



D. E. Roller \ R. Blum

Física

Tomo I

Mecánica, Ondas
y Termodinámica

Volumen 1

EDITORIAL REVERTÉ

D. E. Roller \ R. Blum

Física

Tomo I

Mecánica, Ondas y Termodinámica

Volumen 1



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

PHYSICS:

Mechanics, waves, and thermodynamics.

Volume one

Edición original en lengua inglesa publicada por

Holden-day, San Francisco

Copyright © by Holden-Day, Inc.

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 1986

Edición en papel

ISBN: 978-84-291-4338-6 Tomo I, Volumen I

ISBN: 978-84-291-4337-9 Obra completa

Edición ebook (PDF)

ISBN: 978-84-291-9505-7

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.

*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*

Prólogo

Este libro tiene sus bases en el prestigioso texto clásico Mechanics Molecular Physics, Heat, and Sound, de Millikan, Roller y 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 principal ambición— el trabajo de revisión y la terminación del proyecto para su publicación durante toda 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 su revisión y publicación. 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 expresar 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 editó el manuscrito, 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 estudiastéis en este libro en 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
Editor

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 el 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 primero de un texto en dos volúmenes 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. También se requieren el cálculo diferencial e integral y la geometría analítica, pero pueden estudiarse simultáneamente. El primer volumen cubre la mecánica y la termodinámica; el segundo estudia la electricidad y el magnetismo, la luz y la óptica y los fundamentos de la mecánica cuántica. La organización de todo el material didáctico es esencialmente clásica, con tres excepciones importantes.

En primer lugar, hemos escrito sobre conceptos en lugar de hacerlo sobre fenómenos aislados. Así pues, empezamos con cuatro capítulos cuyo tema central es el método de realizar la descripción de los fenómenos. En los cinco capítulos siguientes se presentan la mecánica de las partículas y los capítulos 10, 11 y 12 estudian las rotaciones y la mecánica de los cuerpos rígidos. El capítulo 13 sobre gravedad y fuerzas centrales sirve como puente entre el estudio de la rotación y las propiedades de la materia, de las cuales la más fundamental es la gravedad, aparte de la propia masa. Los capítulos 14 y 15 continúan el estudio de la materia y presentan las primeras ideas de perturbaciones en medios materiales y su propagación.

Los capítulos 16, 17 y 18 estudian los fenómenos periódicos en la naturaleza. Aquí se resaltan los conceptos unificadores de las perturbaciones oscilantes, su propagación en forma de ondas y los efectos de superposición que dan origen —utilizando la construcción de Huygens— a las leyes básicas de la reflexión, refracción e interferencias. Se consideran diversos tipos de ondas en medios materiales y se insiste en sus semejanzas conceptuales. Por ello, la acústica y la música que normalmente aparecen al final de este recorrido son aquí parte de la corriente principal del razonamiento seguido en las ondas y en las interferencias.

El capítulo 20, que cubre la relatividad, resulta ser el más largo al mismo tiempo que constituye el remate de nuestro tratamiento de la mecánica.

La parte final de este volumen, capítulos 20 a 25, cubren un amplio margen de fenómenos termodinámicos y no sólo la temperatura y el calor. Se hace hincapié en el primer principio de la termodinámica y en las ecuaciones de estado para diversas sustancias y no sólo para el gas ideal. En el capítulo 22 se presentan algunos conceptos estadísticos elementales que se desarrollan posteriormente en el capítulo 24 con la distribución de Maxwell-Boltzmann y la teoría cinética del transporte. El capítulo 23 se ocupa de las fases de la materia y concluye el estudio del primer principio de la termodinámica con un estudio de las fuerzas intermoleculares. También proporciona una pausa antes del relativamente difícil capítulo 24. En el capítulo final se considera el segundo principio de la termodinámica, la definición de entropía y algunas consideraciones estadísticas y filosóficas de su significado.

La segunda característica excepcional en un libro de esta naturaleza es la inclusión de todo el material histórico que ha sido posible, no tanto como mera deferencia al pasado o al patriotismo científico, sino para que el estudiante de física actual pueda seguir el crecimiento orgánico de nuestros conocimientos científicos presentes. La física no surgió de repente como fruto de la idea de un genio, sino que ha sido el resultado de muchas experiencias y experimentos variados y de la elaboración de muchas teorías diferentes. Se verá cumplido nuestro objetivo si el alumno puede ver el desarrollo de la razón detrás de este crecimiento y si puede pensar quizás: «¿dados estos hechos, podría haber obtenido estas conclusiones por mi mismo? Esto no desmerece la intervención del genio sino más bien ilustra el carácter eminentemente razonable de la física.

Pasemos a la tercera característica poco corriente de este texto. 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. 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 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 libro contenga incluido un curso que desarrolla los principios del análisis numérico y del cálculo numérico aplicado al estudio y comprensión de la física.

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 sesión 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, con excepción de los capítulos 19 y 24 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 las páginas 12 a 15 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. Un comentario y estudio más detallado del sistema de vías puede verse en la Guía del Profesor.

En este primer 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 916 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 apéndices de este volumen se han seleccionado cuidadosamente para proporcionar a los alumnos una referencia que pueda serles de utilidad en años sucesivos. La definición de cualquier símbolo puede localizarse rápidamente en el glosario correspondiente (apéndice A); las tablas del Sistema Internacional de Unidades (SI) están comprendidas en el apéndice B y en él se dan las definiciones y abreviaturas de las unidades mksa estándar o patrones, lo mismo que el sistema de prefijos. Las tablas de conversión (apéndice C) son amplias y fáciles de utilizar y la Tabla Periódica (apéndice G) es prácticamente un pequeño manual de física. Las tablas matemáticas y estadísticas (apéndices D, E, F y J) incluyen todas las fórmulas que se necesitan en el texto e incluso alguna más; el lenguaje BASIC de ordenador, tratado en el apéndice I proporciona una referencia asequible al lenguaje de ordenador más popular y de más amplio empleo para el cálculo de aprendizaje y personal.

