Seis piezas fáciles

La física explicada por un genio

Richard P. Feynman

Introducción de Paul Davies

Traducción de Javier García Sanz

Drakontos
Directores: Josep Fontana y Gonzalo Pontón

Crítica
Grijalbo Mondadori (Barcelona)

Título original: Six easy pieces
Essentials of physics explained by its most brilliant teacher
Helix Books, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass.

© 1995, 1989, 1963 California Institute of Technology
© 1998 Grijalbo Mondadori
ISBN 84-7423-871-4
Depósito legal: B 3-1998

ADVERTENCIA

Este archivo es una copia de seguridad, para compartirlo con un grupo reducido de amigos, por medios privados. Si llega a tus manos **debes saber** que **no deberás colgarlo en webs o redes públicas, ni hacer uso comercial del mismo**. Que una vez leído se considera caducado el préstamo y deberá ser destruido.

En caso de incumplimiento de dicha advertencia, derivamos cualquier responsabilidad o acción legal a quienes la incumplieran.

Queremos dejar bien claro que nuestra intención es favorecer a aquellas personas, de entre nuestros compañeros, que por diversos motivos: económicos, de situación geográfica o discapacidades físicas, no tienen acceso a la literatura, o a bibliotecas públicas. Pagamos religiosamente todos los cánones impuestos por derechos de autor de diferentes soportes. Por ello, no consideramos que nuestro acto sea de piratería, ni la apoyamos en ningún caso. Además, realizamos la siguiente…

RECOMENDACIÓN

Si te ha gustado esta lectura, recuerda que **un libro es siempre el mejor de los regalos**. Recomiéndalo para su compra y recuérdalo cuando tengas que adquirir un obsequio.

y la siguiente…

PETICIÓN

Libros digitales a precios razonables.

Nota editorial....6
Introducción....7
Prefacio especial....14
Prefacio de Feynman....18
De las Lecciones de Física....18
Átomos en movimiento....22
Introducción....22
La materia está hecha de átomos....24
Procesos atómicos....29
Reacciones químicas....32
Física básica....37
Introducción....37
La física antes de 1920....40
Física cuántica....44
Núcleos y partículas....47
La relación de la física con las otras ciencias....53
Introducción....53
Química....53
Biología....55
Astronomía....61
Geología....62
Psicología....64
¿Cómo se llegó a ello?....65
La conservación de la energía....67
¿Qué es la energía?....67
Energía potencial gravitatoria....69
Energía Cinética....75
Otras formas de energía....76
La teoría de la gravitación....80
Movimientos planetarios....80
Leyes de Kepler....81
Desarrollo de la dinámica....83
Ley de la gravitación de Newton....83
Gravitación universal....87
El experimento de Cavendish....92
¿Qué es la gravedad?....93
Gravedad y relatividad....96
Comportamiento cuántico....97
Mecánica atómica....97
Un experimento con balas....99
Un experimento con ondas....100
Un experimento con electrones....102
La interferencia de las ondas electrónicas....104
Observando los electrones....106
Primeros principios de la mecánica cuántica....110
El principio de incertidumbre....112

— • —

Nota editorial

Seis piezas fáciles surgió de la necesidad de llevar a una audiencia lo más amplia posible una introducción a la física, sustancial pero no técnica, basada en la ciencia de Richard Feynman. Hemos escogido los seis capítulos más fáciles del celebrado y señero texto de Feynman, Lecciones de física (publicado originalmente en 1963), que sigue siendo su publicación más famosa. Los lectores no especializados tienen la fortuna de que Feynman decidiera presentar algunos temas clave en términos básicamente cualitativos sin matemáticas formales, y estos temas se han reunido en Seis piezas fáciles.

Addison-Wesley Publishing Company desea agradecer a Paul Davies su penetrante introducción a esta nueva compilación. Tras su introducción hemos decidido reproducir dos prefacios de las Lecciones de física, uno de ellos del propio Feynman y otro de dos de sus colegas, puesto que ambos ofrecen el contexto para las piezas que siguen, además de impresiones tanto sobre Richard Feynman como sobre su ciencia.

Finalmente, quisiéramos expresar nuestro agradecimiento al Departamento de Física y a los Archivos del Instituto Tecnológico de California, en particular a la doctora Judith Goodstein, y al doctor Brian Hatfield, por sus excelentes consejos y recomendaciones durante el desarrollo de este proyecto.

— • —

Introducción

Existe una falsa creencia popular según la cual la ciencia es una empresa impersonal, desapasionada y completamente objetiva, mientras que la mayor parte de las otras actividades humanas están dominadas por modas, caprichos y caracteres, se supone que la ciencia se atiene a reglas de procedimiento establecidas y pruebas rigurosas. Lo que cuenta son los resultados, y no las personas que los producen.

Esto es, por supuesto, de lo más absurdo. La ciencia, como cualquier empresa humana, es una actividad impulsada por personas y está igualmente sujeta a modas y caprichos. En este caso, la moda no se establece tanto por la elección del tema como por la forma en que los científicos piensan acerca del mundo. Cada época adopta un enfoque particular para los problemas científicos, siguiendo normalmente la estela dejada por algunas figuras dominantes que fijan los temas y definen los mejores métodos para tratarlos. De vez en cuando, el científico alcanza altura suficiente para llegar a la atención del público general, y cuando está dotado de un don sobresaliente un científico puede llegar a convertirse en un ídolo para toda la comunidad científica. En siglos pasados Isaac Newton fue un ídolo. Newton personificó al científico caballero: bien relacionado, devotamente religioso, tranquilo y metódico en su trabajo. Su estilo de hacer ciencia fijó el canon durante doscientos años. En la primera mitad del siglo XX Albert Einstein reemplazó a Newton como ídolo científico popular. Excéntrico, desmelenado, germánico, distraído, completamente absorto en su trabajo y un pensador abstracto arquetípico, Einstein cambió el modo de hacer física al cuestionarse los propios conceptos que definen la disciplina.

Richard Feynman se ha convertido en un ídolo para la física de finales del siglo XX, el primer norteamericano en alcanzar este estatus. Nacido en Nueva York en 1918 y educado en la Costa Este, llegó demasiado tarde para participar en la edad de oro de la física, que, en las tres primeras décadas de este siglo, transformó nuestra visión del mundo con las revoluciones gemelas de la teoría de la relatividad y la mecánica

cuántica. Estos rápidos desarrollos sentaron los cimientos del edificio que ahora llamamos la Nueva Física. Feynman partió de estos cimientos y ayudó a construir la primera planta de la Nueva Física. Sus contribuciones alcanzaron a casi todos los rincones de la disciplina y han tenido una profunda influencia en el modo en que los físicos piensan acerca del universo físico.

Feynman fue un físico teórico por excelencia. Newton había sido experimentador y teórico en la misma medida. Einstein era simplemente desdeñoso del experimento, prefiriendo poner su fe en el pensamiento puro. Feynman se vio impulsado a desarrollar una profunda comprensión teórica de la naturaleza, pero siempre permaneció próximo al mundo real y a menudo confuso de los resultados experimentales. Nadie que hubiera visto al último Feynman discutir la causa del desastre de la lanzadera espacial Challenger sumergiendo una banda elástica en agua helada podría dudar de que aquí había a la vez un showman y un pensador muy práctico.

Inicialmente, Feynman adquirió renombre con su trabajo sobre la teoría de las partículas subatómicas, en concreto la teoría conocida como electrodinámica cuántica o QED. De hecho, este fue el tema con el que se inició la teoría cuántica. En 1900, el físico alemán Max Planck propuso que la luz y las otras formas de radiación electromagnética, que hasta entonces habían sido consideradas como ondas, se comportaban paradójicamente como minúsculos paquetes de energía, o «cuantos», cuando interaccionaban con la materia. Estos cuantos particulares llegaron a conocerse como fotones. A comienzos de los años treinta los arquitectos de la nueva mecánica cuántica habían elaborado un esquema matemático para describir la emisión y absorción de fotones por partículas eléctricamente cargadas tales como electrones. Aunque esta primera formulación de la QED disfrutó de cierto éxito limitado, la teoría tenía fallos evidentes. En muchos casos los cálculos daban respuestas inconsistentes e incluso infinitas a preguntas físicas bien planteadas. Fue al problema de construir una teoría consistente de la QED al que orientó su atención el joven Feynman a finales de los años cuarenta.

Para colocar la QED sobre una base sólida era necesario hacer la teoría consistente no sólo con los principios de la mecánica cuántica sino también con los de la teoría de la relatividad especial. Estas dos teorías traían sus propias herramientas matemáticas características, complicados sistemas de ecuaciones que de hecho pueden combinarse y reconciliarse para dar una descripción satisfactoria de la QUED. Hacer esto era una empresa dura que requería un alto grado de habilidad matemática, y este fue el enfoque seguido por los contemporáneos de Feynman. Feynman, sin embargo, tomó un camino completamente diferente; tan radical, de hecho, ¡que él fue más o menos capaz de elaborar las respuestas directamente sin utilizar ninguna matemática!

Como ayuda para esta extraordinaria hazaña de intuición, Feynman inventó un sencillo sistema de diagramas epónimos. Los diagramas de Feynman son una manera simbólica pero poderosamente heurística de representar lo que sucede cuando los electrones, fotones y otras partículas interaccionan entre sí. Actualmente los diagramas de Feynman son una ayuda rutinaria para el cálculo, pero a comienzos de los años cincuenta marcaron un alejamiento sorprendente de la forma tradicional de hacer física teórica.

El problema concreto de construir una teoría consistente de la electrodinámica cuántica, aun constituyendo un jalón en el desarrollo de la física, fue sólo el principio. Iba a definir un estilo característico de Feynman, un estilo destinado a producir una cadena de resultados importantes en un amplio abanico de temas en la ciencia física. El estilo de Feynman puede describirse mejor como una mezcla de reverencia y falta de respeto hacia la sabiduría recibida.

La física es una ciencia exacta, y el cuerpo de conocimiento existente, aunque incompleto, no puede ser simplemente dejado de lado. Feynman adquirió una visión formidable de los principios aceptados de la física a una edad muy temprana, y decidió trabajar casi por completo sobre problemas convencionales. No era el tipo de genio que trabajase aislado en un remanso de la disciplina y diese con algo profundamente nuevo. Su talento especial consistía en aproximarse a temas esencialmente corrientes de una forma particular. Esto implicaba dejar de lado los formalismos existentes y desarrollar su propio enfoque altamente intuitivo. Mientras la mayoría de los físicos teóricos confían en cuidadosos cálculos matemáticos que proporcionen una guía hacia territorios poco familiares, la actitud de Feynman era casi displicente. Uno tiene la impresión de que él podía leer en la naturaleza como en un libro e informar simplemente de lo que encontraba, sin análisis tediosos y complejos.

En realidad, al seguir sus intereses de esta manera Feynman mostraba un saludable desprecio por los formalismos rigurosos. Es difícil transmitir la profundidad del genio necesario para trabajar de este modo. La física teórica es uno de los más duros ejercicios intelectuales, que combina conceptos abstractos que desafían la visualización con una complejidad matemática extraordinaria. Sólo adoptando los más altos niveles de disciplina mental pueden hacer progresos la mayoría de los físicos. Pero Feynman hacía caso omiso de este estricto código de actuación y arrancaba nuevos resultados como frutos maduros del Árbol del Conocimiento.

El estilo de Feynman debía mucho a la personalidad del hombre. En su vida profesional y privada parecía enfrentarse al mundo como si fuera un juego enormemente divertido. El universo físico se le presentaba como una serie fascinante de rompecabezas y desafíos, y lo mismo sucedía con su entorno social. Un eterno iconoclasta, trataba a la autoridad y al estamento académico con la misma falta de respeto que mostraba hacia el formalismo matemático rígido. Con poca paciencia para soportar estupideces, rompía las reglas cuando quiera que las encontrara arbitrarias o absurdas. Sus escritos autobiográficos contienen historias divertidas acerca de Feynman burlando los servicios de seguridad de la bomba atómica durante la guerra, Feynman violando claves, Feynman desarmando a las mujeres con un comportamiento descaradamente atrevido. De la misma forma, lo tomas o lo dejas, trató a su premio Nobel, concedido por su trabajo sobre la QED.

