



D. E. Roller \ R. Blum

Física

Tomo II

Electricidad, Magnetismo
y Óptica
Volumen 1

EDITORIAL REVERTÉ

D. E. Roller \ R. Blum

Física

Tomo II

**Electricidad, Magnetismo
y Óptica**

Volumen 1



**EDITORIAL
REVERTÉ**

Barcelona · Bogotá · Buenos Aire · México

Título de la obra original:

**PHYSICS:
Electricity, Magnetism, and Light
Volume two**

Edición original en lengua inglesa publicada por

Holden-day, San Francisco

Copyright © by Holden-Day, Inc.

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 1990

Edición en papel

ISBN: 978-84-291-4341-6 Tomo II, Volumen I

ISBN: 978-84-291-4340-9 Obra completa

Edición ebook (PDF)

ISBN: 978-84-291-9507-1

Versión española por:

Dr. Juan de la Rubia Pacheco

Catedrático de Física General
de la Universidad de Valencia

y

Dr. José Aguilar Peris

Catedrático de Termología
de la Universidad Complutense de Madrid

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona, España

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.

Prólogo

Este libro tiene sus bases en el prestigioso texto clásico Mechanics, Molecular Physics, Heat, and Sound, de Robert A. Millikan, Duane Roller y E. C. Watson, editado por vez primera en 1938, y en una serie de apuntes de clase sobre electricidad, magnetismo y óptica, escritos por los mismos autores en colaboración con Carl Anderson y Wolfgang Panofsky. El principal autor de esta primera versión fue el profesor Duane E. Roller, quien posteriormente emprendió —como su gran ambición— el trabajo de revisión y puesta al día para su publicación a lo largo de su vida. Para poder realizar este proyecto aceptó en 1957 el puesto que le ofreció Joseph Platt, presidente del Harvey Mudd College en Claremont, California, recientemente inaugurado y donde enseñó física y trabajó en el manuscrito. Fue durante este período cuando el profesor Roller me presentó su libro y despertó mi entusiasmo para revisarlo y publicarlo. Sin embargo, su muerte sobrevino en 1965 cuando el proyecto estaba todavía en la etapa de desarrollo.

Por sugerencia del profesor David Saxon solicité al doctor Ronald Blum, entonces profesor de física de la Universidad de Chicago, que completase el manuscrito. Fue una empresa ambiciosa que el doctor Blum realizó en la Universidad de Maryland mientras en la Comisión sobre College Physics dirigía un esfuerzo pionero de exploración y desarrollo del uso de ordenadores en la enseñanza de la física general. El presente libro representa, pues, un tratamiento clásico de la física general puesta al día mediante una completa revisión y la adición de nuevos capítulos, abundantes y nuevos ejemplos, aplicaciones, problemas e ilustraciones. Una característica fundamental es el uso del ordenador dentro del contexto de la física general. El doctor Blum, principal autor de estos volúmenes, ha conseguido fusionar el tratamiento pedagógico del primer trabajo con un enfoque moderno, ofreciendo al estudiante un texto de física introductoria, único en su género.

La publicación de este libro es la culminación de un ambicioso proyecto de ambos autores. El profesor Roller fue uno de los más respetados y conocidos profesores de física de su época y por ello fue recompensado con la Medalla Oersted en 1949 por la Asociación Americana de Profesores de Física. Durante toda su vida dedicó una cantidad considerable de tiempo en la preparación de la primera versión y posteriormente en su revisión. El doctor Blum ha dedicado más de una década en la expansión, desarrollo y modernización del material. Por su esfuerzo, cuidado y dedicación para la terminación de este proyecto me complace expresarle mi sincero agradecimiento. Desde un punto de vista personal la publicación de este libro significa algo muy importante para nosotros dos.

Estamos en deuda con muchas personas que revisaron el manuscrito y proporcionaron valiosos comentarios y sugerencias creativas que mejoraron globalmente el texto. En las primeras etapas fueron muy eficaces las ayudas de Richard Olson y Norma Campbell. Un agradecimiento especial merecen el profesor Anthony Buffa por su meticuloso esfuerzo en el desarrollo editorial del libro y el profesor

Sumner Davis por su generosa entrega en tiempo y consejo. Gracias también a aquellos implicados en la producción real del libro, en particular a Nancy Clark, que diseñó el libro y dirigió el primer volumen, a Larry McCombs, que dirigió el segundo volumen, y a Edward Riley, editor gerente.

Vosotros, estudiantes, seréis los beneficiarios de los esfuerzos combinados de estas personas. Esperamos que sabréis entender y apreciar los pensamientos e ideas expuestos en este libro y que vuestra dedicación al estudio reflejará la dedicación que hizo posible su creación. Mucho de lo que aprendáis en este libro permanecerá con vosotros toda la vida y os será valioso en futuros estudios. Independientemente del campo de vuestra profesión, quizás también contribuiréis con aquello que estudiéis en este libro a la formación de futuras generaciones, para su mejor comprensión y más profunda apreciación de esa hermosa ciencia que es la Física.

San Francisco

Frederick H. Murphy

Prefacio

Einstein señaló una vez que la característica más asombrosamente simple del universo es que resulta extraordinariamente comprensible y razonable. Este libro es una introducción a la física, que es la más razonable de las ciencias naturales. El objetivo que se ha pretendido conseguir es el de reunir las fuentes, la teoría y la práctica de cada tema y alcanzar así una descripción unificada en la cual surjan lógica y razonablemente, unas de otras, las etapas del desarrollo de la física, sin ningún hueco mistificador o salto acrobático de intuición. Cuando no ha sido posible dentro del nivel del texto proceder con lógica inexorable de un paso al siguiente, se orienta por lo menos al alumno para que consiga una apreciación del grado en que resulta razonable el resultado mediante argumentos heurísticos, claramente señalados como tales. Sean cualesquiera los defectos que se encuentren en estas páginas, se espera sinceramente que no esté entre ellos la vacilación.

Este libro es el segundo volumen de un texto sobre introducción a la física para alumnos que estudien seriamente ciencias físicas, ciencias de la vida e ingeniería. Aquellos que sigan este curso deberán haber estudiado previamente geometría, álgebra y trigonometría; el cálculo diferencial e integral, el álgebra y la trigonometría son también requisitos previos para el segundo volumen. El primer volumen cubre la mecánica y la termodinámica; el segundo estudia la electricidad y el magnetismo, la luz y la óptica. Tenemos en preparación un tercer volumen sobre física moderna y mecánica cuántica. La organización del contenido es esencialmente clásica con tres importantes excepciones.

En primer lugar nuestro objetivo son los conceptos y no los fenómenos aislados. Así en este volumen los capítulos 26 a 29 tratan la electrostática de las cargas puntuales en el vacío y el capítulo 30 extiende estos conceptos a la materia macroscópica, aunque las deducciones estén basadas en modelos moleculares. Los capítulos 31 y 32 aplican la electrostática a los fenómenos estacionarios de las corrientes eléctricas uniformes y el capítulo 33 es una mezcla de temas avanzados que incluyen los fundamentos de los circuitos electrónicos. La siguiente área importante es el estudio de la magnetostática que se trata en los capítulos 34 a 36. Este último capítulo extiende la magnetostática a la materia macroscópica por medio del concepto de corrientes de Ampère.

Los capítulos 37 y 38 sobre fems inducidas y autoinducciones ponen los cimientos de la teoría electromagnética de la luz y la radiación que se trata en los capítulos 41 y 42. En cierto sentido el capítulo 39 es una digresión, aunque muy práctica e importante, en la cual los circuitos de CA se tratan detalladamente. Este capítulo introduce también el uso de variables complejas ofreciendo así al estudiante las herramientas para el tratamiento sucinto y fructífero de la óptica física y, en consecuencia, la mecánica cuántica. (Se han incluido referencias cruzadas para los capítulos del tercer volumen.)