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.

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 sicológica 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 numérico 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 curriculum físico, en el trabajo propio y en el laboratorio.

La redacción de este libro ha llevado más de doce 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. Rorschac, 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 Leuhrmann, John Robson, Timothy Kelley, y Louis Deegan, Jr.

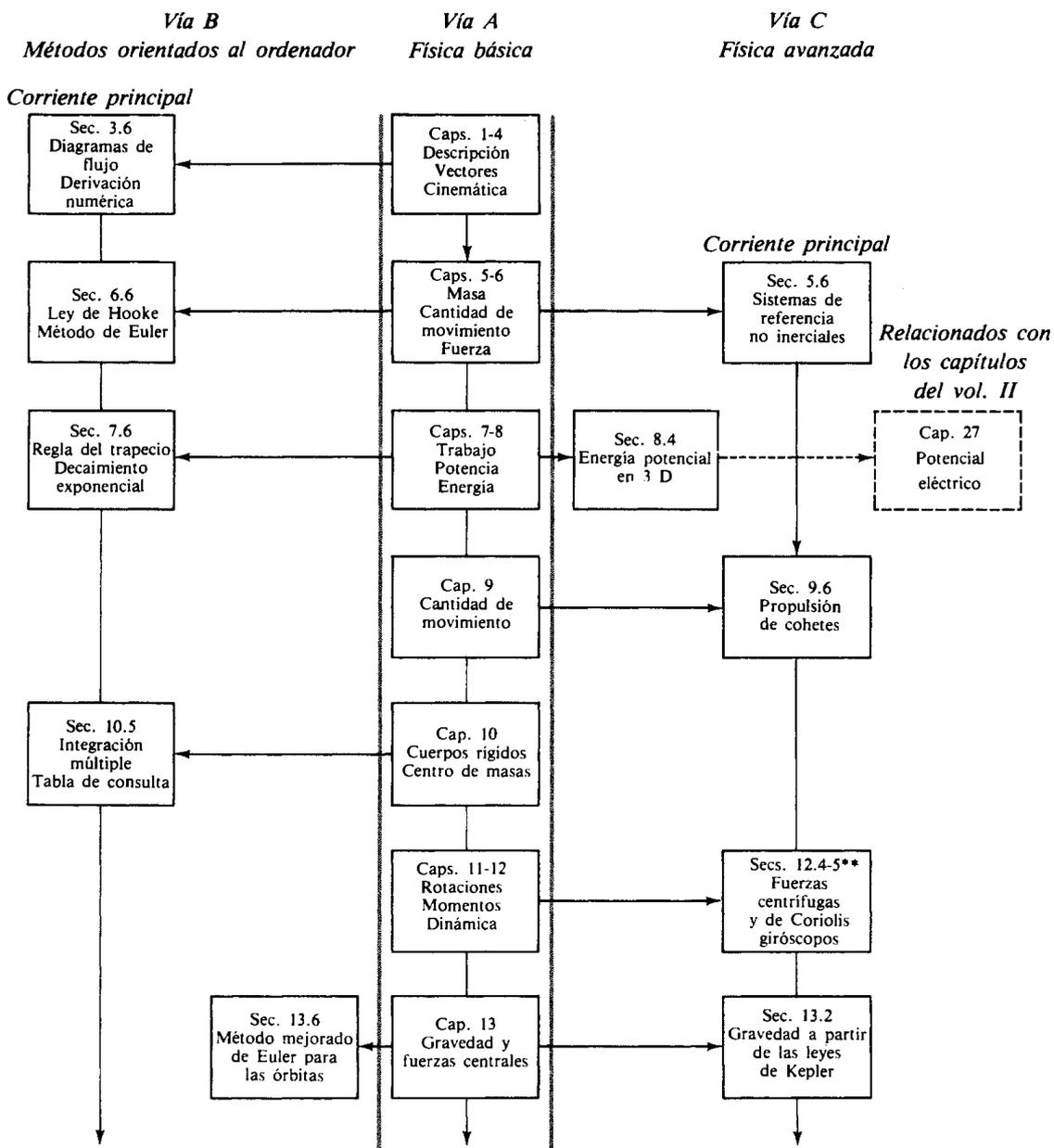
Frederick H. Murphy, Presidente de Holden-Day, fortaleció mi propia resolución, de modo que sin su fe en el éxito de este libro no habría llegado a terminarse. Otras personas que hicieron posible la producción de este libro fueron Nancy Clark, Edward Riley y Edward Millman. A todos y cada uno de ellos deseo expresar mi profundo y sincero aprecio por su notable y valiosa ayuda.

