

# **FISICA**

## **Vol. I MECANICA**

**Autores:**

**MARCELO ALONSO**

**EDWARD J. FINN**

**Versión en español de:**

**CARLOS HERNANDEZ**

**VICTOR LATORRE**



**FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO, S.A.**

**Tabla A-1 Tabla periódica de los elementos**

Las masas atómicas, basadas en el número exacto 12,00000 asignado como masa atómica al principal isótopo del carbono,  $^{12}\text{C}$ , son los valores más recientes (1961) adoptados por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada. La unidad de masa usada en esta tabla se denomina *unidad de masa atómica (uma)*:  $1 \text{ uma} = 1,6604 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . En esta

Grupo→		I	II	III	IV
Período	Serie				
1	1	1 H 1,00797			
2	2	3 Li 6,939	4 B 9,0122	5 B 10,811	6 C 12,01115
3	3	11 Na 22,9898	12 Mg 24,312	13 Al 26,9815	14 Si 28,086
4	4	19 K 39,102	20 Ca 40,08	21 Sc 44,956	22 Ti 47,90
	5	29 Cu 63,54	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59
5	6	37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,905	40 Zr 91,22
	7	47 Ag 107,870	48 Cd 112,40	49 In 114,82	50 Sn 118,69
6	8	55 Cs 132,905	56 Ba 137,34	55-71 Serie de los lantánidos*	72 Hf 178,49
	9	79 Au 196,967	80 Hg 200,59	81 Tl 204,37	82 Pb 207,19
7	10	87 Fr [223]	88 Ra [226,05]	89-Serie de los actínidos**	

\*Serie de los lantánidos: { 57 La 138,91 58 Ce 140,12 59 Pr 140,907 60 Nd 144,24 61 Pm [147] 62 Sm 150,35

\*\*Serie de los actínidos: { 89Ac [227] 90 Th 232,038 91 Pa [231] 92 U 238,03 93 Np [237] 94 Pu [242]

**Tabla A-2 Constantes fundamentales**

Constante	Símbolo	Valor
Velocidad de la luz	$c$	$2,9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Carga elemental	$e$	$1,6021 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masa en reposo del electrón	$m_e$	$9,1091 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masa en reposo del protón	$m_p$	$1,6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Masa en reposo del neutrón	$m_n$	$1,6748 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Constante de Planck	$h$	$6,6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$
	$\hbar = h/2\pi$	$1,0545 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Carga específica del electrón	$e/m_e$	$1,7588 \times 10^{11} \text{ kg}^{-1} \text{ C}$
Relación cuanto-carga	$h/e$	$4,1356 \times 10^{-15} \text{ J s C}^{-1}$
Radio de Bohr	$a_0$	$5,2917 \times 10^{-11} \text{ m}$
Longitud de onda Compton:		
del electrón	$\lambda_{C,e}$	$2,4262 \times 10^{-12} \text{ m}$
del protón	$\lambda_{C,p}$	$1,3214 \times 10^{-15} \text{ m}$
Constante de Rydberg	$R$	$1,0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$
Magnetón de Bohr	$\mu_B$	$9,2732 \times 10^{-24} \text{ J T}^{-1}$

escala, la masa atómica del carbono es 12,01115 porque es el promedio de la de los diferentes isótopos presentes en el carbono natural. (Para los elementos producidos artificialmente, se da entre corchetes la masa atómica aproximada del isótopo más estable.)

V	VI	VII	VIII			0		
						2 He 4,0026		
7 N 14,0067	8 O 15,9994	9 F 18,9984				10 Ne 20,183		
15 P 30,9738	16 S 32,064	17 Cl 35,453				18 Ar 39,948		
23 V 50,942	24 Cr 51,996	25 Mn 54,9380	26 Fe 55,847	27 Co 58,9332	28 Ni 58,71			
33 As 74,9216	34 Se 78,96	35 Br 79,909				36 Kr 83,80		
41 Nb 92,906	42 Mo 95,94	43 Tc [99]	44 Ru 101,07	45 Rh 102,905	46 Pd 106,4			
51 Sb 121,75	52 Te 127,60	53 I 126,9044				54 Xe 131,30		
73 Ta 180,948	74 W 183,85	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,09			
83 Bi 208,980	84 Po [210]	85 At [210]				86 Rn [222]		
63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,924	66 Dy 162,50	67 Ho 164,930	68 Er 167,26	69 Tm 168,934	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97
95 Am [243]	96 Cm [245]	97 Bk [249]	98 Cf [249]	99 Es [253]	100 Fm [255]	101 Md [256]	102 No	103

Constante	Símbolo	Valor
Constante de Avogadro	$N_A$	$6,0225 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k$	$1,3805 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Constante de los gases	$R$	$8,3143 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Volumen normal del gas ideal (a temperatura y presión normales)	$V_0$	$2,2414 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
Constante de Faraday	$F$	$9,6487 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$
Constante de Coulomb	$K_e$	$8,9874 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$
Permitividad del vacío	$\epsilon_0$	$8,8544 \times 10^{-12} \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ C}^2$
Constante magnética	$K_m$	$1,0000 \times 10^{-7} \text{ m kg C}^{-2}$
Permeabilidad del vacío	$\mu_0$	$1,2566 \times 10^{-6} \text{ m kg C}^{-2}$
Constante de gravitación	$\gamma$	$6,670 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
Aceleración de la gravedad a nivel del mar en el ecuador	$g$	$9,7805 \text{ m s}^{-2}$

Constantes numéricas:  $\pi = 3,1416$ ;  $e = 2,7183$ ;  $\sqrt{2} = 1,4142$ ;  $\sqrt{3} = 1,7320$

# INTRODUCCION

En la actualidad, cuando día a día los avances científicos son de frecuente ocurrencia, es necesario prepararse con un mejor conocimiento fundamental de las manifestaciones del mundo físico que nos rodea.

Durante mucho tiempo, había constituido un problema no poder contar con un texto de física adecuadamente destinado a los primeros semestres de las Escuelas de Ingeniería y Ciencias, que abordase en forma exhaustiva y clara los diferentes temas, que como materia básica se requieren.

La experiencia obtenida en nuestras Escuelas ha sido altamente positiva, ya que los resultados demuestran que el presente libro ha contribuido a elevar los niveles académicos y obtener mejor rendimiento por parte de los estudiantes.

Además de lo mencionado, hemos encontrado ventajas específicas muy apreciadas, como son: gran claridad en la exposición, utilización de un lenguaje matemático a nivel de universidades e institutos, abundancia de ejemplos elaborados y problemas resueltos, énfasis en los aspectos conceptuales, y presentación de una vasta gama de diferentes aplicaciones de cada uno de los temas desarrollados.

Para las Escuelas de Ciencias Químicas, en general, es especialmente valioso por su aplicación a la físico-química y a la termodinámica por su capítulo de fenómeno de transporte y su introducción a la mecánica cuántica.

En lo que concierne a las Escuelas de Ingeniería, la orientación en los temas tratados en el libro capacita adecuadamente al estudiante para abordar las diferentes especialidades en ingeniería.

En virtud de lo anterior, consideramos que esta edición en español del libro de M. Alonso y E. J. Finn contribuirá notablemente a la formación del estudiantado latinoamericano.

México, D.F., febrero de 1971

FÍS. ARTURO NAVA JAIMES  
*Coord. de Física de la*  
*Esc. Sup. de Ingeniería*  
*Mecánica y Eléctrica*  
*Instituto Politécnico Nacional,*  
*México*

ING. QUÍM. JULIO GARCÍA STAHL  
*Coord. de Física*  
*Facultad de Química*  
*Universidad Nacional Autónoma*  
*de México*

# FISICA

## VOLUMEN I: MECANICA

### Edición revisada

**MARCELO ALONSO**

*Departamento de Física, Universidad de Georgetown  
Washington, D. C.*

**EDWARD J. FINN**

*Departamento de Física, Universidad de Georgetown  
Washington, D. C.*

Versión en español de :

**CARLOS HERNANDEZ**

**VICTOR LATORRE**

*Profesores de Física General  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima*

Con la colaboración de :

**JUAN HERKRATH, Decano**

*Facultad de Ciencias  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá*



FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO, S. A.

Bogotá - Caracas - México - Panamá - San Juan - Santiago - São Paulo

Versión en español de la obra inglesa titulada  
*Fundamental University Physics, Volume I, Mechanics*,  
por Marcelo Alonso y Edward J. Finn, edición de 1967,  
publicada por Addison-Wesley Publishing Company, Reading,  
Mass., EE. UU. Esta edición en español es la única autorizada.

© 1970 por FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO, S. A.

Todos los derechos han sido reservados. Ni este libro ni parte de él pueden ser reproducidos en forma alguna sin el permiso escrito de su editor. Printed in Spain. Impreso en España. Tarjeta del catálogo de la Biblioteca del Congreso de los EE. UU.: 74-123319.

## PROLOGO A LA EDICION EN ESPAÑOL

La enseñanza de la física ha ido cambiando como consecuencia de los desarrollos tecnológicos de las últimas décadas que exigen de parte de los profesionales, una mayor y mejor comprensión de los fenómenos naturales, para poner dicha tecnología nueva al servicio de todo el mundo.

Podemos señalar varias características importantes de dicho cambio. En primer lugar, el contenido de los cursos de física ha sido reajustado, como para incluir aquellos capítulos que han devenido en doctrina más o menos firme. Teniendo en cuenta que el desarrollo de la relatividad y la mecánica cuántica ha sido vasto, puede comprenderse que tal reajuste es bastante grande.

En segundo lugar, considerando que los avances más importantes, como los ya mencionados, son aquellos que unifican la ciencia, debe esperarse que el reajuste refleje también dicho progreso, relacionando entre sí los cursos de las disciplinas más o menos unificadas.

Finalmente, la metodología misma de la enseñanza está evolucionando, tratando de alcanzar objetivos hace mucho tiempo planteados, pero que habían sido lamentablemente abandonados, como el de poner en manos de los estudiantes los medios para efectuar experimentos por sí mismos y sacar sus propias conclusiones.

En el presente libro se distingue las dos primeras características. Pero además debemos anotar que la incorporación de material moderno a que nos referimos al hablar de aquel reajuste, ha sido efectuada de manera orgánica y muy cuidadosa, encontrando armonía con los tópicos tradicionales que siguen siendo válidos y tratando todo el material, nuevo y viejo, por los métodos del análisis matemático moderno. Para ejemplificar lo dicho, bástenos señalar la forma en que ha sido incorporada la relatividad especial a través de toda la obra.

En cuanto a la segunda característica, debemos reconocer que hay en este libro un afán de traslucir los resultados unificadores de la investigación moderna. Señalemos el capítulo que presenta los choques con una ejemplificación que incluye las reacciones químicas y el tratamiento detallado sobre el uso de las curvas de energía potencial y sus aplicaciones a la estructura molecular.