El último tema importante tratado en este volumen es la óptica. Los capítulos 43 y 44 ofrecen los fundamentos necesarios de la óptica geométrica para entender los sistemas prisma, espejo y lente y aparatos como los telescopios, microscopios y cámaras fotográficas. Los capítulos 45 y 46 discuten la óptica física basada en la construcción de Huygens (ya introducida en el capítulo 18 del primer volumen). La construcción de Huygens no distingue entre ondas longitudinales y transversales, pero el capítulo 47 discute los efectos de polarización que revelan la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas en medios ilimitados.

La segunda característica excepcional para un libro de esta naturaleza es la inclusión de abundante material histórico, no como mera deferencia al pasado o patriotismo científico, sino más bien para que el alumno actual de física conozca el crecimiento orgánico de nuestro conocimiento. La física no ha surgido bruscamente de la frente del genio, sino que es el resultado de múltiples experiencias variadas y de la discusión de muchas teorías distintas. Nuestro objetivo se verá cumplido si el alumno puede detectar la racionalidad de este crecimiento y quizás piense, «dados estos hechos, ¿habría llegado yo a las mismas conclusiones?». Así por ejemplo, en los capítulos 34 y 35 comenzamos nuestro estudio de la magnetostática con la observación de Gilbert de los polos magnéticos y utilizamos esta analogía con la ley de la electrostática de Coulomb y la tercera ley del movimiento de Newton para deducir la ley de Biot y Savart (que usualmente se expone al alumno por proclamación).

La historia es un asunto específicamente humano y forma parte de nuestro estudio del presente y nuestra esperanza de futuro. El físico es humano y está (o debería estar) implicado con los problemas y el futuro de la humanidad. En línea con esta filosofía hemos incluido un capítulo sobre física del plasma y magnetohidrodinámica, así como discusiones detalladas sobre física espacial, reactores de fusión y holografía. Además en discusiones y problemas se encontrarán numerosos ejemplos de nuestro interés por los futuros recursos energéticos.

La tercera característica poco corriente en este texto es la inclusión de métodos orientados por un ordenador. Dado el desarrollo histórico de la física, ¿cuáles son las herramientas que se necesitan para este proceso continuo? Una herramienta muy importante —tan importante que empieza a ser por sí misma un factor conceptual en el propio desarrollo de la ciencia— es el ordenador y más recientemente el calculador de mano programable y el microprocesador. La física como cuerpo de conocimiento debe asimilar para sí la potencia del cálculo electrónico, lo mismo que en etapas anteriores incluyó el álgebra, el cálculo diferencial e integral, la matemática superior y la tecnología. Las modernas técnicas de cálculo con ordenador deben hacerse asequibles a los alumnos dentro del contexto de la física en la etapa más inmediata posible de su desarrollo intelectual. De aquí que este volumen continúe el curso sobre métodos de ordenador iniciado en el primer volumen. Ahora aplicamos viejos métodos a una variedad de nuevos problemas e introducimos nuevos métodos para la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales. El hecho de que un ordenador se programe fácilmente para manipular variables complejas nos animó a introducir el álgebra compleja en nuestros estudios de circuitos de CA y de óptica, en lugar de seguir fieles a los venerables, pero complicados métodos de los fadores. Así, a expensas de cierto trabajo laborioso inicial se gana profundidad física y se reduce la carga matemática.

En lugar de presentar muchas secciones cortas de longitud variable, hemos preferido utilizar un enfoque modular, manteniendo la longitud de cada sección

aproximadamente constante. Existen cinco o seis secciones por capítulo y una sección de clase ordinaria dará de sí lo suficiente como para cubrir una o dos secciones. Todos los capítulos pueden completarse en el tiempo de una semana, y puede desarrollarse el volumen completo en un año académico regular o quizás en menos tiempo. Cada sección con sus problemas puede considerarse como una unidad de estudio separada, lo cual hace más fácil que el profesor y los alumnos sepan dónde están y acomoden su marcha al unísono. La estructura modular no sólo se presta a la autoenseñanza personalizada sino que permite también el desarrollo de un sistema de estudio mediante tres posibles vías. Las vías, que se ilustran en forma de un diagrama de flujo en la guía del curso que se expone a continuación son (A) física básica de iniciación, (B) métodos de la física orientados al manejo del ordenador y (C) física de iniciación avanzada. Cada vía es autoconsistente y supone el conocimiento de la vía anterior, estando dispuestas de modo que el material más avanzado generalmente se presenta al final de cada capítulo. Las secciones opcionales se indican con asteriscos en la guía del curso. Si el tiempo es limitado puede darse un curso breve siguiendo sólo la vía A. La Guía del Profesor ofrece una discusión más detallada del método de vías.

En este volumen se encuentran 187 ejemplos resueltos, que deben considerarse como parte integral del texto. También los problemas tienen una importancia considerable. Los alumnos no pueden aprender a pensar como los físicos a no ser que resuelvan, y en cantidad apreciable, problemas interesantes y que llamen la atención sobre puntos sobresalientes o conflictivos del temario. En este volumen se presentan 912 problemas y la mayoría de ellos constan de dos o más partes; algunos de ellos son más bien cuestiones para pensar, que verdaderos problemas con cálculos más o menos elaborados. Al final de cada capítulo se dan casi todas las soluciones de los problemas sin que sean visibles de modo inmediato. Los problemas se dividen de acuerdo con las secciones del texto, de modo que los más difíciles se sitúan al final de cada sección. Los problemas más avanzados llevan al alumno a través de un determinado número de pasos hasta llegar a alguna conclusión interesante o valiosa. Se sugiere que el profesor o instructor seleccione algunos de los problemas del final de cada capítulo y los asigne como tarea para casa si no hay tiempo suficiente para resolverlos en clase.

Los temas relacionados con el ordenador están marcados claramente con un asterisco y los problemas orientados para su resolución con ordenador están también señalados adecuadamente (aunque la mayoría de ellos no requieren realmente confeccionar ningún programa, sino que se ocupan fundamentalmente de los métodos). Los programas de ordenador que se encuentran en el texto están escritos en el lenguaje de ordenador universal —el diagrama o gráfico del flujo—, de modo que la presentación se hace sin un lenguaje especial. Además, no se necesita ninguna experiencia previa en ordenadores. De hecho, los métodos de ordenador pueden estudiarse con provecho sin tener que recurrir a ningún ordenador, aunque siempre es recomendable el tener experiencia propia. Una breve introducción a los fundamentos del lenguaje de programación BASIC se incluye en el Apéndice I; éste puede servir como guía para el uso del BASIC en casi todos los ordenadores o microordenadores ahora en uso.

Cuando se llega a comprender cada vez más a los ordenadores y sus métodos de cálculo, se tiende a ser menos dependientes de ellos tanto psicológica como prácticamente. El conocimiento del análisis numérico, de las aproximaciones y errores puede frecuentemente conducir a soluciones rápidas en una calculadora manual y así se le ayuda también al alumno a evitar los peligros de sustituir el cálculo nu-

mérico por la intuición. Las evidentes ventajas del ordenador son la facilidad de cálculo (más física con menos matemáticas) y el estudio de casos o situaciones más reales. También anima al estudio de los errores y construcción de algoritmos, al empleo de procedimientos de recurrencia y a la simulación de experimentos. El empleo del ordenador obliga a la precisión y a la disciplina, conduce a ser más conscientes de nuestros propios procesos de abstracción y análisis e incluso sirve para hacer surgir cuestiones fundamentales acerca de la naturaleza de nuestra descripción de la realidad física. El ordenador puede introducir un nuevo sentido de descubrimiento incluso en los problemas más conocidos y hace posible una puerta abierta en el currículum físico, en el trabajo propio y en el laboratorio.