Baltimore

RONALD BLUM

Guía del curso

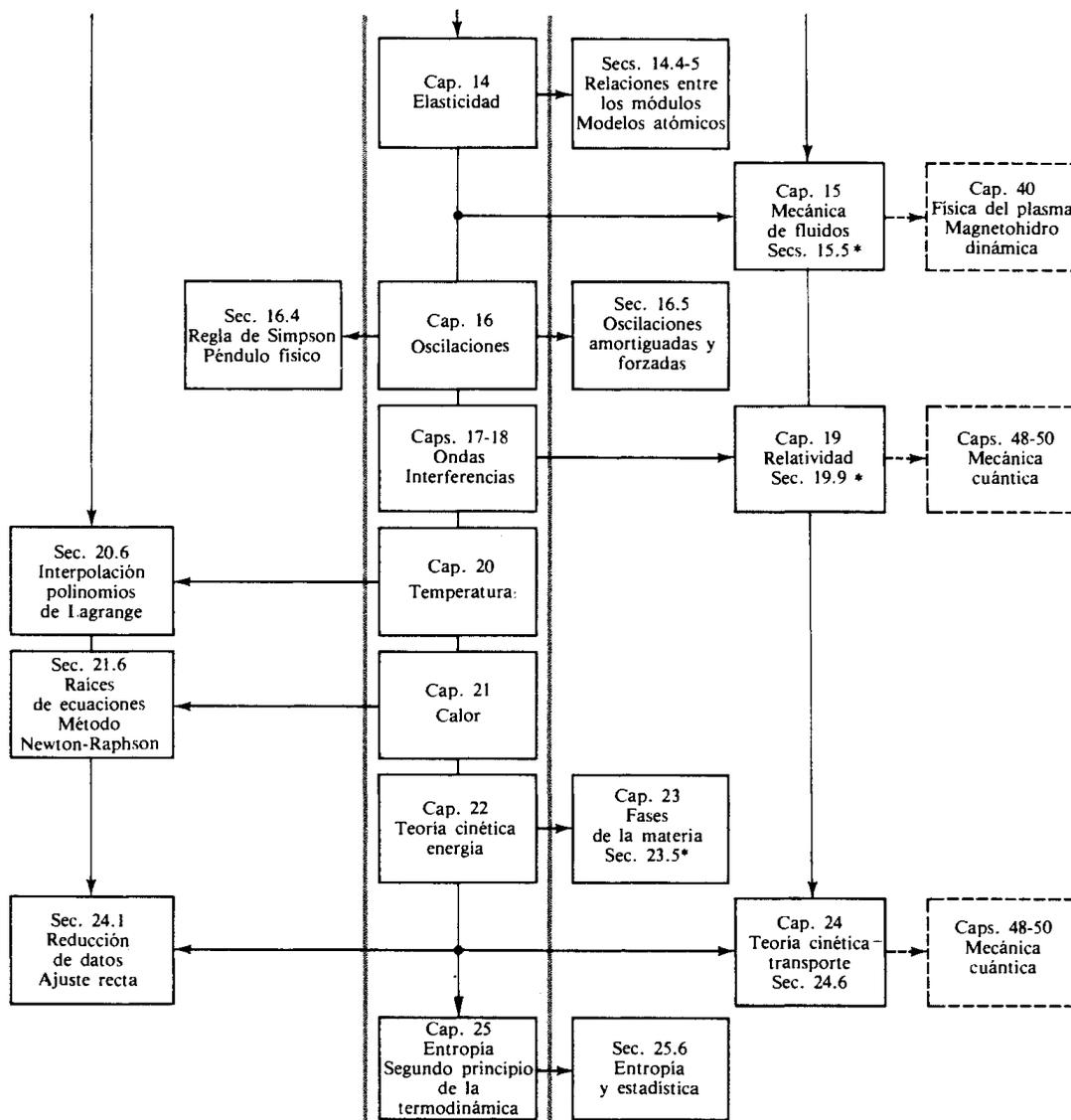
TOMO UNO



Vía B
Métodos orientados al ordenador

Vía A
Física básica

Vía C
Física avanzada



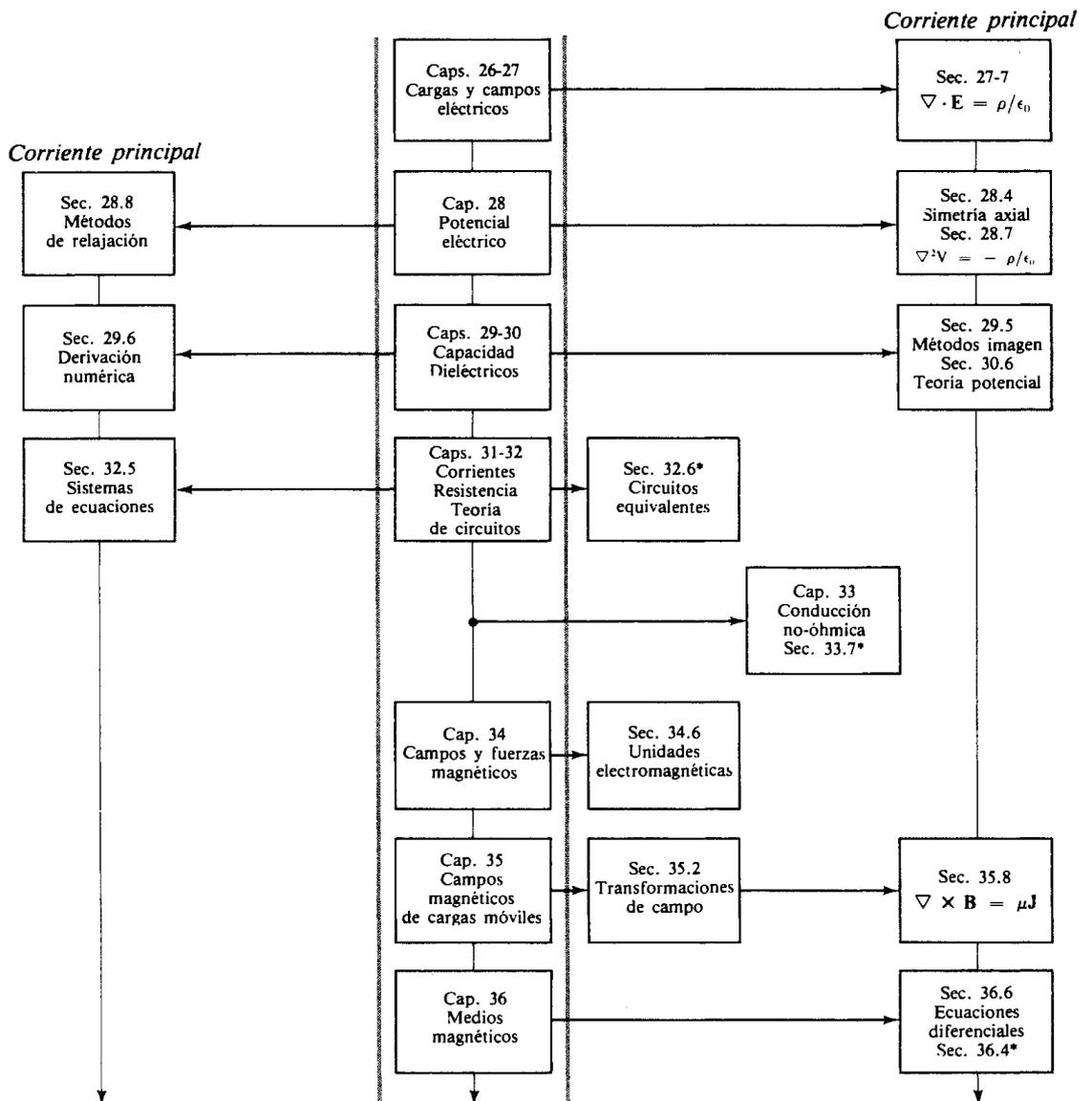
*Sección opcional