Junto a este malestar por el formalismo, Feynman sentía una fascinación hacia lo extraño y oscuro. Muchos recordarán su obsesión con el país hace tiempo perdido de Tuva en el Asia Central, tan deliciosamente captado en un film documental realizado poco antes de muerte. Sus otras pasiones incluían tocar los bongos, la pintura, frecuentar clubs de strip tease y descifrar los textos mayas.

El propio Feynman hizo mucho para cultivar su personalidad característica. Aunque reacio a poner la pluma sobre el papel, era versátil en la conversación y

disfrutaba contando historias sobre sus ideas y escapadas. Estas anécdotas, acumuladas durante años, se sumaron a su mística e hicieron de él una leyenda proverbial durante su vida. Sus encantadores modales le ganaron el aprecio de los estudiantes, especialmente los más jóvenes, muchos de los cuales le idolatraban. Cuando Feynman murió de cáncer en 1988, los estudiantes del Caltech, donde él había trabajado durante la mayor parte de su carrera, desplegaron una pancarta con el simple mensaje: «Te queremos, Dick».

Fue esta aproximación desinhibida a la vida en general y a la física en particular la que hizo de él un comunicador tan soberbio. Tenía poco tiempo para impartir clases formales o incluso para supervisar a estudiantes de doctorado. De todas formas, podía dar brillantes lecciones cuando se lo proponía, desplegando todo el genio chispeante, la intuición penetrante y la irreverencia de que hacía gala en su trabajo de investigación.

A comienzos de los años sesenta Feynman fue persuadido para impartir un curso de física introductorio para los estudiantes de primer y segundo año en el Caltech. Lo hizo con su tono característico y su inimitable mezcla de informalidad, gusto y humor poco convencional. Afortunadamente, estas lecciones inapreciables fueron salvadas para la posteridad en forma de libro. Aunque muy alejadas en estilo o presentación de los textos de enseñanza más convencionales, las Lecciones de Física de Feynman tuvieron un enorme éxito y excitaron e inspiraron a una generación de estudiantes en todo el mundo. Tres décadas después, estos volúmenes no han perdido nada de su chispa y lucidez. Seis piezas fáciles está extraído directamente de las Lecciones de Física. Se propone ofrecer a los lectores no especializados un sabor sustancial de Feynman el Educador extraído de los primeros capítulos no técnicos de esta obra señera. El resultado es un libro delicioso, que sirve a la vez como una introducción a la física para los no científicos y como una introducción al propio Feynman.

Lo más impresionante de la cuidadosamente elaborada exposición de Feynman es la forma en que es capaz de desarrollar nociones físicas de gran alcance a partir de una mínima inversión en conceptos, y con un mínimo de matemáticas y jerga técnica. Tiene la habilidad de encontrar precisamente la analogía correcta o la ilustración cotidiana para transmitir la esencia de un principio profundo, sin oscurecerlo con detalles accidentales e irrelevantes.

La selección de los temas contenidos en este volumen no pretende ser una revisión completa de la física moderna, sino que intenta dar un sabor seductor del enfoque de Feynman. Pronto descubrimos cómo puede iluminar incluso temas triviales como los de fuerza y movimiento con nuevas intuiciones. Los conceptos clave están ilustrados con ejemplos sacados de la vida diaria o de la Antigüedad. La física se relaciona continuamente con otras ciencias mientras que al lector no le queda ninguna duda sobre cuál es la disciplina fundamental.

Desde el mismo principio de Seis piezas fáciles aprendemos que toda la física está enraizada en la noción de ley: la existencia de un universo ordenado que puede ser entendido mediante la aplicación del pensamiento racional. Sin embargo, las leyes de la física no son transparentes para nosotros en nuestras observaciones directas de la naturaleza. Están frustrantemente ocultas, sutilmente codificadas en los fenómenos que estudiamos. Los procedimientos arcanos del físico —una mezcla de

experimentación cuidadosamente diseñada y teorización matemática— son necesarios para desvelar la realidad legaliforme subyacente.

Posiblemente la ley más conocida de la física es la ley de Newton de la inversa del cuadrado para la gravitación, discutida en el capítulo 5, sobre la gravitación. El tema se introduce en el contexto del Sistema Solar y las leyes de Kepler del movimiento planetario. Pero la gravitación es universal, se aplica en todo el cosmos, lo que capacita a Feynman para salpicar su exposición con ejemplos tomados de la astronomía y la cosmología. Comentando una fotografía de un cúmulo globular, mantenido de algún modo por fuerzas invisibles, exclama líricamente: «Si alguien no puede ver aquí la gravitación en acción, es que no tiene alma».

Se conocen otras leyes relativas a las diversas fuerzas no gravitatorias de la naturaleza que describen cómo interaccionan entre sí las partículas de materia. Sólo hay un puñado de estas fuerzas, y el propio Feynman ostenta la notable distinción de ser uno de los pocos científicos en la historia que ha descubierto una nueva ley de la física, concerniente al modo en que una fuerza nuclear débil afecta al comportamiento de ciertas partículas subatómicas.

La física de partículas de altas energías fue la joya de la corona de la ciencia de la posguerra, al mismo tiempo temible y atractiva, con sus enormes aceleradores y su aparentemente inacabable lista de partículas subatómicas recién descubiertas. La investigación de Feynman estuvo dirigida principalmente a explicar los resultados de esta empresa. Un gran tema unificador entre los físicos de partículas ha sido el papel de la simetría y las leyes de conservación para poner orden en el zoológico subatómico.

Muchas de las simetrías conocidas por los físicos de partículas eran ya familiares en la física clásica. Entre éstas eran claves las simetrías que surgen de la homogeneidad del espacio y el tiempo. Consideremos el tiempo: aparte de la cosmología, donde el «big bang» marcó el comienzo del tiempo, no hay nada en la física que distinga un instante de tiempo del siguiente. Los físicos dicen que el mundo es «invariante bajo traslación temporal», lo que quiere decir que ya tomemos la medianoche o el mediodía como el cero de tiempo en nuestras medidas, esto no supone ninguna diferencia en la descripción de los fenómenos físicos. Los procesos físicos no dependen de un cero absoluto del tiempo. Sucede que esta simetría bajo traslación temporal implica directamente una de las leyes más básicas, y también más útiles, de la física: la ley de la conservación de la energía. Esta ley dice que podemos llevar la energía de un lado a otro y transformarla, pero no podemos crearla o destruirla. Feynman hace esta ley cristalinamente clara con su divertida historia de Daniel el Travieso que siempre está ocultando malévolamente sus bloques de construcción de juguete a su madre (capítulo 4, sobre la conservación de la energía).

La lección de este libro que plantea un reto mayor es la última, que es una exposición de la física cuántica. No es exagerado decir que la mecánica cuántica ha dominado la física del siglo XX, y es con mucho la teoría científica de más éxito entre las existentes. Es indispensable para la comprensión de las partículas subatómicas, los átomos y los núcleos, las moléculas y el enlace químico, la estructura de los sólidos, los superconductores y los superfluidos, la conductividad eléctrica y térmica de los metales y los semiconductores, la estructura de las estrellas y muchas otras cosas. Tiene aplicaciones prácticas que van desde el láser al microchip. ¡Todo esto procede de una

teoría que a primera vista —y a segunda vista— parece absolutamente loca! Niels Bohr, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, comentó en cierta ocasión que quienquiera que no se haya sentido conmocionado por la teoría no la ha entendido.

El problema es que las ideas cuánticas inciden en el propio corazón de lo que podríamos llamar realidad de sentido común. En particular, la idea de que objetos físicos tales como electrones o átomos disfrutan de una existencia independiente, con un conjunto completo de propiedades físicas en todo instante, es puesta en cuestión. Por ejemplo, un electrón no puede tener al mismo tiempo una posición en el espacio y una velocidad bien definidos. Si buscamos dónde está localizado el electrón, lo encontraremos en un lugar, y si medimos su velocidad obtendremos una respuesta precisa, pero no podemos hacer ambas observaciones a la vez. Ni tiene sentido atribuir valores precisos, aunque sean desconocidos, a la posición y la velocidad de un electrón en ausencia de un conjunto completo de observaciones.

Este indeterminismo en la naturaleza misma de las partículas atómicas está resumido en el celebrado principio de incertidumbre de Heisenberg. Éste pone límites estrictos a la precisión con que pueden conocerse simultáneamente propiedades tales como la posición y la velocidad. Un valor preciso de la posición difumina el rango de valores posibles de la velocidad y viceversa. La borrosidad cuántica se muestra en la forma en que se mueven los electrones, fotones y otras partículas. Algunos experimentos pueden revelar cómo éstos toman caminos definidos en el espacio, al modo de balas que siguen trayectorias hacia un blanco. Pero otros montajes experimentales muestran que estas entidades pueden comportarse también como ondas, mostrando figuras características de difracción e interferencia.

El análisis maestro de Feynman del famoso experimento de la «doble rendija», que plantea la «perturbadora» dualidad onda-partícula en su forma más aguda, ha llegado a convertirse en un clásico de la historia de la exposición científica. Con unas pocas ideas muy simples, Feynman se las arregla para llevar al lector al mismo corazón del misterio cuántico, y nos deja sorprendidos con la naturaleza paradójica de la realidad que expone.

Aunque la mecánica cuántica había producido sus libros de texto a principios de los años treinta, es típico de Feynman que, siendo joven, él prefiriese reformular la teoría para sí mismo con un aspecto completamente nuevo. El método de Feynman tiene la virtud de que nos proporciona una imagen vívida de la maquinaria cuántica de la naturaleza en acción. La idea consiste en que la trayectoria de una partícula en el espacio no está en general bien definida en mecánica cuántica. Podemos imaginar un electrón que se mueve libremente, pongamos por caso, no viajando meramente en línea recta entre A y B, como sugeriría el sentido común, sino tomando muchos caminos zigzagueantes. Feynman nos invita a imaginar que el electrón explora de algún modo todas las rutas posibles, y en ausencia de una observación de qué camino ha tomado nosotros debemos suponer que todos estos caminos alternativos contribuyen de algún modo a la realidad. Así, cuando un electrón llega a un punto del espacio —digamos a una pantalla— deben integrarse conjuntamente muchas historias diferentes para crear este único suceso.

La denominada integral de camino de Feynman, o enfoque de la suma sobre historias para la mecánica cuántica, establece esta notable idea como un

procedimiento matemático. Siguió siendo más o menos una curiosidad durante muchos años, pero a medida que los físicos llevaban la mecánica cuántica a sus límites —aplicándola a la gravitación, e incluso a la cosmología— la aproximación de Feynman resultó ofrecer la mejor herramienta de cálculo para describir un universo cuántico. La historia podrá juzgar perfectamente que, entre sus muchas contribuciones sobresalientes a la física, la formulación de la mecánica cuántica mediante integrales de camino es la más importante.

Muchas de las ideas discutidas en este volumen son profundamente filosóficas. Pero Feynman recelaba de los filósofos. Una vez tuve ocasión de tantearle sobre la naturaleza de las matemáticas y las leyes de la física, y sobre si podría considerarse que las leyes matemáticas abstractas gozaban de una existencia platónica independiente. Él dio una descripción animada y hábil de por qué lo parece así, pero pronto retrocedió cuando yo le presioné para que adoptase una postura filosófica concreta. Se mostró igualmente cauto cuando yo intenté sonsacarle sobre el tema del reduccionismo. Visto retrospectivamente, creo que Feynman no era, después de todo, desdeñoso de los problemas filosóficos. Pero, de la misma forma que fue capaz de hacer buena física matemática sin matemáticas sistemáticas, también produjo algunas buenas ideas filosóficas sin filosofía sistemática. Era el formalismo lo que le disgustaba, no el contenido.

Es poco probable que el mundo vea otro Richard Feynman. Era un hombre de su tiempo. El estilo de Feynman funcionaba bien para un tema que estaba en trance de consolidar una revolución y embarcarse en la exploración de largo alcance de sus consecuencias. La física de la posguerra estaba segura en sus fundamentos; madura en sus estructuras teóricas, pero enormemente abierta para una explotación pionera. Feynman entró en un país de las maravillas de conceptos abstractos e imprimió su modo personal de pensar sobre muchos de ellos. Este libro proporciona una ojeada única a la mente de un ser humano notable.

