds.) (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage, MD, Rowman and Littlefield, pp. 31-42.
- ROSEN, N. & VALLARTA, J. M. S. (1932) "Relativity and the Uncertainty Principle", *Physical Review*, Vol. 40, pp. 569-577.
- ROSENFELD, LEON (1967) "Niels Bohr in the thirties", en ROZENTAL, S. (ed.) (1967) *Niels Bohr, His life and work as seen by his friends and colleagues*, North Holland, Amsterdam; Wiley, New York, pp. 114-137.
- ROSENFELD, LEON (1971) "Men and Ideas in the History of Atomic Theory" *Arch. Hist. Exact. Sci.*, 7, pp. 69-90, en WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (eds.) 1983, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, pp. 57-61.
- ROZENTAL, S. (ed.) (1967) *Niels Bohr, His life and work as seen by his friends and colleagues*, North Holland, Amsterdam; Wiley, New York.
- RUARK, A. E. (1928) "Heisenberg's uncertainty relation and the motion of free particles" *Physical Review*, 31, p. 708.
- RUARK, A. E. (1935) "Is the Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Complete?", *Physical Review*, 48, p. 466-7.
- SAUER, T. (2007) "An Einstein manuscript on the EPR paradox for spin observables", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38, pp. 879-887.
- SCIENCE NEWS (1931) "Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics", *Science*, 73, 1891, Supplement: Science News, p. 10.
- SCHILPP, P. A. (ed.) (1951) *Albert Einstein-Philosopher Scientist*. 2nd ed. New York, Tudor Publishing.

- SCHRÖDINGER, E. (1931) “Spezielle Relativitätstheorie und Quantenmechanik”, Sitz. Der preuss. Akad. der Wiss., p. 238.
- SCHRÖDINGER, E. (1935a) “Discussion of Probability Relations between Separated Systems” *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31, pp. 555-563.
- SCHRÖDINGER, E. (1935b) “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, *Die Naturwissenschaften*, 23, pp. 807-12, 823-8 y 844-9; traducción al inglés de Lumma, D., “The Present Situation in Quantum Mechanics”, *Proc. Am. Phil. Soc.*, 124, pp. 323-338 (1980), reimpresso en Wheeler, J. A. & Zurek, W. H. (eds.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, pp. 152-168.
- SEARES, FREDERICK H. (1931) “Adress to the Luncheon”, *Science*, 73, No. 1893, pp. 379-380.
- SCHAFFER, S., (1989) “Glass Works: Newton’s Prisms and the Uses of Experiment”, in GOODING, D., PINCH, T., SCHAFFER, S., (eds.), 1989, *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 67-91.
- SHAPER, D. (1982) “The Concept of Observation un Science and Philosophy”, *Philosophy of Science*, 49, pp. 485-525.
- SHI, YU (2000) “Early Gedanken Experiments of Quantum Mechanics Revisited”, *Annalen Phys.*, 9, pp. 637-648.
- SHORT, A. J. (2001) “Popper’s Experiment and Conditional Uncertainty Relations”, *Foundations of Physics Letters*, Vol. 14, No. 3, pp. 275-284.
- SOLVAY (1928) *Electrons et Photons--Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique Tenu à Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927 sous les Auspices de L 'Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars.
- SOLVAY (1932) *Le Magnetisme--Rapports et Discussions du Sixième Conseil de Physique Tenu à Bruxelles du 20 au 25 Octobre 1930 sous les Auspices de L 'Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars.
- SORENSEN, R. (1992a) *Thought Experiments*, Oxford: Oxford University Press.
- SORENSEN, R. (1992b) “Thought Experiments and the Epistemology of Laws”, *Canadian Journal of Philosophy*, 22/1 (March), pp. 15-44.