TOMO DOS

Vía B
Métodos orientados al ordenador

Vía A
Física básica

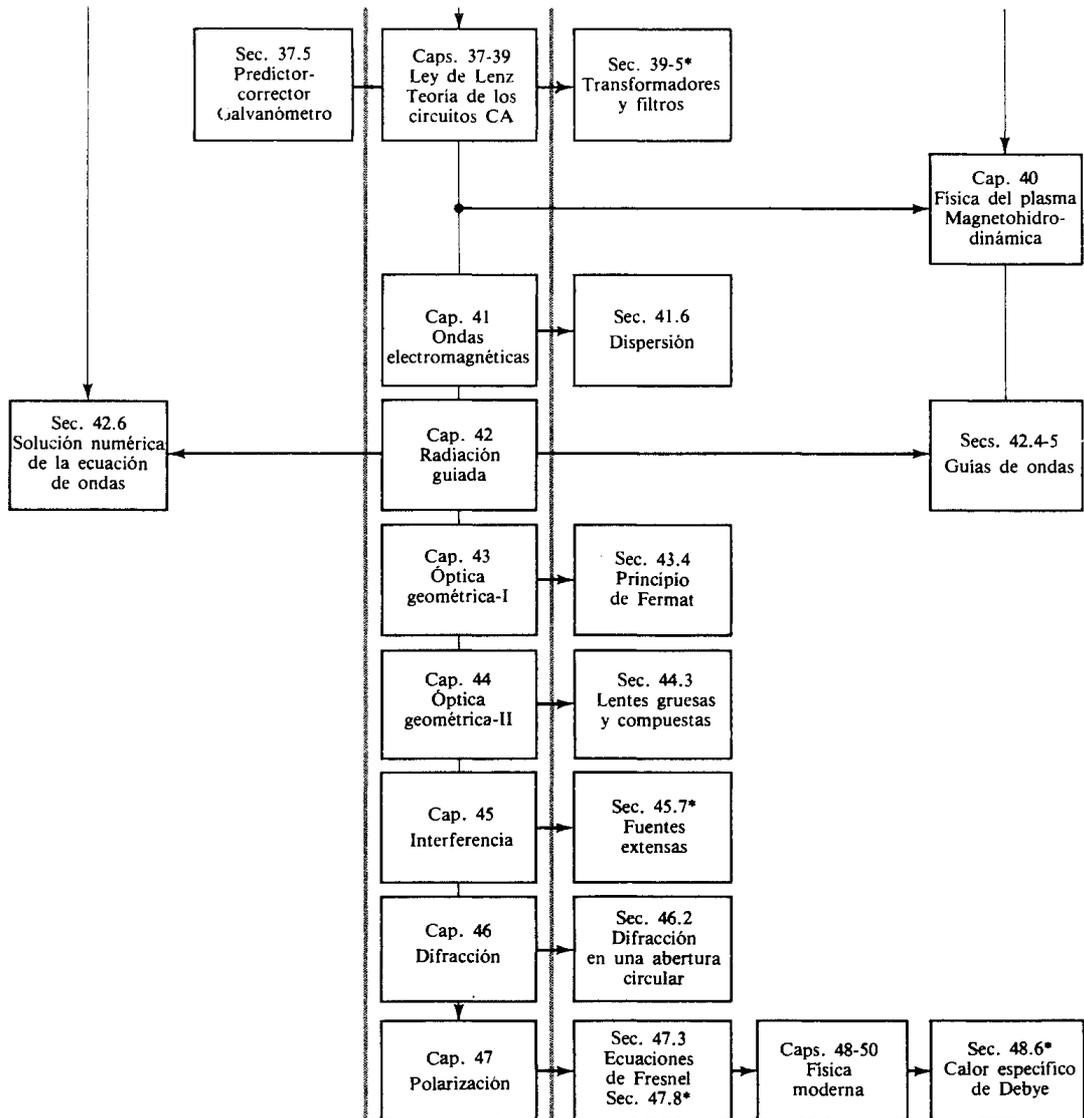
Vía C
Física avanzada



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 1 *Descripción de la realidad física* 1