La redacción de este libro ha costado unos trece años. Numerosas personas han suministrado consejos, sugerencias útiles, críticas acertadas e indicaciones y ciertamente merecen que se les reconozca su labor aquí. En primer y más principal lugar hemos de mencionar al muy respetado físico, profesor, escritor y académico Duane Roller, quien suministró el manuscrito inicial del primer volumen, junto con un ejemplo de constancia y dedicación a la enseñanza que me ha servido de guía e inspiración. Sin esta base, nunca se habría escrito este libro. Mi único sentimiento es el de no haber podido conocer al profesor Roller.

Alfred Bork sugirió la integración de los ordenadores en el texto. Julius Brandstatter nos animó de modo constante y su ayuda fue de gran valor. Anthony Buffa realizó una maravillosa y penosa labor en las detalladas revisiones de las distintas versiones de este libro, así como de las pruebas de imprenta. Entre los que revisaron el manuscrito e hicieron muchos comentarios y sugerencias valiosas podemos citar a Sumner Davis, Charles Bordner, Douglas Shawhan, Robert Leighton, Harold D. Rohrschac, Walter D. Wales, David Cook, Robert March, Stanley Williams, Charles Whitten, Jr., R. Wayne Crews, Don Martin, Malcolm Smith, Warren Blaker, Jerry Pine, Anthony Leitner, David McDaniels, D. Murray Alexander, J. Gordon Stipe, Jr., H. R. Brewer, M. E. Oakes, John L. Powell, Herbert D. Peckham, Susan Schwartz, Harry Bates, Peter Sturrock, Philip DeLavore, David Saxon, Kenneth Jolles, Mark Zemansky, Burton Fried, Arthur Leuermann, John Robson, Timothy Kelley, Louis Deegan, Jr., Christopher Jones y Mary Ashford.

Frederick H. Murphy, Presidente de Holden-Day, fortaleció mi propia resolución, de modo que sin su fe en el éxito de este libro no habría llegado a terminarse. Mi agradecimiento también a Ted Riley por su extraordinario esfuerzo en supervisar la producción de cada volumen y a Judy Nolan de Allservice Phototype-setting por su ayuda en convertir el manuscrito en letra impresa. Finalmente deseo expresar mi mayor aprecio a Larry McCombs, editor de este volumen, por su gran y absoluta dedicación. Ha sido un placer y un aprendizaje trabajar con él, aunque no me admitiera decir «puesto que» en lugar de «porque».

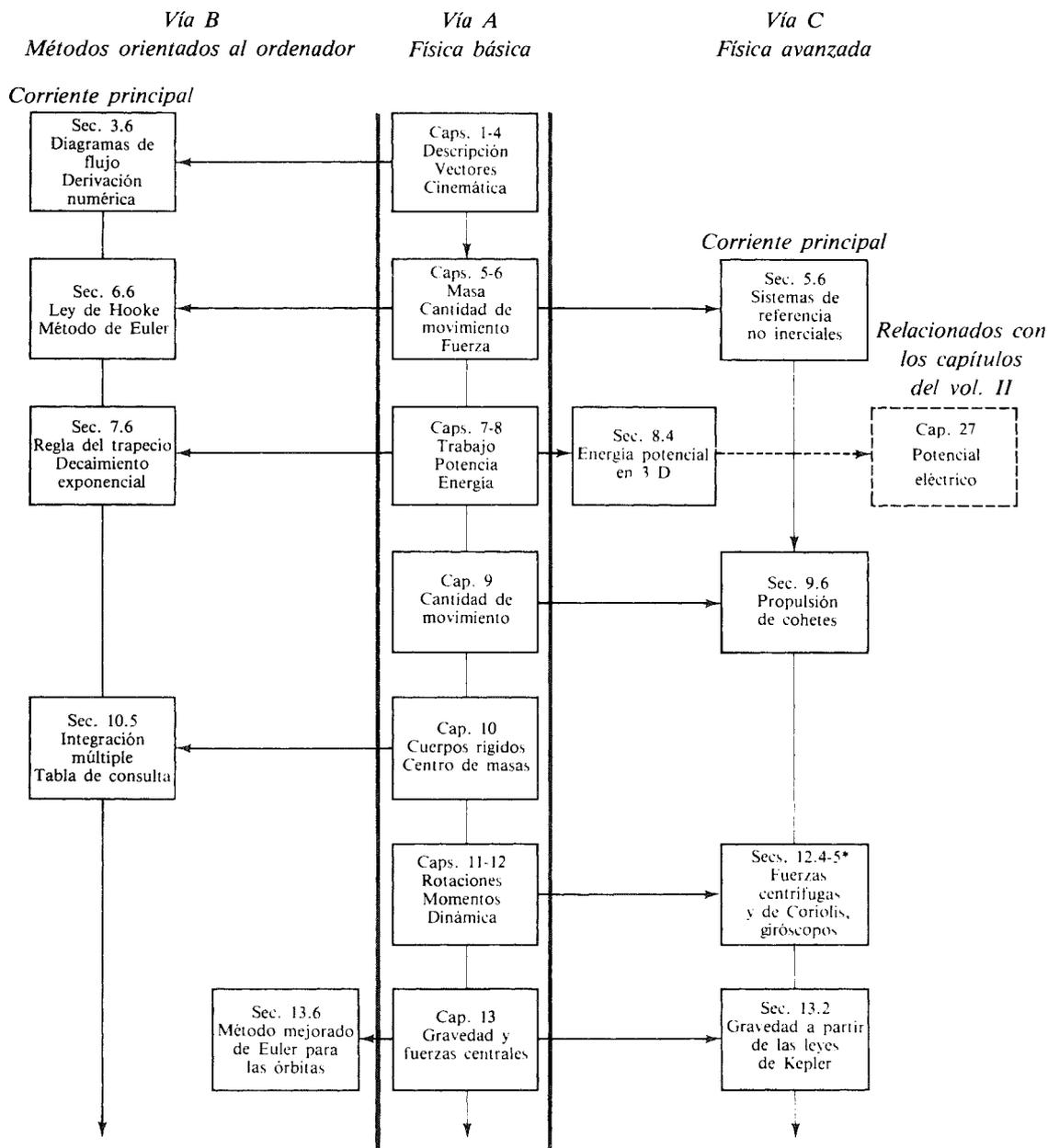
Baltimore
Septiembre, 1981

Ronald Blum

*A mis padres, Sol y Helen Blum, por el amor
que nunca me faltó
y a mis hijos, Elana, Tamara y Don,
con el amor que nunca les faltará*