Paul Davies

Septiembre de 1994

— • —

Prefacio especial

Hacia el final de su vida, la fama de Richard Feynman había trascendido los confines de la comunidad científica. Sus hazañas como miembro de la comisión investigadora del desastre de la lanzadera espacial Challenger le ganaron una amplia audiencia; igualmente, un libro de gran éxito sobre sus aventuras picarescas hizo de él un héroe popular casi de las proporciones de Albert Einstein. Pero ya en 1961, incluso antes de que su premio Nobel aumentara su notoriedad para el público general, Feynman era más que simplemente famoso entre los miembros de la comunidad científica: era legendario. Sin duda, el poder extraordinario de su magisterio ayudó a difundir y enriquecer la leyenda de Richard Feynman.

Realmente era un gran profesor, quizá el más grande de su era y la nuestra. Para Feynman, el aula era un teatro, y el conferenciante un actor, responsable de proporcionar espectáculo y fuegos artificiales tanto como hechos y cifras. Se movía por la tarima del aula, agitando los brazos, «una combinación imposible de físico teórico y artista de circo, todo movimiento corporal y efectos de sonido», escribió The New York Times. Ya se dirigiera a una audiencia de estudiantes, colegas, o público general, para aquellos que tuvieron la suerte de ver a Feynman en persona la experiencia fue en general poco convencional y siempre inolvidable, como lo era la propia persona.

Era el maestro del gran espectáculo, decidido a captar la atención de toda la audiencia de la sala. Hace muchos años, impartió un curso sobre mecánica cuántica avanzada a un gran grupo compuesto por algunos pocos estudiantes graduados y la mayor parte del claustro de física del Caltech. Durante una de las lecciones, Feynman empezó explicando cómo se podían representar gráficamente ciertas integrales complicadas: el tiempo en este eje, el espacio en aquel eje, línea ondulada hacia esta línea recta, etc. Tras describir lo que se conoce en el mundo de la física como un diagrama de Feynman, él se volvió hacia la clase, exclamando triunfalmente: «¡Y esto

se denomina EL DIAGRAMA!». Feynman había llegado al desenlace y la sala prorrumpió en un aplauso espontáneo.

Durante muchos años posteriores a que se hubiesen impartido las lecciones que constituyen este libro, Feynman fue un ocasional profesor invitado para el curso de física dirigido a los novatos del Caltech. Naturalmente, su aparición tenía que mantenerse en secreto para que quedase sitio en el aula para los estudiantes matriculados. En una de estas lecciones el tema era el espacio-tiempo curvo, y Feynman hizo gala de su brillantez característica. Pero el momento inolvidable llegó al comienzo de la lección. Se acababa de descubrir la supernova de 1987 y Feynman estaba muy excitado por ello. Dijo: «Tycho Brahe tuvo su supernova, y Kepler tuvo la suya. Luego, no hubo ninguna durante 400 años. Pero ahora yo tengo la mía». La clase guardó silencio, y Feynman continuó: «Hay 1011 estrellas en la galaxia. Esto solía ser un número enorme. Pero es sólo cien mil millones. ¡Es menos que el déficit nacional! Solemos llamarlos números astronómicos. Ahora deberíamos llamarlos números económicos». La clase se deshizo en risas, y Feynman, habiendo cautivado a su audiencia, siguió con su lección.

Dejando aparte el hombre-espectáculo, la técnica pedagógica de Feynman era sencilla. Un resumen de su filosofía educativa se encontró entre sus papeles en los archivos del Caltech, en una nota que había garabateado para sí mismo mientras estaba en Brasil en 1952:

> *Piensa primero por qué quieres que los estudiantes aprendan el tema y qué quieres que sepan, y el método surgirá más o menos por sentido común.*

Lo que Feynman entendía por «sentido común» eran a menudo giros brillantes que captaban perfectamente la esencia del tema. En cierta ocasión, durante una conferencia pública, él estaba tratando de explicar por qué uno no debe verificar una idea utilizando los mismos datos que sugirieron dicha idea por primera vez. Alejándose en apariencia del tema, Feynman empezó a hablar sobre las placas de matrícula. «Fíjense ustedes, esta noche me ha sucedido la cosa más sorprendente. Me dirigía hacia aquí, a dar la conferencia, y entré en el aparcamiento. ¡Y no van a creer lo que sucedió! Vi un automóvil con la matrícula ARW 357. ¿Se lo pueden imaginar? De todos los millones de matrículas que hay en el estado, ¿cuál era la probabilidad de que yo viera esa matrícula concreta esta noche? ¡Sorprendente!». Un punto que incluso muchos científicos no pueden captar fue hecho evidente mediante el notable «sentido común» de Feynman.

En 35 años en el Caltech (de 1952 a 1987), Feynman figuró como profesor en treinta y cuatro cursos. Veinticinco de ellos eran cursos avanzados, estrictamente limitados a estudiantes graduados, a menos que los no graduados pidiesen permiso para seguirlos (a menudo lo hacían, y el permiso era concedido casi siempre). El resto fueron principalmente cursos introductorios para graduados. Solamente una vez impartió Feynman cursos para estudiantes de licenciatura, y ésa fue la celebrada ocasión en los años académicos 1961-1962 y 1962-1963, con una breve reanudación en 1964, cuando impartió las clases que iban a convertirse en las Lecciones de física de Feynman.

En esa época existía en el Caltech cierto consenso en que los estudiantes de primero y segundo curso se estaban sintiendo alejados, más que espoleados, por sus dos años de física obligatoria. Para remediar la situación, se le pidió a Feynman que planease una serie de lecciones para ser impartidas a los estudiantes a lo largo de dos años, primero a los novatos, y luego a estos mismos alumnos como estudiantes de segundo curso. Cuando él accedió, se decidió inmediatamente que las lecciones deberían ser transcritas para su publicación. Esa tarea resultó ser mucho más difícil de lo que cualquiera hubiera imaginado. Convertirlas en libros publicables requirió una enorme cantidad de trabajo por parte de sus colegas, así como del propio Feynman, quien hizo la edición final de cada capítulo.

Y había que abordar todas las cuestiones prácticas que implica impartir un curso. Esta tarea se vio enormemente complicada por el hecho de que Feynman tenía sólo una vaga idea de lo que quería cubrir. Esto significaba que nadie sabía lo que Feynman iba a decir hasta que se pusiese delante del aula llena de estudiantes y lo dijera. Los profesores del Caltech que le ayudaban se las arreglarían entonces lo mejor que pudieran para trotar los detalles más mundanos, tales como hacer problemas para trabajar en casa.

¿Por qué dedicó Feynman más de dos años a revolucionar la forma en que se enseñaba la física a los principiantes? Sólo podemos especular, pero probablemente había tres razones básicas. Una es que a él le gustaba tener una audiencia, y esto le proporcionó un auditorio mayor del que él solía tener en los cursos de graduados. La segunda era que él se preocupaba auténticamente por los estudiantes, y pensaba sencillamente que enseñar a los novatos era algo importante. La tercera, y quizá más importante, razón era el enorme desafío que suponía reformular la física, tal como él la entendía, de modo que pudiera presentarse a estudiantes jóvenes. Esta era su especialidad, y era el patrón por el que él medía si algo estaba realmente bien entendido. En cierta ocasión un miembro del claustro del Caltech pidió a Feynman que explicase por qué las partículas de espín un-medio obedecen a la estadística de Fermi-Dirac. Él calibró a su audiencia perfectamente y dijo: «Prepararé una lección sobre este tema para los novatos». Pero unos días más tarde regresó y dijo: «Sabéis, no pude hacerlo. No pude reducirlo al nivel de los novatos. Esto significa que realmente no lo entendemos».

Esta especialidad de reducir ideas profundas a términos sencillos y comprensibles es evidente a lo largo de las Lecciones de física de Feynman, pero en ninguna parte lo es más que en su tratamiento de la mecánica cuántica. Para los que conocen el campo, lo que él ha hecho es evidente. Ha presentado, para los estudiantes principiantes, el método de integrales de camino, la técnica que él mismo concibió y que le permitió resolver algunos de los problemas más profundos de la física. Su propio trabajo utilizando integrales de camino, entre otros logros, le llevó al premio Nobel de 1965 que compartió con Julian Schwinger y Sin-Itero Tomanaga.

A través del lejano velo de la memoria, muchos de los estudiantes y profesores que asistieron a las lecciones han dicho que el haber seguido dos años de física con Feynman fue la experiencia de toda una vida. Pero no es esta la impresión que entonces se tuvo. Muchos de los estudiantes temían la clase, y a medida que el curso avanzaba la asistencia por parte de los estudiantes matriculados empezó a descender de forma alarmante. Pero al mismo tiempo, cada vez más profesores y estudiantes

graduados empezaban a asistir. El aula seguía llena, y quizá Feynman nunca supo que él estaba perdiendo parte de su pretendida audiencia. Pero incluso en opinión de Feynman, su objetivo pedagógico no tuvo éxito. En el prefacio a las Lecciones de 1963, él escribió: «No creo que hiciera mucho por los estudiantes». Releyendo los libros, uno parece a veces ver a Feynman mirando por encima de su hombro, no a su audiencia joven, sino directamente a sus colegas, diciendo: «¡Miren eso! ¡Miren cómo aclaro esta cuestión! ¿No fue eso ingenioso?». Incluso cuando él pensaba que estaba explicando las cosas con lucidez a los novatos o estudiantes de segundo año, no eran realmente éstos quienes fueron capaces de beneficiarse de lo que él hacía. Eran sus colegas —científicos, físicos y profesores— quienes serían los principales beneficiarios de su soberbio logro, que fue nada menos que ver la física a través de la perspectiva fresca y dinámica de Richard Feynman.

Feynman fue más que un gran profesor. Su don consistía en que era un extraordinario maestro de maestros. Si el objetivo de impartir las Lecciones de física fue el de preparar un aula llena de estudiantes de licenciatura para resolver problemas de física en los exámenes, no puede decirse que hubiese tenido un gran éxito. Más aún, si se pretendía que los libros sirviesen como textos introductorios para instituto, no puede decirse que haya conseguido su objetivo. De todas formas, los libros han sido traducidos a diez idiomas y están disponibles en cuatro ediciones bilingües. El propio Feynman creía que su contribución más importante a la física no sería la QED, o la teoría del helio superfluido, o los polarones o los partones. Su contribución más importante sería los tres libros rojos de las Lecciones de física de Feynman. Esta creencia justifica por completo esta edición conmemorativa de estos celebrados libros.

David L. Goldstein

Gerry Neugebauer

Instituto Tecnológico de California

Abril de 1989

— • —

Prefacio de Feynman

De las Lecciones de Física

Estas son las lecciones de física que impartí durante los dos últimos años a los estudiantes de primero y segundo curso en el Caltech. Las lecciones no se han reproducido, por supuesto, de forma literal, sino que han sido revisadas, unas veces con gran extensión y otras con menos. Las lecciones constituyen sólo una parte del curso completo. Los 180 estudiantes del grupo se reunían en un aula grande dos veces por semana para asistir a estas lecciones y luego se dividían en grupos pequeños de 15 a 20 estudiantes en sesiones de repaso bajo la guía de un profesor ayudante. Además, había una sesión de laboratorio una vez a la semana.

Con estas lecciones tratábamos de resolver un problema especial: mantener el interés de los muy entusiastas y bastante inteligentes estudiantes que salían de los institutos de enseñanza media e ingresaban en el Caltech. Ellos habían oído muchas cosas sobre lo interesante y excitante que es la física: la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica y otras ideas modernas. Al terminar los dos años del curso anterior al nuestro, muchos parecían sentirse muy desanimados porque realmente se les habían presentado muy pocas ideas grandes, nuevas y modernas. Se les hacía estudiar planos inclinados, electrostática y cosas similares, y al cabo de dos años esto acababa por anquilosarles. El problema consistía en si podíamos o no hacer un curso que atrajese a los estudiantes más avanzados y con más interés, manteniendo su entusiasmo.

Las lecciones no pretendían en modo alguno dar un repaso completo a la física, pero son muy serias. Quise dirigirlas a los estudiantes más inteligentes de la clase y quería estar seguro, en la medida de lo posible, de que ni siquiera el estudiante más inteligente fuera capaz de absorber completamente todo lo que había en las lecciones, para lo que planteaba sugerencias de aplicaciones de las ideas y conceptos en varias

direcciones al margen de la línea de ataque principal. Por esta razón, no obstante, puse mucho interés en que todas las afirmaciones fueran lo más precisas posible, en señalar en cada caso dónde encajaban las ecuaciones y las ideas en el cuerpo de la física, y cómo —cuando ellos aprendieran más— se modificarían las cosas. También creía que para tales estudiantes es importante señalar qué es lo que ellos deberían —si fueran suficientemente inteligentes— ser capaces de comprender por deducción a partir de lo que se había dicho antes, y qué es lo que se estaba planteando como algo nuevo. Cuando intervinieran nuevas ideas, yo trataría o bien de deducirlas si eran deducibles, o de explicar que eran ideas nuevas que no se basaban en cosas ya aprendidas y que no se suponía que fueran demostrables, sino que eran simplemente un añadido más.