1.1 El papel de la geometría física 2

1.2 Magnitudes físicas 3

1.3 Dimensiones 6

1.4 Unidades de medida 8

1.5 Ideas preliminares acerca del movimiento y de las partículas 13

1.6 Nota sobre resolución de problemas 17

CAPÍTULO 2 *Vectores* 21

2.1 Álgebra vectorial 21

2.2 Componentes de un vector 27

2.3 Multiplicación vectorial: producto escalar 33

2.4 Multiplicación vectorial: producto vectorial 35

2.5 Vectores: el ente real 39

CAPÍTULO 3 *Cinemática de las partículas: I* 45

3.1 Tiempo 46

3.2 Velocidad o celeridad 47

3.3	<i>Movimiento rectilíneo: desplazamiento y velocidad</i>	51
3.4	<i>Movimiento rectilíneo: aceleración</i>	55
3.5	<i>Cálculo integral</i>	62
3.6	<i>Análisis numérico del movimiento</i>	66
CAPÍTULO 4	<i>Cinemática de las partículas: II</i>	75
4.1	<i>Movimiento en tres dimensiones: velocidad</i>	75
4.2	<i>Movimiento en tres dimensiones: aceleración</i>	79
4.3	<i>Cuerpos en caída libre y proyectiles</i>	82
4.4	<i>Relatividad de Galileo</i>	87
CAPÍTULO 5	<i>Masa, cantidad de movimiento y fuerza</i>	101
5.1	<i>Ley de la Inercia</i>	102
5.2	<i>Masa inercial</i>	104
5.3	<i>Conservación de la cantidad de movimiento</i>	108
5.4	<i>Fuerza</i>	113
5.5	<i>Unidades de fuerza</i>	116
5.6	<i>Mecánica newtoniana y sistemas de referencia no inerciales</i>	120
CAPÍTULO 6	<i>Dinámica de partículas</i>	127
6.1	<i>Naturaleza vectorial de las fuerzas</i>	128
6.2	<i>Estática de una partícula</i>	131
6.3	<i>Tercera ley de Newton del movimiento</i>	135
6.4	<i>Fuerzas de rozamiento o de fricción</i>	139
6.5	<i>Dinámica de una partícula</i>	142
6.6	<i>Integración numérica de las ecuaciones del movimiento</i>	147
CAPÍTULO 7	<i>Trabajo, potencia y energía</i>	161
7.1	<i>Trabajo</i>	161
7.2	<i>Trabajo realizado por una fuerza variable</i>	166
7.3	<i>Potencia</i>	171
7.4	<i>Energía cinética</i>	173
7.5	<i>Energía cinética y cantidad de movimiento</i>	177
7.6	<i>Integración numérica y cuadratura</i>	178

CAPÍTULO 8 *Energía potencial y sistemas conservativos* 191

- 8.1 *Energía potencial en una dimensión* 192
- 8.2 *Conservación de la energía* 197
- 8.3 *Diagrama de energía* 201
- 8.4 *Energía potencial en tres dimensiones* 207
- 8.5 *Algunas aplicaciones del principio de la energía* 210
- 8.6 *Calor y conservación de la energía* 213

CAPÍTULO 9 *Cantidad de movimiento* 225

- 9.1 *Impulso* 226
- 9.2 *Colisiones elásticas* 230
- 9.3 *Colisiones inelásticas* 233
- 9.4 *Impacto oblicuo* 237
- 9.5 *Pérdida de energía cinética* 240
- 9.6 *Movimiento con masa variable* 242

CAPÍTULO 10 *Cuerpos rígidos y centro de masas* 255

- 10.1 *Centro de masas* 256
- 10.2 *Coordenadas centro de masas* 260
- 10.3 *Centro de masas de un sólido continuo* 265
- 10.4 *Simetría* 269
- 10.5 *Cálculo numérico del centro de masas* 274

CAPÍTULO 11 *Rotaciones y pares* 285

- 11.1 *Cinemática de rotación* 286
- 11.2 *Movimiento circular uniforme* 289
- 11.3 *Magnitudes vectoriales de rotación* 295
- 11.4 *Par de fuerzas* 301
- 11.5 *El par o momento como un vector* 304
- 11.6 *Equilibrio* 310