- STERN, ALEXANDER W. (1931) "The Uncertainty Principle", *The Physical Review, Letters to the Editor*, Vol. 37, No. 9, pp. 1186-1187.
- STOLZENBURG, K. (1975) "Die Entwicklung des Bohrschen Komplementaritätsgedankens in den Jahren 1924 bis 1929" Tesis Doctoral, University of Stuttgart.
- STUEWER, R. H. (1975) *The Compton effect: Turning point in physics*, New York, Science History Publications.
- SZABÓ GENDLER, T. (1998) "Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiment", *British Journal for the Philosophy of Science* 49 (3), pp. 397-424.
- SZABÓ GENDLER, T. (2004) "Thought Experiments Rethought and Reperceived" *Philosophy of Science* 71 (5), pp. 1152-1163
- VON WEIZSÄCKER, K. F. (1931) "Ortsbestimmung eines Elektrons durch ein Mikroskop" *Zeitschrift für Physik*, 70, pp. 114-130.
- VON WEIZSÄCKER, K. F. (1934) "Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen", *Die Naturwissenschaften*, 22, p. 808.
- VON WEIZSÄCKER, K. F. (1935) "Zur Deutung der Quantenmechanik" *Zeitschrift für Physik* 118, pp. 489-509.
- WEYL, HERMANN (1928) *Gruppentheorie und Quantenmechanik*, Leipzig, S. Hirzel.
- WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (eds.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- WHITAKER, A. (1996), *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*, Cambridge, Cambridge University Press.
- WITT-HANSEN, JOHANNES (1976) "H.C. Ørsted, Immanuel Kant and the Thought Experiment", *Danish Yearbook of Philosophy*, 13, pp. 48-65.
- WOLFE, H. C. (1935) "Quantum mechanics and physical reality", *Physical Review*, 49, p. 274.

TABLA DE CONTENIDOS

NOTA PRELIMINAR	1
AGRADECIMIENTOS	3
SUMARIO	5
SUMMARY	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN. EXPERIMENTOS IMAGINARIOS EN LA FÍSICA CUÁNTICA: UN PRINCIPIO PARA LA DISCUSIÓN	9
¿Qué es un experimento imaginario? ¿Dónde comienza la discusión? <i>Gedankenexperiment</i> : la etimología para explicar la naturaleza de la herramienta. Una discusión filosófica sobre un problema físico. El contexto histórico y el espacio de la nueva física.	9
Una función para los experimentos imaginarios. Razones para un contexto histórico. La física cuántica: ¿el lugar más apropiado? Motivos para una selección: desde el microscopio de Heisenberg hasta el gato de Schrödinger. El velo que cubre a los experimentos imaginarios: una realidad mucho más cotidiana. El comienzo.	23
CAPÍTULO II. 1924-1930. LOS EXPERIMENTOS IMAGINARIOS PARA UN PÚBLICO PRIVADO: DEL MICROSCOPIO DE HEISENBERG AL FOTÓN Y LA CAJA DE EINSTEIN.	33

No todas las historias se cuentan desde el comienzo.
El Efecto Compton y el artículo de Bohr-Kramers-

Slater: el camino hacia el Principio de Incertidumbre. 33
Dudas antiguas que vuelven a agitarse. El experimento que comienza con la discusión, o la discusión que comienza con el experimento. Un primer asomo del entrelazamiento cuántico.

La discusión pública: el eco del centenario de Alessandro Volta. El Principio de Complementariedad: las brumas del norte. El raudo otoño del 1927. La quinta Conferencia de Solvay. La primera irrupción de C. G. Darwin: 1929. La sexta Conferencia de Solvay. El público privado. La retórica del experimento imaginario. 70

Sobre el estado de la discusión en torno a la mecánica cuántica durante los primeros años de la década de 1930. De los escenarios *privados* a los escenarios *públicos*. La importancia de la muerte de Paul Ehrenfest. 125

CAPÍTULO III. 1931-1935. DISCUSIÓN ABIERTA: EL CASO DEL EXPERIMENTO IMAGINARIO DE EINSTEIN, PODOLSKY & ROSEN. 137

Cinco años de cambios. Las visitas de Einstein a Estados Unidos y el largo lustro de las mudanzas. ¿Apertura de la polémica? Los participantes ocultos de la discusión. La voluntad de una oposición a Copenhague. 137

1930-1931: ¿Los últimos rescoldos del experimento del 140

microscopio de Heisenberg? Para una defensa del Principio de Incertidumbre. Niebla, nubes y cámaras de gas. Un cambio de perspectiva.