Al comenzar estas lecciones, yo suponía que los estudiantes tenían ciertos conocimientos cuando salían del instituto: óptica geométrica, ideas simples de química, y cosas de este tipo. Tampoco veía que hubiera ninguna razón para seguir las lecciones en un orden definido, en el sentido de que no se pudiera mencionar algo hasta que estuviera listo para discutirlo en detalle. Habría muchas cosas que mencionar, sin discusiones completas. Éstas vendrían más adelante, cuando la preparación hubiera llegado a un estadio más avanzado. Ejemplos de ello son las discusiones de la inductancia, y de los niveles energéticos, que inicialmente se exponen de forma muy cualitativa y más adelante se desarrollan con más extensión.

Al mismo tiempo que me estaba dirigiendo al estudiante más activo, también quería preocuparme del estudiante para quien los fuegos de artificio extra y las aplicaciones marginales son meramente intranquilizadores, y de quien no puede esperarse que aprenda la mayor parte del contenido de la lección. Para tal estudiante, yo quería que hubiese al menos un núcleo central o columna vertebral de material que él *pudiera* asimilar. Pretendía que no se pusiese nervioso aunque no entendiese todo el contenido de una lección. No esperaba que lo entendiese todo, sino los aspectos centrales y más directos. Se necesitaba, por supuesto, cierta inteligencia por su parte para ver cuáles son los teoremas y las ideas centrales, y cuáles son las cuestiones más avanzadas y las aplicaciones que sólo podría entender en años posteriores.

Había una seria dificultad para dar estas lecciones: tal como se impartía el curso, no había ninguna realimentación desde los estudiantes al profesor que indicase cómo se estaban asimilando las lecciones. Esta es realmente una dificultad muy seria, y yo no sé si las lecciones fueron realmente buenas. Todo era básicamente un experimento. Si lo volviera a hacer no lo haría de la misma forma; ¡espero *no* tener que hacerlo otra vez! Creo, sin embargo, que las cosas funcionaron —en lo que concierne a la física— de forma bastante satisfactoria en el primer año.

Del segundo año no quedé tan satisfecho. En la primera parte del curso, que trataba de la electricidad y del magnetismo, yo no fui capaz de encontrar ninguna manera realmente única o diferente de explicarlo, ninguna manera que fuese particularmente más excitante que la forma habitual de presentarlo. Así que yo no creo que hiciera mucho en las lecciones sobre electricidad y magnetismo. Para la parte final del segundo año, mi idea original consistía en seguir dando, tras la electricidad y el magnetismo, algunas lecciones más sobre las propiedades de los materiales, pero explicando fundamentalmente cosas como modos normales, soluciones de la ecuación de difusión, sistemas vibratorios, funciones ortogonales…, desarrollando así las primeras etapas de lo que normalmente se denominan «los métodos matemáticos de

la física». Visto en retrospectiva, creo que si lo hiciese otra vez volvería a la idea original. Pero puesto que no estaba previsto que volviese a dar estas lecciones, se sugirió que podría ser una buena idea tratar de dar una introducción a la mecánica cuántica, que ustedes encontrarán en el volumen III.

Está perfectamente claro que los estudiantes que van a graduarse en física pueden esperar hasta su tercer año para estudiar mecánica cuántica. Por otra parte, se adujo el argumento de que muchos de los estudiantes de nuestro curso estudiaban física como base para su interés primario en otros campos. Y la forma habitual de tratar la mecánica cuántica hace el tema casi inabordable para la gran mayoría de estudiantes porque necesitan mucho tiempo para aprenderlo. Sin embargo, en sus aplicaciones prácticas —especialmente en sus aplicaciones más complejas, tales como la ingeniería eléctrica y la química— no se utiliza realmente toda la herramienta del tratamiento mediante ecuaciones diferenciales. Por ello traté de describir los principios de la mecánica cuántica de una forma que no requiriese una formación previa en las matemáticas de las ecuaciones en derivadas parciales. Creo que el intento de presentar la mecánica cuántica de esta forma inversa es algo interesante incluso para un físico, por varias razones que se harán evidentes en las propias lecciones. Sin embargo, creo que el experimento en la parte de mecánica cuántica no tuvo un éxito completo, debido, en gran parte, a que yo no tuve realmente tiempo suficiente al final (por ejemplo, hubiera necesitado tres o cuatro lecciones más para tratar con más extensión temas tales como las bandas de energía y la dependencia espacial de las amplitudes). Además, nunca había presentado antes la materia de esta forma, de modo que la falta de realimentación fue particularmente grave. Ahora creo que la mecánica cuántica debería darse más tarde. Quizá tenga oportunidad de hacerlo de nuevo algún día. Entonces lo haré bien.

La razón de que no haya lecciones sobre cómo resolver problemas es que había sesiones de repaso. Aunque sí puse tres lecciones el primer año sobre resolución de problemas, éstas no están incluidas aquí. También hubo una lección sobre guía inercial que ciertamente debería ir tras la lección de sistemas rotatorios, pero, por desgracia, fue omitida. Las lecciones quinta y sexta se deben realmente a Matthew Sands, ya que yo estaba fuera de la ciudad.

La cuestión, por supuesto, es saber si el experimento tuvo éxito. Mi punto de vista —que, sin embargo, no parece ser compartido por la mayoría de las personas que trabajaron con los estudiantes— es pesimista. No creo que haya servido de mucho a los estudiantes. Cuando veo la forma en que la mayoría de ellos trataron los problemas en los exámenes, pienso que el sistema es un fracaso. Por supuesto, mis amigos me señalan que hubo una o dos docenas de estudiantes que —de forma muy sorprendente— comprendieron casi todo lo que había en las lecciones, y que se mostraron muy activos en su trabajo con el material y en su interés por los puntos principales de una forma entusiasta y animada. Estas personas tienen ahora, creo yo, unos fundamentos de primer orden en física, y son, después de todo, los únicos a los que yo estaba tratando de captar. Pero «el poder de la instrucción no suele ser muy eficaz excepto en los felices casos en que es casi superfluo» (Gibbon).

Además, yo no quería que ningún estudiante se quedase completamente rezagado, como quizá sucedió. Creo que una forma en la que podríamos ayudar más a los estudiantes sería dedicando un mayor esfuerzo al desarrollo de un conjunto de

problemas que aclaren algunas de las ideas contenidas en las lecciones. Los problemas dan una buena oportunidad para completar el contenido de las lecciones y hacer más realistas, más completas y más asentadas en la mente las ideas que se han expuesto.

Creo, no obstante, que la solución a este problema de la educación no es otra que darse cuenta de que la mejor enseñanza sólo puede hacerse cuando hay una relación individual directa entre un estudiante y un buen profesor: una situación en la que el estudiante discute las ideas, piensa sobre las cosas y habla sobre las cosas. Es imposible aprender mucho asistiendo simplemente a una lección, o incluso haciendo simplemente los problemas que se proponen. Pero en nuestros tiempos tenemos tantos estudiantes a los que enseñar que debemos encontrar algún sustituto para este ideal. Quizá mis lecciones puedan aportar alguna contribución. Quizá en algún pequeño lugar donde exista una relación más personal entre profesores y estudiantes, puedan sacar alguna inspiración o algunas ideas de las lecciones. Quizá se diviertan reflexionando sobre ellas, o desarrollando más algunas de ellas.

Richard P Feynman

Junio de 1963

— 1 —

Átomos en movimiento

Introducción

Este curso de física en dos años se presenta partiendo de la base de que usted, el lector, va a ser físico. Este no es necesariamente su caso, por supuesto, ¡pero es lo que suponen todos los profesores en todas las disciplinas! Si usted va a ser un físico, tendrá mucho que estudiar: doscientos años del campo de conocimiento con más rápido desarrollo que existe. Tanto conocimiento, de hecho, que usted quizá piense que no puede aprenderlo todo en cuatro años, y realmente no puede hacerlo; ¡tendrá que ir a cursos para graduados!

Resulta bastante sorprendente el hecho de que, a pesar de la tremenda cantidad de trabajo realizado durante todo este tiempo, es posible condensar en gran medida la enorme masa de resultados; es decir, encontrar leyes que resuman todo nuestro conocimiento. Incluso así, las leyes son tan difíciles de captar que no es justo que usted empiece a explorar esta enorme disciplina sin algún tipo de mapa o panorámica de la relación entre las diversas disciplinas científicas. De acuerdo con estos comentarios preliminares, los primeros tres capítulos esbozarán la relación de la física con el resto de las ciencias, las relaciones de las ciencias entre sí, y el significado de la ciencia, lo que nos servirá para hacernos una «idea» del tema.

Usted podría preguntarse por qué no podemos enseñar física exponiendo simplemente las leyes básicas en la página uno y mostrando luego cómo se aplican en todas las circunstancias posibles, tal como hacemos con la geometría euclidiana, donde establecemos los axiomas y luego hacemos todo tipo de deducciones. (¿De modo que, no contento con aprender física en cuatro años, quiere usted aprenderla en cuatro minutos?) No podemos hacerlo de esta forma por dos razones. La primera es que *no conocemos* aún todas las leyes básicas: la frontera entre el conocimiento y la ignorancia está en continua expansión. La segunda razón es que el enunciado correcto

de las leyes de la física implica algunas ideas no muy familiares cuya descripción requiere matemáticas avanzadas. Por lo tanto, es necesaria una considerable cantidad de entrenamiento preparatorio incluso para aprender lo que significan las *palabras*. No, no es posible hacerlo de ese modo. Sólo podemos hacerlo fragmento a fragmento.

Todo fragmento, o parte, de la totalidad de la naturaleza es siempre una mera *aproximación* a la verdad completa, o la verdad completa hasta donde la conocemos. De hecho, todo lo que sabemos es tan sólo algún tipo de aproximación porque *sabemos que todavía no conocemos todas las leyes*. Por lo tanto, las cosas deben ser aprendidas sólo para ser desaprendidas de nuevo o, lo que es más probable, para ser corregidas.

El principio de la ciencia, casi la definición, es el siguiente: *La prueba de todo conocimiento es el experimento*. El experimento es el único juez de la «verdad» científica. Pero ¿cuál es la fuente del conocimiento? ¿De dónde proceden las leyes que van a ser puestas a prueba? El experimento por sí mismo ayuda a producir dichas leyes, en el sentido de que nos da sugerencias. Pero también se necesita imaginación para crear grandes generalizaciones a partir de estas sugerencias: conjeturar las maravillosas, y simples, pero muy extrañas estructuras que hay debajo de todas ellas, y luego experimentar para poner a prueba una vez más si hemos hecho la conjetura correcta. Este proceso de imaginación es tan difícil que hay una división del trabajo en la física: están los físicos *teóricos*, quienes imaginan, deducen y conjeturan nuevas leyes pero no experimentan, y luego están los físicos *experimentales*, que experimentan, imaginan, deducen y conjeturan.

Decíamos que las leyes de la naturaleza son aproximadas: que primero encontramos las «erróneas», y luego encontramos las «correctas». Ahora bien, ¿cómo puede ser «erróneo» un experimento? En primer lugar, de un modo trivial: si algo está mal en el aparato que usted no advirtió. Pero estas cosas se pueden arreglar fácilmente, y comprobar una y otra vez. Así, sin reparar en estos detalles menores, ¿cómo *pueden* ser erróneos los resultados de un experimento? Sólo siendo imprecisos. Por ejemplo, la masa de un objeto nunca parece cambiar: una peonza en movimiento tiene el mismo peso que una peonza en reposo. De este modo se concibió una «ley»: la masa es constante, independiente de la velocidad. Ahora se ha encontrado que esta «ley» es incorrecta. Resulta que la masa aumenta con la velocidad, pero un aumento apreciable requiere velocidades próximas a la de la luz. Una ley *verdadera* es: si un objeto se mueve con una velocidad menor que 100 kilómetros por segundo, su masa es constante dentro de un margen de una parte en un millón. En esta forma aproximada, esta es una ley correcta. Uno podría pensar que la nueva ley no supone ninguna diferencia significativa en la práctica. Bien, sí y no. Para velocidades ordinarias podemos ciertamente olvidarla y utilizar la sencilla ley de la masa constante como una buena aproximación. Pero si las velocidades son altas cometeremos errores, y cuanto más alta es la velocidad, mayor será el error.