CAPÍTULO 12 *Dinámica de rotación* 327

- 12.1 *Momento de inercia* 328

12.2	<i>Momento cinético o angular</i>	335
12.3	<i>Traslaciones y rotaciones combinadas</i>	342
12.4	<i>Fuerzas de reacción de rotación</i>	345
12.5	<i>Fenómenos giroscópicos</i>	351
CAPÍTULO 13	<i>Gravedad y fuerzas centrales</i>	363
13.1	<i>Leyes de Kepler</i>	364
13.2	<i>Consecuencias dinámicas de las leyes de Kepler</i>	368
13.3	<i>Ley general de la gravedad</i>	374
13.4	<i>Cuerpos extensos, anillos y cortezas</i>	377
13.5	<i>Campo gravitatorio de la Tierra</i>	381
13.6	<i>Cálculo numérico de órbitas</i>	386
CAPÍTULO 14	<i>Elasticidad</i>	399
14.1	<i>Ley de Hooke</i>	400
14.2	<i>Elasticidad de volumen</i>	404
14.3	<i>Elasticidad de forma</i>	408
14.4	<i>Relaciones entre las constantes elásticas</i>	412
14.5	<i>Modelo atómico molecular de la elasticidad</i>	414
CAPÍTULO 15	<i>Mecánica de fluidos</i>	423
15.1	<i>Presión de un fluido</i>	425
15.2	<i>Flujo estacionario: conservación de la masa</i>	430
15.3	<i>Conservación de la energía: ecuación de Bernoulli</i>	433
15.4	<i>La viscosidad</i>	438
15.5	<i>Flujo laminar y turbulento</i>	445
CAPÍTULO 16	<i>Oscilaciones</i>	459
16.1	<i>Movimiento armónico simple</i>	460
16.2	<i>Energía: condiciones iniciales</i>	464
16.3	<i>Péndulos</i>	470
16.4	<i>Péndulos físicos: regla de Simpson</i>	476
16.5	<i>Osciladores armónicos amortiguados</i>	481
16.6	<i>Oscilaciones de pequeña amplitud</i>	488

CAPÍTULO 17 Ondas 499

- 17.1 Representación matemática de las ondas 501
- 17.2 Velocidad de las ondas transversales 505
- 17.3 Ondas de compresión longitudinales 509
- 17.4 Ondas de compresión en medios diferentes 512
- 17.5 Variaciones de presión en las ondas de compresión 515
- 17.6 Energía, potencia e intensidad 519
- 17.7 Efecto Doppler 524

CAPÍTULO 18 Interferencias 533

- 18.1 Superposición 534
- 18.2 Ondas estacionarias y figuras de Lissajous 539
- 18.3 Reflexión de ondas longitudinales 544
- 18.4 Reflexión de ondas transversales 549
- 18.5 Principio de Huygens: reflexión y refracción 553
- 18.6 Difracción 558

CAPÍTULO 19 Relatividad 569

- 19.1 Experimento de Michelson-Morley 571
- 19.2 Postulados de la relatividad especial 575
- 19.3 Transformación de Lorentz 578
- 19.4 Dilatación del tiempo 582
- 19.5 La contracción de Lorentz-FitzGerald y la simultaneidad 587
- 19.6 Transformación relativista de las velocidades 591
- 19.7 Cantidad de movimiento y masa relativistas 594
- 19.8 Masa y energía 600
- 19.9 Centro de masas relativista 604

CAPÍTULO 20 Temperatura 617

- 20.1 Termometría 618
- 20.2 Escalas de temperatura 622
- 20.3 Ecuaciones de estado 626
- 20.4 Ecuación del gas ideal 629

- 20.5 *Líquidos y sólidos* 632
- 20.6 *Aproximaciones polinómicas* 636

CAPÍTULO 21 *Calor* 649

- 21.1 *Trabajo* 650
- 21.2 *Primer principio de la termodinámica* 654
- 21.3 *Capacidad calorífica específica: calores latentes* 656
- 21.4 *Calores específicos de los gases* 664
- 21.5 *Procesos adiabáticos* 667
- 21.6 *Conducción de calor* 671
- 21.7 *Raíces de las ecuaciones* 676

CAPÍTULO 22 *Teoría cinética: energía* 687

- 22.1 *La teoría atómica* 687
- 22.2 *Gases ideales* 691
- 22.3 *Temperatura y calor* 695
- 22.4 *Aplicaciones del modelo del gas ideal* 699
- 22.5 *Equiparación de la energía y calores específicos* 701
- 22.6 *Teoría cuántica de los calores específicos* 708

CAPÍTULO 23 *Fases de la materia* 717

- 23.1 *Gases reales* 718
- 23.2 *Fuerzas intermoleculares: el efecto Joule-Thomson* 723
- 23.3 *Ecuaciones de estado de los gases reales* 730
- 23.4 *Presión de vapor* 735
- 23.5 *Ecuación de Clausius-Clapeyron* 738

CAPÍTULO 24 *Teoría cinética: propiedades de transporte* 749

- 24.1 *Errores y estadística: ajustes por el procedimiento de los mínimos cuadrados* 750
- 24.2 *Aleatoriedad y probabilidad* 755
- 24.3 *Distribución de Maxwell-Boltzmann* 762
- 24.4 *Recorrido libre medio* 768

Índice analítico

24.5 *Transporte de cantidad de movimiento: viscosidad* 770

24.6 *Transporte de masa y energía* 775

CAPÍTULO 25 *Entropía* 787

25.1 *Máquinas o motores* 788

25.2 *La máquina de Carnot de gas ideal* 790

25.3 *El segundo principio de la termodinámica* 794

25.4 *Entropía* 799

25.5 *Procesos irreversibles* 802

25.6 *Interpretación estadística de la entropía* 806

APÉNDICES 817

A *Glosario de símbolos y abreviaturas* 819

B *Sistema internacional de unidades (SI)* 829

C *Factores de conversión* 833

D *Fórmulas y aproximaciones del álgebra y la geometría* 839

E *Trigonometría y álgebra vectorial* 843

F *Cálculo diferencial, integral y vectorial* 849

G *Tabla periódica de los elementos* 859

H *Convenios de los diagramas de flujo* 863

I *El lenguaje de ordenador BASIC* 865

J *Tablas estadísticas* 885

K *Series de Fourier* 891

L *Constantes físicas fundamentales* 895

ÍNDICE ALFABÉTICO 897

ÍNDICE DE AUTORES 909

Física

Tomo I

Mecánica, Ondas
y Termodinámica

Volumen 1

CAPÍTULO 1

Descripción de la realidad física

Con todo... es cierto que las matemáticas en general, y particularmente la geometría, deben su existencia a la necesidad que se ha sentido de aprender algo acerca de las relaciones de las cosas reales entre sí... [Por consiguiente] la geometría debe despojarse de su carácter simplemente lógico-formal mediante la coordinación de objetos reales de experiencia con el esquema conceptual vacío de la geometría axiomática. Para lograr esto, sólo necesitamos añadir la proposición: los cuerpos sólidos están relacionados, respecto a sus disposiciones posibles, como lo están los cuerpos en la geometría euclidiana de tres dimensiones...