Debemos hacer ahora algunas indicaciones que pueden conducir a un mejor uso de este libro en América latina.

La experiencia y madurez necesarias para el uso normal del texto deben ser adquiridas preferiblemente con cursos de la escuela secundaria que hayan sido afectados por el cambio en la enseñanza de la física. Nos referimos, por ejemplo, a cursos similares al del Comité de Estudio de las Ciencias Físicas (PSSC).

Las matemáticas contenidas en un primer curso de análisis, que generalmente en nuestras universidades es compañero del de física, deberían ser suficientes para una adecuada comprensión. Probablemente haga falta que el profesor de física proporcione oportunamente mayores detalles sobre el cálculo vectorial que los usualmente dados en un curso regular de análisis matemático.

Anticipamos que una primera consideración del material del presente libro, conducirá a su utilización intensiva en las Facultades de Ciencias. Creemos, no obstante, que las Escuelas de Ingeniería no tardarán en apreciar las ventajas de un texto que pretende ser nada más, pero también nada menos, que un primer curso universitario de Física. No hay en realidad "ciencia aplicada" aparte. Hay aplicación de una ciencia que, en determinado momento, es única porque tiene como fundamento un cierto conjunto muy bien definido de principios universalmente aceptados.

La edición original en inglés de esta serie ha tenido tanta aceptación en muchas universidades a través de la América latina (como la Universidad Nacional Autónoma y el Instituto Politécnico Nacional, en México; la Universidad Central y la Universidad de Oriente, en Venezuela; la Universidad de Santo Domingo, en la República Dominicana; la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional y la Universidad de Antioquia, en Colombia, y muchas otras universidades) que no nos asiste duda alguna acerca de la entusiasta acogida que harán los profesores y estudiantes a nuestra edición en español de esta serie extraordinaria.

*Lima*  
*mayo de 1970*

CARLOS HERNÁNDEZ  
VÍCTOR LATORRE



## PROLOGO

La física es una ciencia fundamental que tiene profunda influencia en todas las otras ciencias. Por consiguiente, no sólo los estudiantes de física e ingeniería, sino todo aquel que piense seguir una carrera científica (biología, química y matemática) debe tener una completa comprensión de sus ideas fundamentales.

El propósito primario de un curso de física general (y quizá la única razón para que aparezca en el plan de estudios) es dar al estudiante una visión unificada de la física. Se debería hacer esto sin entrar en muchos detalles, analizando, sólo, los principios básicos, sus implicaciones y sus limitaciones. El estudiante aprenderá aplicaciones específicas en cursos más avanzados. Así, este libro presenta las ideas que creemos fundamentales y que constituyen el corazón de la física de hoy. Hemos tenido en cuenta cuidadosamente las recomendaciones de la *Comission on College Physics* (Comisión de Física para Universitarios) para escoger los temas y el método de presentación.

Hasta no hace mucho tiempo, la física se venía enseñando como si fuera un conglomerado de varias ciencias más o menos relacionadas, pero sin un punto de vista realmente unitario. La división tradicional (en "ciencias"): mecánica, calor, sonido, óptica, electromagnetismo y física moderna no se justifica al presente. Nos hemos apartado de este enfoque tradicional. En su lugar seguimos una presentación lógica unificada, haciendo énfasis en las leyes de conservación, en los conceptos de campos y de ondas y en el punto de vista atómico de la materia. La teoría de la relatividad especial se usa sistemáticamente en el texto como uno de los principios guía que debe satisfacer cualquier teoría física.

El curso se ha dividido en cinco partes: (1) Mecánica, (2) Interacciones y Campos, (3) Ondas, (4) Física cuántica y (5) Física estadística. Comenzamos por la mecánica con el fin de establecer los principios fundamentales necesarios para descubrir los movimientos que observamos a nuestro alrededor. Entonces, como todos los fenómenos naturales son el resultado de interacciones y éstas se analizan en función de campos, en la parte (2) consideramos las clases de interacciones que comprendemos mejor: la gravitacional y la electromagnética, responsables de muchos de los fenómenos macroscópicos que observamos. Estudiamos detalladamente el electromagnetismo, concluyendo con la formulación de las ecuaciones de Maxwell. En la parte (3) discutimos los fenómenos ondulatorios como consecuencia del concepto de campo. Es aquí donde incluimos gran parte del material que generalmente aparece bajo los títulos de óptica y de acústica. Sin embargo, se ha puesto énfasis en las ondas electromagnéticas como extensión lógica de las ecuaciones de Maxwell. En la parte (4) analizamos la estructura de la materia — átomos, moléculas, núcleos y partículas fundamentales —, análisis que está precedido de las bases necesarias de la mecánica cuántica. Finalmente, en la parte (5) hablamos de las propiedades de la materia en conjunto. Comenzamos presentando los principios de la mecánica estadística y los aplicamos a algunos casos simples pero fundamentales. Estudiamos

la termodinámica desde el punto de vista de la mecánica estadística y concluimos con un capítulo sobre las propiedades térmicas de la materia, demostrando cómo se aplican los principios de la mecánica estadística y de la termodinámica.

Este libro es novedoso no sólo en su enfoque sino también en su contenido, ya que hemos incluido algunos tópicos fundamentales que no se encuentran en la mayoría de los textos de física general y hemos dejado de lado otros que son tradicionales. La matemática usada se puede encontrar en cualquier libro de análisis matemático. Suponemos que los estudiantes poseen conocimientos mínimos de análisis matemático y están, a la vez, tomando un curso sobre este tema. Muchas aplicaciones de los principios fundamentales, así como también algunos tópicos un poco más avanzados, aparecen en forma de ejemplos resueltos. Según la conveniencia del profesor, éstos se pueden discutir o proponer conforme a cierta selección, lo cual permite una mayor flexibilidad en la organización del curso.

Los planes de estudios de todas las ciencias están sometidos a presiones para que incorporen nuevos tópicos que están cobrando mayor importancia. Esperamos que este libro alivie estas presiones, elevando en el estudiante el nivel de comprensión de los conceptos físicos y la habilidad para manipular las correspondientes relaciones matemáticas. Esto permitirá elevar el nivel de muchos de los cursos intermedios que se ofrecen en los planes de estudio de pregrado. Los cursos tradicionales de pregrado: mecánica, electromagnetismo y física moderna, son los que más se benefician con esta alza de nivel. Así, el estudiante terminará su carrera con conocimientos superiores a los de antes, beneficio muy importante para aquellos que finalicen sus estudios a esta altura. Además, habrá ahora más oportunidad para hacer cursos nuevos y más interesantes en el postgrado. Esta misma tendencia se encuentra en los textos básicos más recientes de otras ciencias para los primeros y segundos años universitarios.

El texto está concebido para un curso de tres semestres. También se puede usar en aquellas escuelas en las que se enseña un curso de física general de dos semestres seguido de un semestre de física moderna, ofreciendo así una presentación más unificada a lo largo de los tres semestres. Por conveniencia, el texto se ha dividido en tres volúmenes correspondiendo cada uno, *grosso modo*, a un semestre. El volumen I trata de la mecánica y la interacción gravitacional. El volumen II estudia las interacciones electromagnéticas y las ondas, cubriendo esencialmente los cursos de electromagnetismo y óptica. La física cuántica y la física estadística, incluyendo la termodinámica, se estudian en el volumen III. A pesar de que los tres volúmenes están estrechamente relacionados y forman un texto único, cada uno puede ser considerado en sí mismo como un texto introductorio. En particular los volúmenes I y II equivalen a un curso de física general de dos semestres que cubre la física no cuántica.

Esperamos que este texto ayude a los educadores progresistas, quienes constantemente se preocupan por mejorar los cursos que dictan; esperamos, también, que estimule a los estudiantes, quienes merecen una presentación de la física más madura que la de los cursos tradicionales.

Queremos expresar nuestra gratitud a todos aquellos que por su estímulo y ayuda hicieron posible la culminación de este trabajo. Nuestro reconocimiento a los distinguidos colegas, en particular, a los Profesores D. Lazarus y H. S. Robertson, quienes leyeron el manuscrito original: sus comentarios y críticas permitieron corregir y mejorar muchos aspectos del texto. Agradecemos, además, la aptitud y dedicación del personal de la editorial Addison-Wesley. Por último, pero no con menos calor, damos sinceramente las gracias a nuestras esposas, quienes nos han apoyado pacientemente.

## ADVERTENCIA AL PROFESOR

Para ayudar al profesor en la programación de su curso, presentamos un corto esquema de este volumen y algunas sugerencias relativas a los conceptos más importantes dentro de cada capítulo. Como se indica en el prefacio, este curso de física ha sido desarrollado en forma integrada, de manera que el estudiante reconozca rápidamente las pocas ideas básicas en las que se asienta la física (por ejemplo, las leyes de conservación y el hecho de que los fenómenos físicos pueden ser reducidos a interacciones entre partículas fundamentales). El estudiante debe reconocer que para convertirse en físico o ingeniero tiene que alcanzar un claro entendimiento de tales ideas y desarrollar la habilidad de manipularlas.

El material básico forma el cuerpo del texto. Muchos ejemplos han sido incluidos en cada capítulo; algunos son simples aplicaciones numéricas de la teoría en discusión, mientras que otros son realmente extensiones de la teoría o derivaciones matemáticas. Se recomienda aconsejar al estudiante la omisión de todos los ejemplos en su primera lectura de un capítulo. Después, al leerlo por segunda vez, debería considerar los ejemplos escogidos por el profesor. En esta forma el estudiante captará las ideas básicas separadamente de sus aplicaciones o extensiones.

Hay una sección de problemas al final de cada capítulo. Algunos son más difíciles que los problemas corrientes de física general, mientras que otros son extremadamente simples. Están dispuestos en un orden que corresponde aproximadamente al de las secciones del capítulo, con cierta concentración de problemas más difíciles al final. La gran variedad de problemas le permite al profesor escoger con mayor libertad aquellos problemas que estén de acuerdo con la habilidad de sus propios estudiantes.

Sugerimos que el profesor mantenga una colección del material de referencia dado al final de cada capítulo, y que anime al estudiante a usarla de modo que pueda desarrollar el hábito de recurrir a fuentes de información, obteniendo más de una interpretación para cada tópico y adquiriendo al mismo tiempo, información histórica sobre la física.

El presente volumen ha sido escrito para cubrir el primer semestre. (Sin embargo, el capítulo 13 puede ser pospuesto hasta el segundo semestre). Sugerimos como guía, en base a nuestra propia experiencia, el número de horas de clase necesarias para cubrir cómodamente el material. El tiempo total anotado (43 horas de clase) no incluye períodos de repaso ni de exámenes. A continuación ofrecemos un corto comentario sobre cada capítulo.

### **Capítulo 1. *Introducción* (1 hora)**

Este capítulo debe dar al estudiante una visión preliminar de la ciencia que está empezando a estudiar: por tanto, debe leerse cuidadosamente. El profesor podría organizar períodos cortos de discusión.