Guía del curso

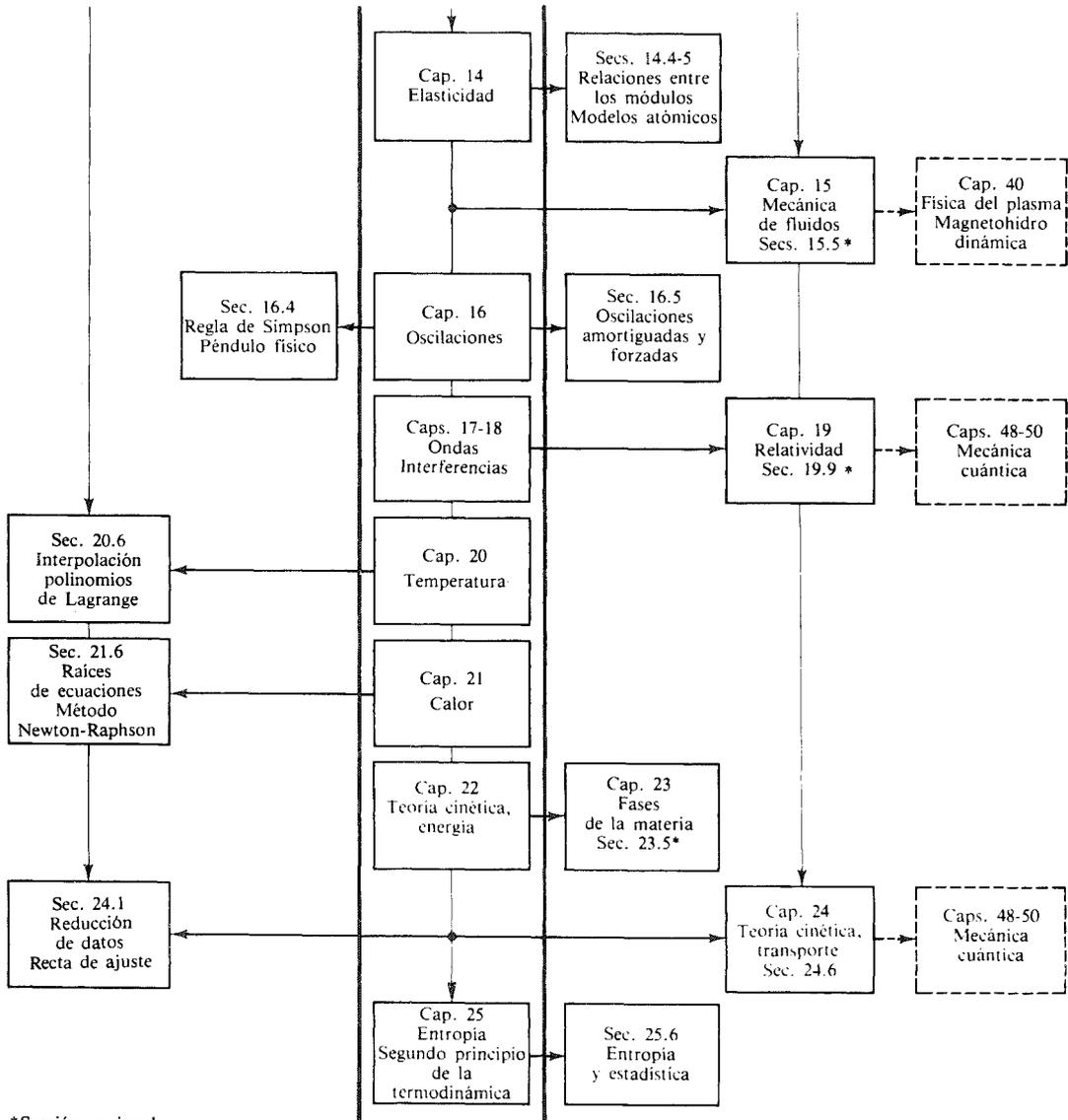
VOLUMEN UNO



Vía B
Métodos orientados al ordenador

Vía A
Física básica

Vía C
Física avanzada

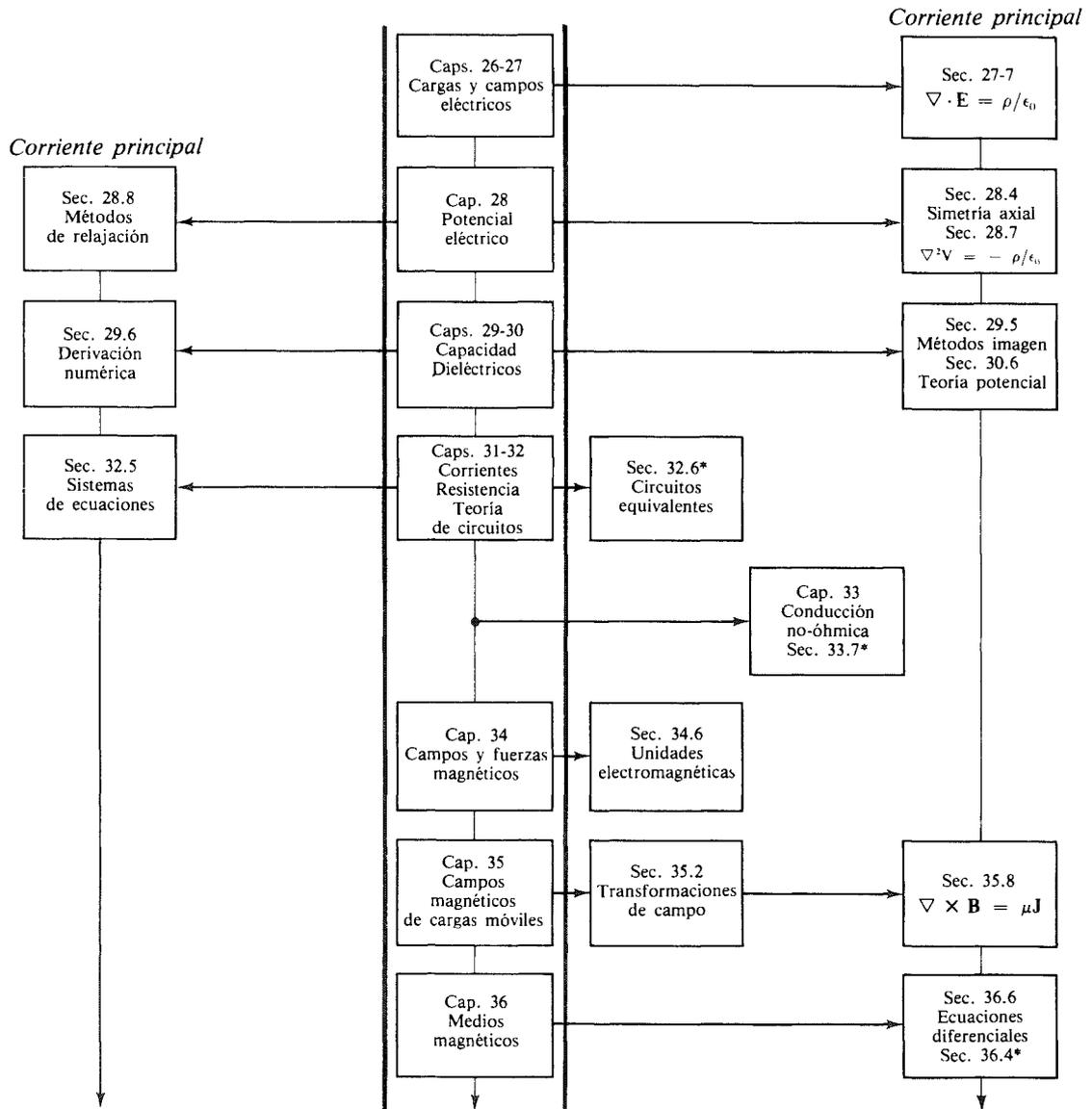


VOLUMEN DOS

Vía B
Métodos orientados al ordenador

Vía A
Física básica

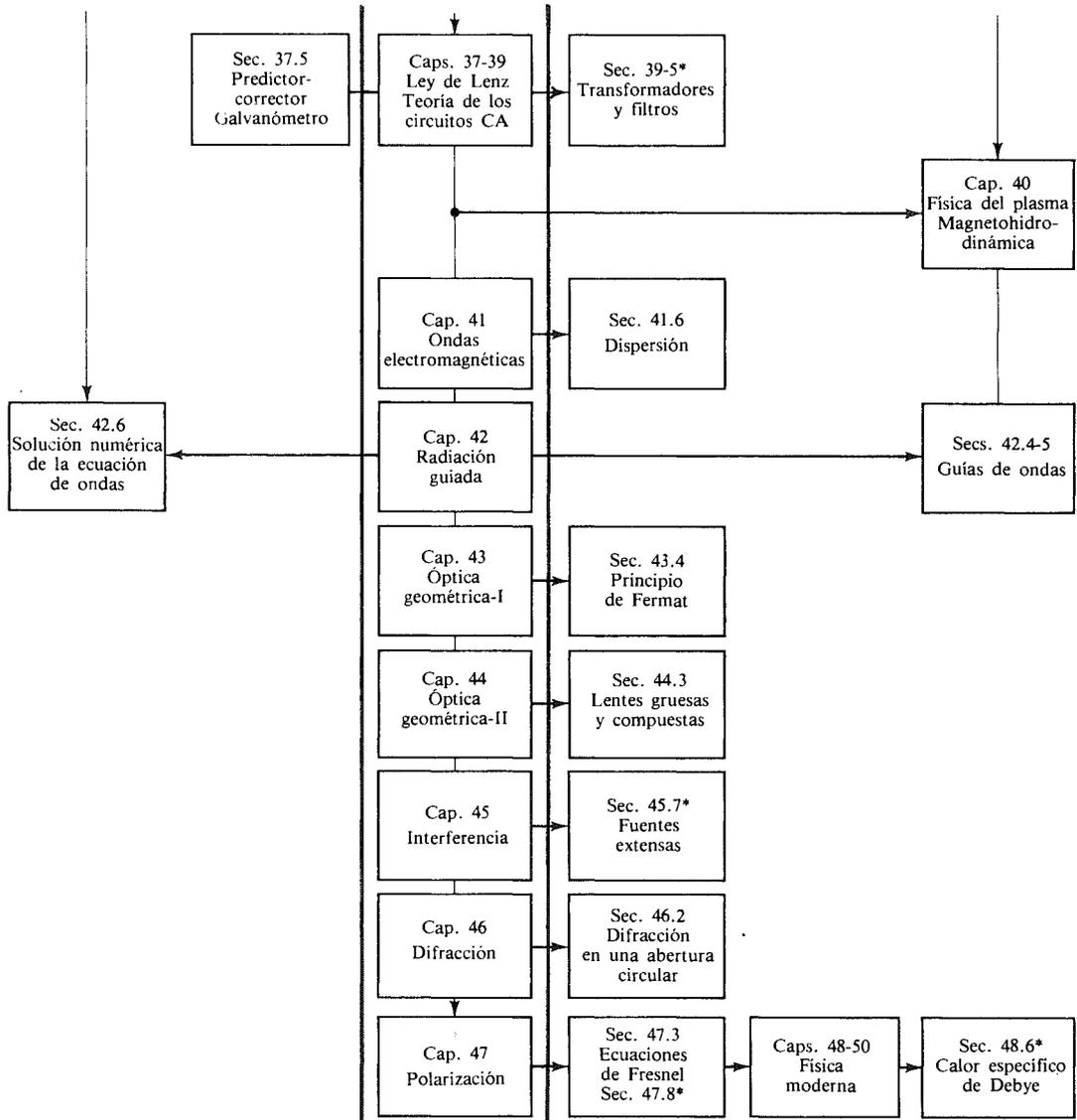
Vía C
Física avanzada



Vía B
Métodos orientados al ordenador

Vía A
Física básica

Vía C
Física avanzada



*Sección opcional

Índice analítico

Prólogo VI
Prefacio VIII
Guía del curso XII

CAPÍTULO 26 *Carga y fuerza eléctrica* 911

- 26.1* Orígenes históricos de la teoría eléctrica 912
- 26.2* Carga 917
- 26.3* Ley de Coulomb 922
- 26.4* Deducción de la ley del inverso de los cuadrados 927
- 26.5* Carga y átomo 930

CAPÍTULO 27 *Campos eléctricos* 939

- 27.1* Intensidad del campo eléctrico 940
- 27.2* Dipolo eléctrico 943
- 27.3* Campos eléctricos de cargas distribuidas 948
- 27.4* Líneas de campo eléctrico 952
- 27.5* Flujo eléctrico y ley de Gauss 959
- 27.6* Aplicaciones de la ley de Gauss 967
- 27.7* Forma diferencial de la ley de Gauss 978

CAPÍTULO 28 *Potencial eléctrico* 991

- 28.1* Energía potencial electrostática 992
- 28.2* Potencial 995

28.3	<i>Aplicaciones de las funciones potenciales</i>	1000
28.4	<i>Función potencial: simetría axial</i>	1009
28.5	<i>Movimiento de una partícula cargada</i>	1013
28.6	<i>Superficies equipotenciales</i>	1019
28.7	<i>Ecuaciones de Poisson y Laplace</i>	1023
28.8	<i>Relajación</i>	1027
CAPÍTULO 29	<i>Capacidad y condensadores</i>	1041
29.1	<i>Capacidad</i>	1042
29.2	<i>Cálculos de capacidades</i>	1047
29.3	<i>Sistemas de conductores</i>	1054
29.4	<i>Energía del campo electrostático y tensión</i>	1059
29.5	<i>Cálculo de capacidades: método de las imágenes</i>	1065
29.6	<i>Cálculo de capacidades: métodos numéricos</i>	1068
CAPÍTULO 30	<i>Dieléctricos</i>	1083
30.1	<i>Polarización</i>	1084