El artículo de Einstein, Tolman y Podolsky: Sobre el conocimiento del pasado y el futuro en la mecánica cuántica. La visita a Pasadena: el primer gesto de un cambio radical en la comunicación científica. La física comienza su mudanza. Breves variaciones epistolares del experimento del fotón y la caja. La complicidad de Ehrenfest. 150

Centelleos, microscopios y diálogos galileanos para una defensa del Principio de Incertidumbre. La imposibilidad de escapar del indeterminismo. Incertidumbre Vs. Indeterminación: la naturaleza conflictiva de los términos. Una Torre de Babel Cuántica. 169

1932: El formalismo matemático como sustento del experimento imaginario. El experimento ideal de Rosen y Vallarta. La conjunción entre el Principio de Incertidumbre y la Relatividad General: una intención de sometimiento. Otra forma de la dualidad, otra noción de la complementariedad. 194

Inicio del éxodo. Einstein y Rosenfeld: 1933. La oralidad de los experimentos imaginarios. El inicio del argumento central de la paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen. Una recapitulación hecha dieciséis años después. 203

¿Un experimento imaginario fallido? Karl Popper y su participación en la polémica. El último eslabón antes de la publicación de EPR. Una comunicación con Albert Einstein. 1934: La lógica del descubrimiento científico. 214

Einstein, Podolsky y Rosen: 1935. Una paradoja. La cumbre de la crítica de Einstein hacia la mecánica cuántica. Discusión abierta, discusión incompleta. El modelo de discusión de los experimentos imaginarios. 232

CAPÍTULO IV. EPÍLOGO DE UNA POLÉMICA: REACCIONES POSTERIORES A EPR. EL CASO DEL GATO DE SCHRÖDINGER. 255

El primer desencanto con EPR: la correspondencia entre Albert Einstein y Erwin Schrödinger. Nuevas paradojas: *ball-in-the-box* y *gunpowder*. Apertura definitiva de la discusión. ¿Diálogo entre científicos o soliloquios autoinmunes? Una nueva generación de físicos se enfrenta a la *antigua* polémica. Kemble y Ruark: inmediatez en la respuesta. 255

La respuesta de Niels Bohr a EPR: la aceptación de un reto sin conclusión. Reconstrucción de un experimento imaginario. La persuasión y la retórica de Bohr. De las salas de Bruselas a las páginas públicas norteamericanas. 270

La primera participación pública de Schrödinger y la primera mención del entrelazamiento. Otras respuestas tardías a EPR: Wolfe, Furry, Margenau. La 293

voz femenina en la mecánica cuántica: Grete Hermann. La fosa y los públicos de la física cuántica en las décadas de 1920 y 1930. La discusión que unifica al actor y al espectador.

El mito del gato de Schrödinger: la pieza que logra la continuidad de la discusión. El carácter «interminado» de la polémica. Un pequeño experimento imaginario que soporta el paso de las décadas. Microcosmos vs. Macrocosmos. Los elementos pintorescos. El asesinato del gato: un segundo experimento imaginario. 328

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES. REFLEXIONES FINALES EN TORNO AL PAPEL DE LOS EXPERIMENTOS IMAGINARIOS EN LA FÍSICA CUÁNTICA. 355

La respuesta de Einstein a EPR: *Physics and Reality*, 1936. Una discusión sin final. El entrelazamiento de los experimentos imaginarios. Propuestas para posteriores investigaciones: la Relatividad, el tiempo en la mecánica cuántica. 355

ANEXO. TABLA DE EXPERIMENTOS IMAGINARIOS EN LA FÍSICA CUÁNTICA 367

BIBLIOGRAFÍA 375

TABLA DE CONTENIDOS 393