**Capítulo 2.    Mediciones y unidades (1 hora)**

Siguiendo las recomendaciones de la comisión de Símbolos, Unidades y Nomenclatura de la IUPAP, hemos adoptado el sistema de unidades MKSC. Siempre que introducimos una nueva unidad MKSC en los capítulos posteriores, damos su equivalente en los sistemas cgs y británico. Mediante los problemas en este capítulo el estudiante debe captar las ideas de lo "grande" y de lo "pequeño".

**Capítulo 3.    Vectores (3 horas)**

Las ideas básicas del álgebra vectorial son introducidas e ilustradas por problemas cinemáticos. Las secciones 3.8, 3.9 y 3.10 pueden ser diferidas hasta que tales conceptos se necesiten en el texto. A causa de su limitada motivación física, el capítulo puede ser difícil para el estudiante. El profesor debería, sin embargo, convencerlo de la necesidad de la notación vectorial y tratar de dar vida a las clases presentando ejemplos físicos.

**Capítulo 4.    Fuerzas (2½ horas)**

Nos adelantamos con este capítulo en el libro por varias razones. Primero, porque proporciona una aplicación familiar de los vectores. Segundo, porque da tiempo al estudiante para aprender algunos fundamentos del cálculo antes de comenzar el estudio de la cinemática. Tercero, porque permite un desarrollo ininterrumpido de la mecánica en los capítulos 5 al 12. En cursos en los que este material no es necesario, el capítulo puede ser omitido, con excepción de las secciones 4.3 (torques) y 4.8 (centro de masa). Si se desea, el capítulo puede ser desarrollado después de la sección 7.6, pero no lo recomendamos así.

**PARTE 1.    MECANICA**

De los capítulos 5 al 12, el texto desarrolla los conceptos principales de la mecánica clásica y relativística. Discutimos primero, simplificando, la mecánica de una partícula, pero luego tratamos de los sistemas de muchas partículas con gran detalle. Hacemos énfasis en la distinción entre el sistema ideal de una partícula solitaria y el sistema real de muchas partículas.

**Capítulo 5.    Cinemática (3½ horas)**

Este capítulo debe ser cubierto en profundidad y detalle. El estudiante puede entender la naturaleza vectorial de la velocidad, la aceleración y sus relaciones con la trayectoria. El profesor podría remarcar que, al computar la razón de cambio de un vector, se debe considerar tanto los cambios en magnitud como en dirección. El cálculo necesario para este capítulo es relativamente simple. Si el profesor lo desea, podría posponer la discusión de la sección 5.11 para antes de la sección 7.14.

**Capítulo 6.    Movimiento relativo (4 horas)**

Consideramos el movimiento relativo desde un punto de vista cinemático. Este capítulo precede al de dinámica, de modo que el estudiante capte la importancia de los sistemas de referencia. Las secciones 6.4 y 6.5 (sistemas en rotación) pueden ser omitidas y las secciones 6.6 y 6.7 (sistemas relativísticos) pospuestos (si se desea) hasta el capítulo 11.

**Capítulo 7.    Dinámica de una partícula (4 horas)**

Este es uno de los capítulos más importantes, y el estudiante debería asimilarlo completamente. Al principio de la conservación del momentum se le da mayor significado que a la relación  $F = ma$ . Las limitaciones de las leyes del movimiento y los conceptos de interacciones y fuerzas deben ser analizados muy cuidadosamente.

**Capítulo 8. Trabajo y energía (3 horas)**

Este capítulo es, en cierto modo, una extensión del capítulo 7, y lo mismo que aquél debería ser comprendido completamente. La sección 8.10 (fuerzas centrales) puede ser omitida o pospuesta hasta el capítulo 13. Las ideas más importantes son los conceptos de energía y de conservación de energía para una partícula solitaria. Introducimos aquí el teorema del virial para una partícula, debido a su uso más y más frecuente tanto en física como en química.

**Capítulo 9. Dinámica de un sistema de partículas (5 horas)**

Por simplicidad, la mayoría de los resultados se derivan para dos partículas y entonces, por analogía, se extienden a un número arbitrario de partículas. Introducimos los conceptos de temperatura, calor y presión como conceptos estadísticos convenientes para describir el comportamiento de sistemas compuestos por un gran número de partículas. Esto nos permite el uso de dichos conceptos a lo largo de todo el resto del libro. Se deriva la ecuación de estado de un gas del teorema del virial pues ello revela más claramente el papel de las fuerzas internas; pero también se presenta un tratamiento más tradicional en el ejemplo 9.17. El capítulo lo termina con una sección sobre el movimiento de fluidos que puede ser omitida si se desea.

**Capítulo 10. Dinámica de un cuerpo rígido (3½ horas)**

Podría ponerse gran énfasis en la precesión del momentum angular bajo un torque aplicado. La sección sobre el movimiento giroscópico es también importante, ya que las ideas que se desarrollan son usadas muchas veces.

**Capítulo 11. Dinámica de alta energía (3½ horas)**

Este es un capítulo esencialmente de dinámica relativística, reforzando los conceptos de velocidad del sistema (sistema-C) y de la transformación de Lorentz de la energía y el momentum. Es naturalmente un capítulo importante en la física de hoy día.

**Capítulo 12. Movimiento oscilatorio (5 horas)**

Se presenta el movimiento armónico simple, primero cinemática y luego dinámicamente. Este capítulo puede ser discutido ya sea en su integridad en esta época (fin del primer semestre) o limitado a las primeras secciones solamente, posponiendo las restantes hasta que sean requeridas por los capítulos posteriores. Recomendamos la primera alternativa. El primer semestre podría concluir con este capítulo.

**PARTE 2. INTERACCIONES Y CAMPOS**

Esta parte está dedicada al estudio de las interacciones gravitacionales y electromagnéticas, las que son discutidas en los capítulos 13 a 17. Hacemos énfasis sobre el concepto de campo como útil herramienta para la física. Como comprendemos que muchos profesores desearían discutir gravitación durante el primer semestre, inmediatamente después de completar la mecánica, hemos incluido el capítulo 13 en este volumen, reservando el estudio de la interacción electromagnética (capítulos 14 a 17) para el segundo semestre junto con el volumen II.

**Capítulo 13. Interacción gravitacional (4 horas)**

Este es un corto resumen de gravitación, que ilustra la aplicación de la mecánica a una interacción en particular. También sirve para introducir al estudiante al concepto de campo. El capítulo está escrito de modo de empalmar naturalmente con la discusión de la interacción electromagnética en el volumen II. Las secciones 13.5 y 13.7 pueden ser omitidas sin pérdida de continuidad. La sección 13.8 proporciona una corta presentación de las ideas de la teoría de la relatividad general.

## ADVERTENCIA AL ESTUDIANTE

Es este un libro sobre los fundamentos de la física para estudiantes que siguen carreras científicas o ingeniería. Los conceptos e ideas que aprenda en él entrarán, muy probablemente, a formar parte de su vida profesional y de su modo de pensar. Cuanto mejor los comprenda tanto más fácil le resultará el resto de su educación superior.

En este curso debe estar preparado para abordar numerosos problemas arduos. El aprender las leyes y técnicas de la física puede ser, a veces, un proceso lento y doloroso. Antes de que entre en esas regiones de la física que excitan su imaginación, usted debe dominar otras menos llamativas pero muy fundamentales, sin las cuales no puede utilizar o comprender la física en forma apropiada.

Ud. deberá mantener dos objetivos principales al tomar este curso. Primero: familiarizarse completamente con el puñado de leyes y principios básicos que constituyen la columna vertebral de la física. Segundo: desarrollar la habilidad de manejar estas ideas y aplicarlas a situaciones concretas; en otras palabras, la habilidad de pensar y actuar como físico. El primer objetivo lo puede alcanzar principalmente leyendo y releendo aquellas secciones impresas en cuerpo grande. Para ayudarlo a alcanzar el segundo objetivo hay a lo largo del texto, en letra pequeña, muchos ejemplos resueltos y están los problemas para resolver en casa al final de cada capítulo. Recomendamos encarecidamente que lea primero el texto principal y una vez familiarizado con él, prosiga con los ejemplos y problemas asignados por el profesor. En algunos casos los ejemplos ilustran una aplicación de la teoría a una situación concreta, en otros amplían la teoría considerando nuevos aspectos del problema en discusión; a veces suministran una justificación de la teoría.

Los problemas que están al final de cada capítulo tienen un grado variable de dificultad. Oscilan entre lo más simple y lo complejo. En general, es bueno tratar de resolver un problema primero en forma simbólica o algebraica, introduciendo al final los valores numéricos. Si el problema que le han asignado no puede resolverlo en un tiempo prudencial, póngalo a un lado e inténtelo más tarde. Para el caso de aquellos pocos problemas que se resisten a ser resueltos, deberá procurar ayuda. El libro *How to Solve It* (segunda edición), de G. Polya (Doubleday, Garden City, N. Y., 1957) es una fuente de autoayuda que le enseñará el *método* de resolución de problemas.

La física es una ciencia cuantitativa que necesita de la matemática para la expresión de sus ideas. Toda la matemática empleada en este libro se puede encontrar en cualquier texto corriente de análisis matemático y deberá consultarlo toda vez que no comprenda una deducción matemática. No deberá, de manera alguna, sentirse desalentado ante una dificultad matemática; en caso de dificultades matemáticas, consulte a su profesor o a un estudiante más avanzado. Para el científico y el ingeniero la matemática es una herramienta y tiene importancia secundaria en la comprensión de los conceptos físicos. Para su comodidad, se

enumera en un apéndice al final del libro algunas de las relaciones matemáticas más útiles.

Todos los cálculos de la física se deben llevar a cabo utilizando un sistema compatible de unidades. En este libro se emplea el sistema MKSC. Como difiere un poco del sistema práctico, podrá encontrarlo extraño al principio. No obstante, se requiere un mínimo esfuerzo para familiarizarse con él. Además, es el sistema oficialmente aprobado para el trabajo científico y en los Estados Unidos lo usa aún el *National Bureau of Standards* en sus publicaciones. Sea extremadamente cuidadoso en verificar la compatibilidad de las unidades en todos sus cálculos. Es además una buena idea utilizar la regla de cálculo desde el comienzo; la precisión a tres cifras significativas de la más simple de las reglas de cálculo le ahorrará muchas horas de trabajo numérico. Sin embargo, en algunos casos, puede que la regla de cálculo no le dé la precisión necesaria.

Al final de cada capítulo se da una lista bibliográfica seleccionada. Consúltela tan a menudo como sea posible. Algunos trabajos ayudarán a entender la idea de la física como una ciencia en evolución, mientras que otros ampliarán el material del texto. En particular encontrará que el libro de Holton y Roller, *Foundations of Modern Physics* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1958) es particularmente útil por la información que trae sobre la evolución de ideas en la física.

