



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Departament de Física Aplicada i Òptica

Modulación completa del plano  
complejo mediante pantallas de cristal  
líquido. Aplicación a la reconstrucción  
de hologramas de Fresnel digitales

Raúl Tudela Fernández

Tesis Doctoral

Barcelona, Julio 2004



Universitat de Barcelona  
Departament de Física Aplicada i Òptica  
Programa de doctorado Técnicas instrumentales de la Física y la Ciencia de  
Materiales  
Bienio 1998/00

# Modulación completa del plano complejo mediante pantallas de cristal líquido. Aplicación a la reconstrucción de hologramas de Fresnel digitales

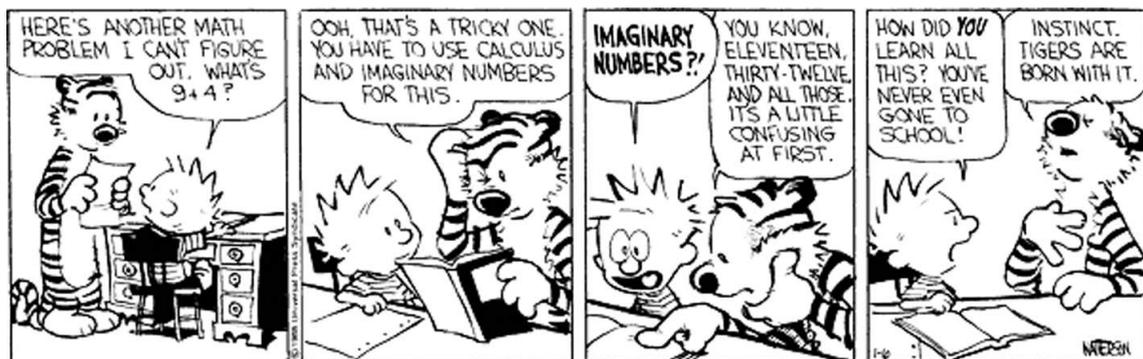
Memoria de la tesis presentada en Julio de 2004 por  
Raúl Tudela Fernández  
para optar al título de Doctor en Física  
dirigida por el Dr. Artur Carnicer González y por el Dr. Santiago Vallmitjana Rico

Artur Carnicer González y Santiago Vallmitjana Rico



*Dedicado a María  
y a la memoria de  
Tomás, Pedro y Aurora,  
gracias por crear el principio*







# Agradecimientos

Como muchas de las cosas de esta vida, sin la colaboración e interacción con muchas personas este trabajo no habría sido posible. A todas ellas mi más sincero agradecimiento, y aunque no puedo citar a todas y cada una de ellas (pues la memoria y el espacio son limitados), si debo mencionar en especial a unas cuantas.

En primer lugar a mis directores, Artur Carnicer y Santiago Vallmitjana, cuyos consejos, ayuda y todo lo que hiciese falta ha hecho posible que este trabajo se llevase a buen puerto. Tampoco hay que olvidar a Ignasi Labastida y Estela Martín, siempre dispuestos a echar una mano, o incluso dos, a la hora de realizar los experimentos o de echar unas partidillas en el ordenador. Ni a Ignasi Juvells y Mario Montes, siempre cerca para resolver cualquier duda que se les plantee, o los compañeros de fatiga en el laboratorio, Julio Pérez, Jordi Andilla, Sergio Arcos, con los que he intercambiado no pocas cuestiones que hacen que las cosas hayan sido más fáciles, en muchos aspectos. Mención especial para Encarnación Pleguezuelos, que además ha compartido despacho y ha tolerado estoicamente mi música. Gracias también a Salvador Bosch, a J. de F. Moneo (cuyos programas todavía nos hacen más fácil el trabajo) y al resto de compañeros y ex-compañeros del grupo de investigación en Óptica Física.

Por otro lado, he de mencionar a los compañeros, colegas y además amigos físicos, que han compartido la carrera y el doctorado, junto con más de una cena y alguna que otra cerveza, ellos siempre saben dar ánimos y soportar quejas y chistes malos. Enric Álvarez, con el que se puede hablar de todo e ir donde sea necesario, aunque no siempre es recomendable dejarle escoger la película, Marta Fonrodona, con la que no hace falta hablar mucho para entenderse y con la que siempre es un placer ver jugar al Barça (manque pierda), Joan Alberich, con el que cualquier conversación resulta interesante, aún cuando se trata sobre la doma de alumnos de secundaria, Toni Pons, con el que mostrarse en desacuerdo en cualquier discusión filosófica siempre es de lo más entretenido y estimulante, David Soler, con el que es fácil ponerse de acuerdo

en ver una película en v.o.s.e o tomar un vinito en la Rioja, Damià Gomilà, que aún en la distancia está cerca para cualquier cosa y Sergio Valencia, compañero desde el instituto, con el que se puede contar esté donde esté. Tampoco me puedo olvidar de la sección informática, con Secun Vicente, amigos desde párvulos, y Ana Candelario, Roque Bonilla, Mary Candelario, Santi Galán, Yoli Candelario y el resto, con los que perderse por la montaña, ir a cenar o simplemente hablar de lámparas se ha hecho imprescindible.