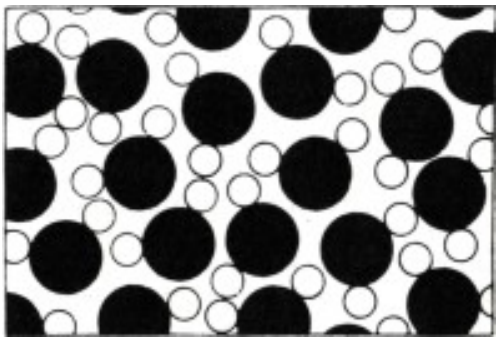
Finalmente, y lo que es más interesante, *filosóficamente estamos completamente equivocados* con la ley aproximada. Nuestra imagen entera del mundo tiene que ser modificada incluso si los cambios en las masas son muy pequeños. Esto es algo muy peculiar de la filosofía, o las ideas, que subyacen en las leyes. Incluso un efecto muy pequeño requiere a veces cambios profundos en nuestras ideas.

Ahora bien, ¿qué deberíamos enseñar primero? ¿Deberíamos enseñar la ley *correcta* pero poco familiar con sus extrañas y difíciles ideas conceptuales, por ejemplo la teoría de la relatividad, el espacio-tiempo tetradimensional y cosas similares? ¿O deberíamos enseñar primero la sencilla ley de la «masa constante», que es sólo aproximada pero no implica ideas tan difíciles? La primera es más excitante, más maravillosa y más divertida, pero la segunda es más fácil de captar al principio, y es un primer paso hacia una comprensión real de la segunda idea. Esta cuestión surge una y otra vez al enseñar física. En diferentes momentos tendremos que resolverla de diferentes formas, pero en cada etapa vale la pena aprender lo que ahora se conoce, cuán aproximado es, cómo encaja en todo lo demás, y cómo puede cambiar cuando aprendamos más cosas.

Sigamos ahora con la panorámica, o mapa general, de nuestra comprensión de la ciencia actual (en particular, la física, pero también otras ciencias en la periferia), de modo que cuando nos con centremos más tarde en algún punto concreto tendremos alguna idea del contexto general, de por qué este punto particular es interesante y cómo encaja en la gran estructura. Así que ¿cuál es nuestra imagen global del mundo?

La materia está hecha de átomos

Si, por algún cataclismo, todo el conocimiento quedara destruido y sólo una sentencia pasara a las siguientes generaciones de criaturas, ¿qué enunciado contendría la máxima información en menos palabras? Yo creo que es la *hipótesis atómica* (o el *hecho atómico*, o como quiera que ustedes deseen llamarlo) según la cual *todas las cosas están hechas de átomos: pequeñas partículas que se mueven en movimiento perpetuo, atrayéndose mutuamente cuando están a poca distancia, pero repeliéndose al ser apretadas unas contra otras*. Verán ustedes que en esa simple sentencia hay una enorme cantidad de información acerca del mundo, con tal de que se aplique un poco de imaginación y reflexión.



1.1 Agua ampliada mil millones de veces

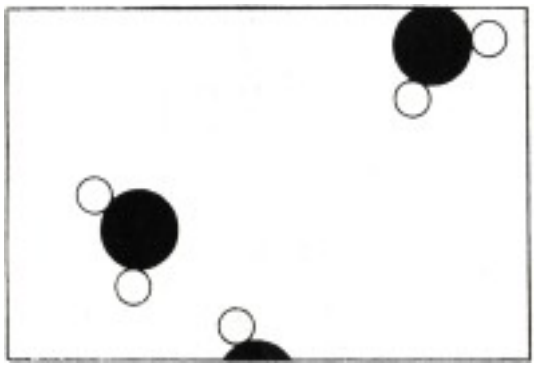
Para ilustrar la potencia de la idea atómica, supongamos que tenemos una gota de agua de 5 milímetros de diámetro. Si la miramos muy de cerca no vemos otra cosa que agua: agua uniforme y continua. Si la ampliamos con el mejor microscopio óptico disponible —aproximadamente dos mil veces— la gota de agua tendrá aproximadamente 10 metros de diámetro, el tamaño aproximado de una habitación

grande, y si ahora la miráramos desde muy cerca, *aún* veríamos agua relativamente uniforme, pero aquí y allí nadan de un lado a otro pequeñas cosas con forma de un balón de rugby. Muy interesante. Son paramecios. Quizá ustedes se queden en este punto y sientan tanta curiosidad por los paramecios con sus cilios cimbreantes y cuerpos contorsionados que ya no sigan más adelante, excepto quizá para ampliar aún más los paramecios y ver qué hay en su interior. Esto, por supuesto, es un tema para la biología, pero por el momento continuaremos y miraremos aún más de cerca al propio material acuoso, ampliándolo dos mil veces más. Ahora la gota de agua se extiende hasta 20 kilómetros de diámetro, y si la miramos muy de cerca vemos una especie de hormigueo, algo que ya no tiene una apariencia lisa; se parece a una multitud en un partido de futbol vista a gran distancia. Para ver qué es este hormigueo, lo ampliaremos otras doscientas cincuenta veces y veremos algo similar a lo que se muestra en la figura 1.1. Esta es una imagen del agua ampliada mil millones de veces, pero idealizada en varios sentidos. En primer lugar, las partículas están dibujadas de una forma muy simple con bordes definidos, lo que no es exacto. En segundo lugar, y por simplicidad, están esbozadas casi esquemáticamente en una formación bidimensional, pero por supuesto se mueven en tres dimensiones. Nótese que hay dos tipos de «manchas» o círculos que representan los átomos de oxígeno (negros) e hidrógeno (blancos), y que a cada oxígeno hay unidos dos hidrógenos. (Cada grupo pequeño de un oxígeno con sus dos hidrógenos se denomina una molécula.) La imagen aún está más idealizada por el hecho de que las partículas reales en la naturaleza están agitándose y rebotando continuamente, girando y moviéndose unas alrededor de las otras. Ustedes tendrán que imaginarse esto como una imagen dinámica más que estática. Otra cosa que no puede ilustrarse en un dibujo es el hecho de que las partículas están «adheridas»: que se atraen entre sí, ésta atraída por esa otra, etc. El grupo entero está «pegado», por así decir. Por otra parte, las partículas no se interpenetran. Si ustedes tratan de comprimir dos de ellas y juntarlas demasiado, ellas se repelen.

Los átomos tienen 1 o 2 x 10^{-8} cm de radio. Ahora bien, 10^{-8} cm se denomina un *ångström* (tan sólo otro nombre), de modo que decimos que tienen 1 o 2 *ångströms* (Å) de radio. Otra manera de recordar este tamaño es la siguiente: si se ampliara una manzana hasta el tamaño de la Tierra, entonces los átomos de la manzana tendrían aproximadamente el tamaño de la manzana original.

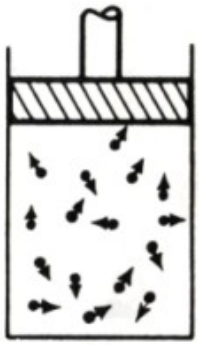
Imaginemos ahora esta gran gota de agua con todas estas partículas zigzagueantes adheridas y siguiéndose unas a otras. El agua mantiene su volumen; no se deshace, porque hay una atracción mutua entre las moléculas. Si la gota está en una pendiente, donde puede moverse de un lugar a otro, el agua fluirá, pero no desaparece simplemente —las cosas no se desvanecen— porque existe una atracción molecular. Este movimiento de agitación es lo que representamos como *calor*: cuando aumentamos la temperatura, aumentamos el movimiento. Si calentamos el agua, la agitación aumenta y aumenta el volumen entre los átomos, y si el calentamiento continúa llega un momento en que la atracción entre las moléculas no es suficiente para mantenerlas juntas y se *disgregan* separándose unas de otras. Por supuesto, así es como producimos vapor a partir del agua: aumentando la temperatura; las partículas se separan debido al incremento del movimiento.

En la figura 1.2 tenemos una imagen del vapor. Esta imagen del vapor falla en un aspecto: a la presión atmosférica ordinaria podría haber tan sólo unas pocas moléculas en toda una habitación, y difícilmente llegaría a haber tres en una figura como esta. La mayoría de los cuadrados de este tamaño no contendrían ninguna, pero nosotros tenemos accidentalmente dos y media o tres en la imagen (sólo para que no estuviera completamente vacía). Ahora bien, en el caso del vapor vemos las moléculas características de forma más clara que en el agua. Por simplicidad, las moléculas se han dibujado de modo que haya un ángulo de 120° entre los átomos de hidrógeno. En realidad el ángulo es de 105° 3', y la distancia entre el centro de un hidrógeno y el centro del oxígeno es de 0,957Å, de modo que conocemos muy bien esta molécula.



1.2 Vapor de agua

Veamos cuáles son algunas de las propiedades del vapor de agua o cualquier otro gas. Las moléculas, estando separadas unas de otras, rebotarán contra las paredes. Imaginemos una habitación con varias pelotas de tenis (un centenar más o menos) rebotando en movimiento perpetuo. Cuando bombardean la pared se produce un empuje sobre la misma. (Por supuesto, nosotros tendríamos que empujar la pared desde atrás para mantenerla fija.) Esto significa que el gas ejerce una fuerza agitatoria que nuestros torpes sentidos (al no estar nosotros mismos ampliados mil millones de veces) sienten sólo como un *empuje promedio*. Para confinar un gas debemos aplicar una presión.



1.3 Recipiente estándar para mantener gases

La figura 1.3 muestra un recipiente estándar para mantener gases (utilizado en todos los libros de texto), un cilindro provisto de un pistón. Ahora bien, no hay ninguna diferencia en cuáles sean las formas de las moléculas de agua, de modo que por

simplicidad las dibujaremos como pelotas de tenis o puntos pequeños. Estas cosas están en movimiento perpetuo en todas direcciones. Tantas están golpeando el pistón superior continuamente que para evitar que se salgan del tanque por este golpeteo tendremos que sujetar el pistón mediante una cierta fuerza que llamamos *presión* (en realidad, la fuerza es la presión multiplicada por el área). Evidentemente, la fuerza es proporcional al área, pues si aumentamos el área pero mantenemos constante el número de moléculas por centímetro cúbico, aumentamos el número de colisiones con el pistón en la misma proporción en que aumenta el área.

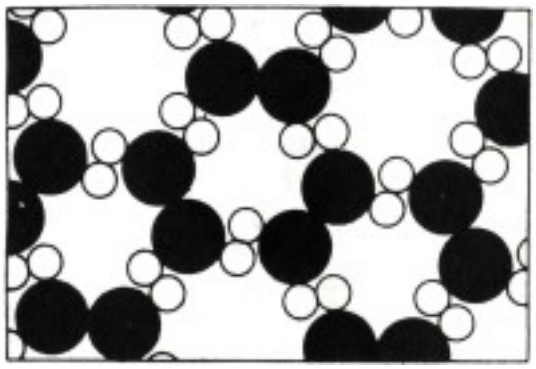
Pongamos ahora el doble de moléculas en este tanque, de modo que se duplique la densidad, y hagamos que tengan la misma velocidad, es decir, la misma temperatura. Entonces, en una buena aproximación, el número de colisiones se duplicará y, puesto que cada una de ellas será igual de «energética» que antes, la presión será proporcional a la densidad. Si consideramos la verdadera naturaleza de las fuerzas entre los átomos, cabría esperar una ligera disminución en la presión debida a la atracción entre los mismos, y un ligero incremento debido al volumen finito que ocupan. De todas formas, con una aproximación excelente, si la densidad es lo suficientemente baja para que no haya muchos átomos, la *presión es proporcional a la densidad*.

También podemos ver algo más: si aumentamos la temperatura sin cambiar la densidad del gas, o sea, si aumentamos la velocidad de los átomos, ¿qué sucederá con la presión? Bien, los átomos golpean con más fuerza porque se están moviendo con más rapidez, y además golpean con más frecuencia, de modo que la presión aumenta. Vean ustedes qué simples son las ideas de la teoría atómica.