# INDICE

**Contracubierta anterior**

**Tabla periódica de los elementos; constantes fundamentales**

**Contracubierta posterior**

**Unidades y símbolos; factores de conversión**

---

## **Capítulo 1      Introducción**

---

¿Qué es la física? 2. Las partes clásicas de la física 2. Nuestra visión del universo 3. La relación de la física con las otras ciencias 10. El método experimental 11.

---

## **Capítulo 2      Mediciones y unidades**

---

Introducción 15. Mediciones 15. Cantidades fundamentales y unidades 16. Densidad 20. Angulos en un plano 21. Angulos sólidos 22. Precisión y exactitud 23. Mediciones en el laboratorio 25.

---

## **Capítulo 3      Vectores**

---

Introducción 32. Concepto de dirección 32. Escalares y vectores 33. Adición de vectores 34. Componentes de un vector 37. Adición de varios vectores 41. Aplicación a problemas de cinemática 42. Producto escalar 45. Producto vectorial 47. Representación vectorial de una superficie 51.

---

## **Capítulo 4      Fuerzas**

---

Introducción 59. Composición de fuerzas concurrentes 59. Torque 60. Torque de varias fuerzas concurrentes 62. Composición de fuerzas aplicadas a un cuerpo rígido 64. Composición de fuerzas coplanares 65. Composición de fuerzas paralelas 66. Centro de masa 68. Estática. Equilibrio de una partícula 71. Estática. Equilibrio de un cuerpo rígido 72.



## **PARTE I MECANICA**

---

### **Capítulo 5 Cinemática**

---

Introducción 86. Movimiento rectilíneo: velocidad 87. Movimiento rectilíneo: aceleración 89. Representación vectorial de la velocidad y de la aceleración en el movimiento rectilíneo 92. Movimiento curvilíneo: velocidad 96. Movimiento curvilíneo: aceleración 98. Movimiento bajo aceleración constante 100. Componentes tangencial y normal de la aceleración 104. Movimiento circular: velocidad angular 106. Movimiento circular: aceleración angular 109. Movimiento curvilíneo general en el plano 112.

### **Capítulo 6 Movimiento relativo**

---

Introducción 121. Velocidad relativa 121. Movimiento relativo de traslación uniforme 123. Movimiento relativo rotacional uniforme 126. Movimiento relativo con respecto a la tierra 129. La transformación de Lorentz 136. Transformación de velocidades 140. Consecuencias de la transformación de Lorentz 143.

### **Capítulo 7 Dinámica de una partícula**

---

Introducción 156. La ley de inercia 156. Momentum lineal 158. Principio de la conservación del momentum 159. Redefinición de la masa 163. Segunda y tercera leyes de Newton; concepto de fuerza 163. Crítica del concepto de fuerza 166. Unidades de fuerza 167. Fuerzas de fricción 170. Fuerzas de fricción en los fluidos 173. Sistemas con masa variable 176. Movimiento curvilíneo 178. Momentum angular 183. Fuerzas centrales 185. Equilibrio y reposo 190.

### **Capítulo 8 Trabajo y energía**

---

Introducción 202. Trabajo 203. Potencia 206. Unidades de trabajo y potencia 207. Energía cinética 209. Trabajo de una fuerza de magnitud y dirección constantes 212. Energía potencial 213. Conservación de la energía de una partícula 219. Movimiento rectilíneo bajo fuerzas conservativas 220. Movimiento bajo fuerzas centrales conservativas 222. Discusión de curvas de energía potencial 224. Fuerzas no conservativas 228. El teorema del virial para una sola partícula 231. Crítica del concepto de la energía 232.

### **Capítulo 9 Dinámica de un sistema de partículas**

---

Introducción 241. Movimiento del centro de masa de un sistema de partículas 241. Masa reducida 247. Momentum angular de un sistema de partículas 251. Energía cinética de un sistema de partículas 255. Conservación de la energía de un sistema de partículas 257. Colisiones 262. Sistemas de muchas partículas: temperatura 269. Sistemas

de muchas partículas: trabajo 270. Sistemas de muchas partículas: calor 272. Reformulación del principio de conservación de la energía para sistemas de muchas partículas 274. El teorema del virial para muchas partículas 275. Ecuación de estado de un gas 276. Movimiento de un fluido 280.

---

**Capítulo 10      Dinámica de un cuerpo rígido**

---

Introducción 296. Momentum angular de un cuerpo rígido 297. Cálculo del momento de inercia 300. Ecuación del movimiento de la rotación de un cuerpo rígido 305. Energía cinética de rotación 311. Movimiento giroscópico 314.

---

**Capítulo 11      Dinámica de alta energía**

---

Introducción 328. Principio clásico de relatividad 328. Principio especial de relatividad 330. Momentum 332. Fuerza 334. Energía 336. Transformación de energía y momentum 341. Transformación de fuerza 344. Sistemas de partículas 345. Colisiones de alta energía 348.

---

**Capítulo 12      Movimiento oscilatorio**

---

Introducción 359. Cinemática del movimiento armónico simple 359. Fuerza y energía en el movimiento armónico simple 363. Dinámica del movimiento armónico simple 364. El péndulo simple 366. El péndulo compuesto 369. Superposición de dos MAS: igual dirección, igual frecuencia 371. Superposición de dos MAS: igual dirección, diferente frecuencia 374. Superposición de dos MAS: direcciones perpendiculares 376. Osciladores acoplados 380. Oscilaciones anarmónicas 385. Oscilaciones amortiguadas 387. Oscilaciones forzadas 389. Impedancia de un oscilador 393. Análisis de Fourier del movimiento periódico 395.

---

**PARTE 2      INTERACCIONES Y CAMPOS**

---

**Capítulo 13      Interacción gravitacional**

---

Introducción 411. La ley de gravitación 413. Masa inercial y gravitacional 416. Energía potencial gravitacional 418. Movimiento general bajo la interacción gravitacional 423. Campo gravitacional 428. Campo gravitacional debido a un cuerpo esférico 434. Principio de equivalencia 440. La gravitación y las fuerzas intermoleculares 442.

---

**Apéndice: Relaciones matemáticas; Tablas A-1**

**Respuesta a los problemas impares A-11**

**Índice A-20**

# INTRODUCCION

- 1.1 *¿Qué es la física?*
- 1.2 *Las partes clásicas de la física*
- 1.3 *Nuestra visión del universo*
- 1.4 *La relación de la física con otras ciencias*
- 1.5 *El método experimental*

Estudiar física es una aventura interesante y estimulante. Ser un físico profesional es aún más interesante. Es quizás una de las actividades más placenteras del saber humano desde que, en opinión del autor, nada atrae más a la mente que aprender sobre el mundo en que vivimos y descubrir los secretos de la naturaleza.

Puede parecer superfluo en este momento decirle al estudiante de qué trata la física, por qué es tan apasionante e interesante o cuáles son sus métodos, puesto que él tiene ya alguna familiaridad con esta ciencia. Sin embargo, precisamente debido a su familiaridad con la física, es deseable analizar y revisar los objetivos y los métodos de esta ciencia antes de embarcarnos en su estudio a un nivel más elevado. Eso es lo que concisamente haremos en este capítulo.

### **1.1 *¿Qué es la física?***

La palabra *física* viene del término griego que significa *naturaleza*, y por ello la física debía ser una ciencia dedicada al estudio de todos los fenómenos naturales. En verdad, hasta principios del siglo diecinueve se entendía la física en este amplio sentido, y se denominó "filosofía natural". Sin embargo, durante el siglo diecinueve y hasta muy recientemente, la física estuvo restringida al estudio de un grupo más limitado de fenómenos, designados por el nombre de *fenómenos físicos* y definidos sin precisión como procesos en los cuales la *naturaleza* de las sustancias participantes no cambia. Esta definición poco precisa de la física ha sido gradualmente descartada, retornándose al concepto más amplio y más fundamental de antes. Por ello, podemos decir que *la física es una ciencia cuyo objetivo es estudiar los componentes de la materia y sus interacciones mutuas. En función de estas interacciones el científico explica las propiedades de la materia en conjunto, así como los otros fenómenos que observamos en la naturaleza.*

A medida que el estudiante progresa en el curso, él será testigo de la manera en que este programa se desarrolla a partir de principios básicos y generales y se aplica a la comprensión de una gran variedad de fenómenos físicos, aparentemente sin relación entre sí pero que obedecen las mismas leyes fundamentales. Una vez que estos grandes principios sean claramente comprendidos el estudiante será capaz de acometer nuevos problemas con gran economía de reflexión y esfuerzo.

### **1.2 *Las partes clásicas de la física***

El hombre, poseedor de una mente investigadora, ha tenido siempre una gran curiosidad acerca de cómo funciona la naturaleza. Al principio sus únicas fuentes de información fueron sus sentidos y por ello clasificó los fenómenos observados de acuerdo a la manera en que los percibía. *La luz* fue relacionada con la visión y la *óptica* se desarrolló como una ciencia más o menos independiente asociada a ella. *El sonido* fue relacionado con la audición y la *acústica* se desarrolló como

una ciencia correlativa. *El calor* fue relacionado a otra clase de sensación física, y por muchos años el estudio del calor (denominado *termodinámica*) fue otra parte autónoma de la física. *El movimiento*, evidentemente, es el más común de todos los fenómenos observados directamente, y la ciencia del movimiento, *la mecánica*, se desarrolló más temprano que cualquier otra rama de la física. El movimiento de los planetas causado por sus interacciones gravitatorias, así como la caída libre de los cuerpos, fue satisfactoriamente explicado por las leyes de la mecánica; por ello *la gravitación* se consideró tradicionalmente como un capítulo de la mecánica. *El electromagnetismo*, no estando relacionado directamente con ninguna experiencia sensorial — a pesar de ser responsable de la mayoría de ellas — no apareció como una rama organizada de la física sino hasta el siglo diecinueve.