30.2	<i>Susceptibilidad eléctrica</i>	1090
30.3	<i>Desplazamiento eléctrico</i>	1095
30.4	<i>Comportamiento del dieléctrico</i>	1103
30.5	<i>Líneas de campo en los límites del dieléctrico</i>	1107
30.6	<i>Teoría potencial</i>	1111
CAPÍTULO 31	<i>Corrientes eléctricas y resistencia</i>	1125
31.1	<i>Corriente</i>	1126
31.2	<i>Conducción</i>	1132
31.3	<i>Resistencia</i>	1135
31.4	<i>Cálculos de resistencias</i>	1142
31.5	<i>Corriente de desplazamiento</i>	1151
CAPÍTULO 32	<i>Teoría de circuitos</i>	1169
32.1	<i>Fuerza electromotriz</i>	1170
32.2	<i>Leyes de Kirchhoff</i>	1176

- 32.3 *Análisis de circuitos* 1185
- 32.4 *Mediciones* 1190
- 32.5 *Sistemas de ecuaciones algebraicas lineales simultáneas* 1197
- 32.6 *Circuitos equivalentes* 1205

CAPÍTULO 33 *Electroquímica, termoelectricidad y conducción no-ohmica* 1223

- 33.1 *Electroquímica* 1224
- 33.2 *FEM química* 1229
- 33.3 *Termoelectricidad* 1236
- 33.4 *Conducción no-ohmica: electrones en el vacío* 1244
- 33.5 *Conducción no-ohmica: electrones en la materia* 1253
- 33.6 *Circuitos de transistores* 1262
- 33.7 *Redes equivalentes de transistores* 1267

CAPÍTULO 34 *Campos y fuerzas magnéticas* 1281

- 34.1 *El campo magnético* 1283
- 34.2 *Fuerzas magnéticas* 1287
- 34.3 *Par sobre un dipolo magnético: aplicaciones* 1294
- 34.4 *Fuerza magnética sobre una carga móvil* 1299
- 34.5 *Aplicaciones en la investigación* 1305
- 34.6 *Unidades electromagnéticas* 1310

CAPÍTULO 35 *Campos magnéticos producidos por cargas móviles* 1323

- 35.1 *Ley de Biot y Savart* 1324
- 35.2 *Transformaciones de campos* 1328
- 35.3 *Campo creado por un hilo rectilíneo* 1331
- 35.4 *Campo de una espira circular* 1338
- 35.5 *Ley de Ampère* 1343
- 35.6 *Líneas de campo magnético* 1351
- 35.7 *Láminas de corriente y solenoides* 1356
- 35.8 *Ecuaciones diferenciales de la magnetostática* 1363