Consideremos otra situación. Supongamos que el pistón se mueve hacia adentro, de modo que los átomos son lentamente comprimidos en un espacio menor. ¿Qué sucede cuando un átomo golpea contra el pistón en movimiento? Evidentemente gana velocidad en la colisión. Ustedes pueden intentarlo haciendo rebotar una pelota de ping-pong en una pala que se mueve hacia ella, por ejemplo, y encontrarán que sale rebotada con más velocidad con la que chocó. (Ejemplo especial: si resulta que un átomo está en reposo y el pistón le golpea, el átomo ciertamente se moverá.) Así pues, los átomos están «más calientes» cuando vuelven del pistón que antes de que chocasen en él. Por consiguiente, todos los átomos que están en el recipiente habrán ganado velocidad. Esto significa que *cuando comprimimos lentamente un gas, la temperatura del gas aumenta*. De este modo, en una *compresión* lenta, un gas *aumentará* su temperatura, y en una *expansión* lenta *disminuirá* su temperatura.

Volvamos ahora a nuestra gota de agua y consideremos otro aspecto. Supongamos que disminuimos la temperatura de nuestra gota de agua. Supongamos que la agitación de las moléculas de los átomos del agua está decreciendo continuamente. Sabemos que existen fuerzas atractivas entre los átomos, de modo que al cabo de algún tiempo ya no serán capaces de agitarse tanto. Lo que sucederá a temperaturas muy bajas está indicado en la figura 1.4: las moléculas se quedarán bloqueadas en una nueva estructura, el *hielo*. Este diagrama esquemático concreto del hielo no es muy bueno porque está en dos dimensiones, pero es cualitativamente correcto. El punto interesante es que en el material hay un l*ugar definido para cada átomo*, y ustedes pueden apreciar fácilmente que si de un modo u otro mantuviéramos todos los átomos de un extremo de la gota en una cierta disposición,

cada uno de ellos en un determinado lugar, entonces, debido a la estructura de las interconexiones, que es rígida, el otro extremo a kilómetros de distancia (en nuestra escala ampliada) tendría una posición definida. Así, si agarramos una aguja de hielo por un extremo, el otro extremo aguanta nuestra fuerza, a diferencia del caso del agua en el que la estructura se desmorona debido a la agitación creciente que hace que todos los átomos se muevan de formas diferentes. La diferencia entre sólidos y líquidos consiste entonces en que en un sólido los átomos están dispuestos en algún tipo de formación, llamada una *red cristalina*, y no tienen una posición aleatoria a grandes distancias; la posición de los átomos en un extremo del cristal está determinada por la de otros a millones de átomos de distancia al otro extremo del cristal. La figura 1.4 es una disposición imaginaria para el hielo pero, aunque contiene muchas de las características correctas del hielo, no es la disposición verdadera. Una de las características correctas es que hay una parte de la simetría que es hexagonal. Ustedes pueden ver que, si giramos la figura 120° alrededor de un eje, la imagen vuelve a ser la misma. Así pues, hay una *simetría* en el hielo que explica por qué los copos de nieve aparecen con seis lados. Otra cosa que podemos ver de la figura 1.4 es por qué el hielo se contrae cuando se funde. La estructura cristalina concreta del hielo mostrada aquí tiene muchos «agujeros» en su interior, como los tiene la verdadera estructura del hielo. Cuando la organización se desmorona, estos agujeros pueden ser ocupados por moléculas. La mayoría de las sustancias simples, con la excepción del agua y algún metal, se *expanden* al fundirse, porque los átomos están empaquetados más estrechamente en el sólido cristalino y al fundirse necesitan más sitio para agitarse; pero una estructura abierta colapsa, como es el caso del agua.



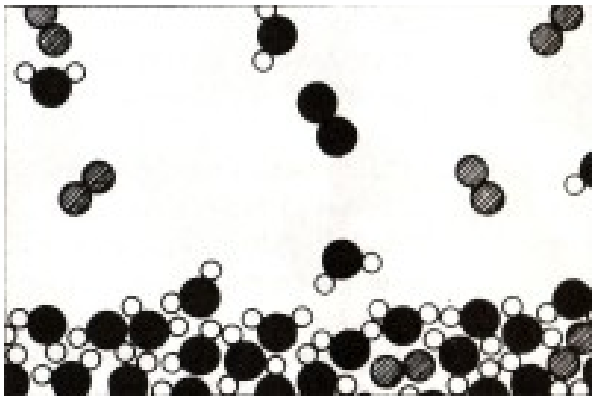
1.4 Hielo

Ahora bien, aunque el hielo tiene una forma cristalina «rígida», su temperatura puede cambiar: el hielo tiene calor. Si queremos, podemos cambiar la cantidad de calor. ¿Qué es el calor en el caso del hielo? Los átomos no están en reposo. Están agitándose y vibrando. Así pues, incluso si hay un orden definido en el cristal —una estructura definida—, todos los átomos están vibrando «en su sitio». A medida que aumentamos la temperatura, vibran con una amplitud cada vez mayor, hasta que se salen de su sitio. Llamamos a esto *fusión*. A medida que disminuimos la temperatura, la vibración disminuye cada vez más hasta que, en el cero absoluto, se reduce a una cantidad mínima de vibración que pueden tener los átomos, aunque *no nula*. Esta cantidad de movimiento mínima que pueden tener los átomos no es suficiente para fundir una sustancia, con una excepción: el helio. El helio simplemente reduce los

movimientos atómicos tanto como puede, pero incluso en el cero absoluto hay todavía movimiento suficiente para evitar la congelación. El helio no se congela ni siquiera en el cero absoluto, a menos que la presión sea tan grande como para hacer que los átomos se aplasten unos contra otros. Si aumentamos la presión, podemos hacer que se solidifique.

Procesos atómicos

Hasta aquí la descripción de sólidos, líquidos y gases desde el punto de vista atómico. Sin embargo, la hipótesis atómica describe también procesos, y por ello vamos a ver ahora algunos *procesos* desde un punto de vista atómico.



1.5 Agua evaporándose en el aire (•=Oxígeno, o=Hidrógeno, ø=Nitrógeno)

El primer proceso que consideraremos está asociado a la superficie del agua. ¿Qué sucede en la superficie del agua? Haremos ahora la imagen más complicada —y más realista— suponiendo que la superficie está al aire. La figura 1.5 muestra la superficie del agua al aire. Vemos las moléculas de agua como antes, formando un bloque de agua líquida, pero ahora vemos también la superficie del agua. Por encima de la superficie encontramos varias cosas: ante todo hay moléculas de agua, como en el vapor. Esto es *vapor de agua*, que siempre se encuentra por encima del agua líquida. (Hay un equilibrio entre el vapor de agua y el agua que describiremos más adelante.) Además encontramos otras moléculas: aquí dos átomos de oxígeno adheridos, formando una *molécula de oxígeno*, allí dos átomos de nitrógeno también adheridos para formar una molécula de nitrógeno. El aire consiste casi por completo en nitrógeno, oxígeno, algo de vapor de agua y cantidades menores de dióxido de carbono, argón y otras cosas. Así que por encima de la superficie del agua está el aire, un gas, que contiene algo de vapor de agua. Ahora bien, ¿qué está sucediendo en esta imagen? Las moléculas en el agua están en continua agitación. De cuando en cuando, una molécula en la superficie es golpeada con una fuerza algo mayor de lo normal, y es expulsada. Es difícil ver esto en la imagen porque es una imagen *estática*. Pero podemos imaginar que una molécula próxima a la superficie acaba de ser golpeada y se está desprendiendo, y quizá otra ha sido golpeada y se separa. Así, molécula a molécula, el agua desaparece: se evapora. Pero si cerramos el recipiente por arriba, al cabo de algún tiempo encontraremos un gran número de moléculas de agua entre las

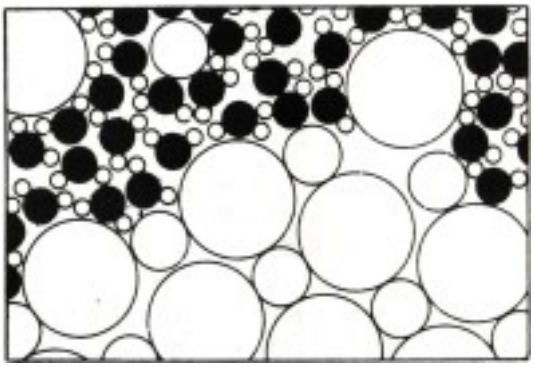
moléculas del aire. De cuando en cuando, una de estas moléculas de vapor llega hasta el agua y se queda adherida de nuevo. De este modo vemos que lo que parecía algo poco interesante y muerto —un vaso de agua con una tapa, que ha estado allí durante quizá veinte años— realmente contiene un fenómeno dinámico e interesante que prosigue continuamente. A nuestros ojos, nuestros torpes ojos, nada está cambiando, pero si pudiésemos verlo ampliado mil millones de veces veríamos que desde este punto de vista está cambiando continuamente: hay moléculas que están dejando la superficie y moléculas que regresan a ella.

¿Por qué *nosotros* no vemos *ningún cambio*? ¡Porque están abandonando la superficie exactamente tantas moléculas como están volviendo a ella! A la larga «nada sucede». Si ahora quitamos la tapa del recipiente y soplamos para apartar el aire húmedo, reemplazándolo con aire seco, entonces el número de moléculas que abandonan la superficie es exactamente el mismo que antes, porque este número depende de la agitación del agua, pero el número de moléculas que regresan se reduce mucho debido a que hay muchas menos moléculas de agua por encima de la superficie del agua líquida. Por consiguiente, hay más moléculas saliendo que entrando, y el agua se evapora. De modo que si ustedes quieren evaporar agua ¡pongan en marcha el ventilador!

Aquí hay algo más: ¿qué moléculas se van? Cuando una molécula se va es debido a una acumulación accidental de energía algo mayor de la habitual, que es lo que se necesita para liberarla de las atracciones de sus vecinas. Así pues, puesto que las moléculas que se van tienen más energía que la media, las moléculas que quedan tienen en promedio un movimiento *menor* que el que tenían antes. De modo que el líquido se *enfría* poco a poco cuando se evapora. Por supuesto, si una molécula de vapor llega desde el aire hasta el agua que está por debajo, aparece de repente una gran atracción cuando la molécula se aproxima a la superficie. Esto acelera la partícula incidente y da lugar a una generación de calor. Así, cuando las moléculas dejan la superficie roban calor; cuando regresan generan calor. Por supuesto, cuando no hay evaporación neta el resultado es nulo: el agua no cambia de temperatura. Si soplamos en el agua para mantener una preponderancia continua en el número de moléculas que se evaporan, entonces el agua se enfría. Por lo tanto, ¡hay que soplar en la sopa para enfriarla!

Ustedes comprenderán, por supuesto, que los procesos que acabamos de describir son más complicados de lo que hemos indicado. No sólo el agua penetra en el aire, sino que también, de cuando en cuando, una de las moléculas de oxígeno o nitrógeno penetrará y se «perderá» entre la masa de las moléculas de agua, y seguirá su camino dentro del agua. Así, el aire se disuelve en el agua; las moléculas de oxígeno y nitrógeno seguirán su camino dentro del agua y el agua contendrá aire. Si repentinamente extraemos el aire del recipiente, entonces las moléculas de aire dejarán el agua con más rapidez de la que entran en ella, y al hacerlo así formarán burbujas. Esto es muy malo para los buceadores, como ustedes quizá ya sepan.

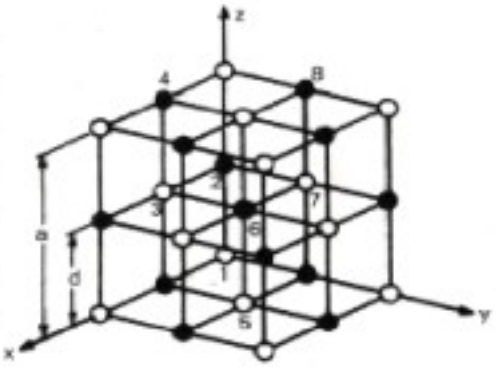
Vayamos ahora a otro proceso. En la figura 1.6 vemos, desde un punto de vista atómico, un sólido que se disuelve en agua. Si colocamos un cristal de sal en el agua, ¿qué sucederá? La sal es un sólido, un cristal, una disposición ordenada de «átomos de sal».