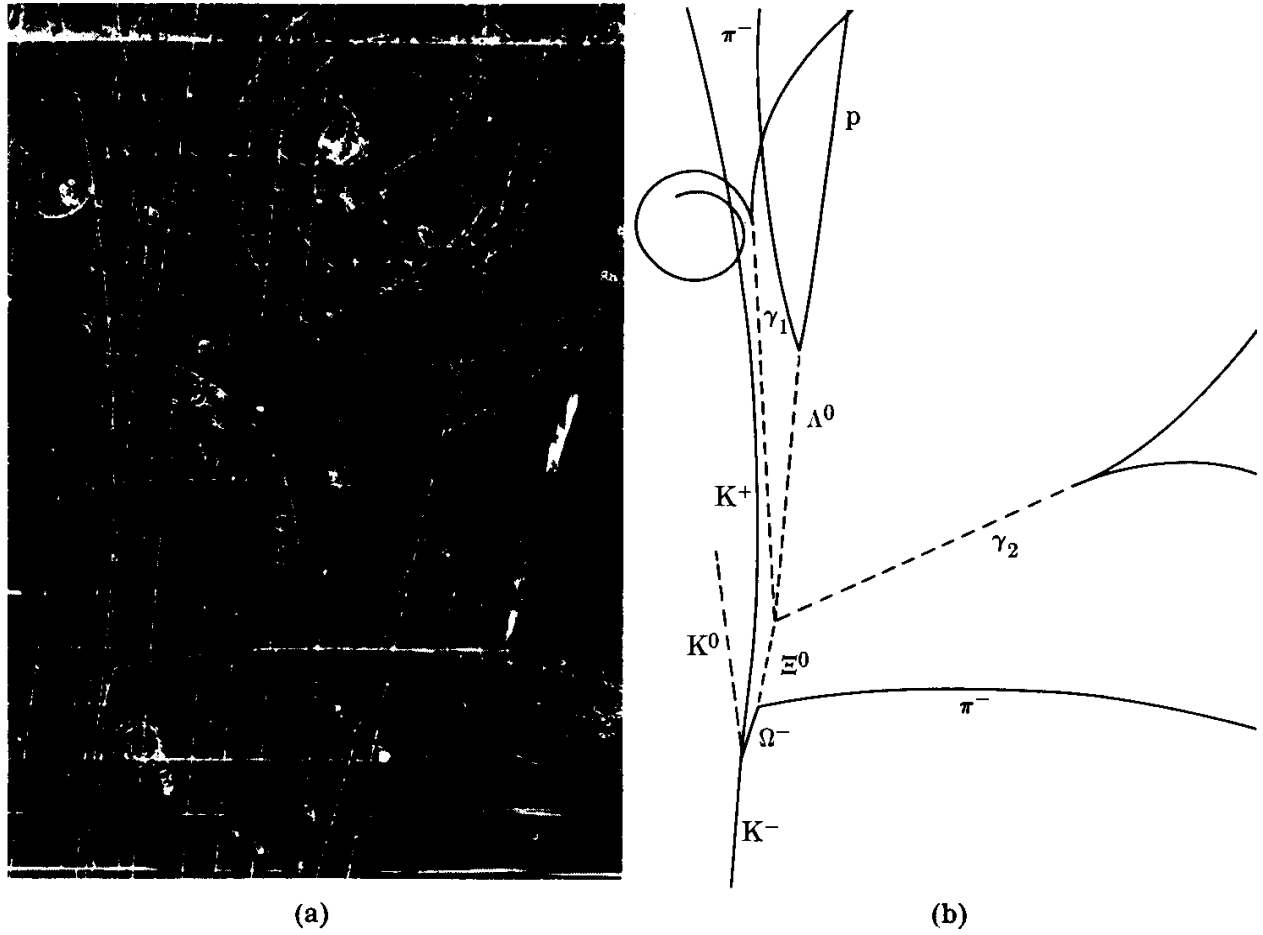
De esta manera en el siglo diecinueve la física aparecía dividida en unas pocas ciencias o ramas (llamadas *clásicas*): mecánica, calor, sonido, óptica, y electromagnetismo, con muy poca o ninguna conexión entre ellas, aunque la mecánica fue, con toda propiedad, el principio guía para todas ellas. Y así la física se enseñó de este modo a los estudiantes hasta hace poco. Ultimamente una nueva rama, denominada *física moderna*, que cubre los desarrollos de la física del siglo veinte, se ha agregado a estas ramas “clásicas”.

Las ramas “clásicas” de la física son, y lo seguirán siendo, campos muy importantes de especialización y actividad profesional, sin embargo, no tiene ya sentido estudiar los fundamentos de la física de tal modo. El mismo conjunto de fenómenos incluidos bajo el electromagnetismo y la física moderna han producido una nueva tendencia en el pensamiento que mira a los fenómenos físicos desde un punto de vista unificado y más lógico, y ésta es una de las grandes proezas del siglo veinte. Esta presentación unificada de la física requiere una reevaluación de la física clásica desde un punto de vista *moderno* y no una división de la física en *clásica* y *moderna*. Es claro que habrá siempre una *física moderna* en el sentido que habrá una física contemporánea en proceso de desarrollo. Esta física moderna requerirá a cada momento de una revisión y reevaluación de ideas y principios previos. Las físicas *clásica* y *moderna* deberán integrarse en cada etapa en un solo cuerpo de conocimiento. La física será siempre un todo que debe considerarse de una manera lógica y consecuente.

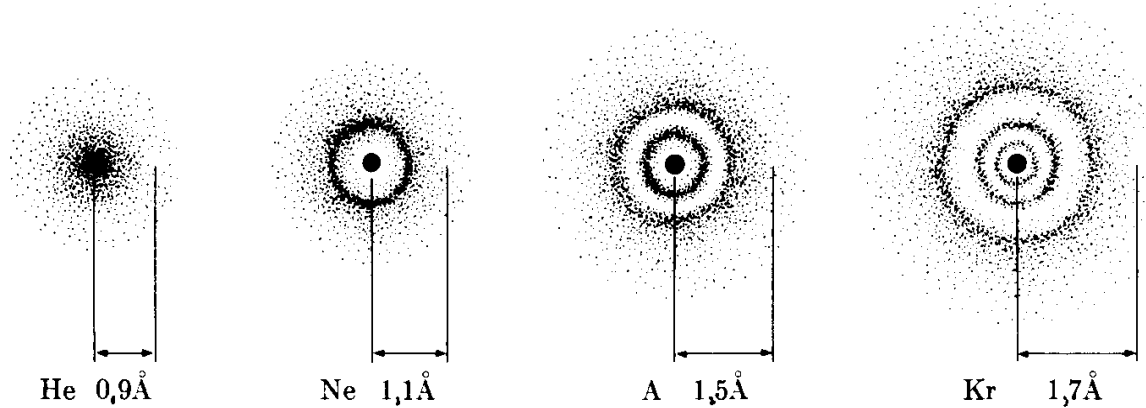
### 1.3 Nuestra visión del universo

En el presente nosotros consideramos que la materia está compuesta de un manojito de partículas fundamentales (o elementales) y que todos los cuerpos vivientes e inertes están hechos de diferentes grupos de ordenamientos de tales partículas. Tres de estas partículas fundamentales son especialmente importantes por su presencia en muchos fenómenos comunes: *electrones*, *protones*, y *neutrones*.

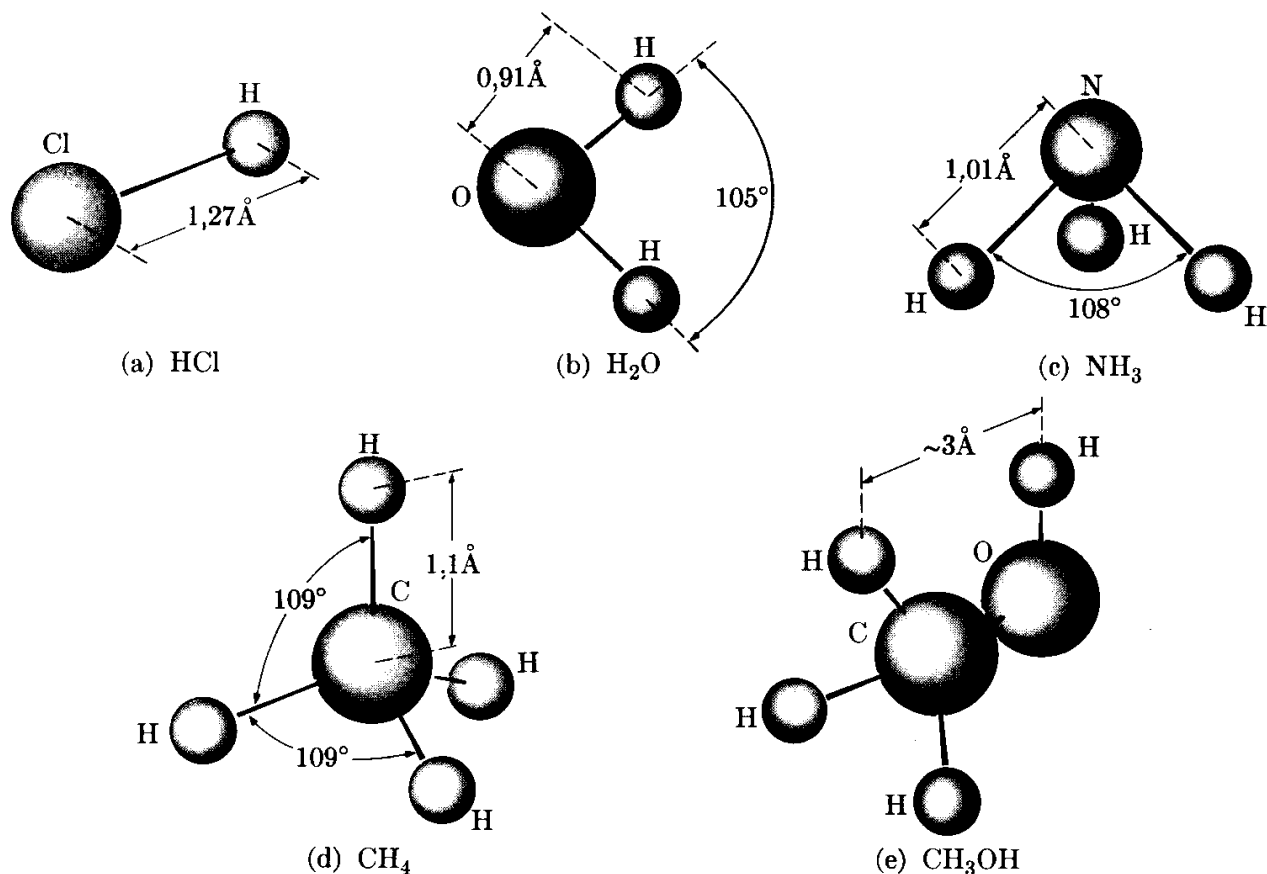
Hay otras pocas partículas fundamentales (algunos físicos piensan que hay demasiadas) pero que tienen una vida transitoria, creándose y destruyéndose continuamente (por ello se denominan inestables) y aparentemente no participan



**Fig. 1-1.** (a) Trazos de partículas fundamentales en una cámara de burbujas de hidrógeno líquido, de 203,2 cm, colocada en un campo magnético intenso que obliga a las partículas cargadas a seguir trayectorias curvas. Del análisis de estos trazos se derivan las propiedades de las diferentes partículas. Esta fotografía, tomada en 1964, es histórica, pues aportó la primera evidencia de la existencia de la partícula omega menos ( $\Omega^-$ ), que había sido supuesta previamente sobre una base teórica. (b) El diagrama de líneas muestra los eventos más importantes registrados en la fotografía. La trayectoria  $\Omega^-$  es la línea corta cerca del fondo de la lámina. Las partículas que corresponden a los otros trazos están identificados también. (Fotografía cortesía del Laboratorio Nacional de Brookhaven.)