CAPÍTULO 36	<i>Medios magnéticos</i>	1377
36.1	<i>Imanación</i>	1378
36.2	<i>Susceptibilidad magnética</i>	1385
36.3	<i>Formulación diferencial de la magnetostática, continuación</i>	1392
36.4	<i>Solución general</i>	1394
36.5	<i>Circuitos magnéticos</i>	1401
36.6	<i>Diamagnetismo y paramagnetismo</i>	1407
36.7	<i>Ferromagnetismo</i>	1413
CAPÍTULO 37	<i>Fuerza electromotriz inducida</i>	1425
37.1	<i>FEM de movimiento: traslaciones</i>	1426
37.2	<i>FEM de movimiento: rotaciones</i>	1431
37.3	<i>Ley de Faraday y ley de Lenz</i>	1437
37.4	<i>Aplicaciones de la ley de Faraday</i>	1441
37.5	<i>Movimientos del galvanómetro y método del predictor-corrector</i>	1446
37.6	<i>Ecuaciones de Maxwell</i>	1451
CAPÍTULO 38	<i>Autoinducción</i>	1463
38.1	<i>Autoinducción</i>	1464
38.2	<i>Inducción mutua</i>	1468
38.3	<i>Inducciones combinadas</i>	1472
38.4	<i>Transitorios inductivos</i>	1476
38.5	<i>Energía del campo magnético</i>	1481
CAPÍTULO 39	<i>Corrientes alternas</i>	1495
39.1	<i>Elementos de circuitos de CA</i>	1497
39.2	<i>Álgebra compleja</i>	1506
39.3	<i>Teoría de circuitos de CA</i>	1510
39.4	<i>Ampliación de la teoría de circuitos de CA</i>	1516
39.5	<i>Potencia</i>	1521
39.6	<i>Transformadores y filtros</i>	1528

CAPÍTULO 40 Física del plasma y magnetohidrodinámica 1541

- 40.1 Movimientos de las partículas cargadas 1543
- 40.2 Espejos magnéticos 1550
- 40.3 Teorema de Alfvén 1554
- 40.4 Magnetohidrodinámica (MHD) 1556
- 40.5 Física del plasma 1560
- 40.6 Ondas MHD 1565
- 40.7 Mecánica magnetofluida solar-terrestre 1568

CAPÍTULO 41 Ondas electromagnéticas 1581

- 41.1 Ecuación de ondas 1583
- 41.2 Ondas sobre líneas de transmisión 1587
- 41.3 Ondas electromagnéticas en el espacio 1593
- 41.4 Energía y cantidad de movimiento de las ondas electromagnéticas 1602
- 41.5 Índice de refracción 1608
- 41.6 Dispersión 1610

CAPÍTULO 42 Radiación y ondas guiadas 1621

- 42.1 Oscilaciones libres 1622
- 42.2 Oscilaciones forzadas 1629
- 42.3 Radiación dipolar 1634
- 42.4 Líneas de transmisión: ondas electromagnéticas transversales (EMT) 1639
- 42.5 Guías de ondas: los modos ET y MT y la velocidad de grupo 1644
- 42.6 Solución numérica de la ecuación de ondas 1650

CAPÍTULO 43 Óptica geométrica: reflexión y refracción 1665

- 43.1 Luz 1667
- 43.2 Reflexión 1670
- 43.3 Refracción 1676
- 43.4 Principio de Fermat 1682
- 43.5 Reflexión en una superficie esférica 1685
- 43.6 Refracción en una superficie esférica 1693

CAPÍTULO 44 *Óptica geométrica: lentes e instrumentos ópticos* 1711

- 44.1 Prismas 1712*
- 44.2 Lentes 1717*
- 44.3 Lentes gruesas y lentes compuestas 1724*
- 44.4 Amplificadores (o lupas) y microscopios 1732*
- 44.5 Telescopios 1739*
- 44.6 Otros dispositivos ópticos 1746*

CAPÍTULO 45 *Interferencias de la luz* 1763

- 45.1 Condiciones de interferencia 1765*
- 45.2 Interferencias desde dos focos 1769*
- 45.3 Interferencias por focos múltiples 1775*
- 45.4 Fuentes extensas: películas y placas delgadas 1781*
- 45.5 Reflexión y transmisión 1788*
- 45.6 Aplicaciones: interferometría y holografía 1794*
- 45.7 Más sobre superficies extensas 1800*

CAPÍTULO 46 *Difracción* 1813

- 46.1 Difracción de Fraunhofer 1816*
- 46.2 Difracción de Fraunhofer por una abertura circular 1820*
- 46.3 Límite de resolución: lentes 1822*
- 46.4 Límite de resolución: redes y prismas 1828*
- 46.5 Difracción por cristales 1833*
- 46.6 Difracción de Fresnel 1837*

CAPÍTULO 47 *Polarización* 1855

- 47.1 Teoría electromagnética de la reflexión y refracción 1858*
- 47.2 Fórmulas de Fresnel 1862*
- 47.3 Deducción de las fórmulas de Fresnel 1865*
- 47.4 Polarización mediante cristales 1867*
- 47.5 Polarización por reflexión y refracción 1875*
- 47.6 Tipos de polarización 1881*
- 47.7 Análisis de la luz 1885*

47.8 Polarización elíptica general 1891

Epílogo 1903

APÉNDICES 1905

A *Glosario de símbolos y abreviaturas* 1907

B *Sistema internacional de unidades (SI)* 1917

C *Factores de conversión* 1921

D *Fórmulas y aproximaciones del álgebra y la geometría* 1927

E *Trigonometría y álgebra vectorial* 1931

F *Cálculo diferencial, integral y vectorial* 1937

G *Tabla periódica de los elementos* 1947

H *Convenios de los diagramas de flujo* 1951

I *El lenguaje BASIC de ordenador* 1953

J *Tablas estadísticas* 1973

K *Series de Fourier* 1979

L *Constantes físicas fundamentales* 1983

M *Álgebra compleja* 1985

N *Métodos numéricos* 1989

O *Sistemas de unidades eléctricas y magnéticas* 2001

ÍNDICE ALFABÉTICO 2013

ÍNDICE DE AUTORES 2025

CAPÍTULO 26

Carga y fuerza eléctrica

«De acuerdo con ello, el 21 de diciembre [1766] electrifiqué una vasija de estaño de un cuartillo de capacidad, apoyada sobre una pieza de madera; y observé que un par de bolitas de médula de saúco, aisladas mediante su sujeción al extremo de una varilla de vidrio, y que colgaban totalmente introducidas dentro de la vasija, de modo que no sobresalía de la misma ningún trozo de hilo, permanecían exactamente donde se les dejaba, sin verse influidas en lo más mínimo por la electricidad... A partir de aquí podemos inferir de este experimento que la atracción de la electricidad está sometida a las mismas leyes que las de la gravitación y que varía, de acuerdo con ello, en razón a los inversos de los cuadrados de las distancias; así pues, se demuestra fácilmente que, si la Tierra tuviese forma de corteza, todo cuerpo en su interior no se vería atraído hacia un lado con más fuerza que hacia otro.»

JOSEPH PRIESTLEY, *Historia y estado presente de la electricidad, con experimentos originales*

En este capítulo presentamos los conceptos fundamentales de la electricidad. La base de nuestro estudio se encuentra en ciertos principios y conceptos fundamentales que hemos desarrollado ya (tales como fuerza, energía, y magnitudes vectoriales), pero nos vamos a encontrar ahora con una nueva propiedad física de la materia, la carga eléctrica, y la fuerza asociada con ella. Esta propiedad es el elemento unificador que enlaza conjuntamente el inmenso campo de fenómenos considerados en este volumen. A diferencia de la masa, la carga puede ser (según nuestra manera de describirla) positiva o negativa y un cuerpo que no posee ninguna carga *net*a se considera como *neutro*. Como la masa, la carga es la fuente de una fuerza característica del universo; la fuerza asociada con la carga se denomina *fuerza eléctrica*. Sin embargo, esta fuerza, aunque semejante a la gravedad en su formulación *matemática*, puede ser *atractiva* o *repulsiva*, como se demuestra experimentalmente, según que las cargas que interaccionen sean de signos opuestos o iguales.

