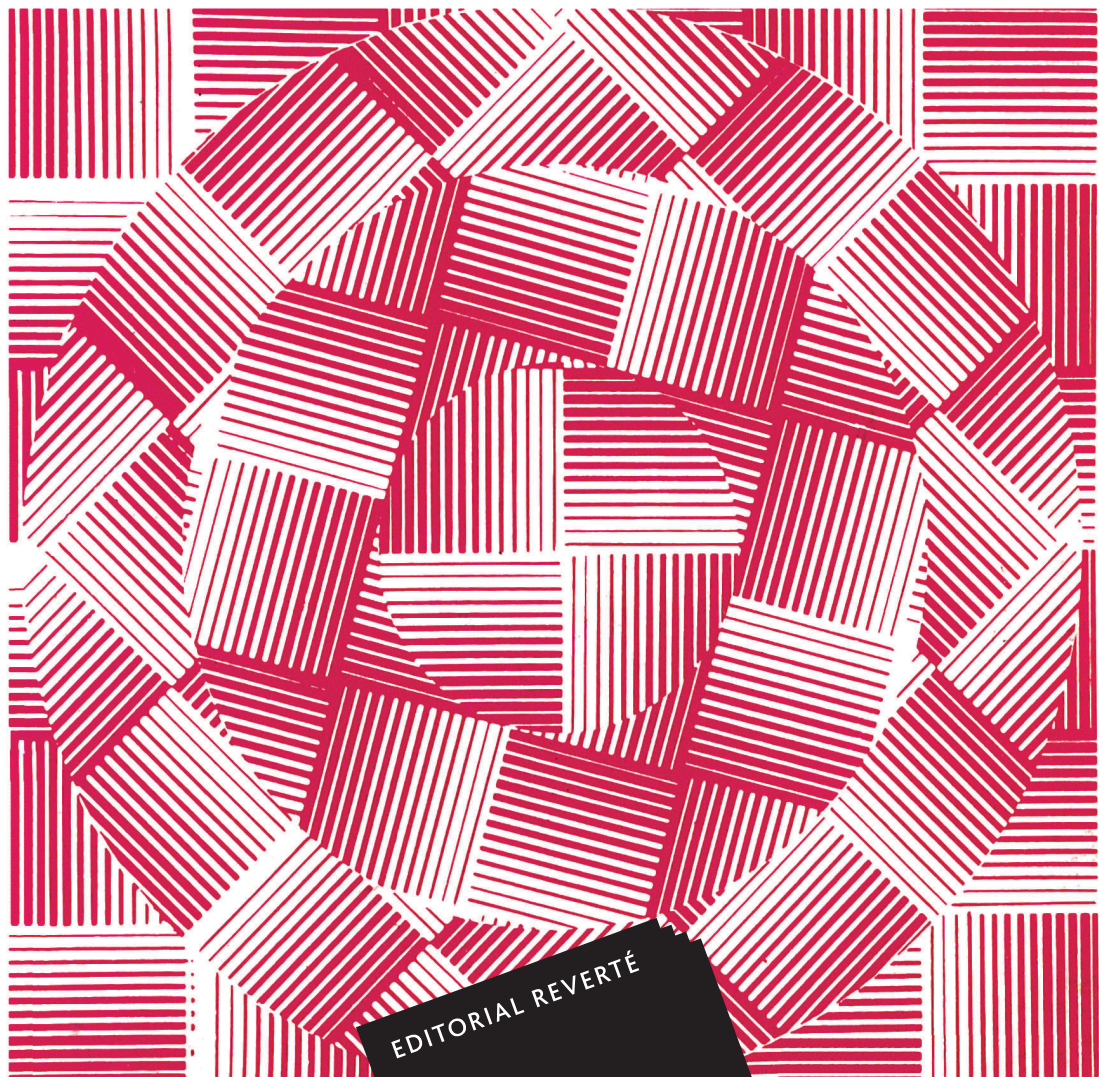


Curso de ciencias físicas

R. ANNEQUIN Y J. BOUTIGNY

OPTICA 1



EDITORIAL REVERTÉ

Curso de ciencias físicas

OPTICA 1

R. ANNEQUIN Y J. BOUTIGNY

agrégés de sciences physiques

Para uso de los alumnos de las clases
de matemáticas superiores y del primer
ciclo universitario