**Fig. 1-2.** Distribución de electrones alrededor del núcleo en algunos átomos simples (helio, He; neón, Ne; argón, Ar; criptón, Kr). Puesto que los electrones no siguen trayectorias bien definidas, las regiones oscuras son las que tienen más probabilidad de ser ocupadas por los electrones ( $1 \text{ Å} = \text{angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$ ).



**Fig. 1-3.** Algunas moléculas relativamente simples. Los electrones interiores permanecen ligados a los átomos correspondientes, pero los exteriores, o bien se mueven en el espacio entre dos átomos, o más o menos libremente sobre la molécula ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ).

directamente en la mayor parte de los fenómenos que observamos a nuestro alrededor (Fig. 1-1). Su existencia se manifiesta solamente por medio de técnicas de observación elaboradas, y su papel en el esquema general aún no se comprende completamente. Algunas de estas, tales como el *pion*, son vitales debido al papel que desempeñan en las interacciones entre protones y neutrones. La investigación de las partículas fundamentales es de gran importancia hoy en día para obtener algunos indicios sobre la estructura del universo.

Usando un lenguaje muy simplificado, podemos decir que las tres partículas, el electrón, el protón y el neutrón, están presentes en grupos bien definidos llamados *átomos*, con los protones y neutrones situados en una región central muy pequeña denominada *núcleo* (Fig. 1-2). Se han reconocido cerca de 104 “especies” diferentes de átomos (ver tabla A-1) pero hay alrededor de 1300 “variedades” diferentes de átomos, denominados *isótopos*. Los átomos a su vez forman otros agregados llamados *moléculas*, de las cuales se sabe que existen varios millones. El número de moléculas diferentes parece ser extremadamente grande, ya que día a día más y más moléculas se sintetizan en los laboratorios de química. Algunas moléculas contienen pocos átomos, tales como el ácido clorhídrico (cuyas moléculas están constituidas por un átomo de hidrógeno y otro de cloro (Fig. 1-3), mientras que otras pueden tener tantos como varios centenares de átomos, tales

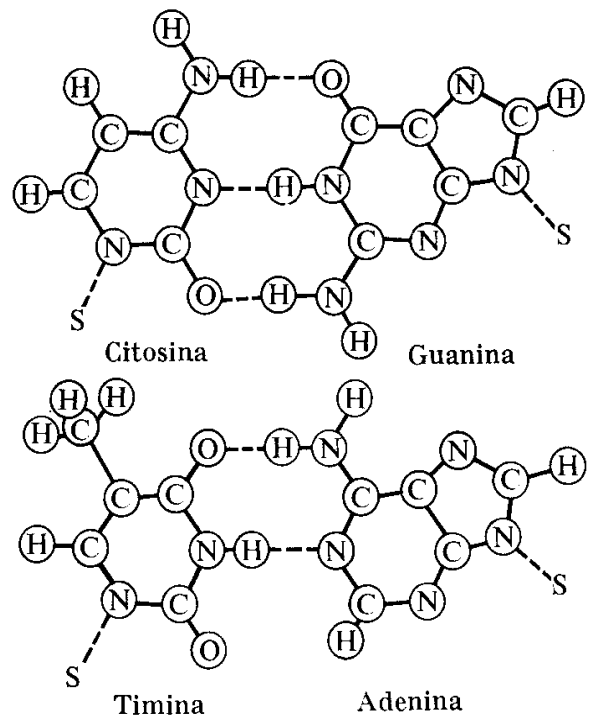
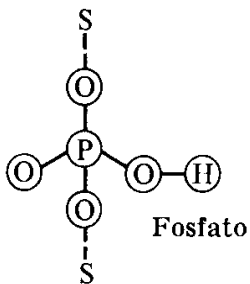
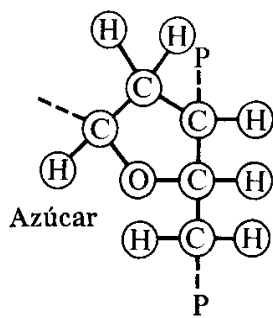
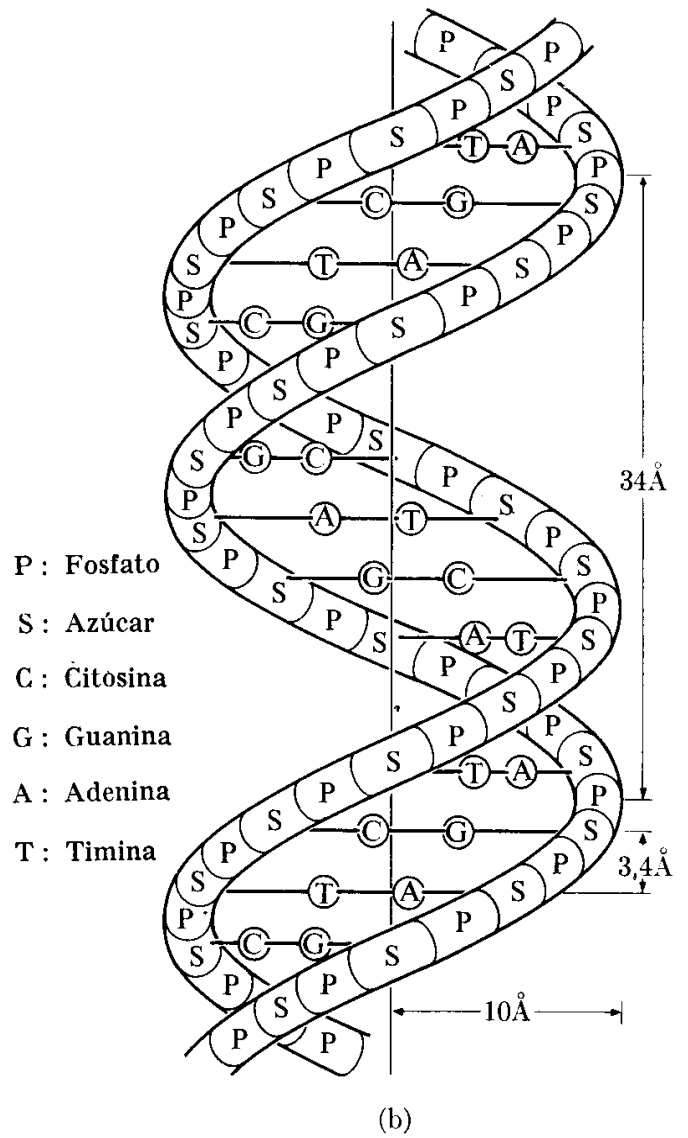
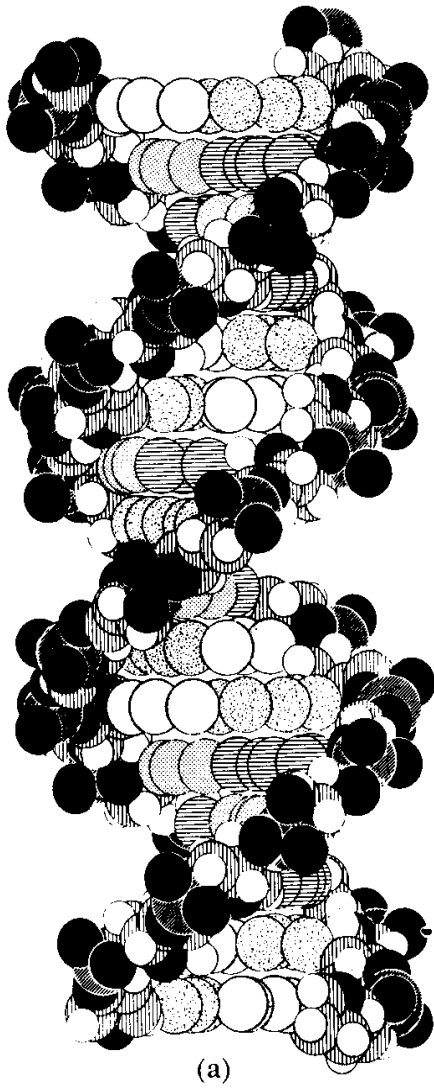
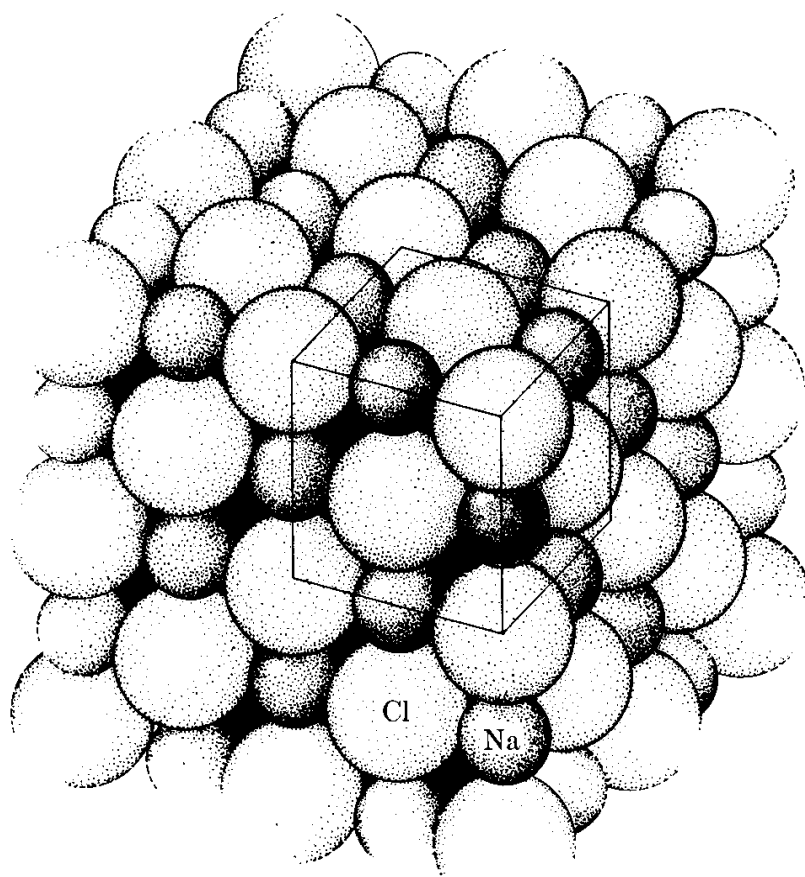


Figura 1-4





**Fig. 1-5.** Estructura de un cristal de cloruro de sodio. Los átomos están distribuidos en una forma geométrica regular que se extiende sobre un volumen relativamente grande. Esta estructura se refleja en la apariencia externa de los cristales macroscópicos.

como las proteínas, las encimas y los ácidos nucleicos [ADN y ARN (Fig. 1-4)] o algunos polímeros orgánicos tales como el polietileno o el cloruro de polivinilo (CPN). Finalmente, las moléculas se agrupan formando cuerpos (o materia en conjunto) apareciendo como sólidos, líquidos o gases\* (Fig. 1-5), aunque esta clasificación o división no es del todo rígida.