Las pruebas experimentales han demostrado que los dos tipos de cargas pueden neutralizarse entre sí al combinarse, produciendo una carga *neta* nula, lo cual representa simplemente su suma algebraica. Si no fuese por el hecho de que los cuerpos se encuentran generalmente en una condición neutra, todos los fenómenos macroscópicos se verían dominados por las fuerzas eléctricas, que son mucho más intensas que las fuerzas gravitatorias.

La primera etapa para la comprensión de la naturaleza de estas fuerzas consiste en describir las interacciones entre cuerpos estacionarios que poseen una carga neta que no varía con el transcurso del tiempo. Este estudio de la *electrostática* será el tema de los cinco capítulos siguientes. Después de la electrostática estudiaremos las cargas *móviles* (o *corrientes* eléctricas) y las fuerzas *magnéticas* a que dan origen. Veremos que existe una relación directa y estrecha entre los fenómenos eléctricos y los magnéticos, ¡relación que conduce a la *deducción* de la velocidad de la luz y a la naturaleza de su propagación por el espacio! Luego emprenderemos el estudio de la luz, u *óptica*, para mostrar finalmente la conexión existente entre los colores observados (frecuencias) de ciertos tipos de luz radiada y los principios de la estructura atómica y de la *mecánica cuántica*, rama fundamentalísima de la física que considera a las ondas y a las partículas como dos aspectos de la misma realidad física. (Es decir, las ondas y las partículas no son entidades físicas diferentes, sino más bien dos tipos de *comportamiento* que presentan todas las entidades de esta clase.) Estos principios se aplican asimismo a la estructura de los núcleos atómicos, dentro de los cuales se almacenan las tremendas energías que se liberan en el Sol y en los dispositivos termonucleares.

En este capítulo seguiremos los orígenes históricos de la teoría de la electricidad y estudiaremos las pruebas teóricas y experimentales correspondientes a la formulación de la ley de Coulomb, que es la descripción básica de las fuerzas existentes entre las partículas cargadas. Finalmente, mencionaremos las ideas modernas de la estructura atómica que describen las cargas en el átomo, sus tamaños y posiciones relativas y algunos de sus efectos sobre los fenómenos atómicos.

26.1 Orígenes históricos de la teoría eléctrica

La teoría moderna de la electricidad tuvo sus comienzos en el siglo XVI en el trabajo de William Gilbert, el más famoso físico experimental inglés de su época. En 1600 publicó los resultados de 17 años de investigación en *De Magnete*, libro que compite con el libro *Dos nuevas Ciencias* de Galileo en la distinción de ser el primer texto sobre física moderna. Aunque trata fundamentalmente del magnetismo, el único capítulo dedicado a la electricidad representa el primer tratado importante sobre el tema. Antes de la época de Gilbert, el conocimiento de los fenómenos eléctricos había progresado poco más allá del hecho (aparentemente conocido desde la antigüedad) de que el ámbar y el azabache, al ser frotados, adquieren la propiedad de atraer a pequeñas porciones de materia. Con objeto de estudiar esta propiedad de la *electrización*, Gilbert ideó el primer instru-

mento eléctrico, que denominó «versorium», pero que hoy llamaríamos *electroscopio* (ver figura 26.1). Con su ayuda encontró que se pueden electrizar por frotamiento otras muchas sustancias además del ámbar y que también atraen a una amplia variedad de otros objetos. Sin embargo, una determinada clase de sustancias, especialmente los metales, se resistieron a todos los intentos de Gilbert para electrizarlos. Tuvieron que pasar más de cien años antes de que se demostrase que esta clase de materiales se compone de sustancias «conductoras», a través de las cuales pueden moverse libremente las cargas eléctricas y como Gilbert las sujetaba con su mano mientras las frotaba, perdían su electrización al mismo tiempo que la iban recibiendo.

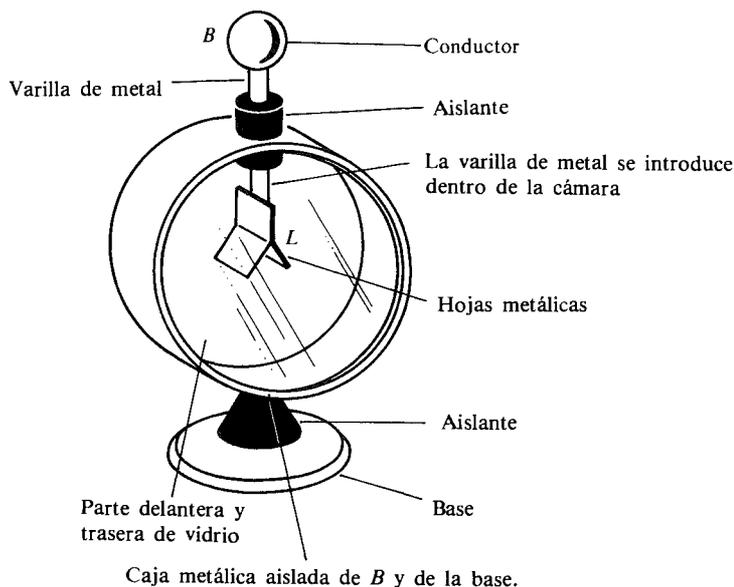


Fig. 26.1 Electroscopio de hojas o láminas.

Durante todo el siglo XVII sólo se hizo un avance significativo sobre los descubrimientos de Gilbert. Otto von Guericke fue el primero en darse cuenta claramente de que en muchos casos, si un objeto ligero es atraído hacia un objeto electrizado y entra en contacto efectivo con éste durante unos momentos, a continuación se ve repelido en lugar de ser atraído por el objeto electrizado. (Ahora sabemos que dicha repulsión se produce entre dos cuerpos que están electrizados de modo semejante —en otras palabras, el contacto produce una electrización del objeto que inicialmente estaba sin electrizar). Von Guericke ideó el primer generador eléctrico elemental, una esfera giratoria de azufre, que podía frotarse apoyando simplemente la palma seca de la mano cuando giraba. Entonces acercaba un objeto ligero (sin electrizar) que era atraído hacia la esfera electrizada. Si dejaba que el objeto en cuestión tocara a la esfera, entonces se veía repelido por la misma. A partir de ese momento el objeto ligero adquiría la capacidad de atraer a otros objetos sin electri-

zar. Esta electrización del objeto utilizado podía eliminarse poniéndolo en contacto con un dedo o con el suelo o bien acercándolo a una llama. Después de esto dejaba de atraer a otros objetos sin electrizar y era de nuevo atraído por la esfera electrizada.

Von Guericke realmente estaba experimentando acerca de la conducción de la electricidad entre cuerpos electrizados y sin electrizar puestos en contacto. Sin embargo, quedó para Stephen Gray al principio del siglo XVIII la demostración experimental de que la electricidad puede transportarse a lo largo de hilos metálicos y cuerdas mojadas, pero que la propiedad de la conducción se limita prácticamente a una determinada clase de sustancias. Sus observaciones condujeron a la división de las sustancias en dos clases, *conductores* y *aislantes*, de acuerdo con su capacidad de transmitir la electricidad. Así los metales y las soluciones acuosas de sales y ácidos son todos conductores eléctricos, mientras que la porcelana, la goma, la mica, la goma laca, la trementina, la parafina y los aceites son generalmente no conductores. Sin embargo, no puede trazarse ninguna línea clara y definida entre conductores y aislantes; pueden encontrarse sustancias con todos los grados de conductividad entre los correspondientes al azufre, el ámbar y el cuarzo (los mejores aislantes) y los de la plata y el cobre (los mejores conductores).