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

Cours de sciences physiques. Optique 1

Edición original en lengua francesa publicada por:

Librairie Viubert, Paris

Copyright © by Librairie Viubert, Paris

Edición en papel:

© Editorial Reverté, S. A., 1976

ISBN: 978-84-291-4007-1 **Tomo 1**

ISBN: 978-84-291-4000-2 **Obra completa**

Edición e-book (PDF):

© Editorial Reverté, S. A., 2020

ISBN: 978-84-291-9035-9

Versión española por:

Dr. José M^a Vara Cuadrado

Profesor de la Universidad Autónoma de Madrid

Revisada por:

Dr. Julián Fernández Ferrer

Catedrático de Física de la Universidad Politécnica de Barcelona

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

Índice analítico

Capítulo 1. LUZ. ONDAS

1.1. Resumen esquemático de algunas nociones	1
Ondas	
1.2. Ondas planas	2
1.3. Onda plana sinusoidal. Vector de onda	6
Ejercicio	7
1.4. Onda cuasi-plana	9
1.5. Ondas luminosas	10
1.6. Índice de refracción de un medio homogéneo	12

Capítulo 2. EL PRINCIPIO DE FERMAT

2.1. Noción de rayo luminoso	15
2.2. Camino óptico	16
2.3. Principio de Fermat	17
2.4. El principio de Fermat abarca las leyes de Descartes	18
Estigmatismo	
2.5. Estigmatismo riguroso	21
Ejercicios	21
2.6. Imagen de un punto	25
2.7. Aplanetismo	27
Ejercicios	28

Capítulo 3. APROXIMACIÓN LINEAL EN ÓPTICA

3.1. Eikonal	31
3.2. Eikonal angular	32
3.3. Expresión diferencial de la eikonal angular	33
3.4. La función χ para el dioptrio esférico	34
3.5. Óptica paraxial	36
3.6. Estigmatismo aproximado	37
3.7. Fórmula de Lagrange-Helmholtz	40

Ejercicio	41
3.8. Caso de sistemas catadioptrios	42

Capítulo 4. ELEMENTOS CARDINALES DE UN SISTEMA CENTRADO

4.1. Nociones. Definiciones	43
Caso de sistemas dioptrios	
4.2. Focos. Planos focales	44
4.3. Planos principales	45
4.4. Distancias focales. Fórmulas de Newton	46
4.5. Puntos nodales	47
4.6. Relaciones de conjugación con los orígenes en los puntos principales	48
4.7. Construcción de la imagen de un objeto	49
4.8. Vergencias. Corvergencias	50
Asociación de dos sistemas centrados	
4.9. Focos. Planos principales	50
4.10. Distancias focales. Fórmula de Gullstrand	51
Sistemas centrados afocales	
4.11. Definición. Propiedades. Relación de conjugación	53

Capítulo 5. ESTUDIO DE ALGUNOS SISTEMAS PARTICULARES

Dioptrios esféricos	
5.1. Estigmatismo	55
5.2. Elementos cardinales. Distancias focales	55
5.3. Relaciones de conjugación	58
5.4. Construcción de la imagen de un objeto	60
5.5. Dioptrio plano	60
Ejercicios	61
Lentes	
5.6. Definiciones. Centro óptico	64
Ejercicio	65
Lentes delgadas	
5.7. Propiedades generales	67
5.8. Algunas construcciones geométricas	68
5.9. Relaciones de conjugación	69
Ejercicio	70
5.10. Asociación de lentes delgadas	71
Ejercicio	72
5.11. El microscopio	74