Por último, pero no por ello menos importante sino todo lo contrario, agradecerles todo a mi familia, en especial a mis padres, Isidro y Pilar, y a mi hermana Eulalia, por su apoyo incondicional e incuestionable durante todos estos años. De ellos he aprendido mucho, sino todo, de lo que realmente importa y no cabe lugar a dudas que sin ellos nada de todo esto habría sido posible. Espero que este trabajo les haga sentir al menos una milésima parte de lo orgulloso que yo me siento de ellos.

En resumen, a todos mi más sincero agradecimiento.

Y a ellos más todavía.

Y ahora, miles de transformadas de Fresnel...

*Este trabajo ha sido parcialmente financiado por una Beca de Postgrado del Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario del MECD y por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología a través del proyecto DPI2001-3365.*

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos y estructura del trabajo . . . . .	5
<b>2. Difracción de Fresnel e información compleja</b>	<b>9</b>
2.1. Teoría escalar de la difracción . . . . .	9
2.1.1. Teorema integral de Helmholtz-Kirchoff. Formulación de Rayleigh-Sommerfeld . . . . .	10
2.2. Aproximación de Fresnel . . . . .	13
2.3. Holografía . . . . .	16
2.4. Hologramas de Fresnel digitales . . . . .	19
2.5. Cálculo de la transformada de Fresnel . . . . .	20
2.6. Información compleja en el dominio de Fresnel . . . . .	21
2.6.1. Amplitud y fase . . . . .	23
2.6.2. Partes real e imaginaria . . . . .	30
<b>3. Hologramas en soporte fotográfico</b>	<b>33</b>
3.1. Codificación de información compleja con el método de Lee . . . . .	33
3.2. Hologramas de Fresnel codificados con el método de Lee . . . . .	37
3.3. Reconstrucción experimental de hologramas de Lee . . . . .	40
3.3.1. Cambios de escala . . . . .	41
3.3.2. Reconstrucciones con iluminación convergente . . . . .	44
<b>4. Pantallas de cristal líquido</b>	<b>47</b>
4.1. Cristales líquidos . . . . .	47
4.2. Polarización de la luz y matrices de Jones . . . . .	48
4.2.1. Representación matricial . . . . .	50
4.2.2. Medios anisótropos . . . . .	53

4.3.	Pantallas de cristal líquido nemático . . . . .	54
4.3.1.	Representación matemática de una pantalla de cristal líquido nemático . . . . .	55
4.3.2.	Casos especiales de las pantallas de cristal líquido TNLC . . . . .	59
4.3.3.	Celda TNLC entre dos polarizadores . . . . .	60
4.3.4.	Ángulo del vector director de entrada de las moléculas de una celda TNLC diferente de cero . . . . .	62
4.3.5.	Zona sin giro en una celda TNLC . . . . .	64
4.3.6.	Características de las pantallas VGA . . . . .	66
4.3.7.	Modos de operación de las pantallas VGA . . . . .	67
4.4.	Pantallas ferroeléctricas . . . . .	72
4.4.1.	Matrices de Jones y curvas operativas . . . . .	75
<b>5.</b>	<b>Modulación compleja acoplando pantallas de transmisión. Configuración en cascada</b>	<b>81</b>
5.1.	Modulación compleja completa con amplitud y fase . . . . .	82
5.2.	Resultados simulados . . . . .	86
5.3.	Comparación de los métodos de ajuste . . . . .	90
5.3.1.	Ajuste de la distribución test del plano complejo unidad . . . . .	94
5.4.	Reconstrucción de objetos a distintas distancias . . . . .	100
5.5.	Montaje y resultados experimentales . . . . .	100
<b>6.</b>	<b>Modulación compleja sumando pantallas de reflexión. Configuración de Mi- chelson</b>	<b>105</b>
6.1.	Modulación compleja completa sumando la parte real y la imaginaria .	105
6.2.	Resultados simulados . . . . .	109
6.2.1.	Reconstrucción a distintas distancias . . . . .	111
6.3.	Evaluación del método . . . . .	113
6.4.	Montaje y resultados experimentales . . . . .	118
6.4.1.	Factores de error del montaje . . . . .	122
<b>7.</b>	<b>Modulación compleja sumando pantallas de transmisión. Configuración de Mach-Zehnder</b>	<b>127</b>
7.1.	Números complejos como combinación de dos fases . . . . .	127
7.2.	Suma de las ditribuciones mostradas en dos pantallas de cristal líquido	129
7.3.	Ajuste a la suma de configuraciones . . . . .	132
7.4.	Resultados simulados . . . . .	137

7.4.1. Evaluación del método al propagar el holograma . . . . .	139
7.5. Montaje y resultados experimentales . . . . .	145
7.5.1. Factores de error en el montaje . . . . .	146
<b>8. Conclusiones</b>	<b>153</b>
<b>A. Apéndice: Captación digital de hologramas</b>	<b>163</b>
A.1. Resolución del holograma . . . . .	164
A.2. Montaje y resultados experimentales . . . . .	165
<b>B. Apéndice: Publicaciones relacionadas con el trabajo</b>	<b>169</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>173</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>185</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>193</b>