---

**Fig. 1-4.** Modelo de ácido desoxiribonucleico (ADN) de Crick-Watson. Uno de los dos ácidos nucleicos que toman parte en la composición de un cromosoma, el ADN, lleva información genética y es una de las moléculas gigantes mejor estudiadas. La difracción por rayos X ha mostrado que consiste de dos hélices antiparalelas compuestas de grupos de azúcar (S) y fosfato (P) alternados. El azúcar, llamada desoxiribosa, contiene cinco átomos de carbono. Las dos hélices están entrelazadas por pares de bases unidas por enlaces de hidrógeno. Un par está formado por dos bases llamadas adenina y timina (A-T) y el otro por citosina y guanina (C-G). El código genético de la molécula ADN depende de la ilación u ordenamiento de cada par de bases. Estos pares de bases son como travesaños de una escalera de espiral, cada uno de los cuales es de un largo de 11 angstroms. El paso de cada hélice es de unos 34 angstroms y su diámetro total es de unos 18 angstroms (1 angstrom =  $= 10^{-10}$  m).

---

\* Otro estado de la materia es el *plasma*, que consiste de una mezcla gaseosa de iones positivos y negativos (o partículas cargadas). La mayor parte de la naturaleza en el universo se halla en la forma de plasma.

Una clase particularmente importante de cuerpo es el cuerpo viviente o *materia viviente*, también designado *protoplasma*, en el cual las moléculas aparecen altamente organizadas y exhiben propiedades y funciones que son aparentemente distintas de aquéllas de la materia inerte. El cuerpo humano, el cual es el más desarrollado de los entes vivientes, está compuesto de cerca de  $10^{28}$  átomos; la mayor parte de los cuales son átomos de carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

El sistema solar es un agregado de varios cuerpos enormes llamados planetas, los que giran alrededor de una estrella, denominada el sol. Uno de los planetas es nuestra tierra, la cual contiene cerca de  $10^{51}$  átomos. El sol está compuesto de cerca de  $10^{57}$  átomos. El sistema solar a su vez es una pequeña parte de un gran agregado de estrellas que forman una galaxia llamada la Vía Láctea, compuesta de cerca de  $10^{11}$  estrellas o  $10^{70}$  átomos y con una forma de disco, con un diámetro de  $10^{21}$  m o alrededor de 100.000 años luz, y un espesor máximo de alrededor de  $10^{20}$  m. Se han observado muchas galaxias similares a la nuestra (Fig. 1-6), estando la más cercana a dos millones de años luz o  $2 \times 10^{22}$  m de nosotros. El universo puede contener  $10^{20}$  estrellas agrupadas en cerca de  $10^{10}$  galaxias y conteniendo un total de alrededor de  $10^{80}$  átomos en una región cuyo radio es del orden de  $10^{26}$  m o  $10^{10}$  años luz.

Algunas preguntas vienen naturalmente a nuestra mente. ¿Por qué y cómo se unen los electrones, protones y neutrones para formar átomos? ¿Por qué y cómo se unen los átomos para formar moléculas? ¿Por qué y cómo las moléculas se unen para formar cuerpos? ¿Cómo es que la materia se agrega para formar desde partículas de polvo hasta planetas gigantes, desde bacterias hasta esa criatura maravillosa que es el hombre? Nosotros podemos responder en principio estas preguntas fundamentales, introduciendo la noción de *interacción*. Decimos que las partículas de un átomo interactúan entre sí de modo de producir una configuración estable. Los átomos a su vez interactúan para formar moléculas, y las moléculas interactúan para formar cuerpos. La materia en conjunto también exhibe ciertas interacciones obvias, tales como la gravitación.

Este concepto no es nuevo. No estamos promulgando una doctrina nueva y radical o desechando conceptos largamente establecidos. Nosotros hemos simplemente cambiado y adaptado las palabras usadas al describir la creación del universo, como un resultado de muchos años de investigación desde el año 300 A.C., cuando Aristóteles, en su *De Caelo*, dijo, "Ellos (los átomos) se mueven en el vacío y enlazándose unos con otros se empujan, y algunos rebotan en cualquier dirección al azar y otros se unen entre sí en grados diferentes, de acuerdo a la simetría de sus formas, tamaños, posiciones y orden, y ellos permanecen juntos; y así se llega a las cosas compuestas". Podemos comparar lo dicho por Aristóteles con aquello expresado por el laureado Nobel T. D. Lee, quien, en 1965, dijo:\* "El propósito de la ciencia es buscar aquel conjunto de principios fundamentales a través de los cuales todos los hechos conocidos son comprendidos y por medio de los cuales se predicen nuevos resultados. Puesto que la materia está compuesta de las mismas unidades básicas, el último fundamento de todas las ciencias na-

---

\* *Nature of Matter — Purposes of High Energy Physics*, Luke C. L. Yuan, editor. New York : Brookhaven National Laboratory, 1965.



**Fig. 1-6.** La gran Nebulosa de Andrómeda, también llamada M-31, la más cercana de las galaxias regulares, está a unos 2.500.000 años-luz ó  $10^{21}$  m, y contiene más de  $10^{11}$  estrellas. (Foto cortesía de los observatorios Monte Wilson y Palomar.)

turales debe basarse en las leyes que gobiernan el comportamiento de estas partículas elementales”.

El objetivo primario del físico es descubrir las diferentes interacciones de la materia; éstas son principalmente interacciones gravitacionales, electromagnéticas y nucleares. El físico trata luego de expresarlas en una manera cuantitativa, para lo cual requiere de la matemática. Finalmente intenta formular reglas generales acerca del comportamiento de la materia en conjunto — comportamiento que resulta de estas interacciones fundamentales. Una descripción del compor-

tamiento de la materia en conjunto es, por necesidad, de naturaleza estadística, ya que involucra un número tremendamente grande de moléculas, cuyos movimientos individuales son imposibles de seguir en detalle. Por ejemplo, en una gota de lluvia puede haber tanto como  $10^{20}$  moléculas de agua.

La física cubre rangos tremendos de magnitudes, yendo desde longitudes del orden de  $10^{-15}$  m y masas del orden de  $10^{-31}$  kg (correspondiente a una sola partícula tal como el electrón), hasta — y aún más allá de — longitudes del orden de  $10^9$  m y masas del orden de  $10^{30}$  kg (correspondientes a cuerpos de nuestro sistema solar). Aunque las leyes básicas son las mismas, la manera en que se expresan y los tipos de aproximación que se hacen dependen del rango particular de magnitudes en los cuales se está trabajando.

### **1.4 La relación de la física con otras ciencias**

Indicamos en la sección 1.1, y podemos repetirlo ahora que el objetivo de la física es capacitarnos para comprender los componentes básicos de la materia y sus interacciones mutuas, y explicar así los fenómenos naturales, incluyendo las propiedades de la materia en conjunto. Por esto, podemos ver que la física es la más fundamental de todas las ciencias naturales. La química trata básicamente de un aspecto particular de este ambicioso programa: la aplicación de las leyes de la física a la formación de moléculas y los variados métodos prácticos de transformación de ciertas moléculas en otras. La biología se basa fundamentalmente en la física y en la química para explicar los procesos que ocurren en los cuerpos vivientes. La aplicación de los principios de la física y la química a los problemas prácticos, en la investigación y el desarrollo así como en la práctica profesional, ha dado lugar a las diferentes ramas de ingeniería. La práctica moderna de la ingeniería al igual que la investigación serían imposibles sin una comprensión completa de las ideas fundamentales de las ciencias naturales.

Pero la física es importante no solamente porque proporciona la base conceptual y la estructura teórica sobre la cual se fundan las otras ciencias naturales. Desde el punto de vista práctico es importante porque proporciona técnicas que pueden utilizarse casi en cualquier área de la investigación pura o aplicada. El astrónomo requiere de técnicas ópticas, de radio y espectroscópicas. El geólogo utiliza en sus investigaciones métodos gravimétricos, acústicos, nucleares, y mecánicos. Lo mismo puede decirse del oceanógrafo, el meteorólogo, el sismólogo, etc. Un hospital moderno está equipado con laboratorios en los cuales se usan las técnicas más refinadas de la física. En resumen, casi todas las actividades de investigación, incluyendo tales campos como la arqueología, paleontología, historia y arte pueden difícilmente avanzar sin el uso de las técnicas modernas de la física. Esto le da al físico el grato sentimiento que no sólo está haciendo avanzar el conocimiento que existe sobre la naturaleza sino que está contribuyendo al progreso social de la humanidad.