Capítulo 6. ESPEJOS. SISTEMAS CATADIOPTRIOS

Espejos

<i>Índice analítico</i>	VII
6.1. Propiedades generales de los espejos	77
6.2. Construcciones geométricas	78
6.3. Relaciones de conjugación	79
Ejercicio	80
Sistemas catadioptrios	
6.4. Propiedades	81
6.5. Telescopio	82
Ejercicio	83
Capítulo 7. MAGNITUDES FOTOMÉTRICAS ENERGÉTICAS	
7.1. Aspecto energético de la radiación	85
7.2. Definiciones	86
7.3. Tubo de radiación	87
7.4. Intensidad energética de una fuente puntual	89
7.5. Iluminación de una superficie por una fuente puntual	90
7.6. Magnitudes energéticas referentes a una fuente extensa	91
Ejercicios	93
Fotometría de los instrumentos ópticos	
7.7. Diagrama de abertura y pupilas	97
7.8. Conservación de la extensión óptica y de la luminancia	97
Índice alfabético	101

CAPÍTULO 1

Luz. Ondas

1.1. RESUMEN ESQUEMÁTICO DE ALGUNAS NOCIONES

La Óptica es la ciencia que estudia la luz, cuya definición simple e incompleta sería la del agente físico que nos permite ver los objetos. Los cuerpos luminosos son ellos mismos *fuentes luminosas*, los demás, para poder ser vistos, necesitan ser iluminados por una fuente luminosa.

Se dice que una fuente luminosa es *puntual* para el que la utiliza (ojo o aparato óptico) si sus dimensiones son muy pequeñas con relación a la distancia a que se halla o, de otra forma más precisa, si es vista bajo un diámetro aparente no superior a $1'$, es decir $3 \cdot 10^{-4}$ radianes.

La luz visible puede actuar sobre receptores diferentes al ojo, como, por ejemplo, una placa fotográfica o una célula fotoeléctrica; estos receptores nos llevan al conocimiento de la existencia de otros dominios luminosos, el ultravioleta y el infrarrojo, invisibles para el ojo y que, por tanto, excluimos en el estudio de la Óptica abordado en esta obra.

Las manifestaciones luminosas fueron atribuidas por NEWTON (hacia 1700) a la emisión por la fuente de partículas de naturaleza imprecisa. Más adelante, en el siglo XIX, se adopta con FRESNEL la teoría ondulatoria, la única capaz de interpretar los fenómenos de interferencia y de difracción. Esta teoría se consolidó con MAXWELL al precisar la estructura de las ondas luminosas: *Éstas están constituidas por un campo eléctrico \vec{E} y por un campo magnético \vec{B} perpendiculares y cuyos módulos son funciones sinusoidales del tiempo con un mismo período; todas las ondas luminosas, cualquiera que sea su frecuencia, se propagan en el vacío a la misma velocidad, $c = 299\,790\text{ km s}^{-1}$, que está ligada a las magnitudes ϵ_0 (permitividad del vacío) y μ_0 (permeabilidad del vacío) por la relación de Maxwell*

$$\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$$

Esta es la teoría electromagnética de la luz.

La propagación de la luz lleva consigo un transporte de energía: así una lámina de platino ennegrecida, al ser expuesta a una radiación luminosa, se calienta.

La potencia que transporta está ligada a las amplitudes de los campos \vec{E} y \vec{B} por una relación sencilla.

La teoría electromagnética, sin embargo, no permite interpretar intercambios de energía entre la materia y la radiación, como los que se dan, por ejemplo, en la emisión fotoeléctrica. La extracción de electrones de una materia sometida a la radiación presenta un carácter discontinuo, y por lo tanto, el intercambio de energía que supone debe ser discontinuo, lo que es incompatible con el carácter ondulatorio de la luz.

Esto nos lleva a suponer que la energía de la radiación no está repartida a lo largo de la onda, sino concentrada en forma de partículas. Desde 1915 EINSTEIN había admitido esta hipótesis, atribuyendo a cada partícula, que él llama *fotones*, una energía proporcional a la frecuencia de la onda ($W = h\nu$). Así pudo enunciar las leyes que rigen el efecto fotoeléctrico, leyes en perfecto acuerdo con los hechos experimentales.