1.6 Sal disolviéndose en agua (O=Cloro o=Sodio)

La figura 1.7 es una ilustración de la estructura tridimensional de la sal común, el cloruro sódico. Estrictamente hablando, el cristal no está compuesto de átomos, sino de lo que denominamos *iones*. Un ión es un átomo que o bien tiene algunos electrones de más o bien ha perdido algunos electrones. En un cristal de sal encontramos iones de cloro (átomos de cloro con un electrón extra) e iones de sodio (átomos de sodio a los que les falta un electrón). Todos los iones se adhieren por atracción eléctrica en la sal sólida, pero cuando los colocamos en el agua encontramos que, debido a las atracciones del oxígeno negativo y el hidrógeno positivo hacia los iones, algunos de los iones se agitan más libremente.

Cristal	•	o	a(Å)
Sal común	Na	Cl	5,64
Silvina	K	Cl	6,28
	Ag	Cl	5,54
	Mg	O	4,20
Galena	Pb	S	5,97
	Pb	Se	6,14
	Pb	Te	6,34



1.7 Distancia entre primeros vecinos d = a/2

En la figura 1.6 vemos un ión de cloro que se libera y otros átomos que flotan en el agua en forma de iones. Esta imagen se ha hecho con cierto cuidado. Nótese, por ejemplo, que los terminales de hidrógeno de las moléculas de agua suelen estar más cerca del ión cloro, mientras que cerca del ión sodio es mucho más probable encontrar el terminal de oxígeno, porque el sodio es positivo y el terminal de oxígeno del agua es negativo, y ambos se atraen eléctricamente. ¿Podemos decir a partir de esta imagen si la sal se está *disolviendo en el agua* o está *cristalizando a partir del agua*? Por supuesto que *no podemos decirlo*, porque mientras que algunos de los átomos están dejando el cristal, otros átomos se están volviendo a unir a él. Se trata de un proceso dinámico, igual que en el caso de la evaporación, y depende de si hay más o menos sal en el agua que la cantidad necesaria para el equilibrio. Por equilibrio entendemos esa situación en la que el ritmo al que los átomos están dejando el cristal ajusta exactamente con el

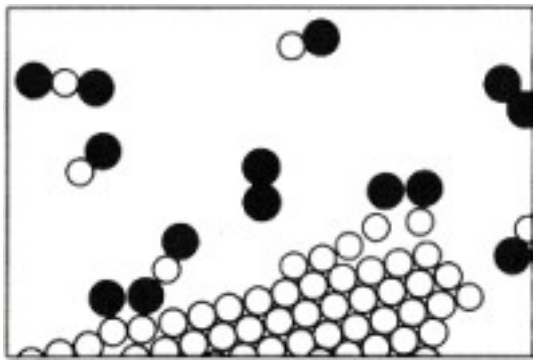
ritmo al que están volviendo a él. Si no hubiese apenas sal en el agua, habría más átomos que lo dejan que átomos que regresan a él, y la sal se disolvería. Si, por el contrario, hubiera demasiados «átomos de sal», regresarían más de los que se van, y la sal estaría cristalizando.

Mencionemos de paso que el concepto de una *molécula* de una sustancia es sólo aproximado y existe solamente para cierta clase de sustancias. Es evidente en el caso del agua que los tres átomos están realmente adheridos. No es tan claro en el caso del cloruro sódico en el sólido. Hay tan sólo una disposición de iones sodio y cloro en una estructura cúbica. No hay manera natural de agruparlos como «moléculas de sal».

Volviendo a nuestra discusión de la solución y la precipitación, si aumentamos la temperatura de la solución salina se incrementa el ritmo al que los átomos se van, y también lo hace el ritmo al que los átomos vuelven. Resulta muy difícil, en general, predecir qué es lo que va a pasar, si se va a disolver más o menos sólido. La mayoría de las sustancias se disuelven más, pero algunas sustancias se disuelven menos a medida que la temperatura aumenta.

Reacciones químicas

En todos los procesos que se han descrito hasta ahora, los átomos y los iones no han cambiado de compañeros, pero por supuesto hay circunstancias en las que los átomos cambian sus combinaciones para formar nuevas moléculas. Esto se ilustra en la figura 1.8. Un proceso en el que tiene lugar una recombinación de los compañeros atómicos es lo que denominamos una *reacción química*.



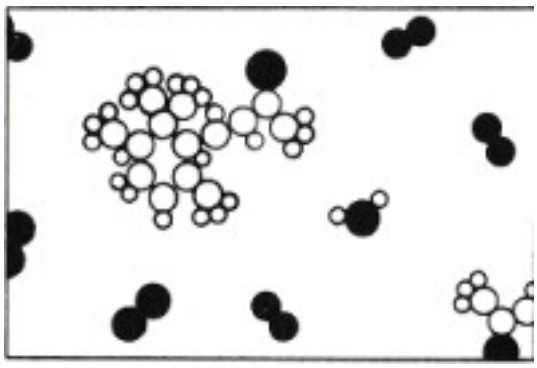
1.8 Carbono quemándose en oxígeno

Los otros procesos descritos hasta ahora se denominan procesos físicos, pero no hay una distinción tajante entre ambos tipos de procesos. (La naturaleza no se preocupa de cómo lo llamemos, simplemente sigue trabajando.) Se supone que esta figura representa carbono quemándose en oxígeno. En el caso del oxígeno, *dos* átomos de oxígeno están adheridos muy fuertemente. (¿Por qué no se adhieren *tres* o incluso *cuatro* átomos? Esta es una de las características muy peculiares de tales procesos atómicos. Los átomos son muy especiales: les gustan ciertos compañeros concretos, ciertas direcciones concretas, y así sucesivamente. La tarea de la física consiste en

analizar por qué cada uno de ellos quiere lo que quiere. En cualquier caso, dos átomos de oxígeno forman, saturados y felices, una molécula.)

Se supone que los átomos de carbono están en un cristal sólido (que podría ser grafito o diamante). Ahora, por ejemplo, una de las moléculas de oxígeno puede llegar al carbono, y cada uno de sus átomos puede recoger un átomo de carbono y salir en una nueva combinación —«carbono-oxígeno»—, que es una molécula de un gas denominado monóxido de carbono. Se le da el nombre químico CO. Es muy simple: las letras «CO» son prácticamente una imagen de dicha molécula. Pero el carbono atrae al oxígeno con mucha más fuerza que el oxígeno atrae al oxígeno o que el carbono atrae al carbono. Por lo tanto, en este proceso el oxígeno puede llegar con sólo una pequeña energía, pero el oxígeno y el carbono saldrán juntos con una enorme violencia y conmoción, y cualquier cosa que haya cerca de ellos recogerá la energía. Entonces se genera una gran cantidad de energía de movimiento, energía cinética. Esto, por supuesto, es la *combustión*; estamos obteniendo *calor* a partir de la combinación de oxígeno y carbono. El calor está ordinariamente en forma de movimiento molecular del gas caliente, pero en ciertas circunstancias puede ser tan enorme que genere *luz*. Así es cómo se obtienen las llamas.

Además, el monóxido de carbono no está totalmente satisfecho. Es posible que se una a otro oxígeno, de modo que podríamos tener una reacción mucho más complicada en la que el oxígeno se está combinando con el carbono y al mismo tiempo tiene lugar una colisión con una molécula de monóxido de carbono. Un átomo de oxígeno podría unirse al CO y formar finalmente una molécula, compuesta de un carbono y dos oxígenos, que se designa CO_2 y se denomina dióxido de carbono. Si quemamos el carbono con muy poco oxígeno en una reacción muy rápida (por ejemplo, en un motor de automóvil, donde la explosión es tan rápida que no hay tiempo para hacer dióxido de carbono), se forma una gran cantidad de monóxido de carbono. En muchas de tales recombinaciones se libera una cantidad muy grande de energía, que produce explosiones, llamas, etc., dependiendo de las reacciones. Los químicos han estudiado estas ordenaciones de los átomos y han encontrado que toda sustancia es algún tipo de *disposición de átomos*.

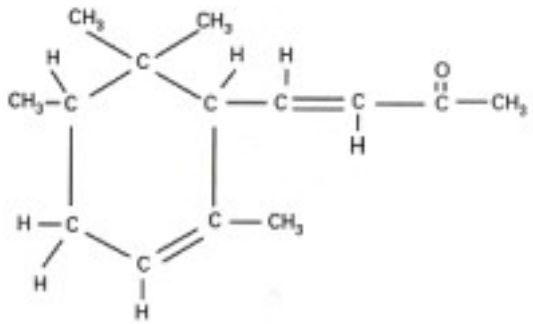


1.9 Aroma de violetas

Para ilustrar esta idea, consideremos otro ejemplo. Si entramos en un campo de pequeñas violetas, enseguida sabemos qué es «ese olor». Es algún tipo de molécula, o disposición de átomos, que se ha abierto camino hasta el interior de nuestras fosas

nasales. Antes de nada, ¿cómo se abrió camino? Eso es bastante fácil. Si el olor es algún tipo de molécula en el aire, agitándose y siendo golpeada desde todas direcciones, podría haber llegado *accidentalmente* al interior de la nariz. Ciertamente no tiene ningún deseo particular de entrar en nuestra nariz. Es simplemente una indefensa parte de una multitud zigzagueante de moléculas, y en su errar sin rumbo esta porción concreta de materia acaba encontrándose en nuestra nariz.

Ahora los químicos pueden tomar moléculas especiales como las del aroma de las violetas y analizarlas y decirnos la *disposición exacta* de los átomos en el espacio. Sabemos que la molécula de dióxido de carbono es recta y simétrica: O–C–O. (Esto también puede determinarse fácilmente con métodos físicos.) Sin embargo, incluso para las enormemente más complicadas disposiciones de átomos que hay en la química es posible, mediante un largo y notable proceso de trabajo detectivesco, encontrar las disposiciones de los átomos. La figura 1.9 es una imagen del aire cerca de una violeta; de nuevo encontramos nitrógeno y oxígeno en el aire, y vapor de agua. (¿Por qué hay vapor de agua? Porque la violeta está *húmeda*. Todas las plantas transpiran.) Sin embargo, vemos también en la figura 1.10 un «monstruo» compuesto de átomos de carbono, átomos de hidrógeno y átomos de oxígeno, que han elegido una cierta estructura concreta en la que disponerse. Es una disposición mucho más complicada que la del dióxido de carbono; de hecho, es una disposición enormemente complicada. Por desgracia, no podemos representar todo lo que de verdad se conoce sobre ella químicamente, porque la disposición precisa de todos los átomos se conoce realmente en tres dimensiones, mientras que nuestra imagen es sólo bidimensional. Los seis carbonos que forman un anillo no forman un anillo plano, sino un tipo de anillo «arrugado». Se conocen todos los ángulos y las distancias. Así pues, una *fórmula* química es simplemente una imagen de semejante molécula. Cuando el químico escribe una cosa semejante en la pizarra está tratando de «dibujar», hablando *grosso modo*, en dos dimensiones. Por ejemplo, vemos un «anillo» de seis carbonos, y una «cadena» de carbonos que cuelga en un extremo, con un oxígeno en el segundo lugar a partir del extremo, tres hidrógenos unidos al carbono, dos carbonos y tres hidrógenos adheridos aquí, etc.



1.10 La sustancia representada es α-irona.

¿Cómo descubre el químico cuál es la disposición? Él mezcla botellas llenas de algún material, y si éste se vuelve rojo, significa que consiste en un hidrógeno y dos carbonos unidos aquí; si se vuelve azul, por el contrario, no es esa la forma ni mucho menos. Esta es una de las más fantásticas piezas de trabajo detectivesco que se han hecho nunca: la química orgánica. Para descubrir la disposición de los átomos en estas

formaciones enormemente complicadas, el químico observa qué sucede cuando mezcla dos sustancias diferentes. El físico nunca se acababa de creer que el químico supiera de lo que estaba hablando cuando describía la disposición de los átomos. Desde hace aproximadamente veinte años ha sido posible, en algunos casos, examinar moléculas semejantes (no tan complicadas como estas, pero sí algunas que contienen partes de ella) por un método físico, y ha sido posible localizar cada átomo, no observando colores, sino *midiendo dónde están*. Y ¡como por arte de magia!, los químicos tienen casi siempre razón.

Resulta, de hecho, que en las violetas hay tres moléculas ligeramente distintas, que difieren sólo en la disposición de los átomos de hidrógeno.