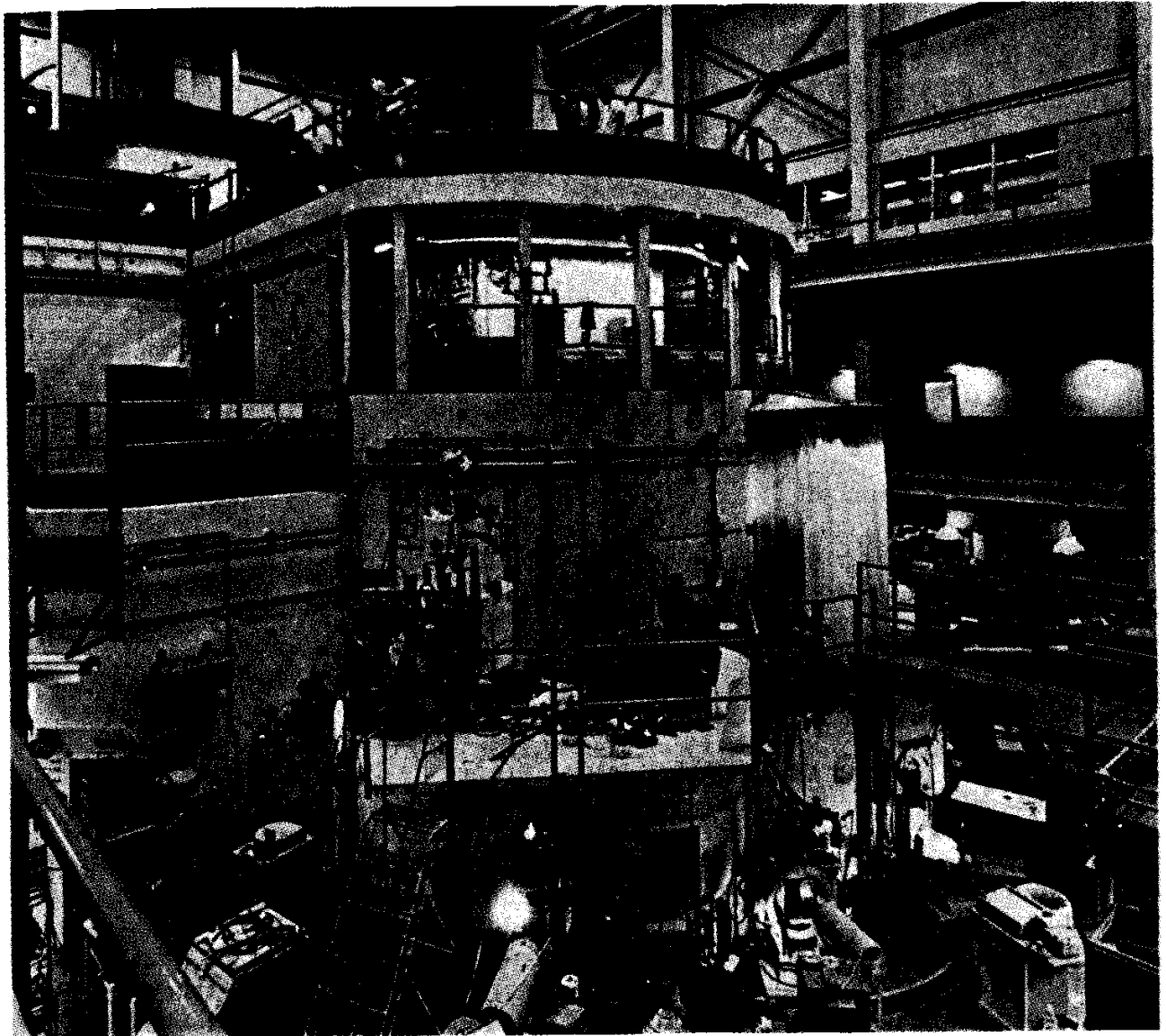
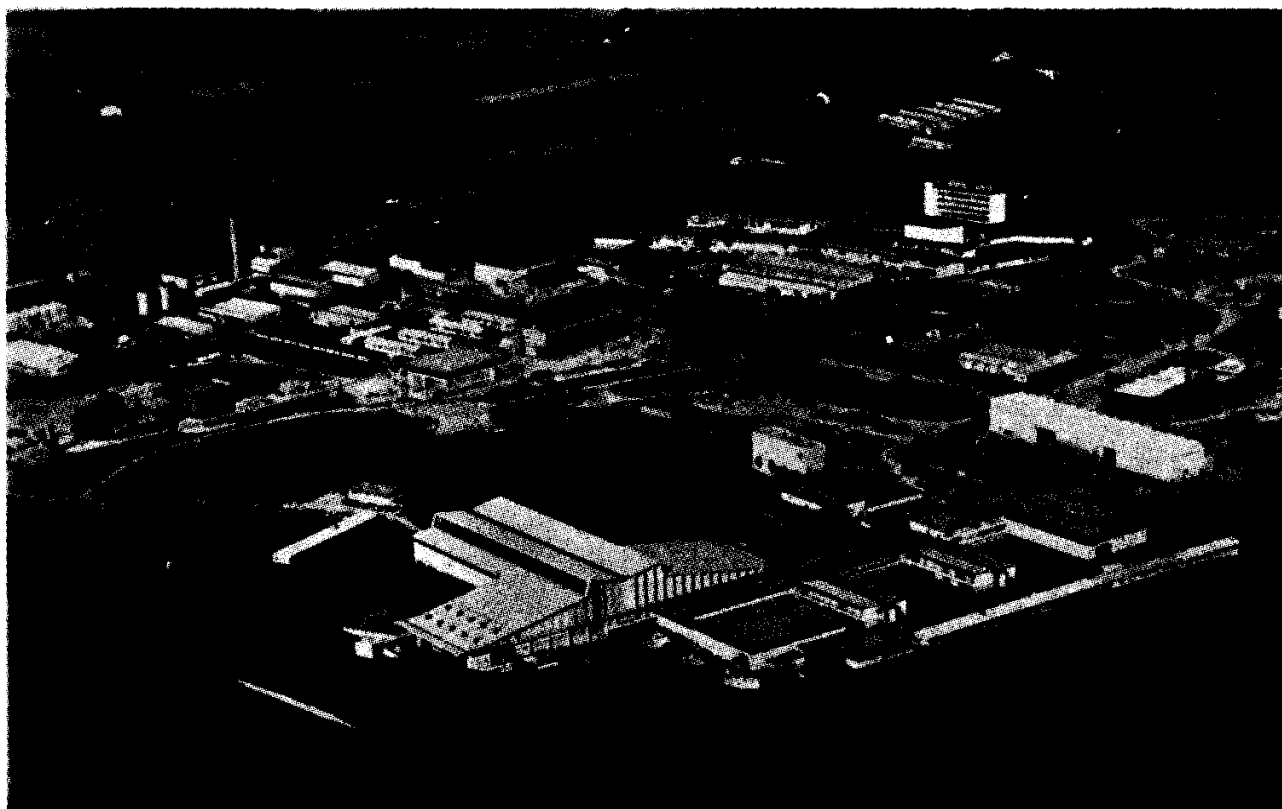


Fig. 1-7. El reactor nuclear de investigación del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, usado en una extensa variedad de investigaciones fundamentales. (Foto cortesía de ORNL.)

### 1.5 El método experimental

A fin de cumplir con sus objetivos la física, como todas las ciencias naturales puras o aplicadas, depende de la *observación* y de la *experimentación*. La observación consiste en un examen crítico y cuidadoso de los fenómenos, notando y analizando los diferentes factores y circunstancias que parecen influenciarlos. Desafortunadamente, las condiciones bajo las cuales ocurren los fenómenos naturales raramente ofrecen suficiente variación y flexibilidad. En algunos casos ocurren sólo de vez en cuando de modo que su análisis es un proceso difícil y lento. Por dicha razón es necesaria la experimentación. La experimentación consiste en la observación del fenómeno bajo condiciones preparadas de antemano y cuidadosamente controladas. De esta manera el científico puede variar las condiciones a voluntad, haciendo más fácil de descubrir como ellas afectan



**Fig. 1-8.** Vista general del CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares), fundado en 1954. Aunque es una empresa de cooperación entre gobiernos europeos (Austria, Bélgica, Dinamarca, la República Federal de Alemania, Francia, Grecia, Italia, los Países Bajos, Noruega, España, Suiza y la Gran Bretaña), Estados Unidos también participa activamente. Situada en Mayrin Suiza, en la frontera franco-suiza, el CERN posee las mejores facilidades para investigaciones nucleares de la Europa Occidental, tales como un sincro-ciclotrón de 600-Mev, un protón-sincrotrón de 28-Gen (cuyo imán queda bajo tierra a lo largo de la estructura circular) y una cámara de burbujas de hidrógeno líquido de 2-m. El personal del CERN (alrededor de 2000) procede de todos los países-miembros y su presupuesto anual es de cerca de \$ 20.000.000. (Foto cortesía de la CERN.)

el proceso. Sin la experimentación la ciencia moderna nunca habría alcanzado los avances que han ocurrido. Tal es la razón por la cual los laboratorios son tan esenciales al científico.

Para dar énfasis a este punto la Fig. 1-7 muestra un reactor de investigación del Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Debe notarse que el espacio que rodea al reactor está cubierto con equipos experimentales. Algunos de estos equipos se utilizan por físicos para conocer más sobre las propiedades nucleares o realizar un análisis estructural de los materiales. Otros aparatos se utilizan para preparar materiales radiactivos para aplicaciones en química, medicina, biología, agricultura o ingeniería. Un grupo de biofísicos utilizando parte del equipo mencionado pueden experimentar sobre los efectos de la radiación en especímenes biológicos, mientras que otro grupo de científicos puede usar el mismo equipo para estudiar el efecto de la radiación sobre diferentes clases de material. Se sugiere que el alumno visite un laboratorio moderno de investigación de modo que pueda tener una mayor apreciación personal de la importancia de la experimentación en la ciencia.

Evidentemente, la experimentación no es la única herramienta que tiene un físico. A partir de hechos conocidos un científico puede deducir nuevos conocimientos en una forma *teórica*. Por *teórica* se entiende que el físico proponga un *modelo* de la situación física que está estudiando. Utilizando relaciones previamente establecidas, el físico aplica razonamientos lógicos y deductivos al modelo. Ordinariamente expresa su razonamiento mediante técnicas matemáticas. El resultado final puede ser la predicción de algunos fenómenos no observados todavía o la verificación de las relaciones entre varios procesos. El conocimiento que un físico adquiere por medios teóricos a su vez puede ser utilizado por otros científicos para realizar nuevos experimentos para comprobar el modelo mismo, o para determinar sus limitaciones y fallas. El físico teórico entonces revisa y modifica su modelo de modo que esté de acuerdo con la nueva información. Es esta interrelación entre la experimentación y la teoría lo que permite a la ciencia progresar continuamente sobre una base sólida.

Aunque hasta hace algunos años un científico podía trabajar en una forma más o menos aislada (y tal fue el caso de Galileo, Newton, Huygens y otros), la ciencia moderna, debido a su complejidad, es principalmente el resultado de trabajo en equipo, en el cual los teóricos y los experimentales trabajan y piensan juntos. Y por "juntos", no implicamos necesariamente coincidencia física en el mismo lugar. Los medios modernos de comunicación facilitan el rápido intercambio de las ideas. Físicos a cientos de kilómetros de distancia, y de nacionalidades diferentes, pueden trabajar unidos, colaborando en un proyecto de investigación común (Fig. 1-8). Este hecho se aplica no solamente a la física, sino a casi toda la ciencia, y de esta manera se demuestra el valor universal de la ciencia, la cual sobrepasa toda clase de barreras humanas. Puede esperarse que la ciencia, a través de este tipo de cooperación, ayudará a aumentar la comprensión entre los hombres.

## Bibliografía

1. "Truth in Physics", P. Schmidt, *Am. J. Phys.* 28, 24 (1960)
2. "Nature of Physics and Its Relation to Other Sciences", G. P. Thompson, *Am. J. Phys.* 28, 187 (1960)
3. "Empty Space", H. van de Hulst, *Scientific American*, noviembre de 1955, pág. 72
4. "Some Reflections on Science and the Humanities", J. Ashmore, *Physics Today*, noviembre de 1963, pág. 46
5. "American Physics Comes of Age", J. Van Vleet, *Physics Today*, junio de 1964, pág. 21
6. "Science and Public Policy", E. Daddario, *Physics Today*, enero de 1965, pág. 23
7. "Physics and Biology", W. A. Rosenblith, *Physics Today*, enero de 1966, pág. 23
8. *Atoms and the Universe* (segunda edición), por G. Jones, J. Rotblat y G. Witrow. New York: Scribner's, 1963
9. *The Excitement of Science*, por J. R. Platt. Boston: Houghton Mifflin, 1962
10. *The Feynman Lectures on Physics*, vol. I, por R. Feynman, R. Leighton y M. Sands. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963, caps. 1, 2 y 3
11. *Foundations of Modern Physical Science*, por G. Holton y D. H. D. Roller. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1958, caps. 8, 12, 14 y 15