La geometría descrita de esta manera es evidentemente una ciencia natural; de hecho, podemos considerarla como la rama más antigua de la física. Sus afirmaciones descansan esencialmente sobre la inducción a partir de la experiencia, pero no únicamente sobre inferencias lógicas. Denominaremos a esta geometría así descrita, «geometría práctica»... En este sentido toda medición lineal de la física es geometría práctica y así también es una medición física geodésica y astronómica, si llamamos en nuestra ayuda a la ley de la experiencia según la cual la luz se propaga en línea recta, y ciertamente en una línea recta en el sentido de la geometría práctica.

ALBERT EINSTEIN, «Geometría y experiencia»
en *Sidelights on Relativity*, Methuen, 1936

Los fenómenos físicos que primero atraen nuestra atención son los movimientos de los objetos respecto a nosotros. Los objetivos de la ciencia denominada *mecánica* son los movimientos y sus cambios, así como las condiciones que los determinan. La mecánica proporciona los fundamentos sobre los que se ha construido toda la física y como veremos, sus conceptos y generalizaciones fundamentales impregnan a toda la física básica y a sus aplicaciones ingenieriles y técnicas. El fin último de la mecánica consiste en describir y predecir los movimientos y los cambios en dichos movimientos. Sin embargo, en primer lugar debemos ser capaces de describir las posiciones que los cuerpos físicos y sus partes ocupan en el espacio, unos respecto a otros, y las variaciones de la posición que pueden producirse cuando el tiempo transcurre. Así pues, existen tres

etapas en el desarrollo de la mecánica: *geometría física*, que se ocupa de las propiedades espaciales, de sus medidas y de sus relaciones mutuas; la *cinemática*, que difiere de la geometría física únicamente en que introduce el concepto de tiempo y de aquí el de movimiento; y la *dinámica*, que describe y predice cómo se moverá un cuerpo sometido a un conjunto particular cualquiera de circunstancias físicas.

1.1 El papel de la geometría física

Las primeras nociones de propiedades espaciales surgieron en las medidas topográficas y de construcción que realizaron los antiguos egipcios y babilonios y los griegos primitivos. Así idearon algunas reglas aproximadas para hallar áreas y volúmenes en función de longitudes, pero estas reglas se aplicaban principalmente a objetos físicos específicos. Un *punto* era una marca real sobre el objeto y una *línea* era una vara de medir o una cuerda tensa. Un *área* era un campo, un suelo o la superficie de un monumento u otra construcción; un *volumen* era la capacidad de una estructura particular, como la cantidad de agua contenida en un determinado recipiente. También las áreas y volúmenes de diversas *formas* se «visualizaban» en función de objetos físicos, pero aparentemente no como entidades abstractas. Parece que apenas tenían el concepto, por ejemplo, de un triángulo como la abstracción que representa a todos los objetos triangulares. Sin embargo, este almacenamiento acumulativo de conocimiento práctico fue el origen de la *geometría empírica-inductiva*: la observación y descripción de las características espaciales de los objetos físicos, su clasificación en formas idealizadas y la formulación de reglas empíricas o «leyes» para englobar las relaciones entre ellas. En su forma ya madura, la geometría empírica-inductiva es una rama de la *física experimental*, concretamente su rama más elemental.

Existen indicaciones de que la geometría de los griegos tuvo una deuda considerable contraída con los babilonios. Empezando aproximadamente en el siglo VI (a. de C.), los griegos desarrollaron la geometría en una disciplina lógica, que era un sistema *postulacional-deductivo* basado en el conocimiento empírico (hechos observados). Mediante algunas definiciones y postulados relativamente sencillos, fueron entonces capaces de deducir teóricamente resultados empíricos. Este desarrollo, que empezó probablemente con Tales de Mileto alrededor del año 600 (a. de C.), culminó en la *geometría euclídea*, denominada así porque sus métodos fueron codificados en los *Elementos* de Euclides aproximadamente en el año 300 (a. de C.).

La geometría euclídea es de particular interés para nosotros ahora, no solo porque jugó un papel dominante en el desarrollo de la mecánica, sino también porque ilustra la mayor parte de las características importantes de la etapa de indagación postulacional-deductiva, que se utiliza amplia y eficazmente en la física teórica. La geometría euclídea es, de hecho, la rama más elemental de la *física teórica*.

Los postulados o axiomas de una teoría son afirmaciones que se supone que son ciertos para su aplicación a la teoría a la luz de la experiencia. No son «verdades auto-evidentes»; representan más bien idealizaciones.