En una repetición de los experimentos de Gray, su contemporáneo Charles François de Cisternay du Fay demostró que incluso un conductor se puede electrizar mediante frotamiento o «fricción» con tal de que se le coloque sobre un soporte no conductor. «La electricidad —concluía du Fay— es una cualidad universalmente extendida en toda la materia que conocemos y que influye sobre el mecanismo del universo bastante más de lo que pensamos.» Así se demostró que la electrización es el resultado de frotar dos sustancias *diferentes* —aunque en la mayoría de las parejas de sustancias el efecto es pequeño y sólo puede detectarse con aparatos especiales. Sin embargo, lo que es esencial para producir una electrización apreciable es el contacto íntimo entre los dos cuerpos distintos, y no el frotamiento o fricción. Un trozo de parafina sujeto mediante un mango aislante presenta una electrización considerable después de sumergirse simplemente en agua, debido a que el contacto entre un líquido y un sólido es muy íntimo; pero dos objetos sólidos, cuyas superficies son más o menos irregulares, deben presionarse entre sí y frotarse para que entren en contacto partes mayores de sus superficies.

Du Fay descubrió también que la electrización producida en los cuerpos por el frotamiento es de *dos tipos únicamente*. Usando una lámina o pan de oro como electroscopio, la electrizó tocándola con una varilla de vidrio que había sido frotada con seda. Como es natural la laminilla de oro era repelida por la varilla de vidrio pero, en contra de lo que du Fay esperaba, era atraída y no repelida por una varilla de resina o de ámbar que había sido frotada con lana. Análogamente, una laminilla de oro que tocase primero la resina y luego se viese repelida por ella, sería entonces atraída por el vidrio. Du Fay denominó al tipo de electrización producida en el vidrio como «vítrea» y la correspondiente a la resina como «resinosa». Además estableció una generalización básica importante:

Los cuerpos análogamente electrizados se repelen entre sí, mientras que los cuerpos electrizados de modo diferente se atraen los unos a los otros.

Las denominaciones de du Fay fueron posteriormente desplazadas por los términos más convenientes de positiva (vítrea) y negativa (resinosa) sugeridos por Benjamin Franklin. Aunque nos duela reconocerlo, ha sido esta desafortunada selección del convenio de signos realizada por tan renombrado científico lo que ha obligado a asignar un valor negativo a la carga del electrón y ha sido la causa de incontables errores en el signo algebraico a incontables generaciones de estudiantes de física. Sin embargo este convenio ha sido ratificado por el tiempo y la tradición: *honi soít qui mal y pense*.

Hasta promediado el siglo XVIII no existía ninguna explicación sobre todos los hechos conocidos hasta ese momento como consecuencia de la electricidad: un cuerpo electrizado atraía a trocitos de materia, aunque no se hubiese impartido *ninguna* electrización a los mismos por fricción o conducción. En 1753 John Canton (y después Franklin entre otros) aclararon todo el problema mediante experimentos del tipo siguiente. Un cuerpo Q cargado positivamente se acerca a un conductor aislado C equipado con bolitas de médula de saúco a , b y c (ver figura 26.2). Las bolitas a y c divergen, mostrando así que los extremos de C han resultado

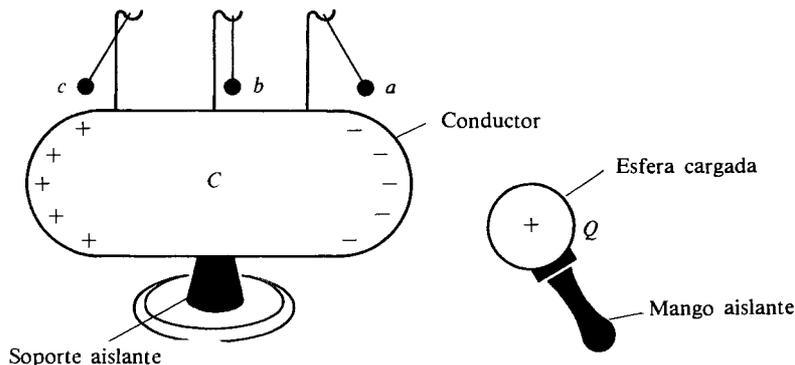


Fig. 26.2 El conductor C resulta eléctricamente polarizado en presencia de la carga Q .

electrizados, mientras que b permanece inalterada, lo que indica que la parte media de C no ha sido electrizada. Además, se identifican los tipos de cargas en los extremos cuando resulta que una varilla del vidrio con carga positiva repele a c y atrae a a . Aparentemente la simple influencia de un cuerpo electrizado sobre un conductor situado en su proximidad da como resultado la electrización de dicho conductor, recibiendo el extremo más alejado del conductor una carga del mismo signo que la carga original mientras que el otro extremo próximo almacena una carga del signo opuesto. Cuando se retira Q , desaparecen completamente las cargas en a y en c y el conductor C resulta de nuevo neutro, indican-

do así que la cantidad total de carga o electricidad positiva que aparece en un extremo de C es *exactamente* igual a la cantidad total de electricidad negativa que aparece en el otro extremo.

El fenómeno en virtud del cual aparecen cargas del mismo valor pero signo opuesto en los extremos opuestos de un conductor colocado cerca de un cuerpo cargado se denomina *inducción electrostática* y un conductor en esta condición se dice que está *polarizado eléctricamente*. Cuando con la mano o mediante un hilo conductor se une a tierra el conductor C en presencia de Q , desaparece la carga situada en el extremo más alejado de C , pero queda la que se encuentra en el extremo más próximo, y cuando se rompe la conexión de C con la tierra y Q se aleja, se distribuye por sí misma la carga restante en C por todo el conductor. Entonces resulta el conductor con una carga opuesta a la de Q y esto se ha llevado a cabo sin ninguna disminución de la carga Q .

La producción de electrización negativa se ve acompañada siempre por la producción de una cantidad *igual* de electrización positiva; esto puede verse de modo más convincente con ayuda del aparato indicado en la figura 26.3, que consiste en un recipiente metálico hueco C , que posee una abertura pequeña y que está conectado mediante un alambre a un

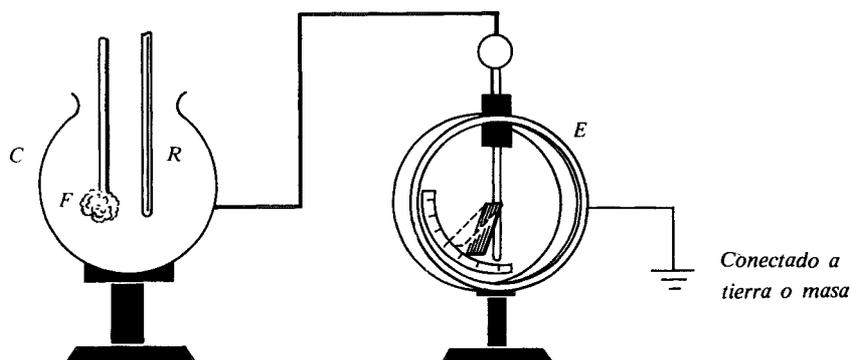


Fig. 26.3 Aparato del cubo de hielo de Faraday.

electroscopio sensible de láminas de oro E . (Este aparato corresponde al famoso «cubo de hielo» de Faraday, denominado así porque en la versión original utilizaba un cubo de estos como recipiente, porque fue el objeto más conveniente que se encontraba a mano). Se sujeta en un mango aislante un trozo de fieltro F y se frota con el extremo de una varilla de ebonita R . Cuando los dos cuerpos frotados se introducen juntos dentro del recipiente C , las hojas del electroscopio no muestran ninguna señal de separarse. Sin embargo, cuando se elimina uno de los cuerpos frotados, la lámina de oro adopta la posición indicada a trazos. Si se elimina el otro cuerpo, entonces la lámina diverge *en la misma cantidad que antes*, pero se puede comprobar que el electroscopio tiene una carga de signo opuesto.

La demostración de la figura 26.3 muestra que dos cuerpos frotados conjuntamente no presentan ninguna electrización en tanto se encuen-