Esta dualidad onda-corpúsculo parece contradictoria hasta que en 1924 Luis DE BROGLIE muestra la existencia de ondas asociadas a los electrones y así puede interpretar fenómenos que la Mecánica Clásica, aplicada al movimiento de los electrones, no podía interpretar. La asociación onda-corpúsculo fue extendida a otras partículas materiales, conduciendo a HEISENBERG, SCHRÖDINGER y DIRAC a formular la Mecánica Ondulatoria. Esta nueva Mecánica reúne en un mismo conjunto las propiedades de la Mecánica Clásica y las hipótesis de BOHR y SOMMERFELD acerca del átomo. Debemos decir que fue principalmente DIRAC el que propuso una síntesis de la teoría electromagnética de la luz y de la teoría de los fotones de Einstein.

Debemos insistir en un punto: el decir que la teoría ondulatoria no explica todas las manifestaciones de la luz no significa que deba ser rechazada en bloque: el carácter vibratorio de la luz es cierto y permite adentrarnos en la *Óptica geométrica* como una aproximación de la Óptica; éste será el objeto de nuestro estudio. De aquí nace la necesidad de que examinemos las propiedades fundamentales de las ondas.

ONDAS

1.2. ONDAS PLANAS

1.º Ondas planas que se propagan en la dirección Ox .

Dado un punto $M(x, y, z)$ en el espacio euclídeo (\mathcal{E}); y $f(u)$ una función real de variable real $u = vt - x$, donde t es el tiempo y x la abscisa de M , la cantidad $f(u)$ recibe el nombre de *vibración* en el punto M .

a) Si se trata de fenómenos sonoros producidos en O , origen del sistema de referencia, la vibración en M es el desplazamiento de las moléculas que primitivamente estaban en equilibrio en M .

b) Si se trata de la deformación elástica de una cuerda, la vibración es el desplazamiento transversal del elemento de cuerda en torno a M.

c) En el caso de un fenómeno luminoso, la vibración en M representa la variación del campo eléctrico \vec{E} que acompaña al fenómeno. La realidad es más complicada, pues en la teoría electromagnética además del campo \vec{E} interviene el campo magnético \vec{B} , sin embargo, al estar relacionados \vec{E} y \vec{B} por las ecuaciones de Maxwell, en la mayoría de casos resulta suficiente el estudio de la vibración de \vec{E} .

Supongamos que se pueda representar gráficamente la vibración $f(u)$ en la forma indicada en fig. 1.2.1.

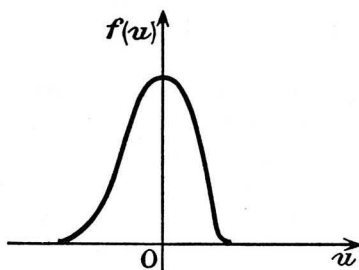


FIG. 1-2-1.

Si se efectúa el cambio de x por $x + \delta$ y de t por $t + \frac{\delta}{v}$ la vibración no cambia:

$$f(vt - x) = f\left[v\left(t + \frac{\delta}{v}\right) - (x + \delta)\right]$$

En cada instante, la vibración depende de la abscisa x , pero no de y ni de z , es decir, de la posición de M respecto a Ox.

Si colocásemos dispositivos que registrasen la vibración en los lugares x_0 y $x_0 + \delta$ obtendríamos las curvas de las figuras 1.2.2. (a) y 1.2.2. (b) respectivamente, que representan la función $f(t)$. El registro en el punto $x_0 + \delta$ aparece con un retardo de $\frac{\delta}{v}$: se dice que este tiempo es el que tarda la vibración $f(u)$ en propagarse desde x_0 a $x_0 + \delta$.

v es la velocidad de propagación de la vibración: se supone constante (independiente de t y de x) en un medio homogéneo.

Si fotografiásemos la vibración en los instantes t y $t + \frac{\delta}{v}$ obtendríamos (figu-