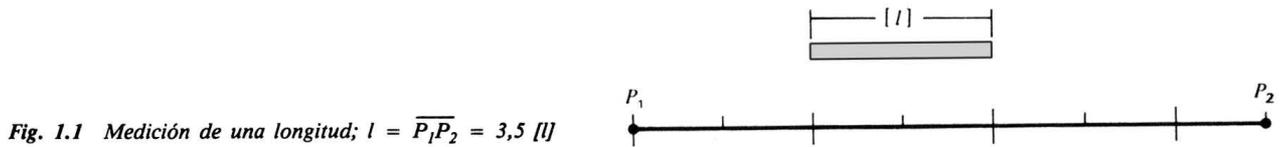
zaciones o abstracciones, como lo son los puntos, líneas, áreas y volúmenes «perfectos», de los que no existen contrapartidas en la naturaleza. Cada postulado de una teoría determinada debería proporcionar una definición implícita de algunos de los conceptos que aparecen en ella y los postulados deben ser consistentes e independientes entre sí. Sin embargo, como frecuentemente los postulados se han extraído a base de intuición, en muchos casos resulta extremadamente difícil o imposible el *probar* que todos los miembros de una serie de postulados son mutuamente independientes o incluso auto-consistentes.

Se ha visto que la teoría de Euclides tiene muchos defectos lógicos. Algunas de sus definiciones ocultan postulados en ellas; otras son parcialmente teoremas. Con frecuencia en los razonamientos intervienen hipótesis o suposiciones tácitas. Así la hipótesis de que «las figuras pueden moverse libremente en el espacio sin cambiar de forma o de tamaño», que constituye la base del importante concepto físico de cuerpos rígidos, se utiliza en diversas demostraciones de teoremas, pero no se afirma explícitamente como un postulado. Aunque nada de esto mengua el gran valor del trabajo pionero de Euclides, ilustra un hecho crucial: nunca se ha desarrollado ninguna teoría física, cualquiera que haya sido su envergadura, que estuviese libre inicialmente de fallos lógicos. Únicamente de un modo lento y a través del esfuerzo de numerosas personas, las teorías adquieren las formulaciones relativamente elegantes y sin faltas que finalmente encuentran su lugar en los tratados y textos.

1.2 Magnitudes físicas

Con objeto de expresar las relaciones existentes entre las *magnitudes físicas* —conceptos que conducen a valores mensurables— es necesario primero definir las magnitudes. El enlace entre una abstracción teórica y una magnitud física es una *definición operacional*, que especifica la manera en que puede medirse la magnitud. Una definición operacional siempre incluirá alguna referencia directa o indirecta a un patrón o estándar arbitrario y a un conjunto de manipulaciones para medir o comparar la magnitud en cuestión con el patrón. Una definición no puede considerarse operacional a menos que encierre un manual de procedimientos experimentales que puedan efectivamente llevarse a cabo.

El concepto de longitud, por ejemplo, puede definirse en términos teóricos como una «extensión espacial». No obstante, la definición operacional de longitud especifica un proceso de recuento. En términos operacionales, *longitud* es el número de veces, incluyendo fracciones, que una unidad escogida de longitud, designada por $[l]$, se ajusta dentro de la distancia lineal particular l que ha de medirse. Una definición operacional puede incluir también ciertos conceptos físicos o matemáticos cuidadosamente especificados. Por ejemplo, además del procedimiento de recuento, la definición de longitud incluye el concepto de *cuerpos rígidos*, que son objetos en los que todos los puntos tienen una relación fija entre sí que permanece constante en todas condiciones. Un cuerpo perfectamente rígido es un ideal teórico, pero a todos los efectos prácti-



cos, podemos considerar que los sólidos son cuerpos rígidos a no ser que se indique otra cosa.

El resultado inmediato de la medida *directa* de una magnitud física es un número puro y una unidad de medida. En la figura 1.1, el valor numérico de la distancia lineal desde P_1 hasta P_2 es un número puro $\{l\}$, en donde

$$\{l\} = \frac{l}{[l]} = 3,5$$

Sin embargo, la propia longitud l se compone de dos términos, la unidad $[l]$ y el valor numérico $\{l\}$ respecto a dicha unidad. Si $[l] = 1$ metro, entonces en este caso

$$l = \{l\} [l] = 3,5 \text{ metros} \quad [1 \cdot 1]$$

Es importante recordar que el valor numérico solo no especifica una magnitud física. La distancia l entre dos puntos fijos permanece constante independientemente de nuestra selección de $[l]$; de aquí que el valor numérico $\{l\}$ tenga un significado únicamente en relación con las unidades $[l]$ en que se expresa.

Excepto en el caso del simple recuento de cosas, las mediciones sucesivas de un objeto determinado presentan discrepancias debido a los *errores al azar* o *aleatorios* de las medidas. Por consiguiente, si la longitud verdadera de una varilla determinada es l_0 , la media aritmética de un gran número de medidas sucesivas será un cierto número que representa una longitud media \bar{l} . Una medida individual cualquiera se desviará de la media en una cantidad ϵ ; es decir

$$l = \bar{l} \pm \epsilon \quad [1 \cdot 2]$$

Si elevamos al cuadrado cada uno de estos valores ϵ y tomamos la media de todos los ϵ^2 , obtenemos una cantidad $\bar{\epsilon}^2$ conocida como *varianza* del conjunto de medidas. La raíz cuadrada de esta media es una magnitud estadística conocida como *error cuadrático medio* o *desviación normal* o *estándar* σ :

$$\sigma = \sqrt{\bar{\epsilon}^2} \quad [1 \cdot 3]$$

Cuanto mayor sea el número n de medidas, menor será la diferencia entre su media \bar{l} y la longitud verdadera l_0 , es decir, menor será *el error estándar de la media*, σ / \sqrt{n} . Por consiguiente, el mejor valor *estimado* de l_0 es la cantidad

$$l = \bar{l} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{l} \pm \Delta l \quad [1 \cdot 4]$$