Un problema de la química consiste en dar nombre a una sustancia, de tal modo que sepamos qué es. ¡Encontrar un nombre para esta forma! El nombre no sólo debe decir la forma, sino que también debe decir que aquí hay un átomo de oxígeno, ahí hay un hidrógeno: exactamente qué es y dónde está cada átomo. Es fácil comprender entonces que los nombres químicos deban ser complejos para poder ser completos. Vean ustedes que el nombre de esta cosa en la forma más completa que les revele su estructura es 4–(2,2,3,6 tetrametil–5–ciclohexanil)–3–buten–2–uno, y eso les dice que esta es la disposición. Podemos darnos cuenta de las dificultades que tienen los químicos, y darnos cuenta también de la razón de nombres tan largos. ¡No es que ellos quieran ser oscuros, sino que se enfrentan a un problema extremadamente difícil al tratar de describir las moléculas con palabras!

¿Cómo *sabemos* que existen los átomos? Por uno de los trucos antes mencionados: hacemos la *hipótesis* de que existen átomos, y los resultados se siguen uno tras otro de la forma que predecimos, como debería ser si las cosas están hechas de átomos. Existe también una evidencia algo más directa, un buen ejemplo de la cual es el siguiente: los átomos son tan pequeños que ustedes no pueden verlos con un microscopio óptico; de hecho, ni siquiera con un microscopio *electrónico*. (Con un microscopio óptico ustedes sólo pueden ver cosas que son mucho más grandes.) Ahora bien, si los átomos están siempre en movimiento, digamos en agua, y ponemos una bola grande de algo en el agua, una bola mucho más grande que los átomos, la bola se agitará de un lado a otro, de forma muy parecida a un juego en donde un balón muy grande es empujado en todas direcciones por muchas personas. Las personas están empujando en diferentes direcciones, y el balón se mueve en el campo de una forma irregular. De la misma forma, la «gran bola» se moverá debido a las desigualdades de las colisiones en un lado y en otro, y de un instante al siguiente. Así, si miramos partículas muy pequeñas (coloides) en el agua a través de un microscopio excelente, vemos una agitación perpetua de las partículas que es el resultado del bombardeo de los átomos. Esto se denomina *movimiento browniano*.

Tenemos evidencia adicional de los átomos en la estructura de los cristales. En muchos casos las estructuras deducidas por análisis de rayos X coinciden en sus «formas» espaciales con las formas que realmente muestran los cristales tal como se dan en la naturaleza. Los ángulos entre las diversas «caras» de un cristal coinciden, dentro de un margen de segundos de arco, con los ángulos deducidos de la hipótesis de que un cristal está hecho de muchas «capas» de átomos.

Todo está hecho de átomos. Esta es la hipótesis clave. La hipótesis más importante de toda la biología, por ejemplo, es que *todo lo que hacen los animales lo hacen los átomos*. En otras palabras, *no hay nada que hagan los seres vivos que no pueda ser comprendido desde el punto de vista de que están hechos de átomos que actúan de acuerdo con las leyes de la física*. Esto no era conocido desde el principio: se necesitó alguna experimentación y teorización para sugerir esta hipótesis, pero ahora se acepta, y es la teoría más útil para producir nuevas ideas en el campo de la biología.

Si un pedazo de acero o de sal, que consiste en átomos colocados uno detrás de otro, puede tener propiedades tan interesantes; si el agua —que no es otra cosa que estos pequeños borrones, un kilómetro tras otro de la misma cosa sobre la tierra— puede formar olas y espuma y hacer ruidos estruendosos y figuras extrañas cuando corre sobre el cemento; si todo esto, toda la vida de una corriente de agua, no es otra cosa que un montón de átomos, ¿*cuánto más es posible*? Si en lugar de disponer los átomos siguiendo una pauta definida, repetida una y otra vez, aquí y allí, o incluso formando pequeños fragmentos de complejidad como los que dan lugar al olor de las violetas, construimos una disposición que es *siempre diferente* de un lugar a otro, con diferentes tipos de átomos dispuestos de muchas formas, con cambios continuos y sin repetirse, ¿cuánto más maravilloso podrá ser el comportamiento de este objeto? ¿Es posible que este «objeto» que se pasea de un lado a otro delante de ustedes, hablándoles a ustedes, sea un gran montón de estos átomos en una disposición muy compleja, tal que su enorme complejidad sorprenda a la imaginación con lo que puede hacer? Cuando decimos que somos un montón de átomos no queremos decir que somos *meramente* un montón de átomos, porque un montón de átomos que no se repiten de un lugar a otro muy bien podría tener las posibilidades que ustedes ven ante sí en el espejo.

— 2 —

Física básica

Introducción

En este capítulo examinaremos las ideas más fundamentales que tenemos acerca de la física: la naturaleza de las cosas tal como las vemos actualmente. No discutiremos la historia de cómo sabemos que todas estas ideas son verdaderas; ustedes aprenderán estos detalles a su debido tiempo.

Las cosas que nos interesan en ciencia aparecen en múltiples formas y con muchos atributos. Por ejemplo, si estamos de pie en la costa y miramos el mar, vemos el agua, las olas que rompen, la espuma, el movimiento del agua, el sonido, el aire, los vientos y las nubes, el sol y el cielo azul, y la luz; hay arena y hay rocas de diversa dureza y permanencia, color y textura. Hay animales y algas, hambre y enfermedad, y el observador en la playa; incluso puede haber felicidad y pensamiento. Cualquier otro punto en la naturaleza presenta una variedad similar de cosas e influencias. Siempre hay la misma complejidad, independientemente de dónde esté. La curiosidad exige que planteemos preguntas, que tratemos de unir las cosas y de comprender esta multitud de aspectos como resultantes tal vez de la acción de un número relativamente pequeño de cosas y fuerzas elementales que actúan en una infinita variedad de combinaciones.

Por ejemplo: ¿es la arena distinta de las rocas? Es decir, ¿es la arena algo más que un gran número de piedras minúsculas? ¿Es la Luna una gran roca? Si entendiéramos las rocas, ¿entenderíamos también la arena y la Luna? ¿Es el viento un chapoteo del aire análogo al movimiento confuso y ruidoso del agua en el mar? ¿Qué características comunes hay en movimientos diferentes? ¿Qué es común a los diferentes tipos de sonidos? ¿Cuántos colores diferentes existen? Y así sucesivamente. De esta forma tratamos de analizar poco a poco todas las cosas, unir cosas que a primera vista

parecen diferentes, con la esperanza de que podamos ser capaces de *reducir* el número de cosas *diferentes* y, por consiguiente, comprenderlas mejor.

Hace algunos cientos de años se concibió un método para encontrar respuestas parciales a tales preguntas. *Observación, razonamiento y experimento* constituyen lo que llamamos el *método científico.* Tendremos que limitarnos a una descripción desnuda de nuestra visión esencial de lo que a veces se denomina *física fundamental,* o las ideas fundamentales que han surgido de la aplicación del método científico.

¿Qué entendemos por «comprender» algo? Imaginemos que esta serie complicada de objetos en movimiento que constituyen «el mundo» es algo parecido a una gran partida de ajedrez jugada por los dioses, y que nosotros somos observadores del juego. Nosotros no sabemos cuáles son las reglas del juego; todo lo que se nos permite hacer es *observar* las jugadas. Por supuesto, si observamos durante el tiempo suficiente podríamos llegar a captar finalmente algunas de las reglas. *Las reglas del juego* son lo que entendemos por *física fundamental.* No obstante, quizá ni siquiera conociendo todas las reglas seríamos capaces de entender por qué se ha hecho un movimiento particular en el juego, por la sencilla razón de que es demasiado complicado y nuestras mentes son limitadas. Si ustedes juegan al ajedrez sabrán que es fácil aprender todas las reglas y, pese a todo, es a menudo muy difícil seleccionar el mejor movimiento o entender por qué un jugador ha hecho la jugada que ha hecho. Así sucede en la naturaleza, sólo que mucho más; pero al menos podemos ser capaces de encontrar todas las reglas. Realmente no tenemos ahora todas las reglas. (De tanto en tanto sucede algo, como un enroque; que aún no entendemos.) Aparte de no conocer todas las reglas, lo que realmente podemos explicar en términos de dichas reglas es muy limitado, porque casi todas las situaciones son tan enormemente complicadas que no podemos seguir las jugadas utilizando las reglas, y mucho menos decir lo que va a suceder a continuación. Debemos, por lo tanto, limitarnos a la cuestión más básica de las reglas del juego. Si conocemos las reglas, consideramos que «entendemos» el mundo.

¿Cómo podemos decir que las reglas del juego que «conjeturamos» son realmente correctas si no podemos analizar muy bien el juego? Hablando en términos generales, hay tres maneras de hacerlo. Primero, puede haber situaciones donde la naturaleza se las ha arreglado, o nosotros hemos arreglado a la naturaleza, para ser simple y tener tan pocas partes que podamos predecir exactamente lo que va a suceder, y en consecuencia podamos comprobar cómo trabajan nuestras reglas. (En una esquina del tablero puede haber sólo algunas piezas de ajedrez en acción, y eso lo podemos entender exactamente.)

Una buena segunda manera de comprobar las reglas es hacerlo a partir de reglas menos específicas derivadas de las primeras. Por ejemplo, la regla del movimiento de un alfil en un tablero de ajedrez consiste en que se mueve sólo en diagonal. Uno puede deducir, independientemente de cuántos movimientos puedan hacerse, que un alfil determinado estará siempre en una casilla blanca. De este modo, aun sin ser capaces de seguir todos los detalles, siempre podemos comprobar nuestra idea sobre el movimiento del alfil mirando si está siempre en una casilla blanca. Por supuesto, lo estará durante mucho tiempo, hasta que de repente encontramos que está en una casilla *negra* (lo que sucedió, por supuesto, es que mientras tanto el alfil fue capturado, y además un peón coronó y se convirtió en un alfil en una casilla negra).

Eso mismo pasa en física. Durante mucho tiempo tendremos una regla que trabaja de forma excelente en general, incluso si no podemos seguir los detalles, y luego podemos descubrir en algún momento una *nueva regla.* Desde el punto de vista de la física básica, los fenómenos más interesantes están por supuesto en los *nuevos* lugares, los lugares donde las reglas no funcionan, ¡no los lugares donde sí funcionan! Así es como descubrimos nuevas reglas.

La tercera manera de decir si nuestras ideas son correctas es relativamente burda pero probablemente es la más poderosa de todas ellas: *por aproximación.* Aunque quizá no seamos capaces de decir por qué Alekhine mueve *esta pieza concreta,* quizá podamos comprender *en un sentido muy amplio* que él está reuniendo sus piezas alrededor del rey para protegerlo, más o menos, puesto que es lo más razonable que se puede hacer en las circunstancias dadas. De la misma forma, a veces podemos entender la naturaleza, más o menos, sin ser capaces de ver qué está haciendo *cada pieza menor,* en términos de nuestra comprensión del juego.

Al principio, los fenómenos de la naturaleza fueron divididos de forma muy general en categorías como calor, electricidad, mecánica, magnetismo, propiedades de las sustancias, fenómenos químicos, luz u óptica, rayos X, física nuclear, gravitación, fenómenos mesónicos, etc. Sin embargo, el objetivo es ver *toda la naturaleza* como aspectos diferentes de *un conjunto* de fenómenos. Este es el problema con que se encuentra actualmente la física teórica básica: *encontrar las leyes que hay tras el experimento; amalgamar estas categorías.* Hasta ahora siempre hemos sido capaces de amalgamarlas, pero con el paso del tiempo se encuentran cosas nuevas. Estábamos amalgamando muy bien cuando, de repente, se descubrieron los rayos X. Luego amalgamamos algo más, y se descubrieron los mesones. Por lo tanto, en cualquier fase del juego, éste siempre parece bastante confuso. Se ha amalgamado mucho, pero siempre hay muchos cables o hilos sueltos en todas direcciones. Esta es la situación actual, que vamos a tratar de describir.

Algunos ejemplos históricos de amalgamación son los siguientes. Consideremos, en primer lugar, *el calor y la mecánica.* Cuando los átomos están en movimiento, cuanto mayor es el movimiento más calor contiene el sistema, y por ello *el calor y todos los efectos de la temperatura pueden ser representados por las leyes de la mecánica.* Otra amalgamación enorme fue el descubrimiento de la relación entre la electricidad, el magnetismo y la luz, que se mostraron como aspectos diferentes de un mismo objeto, que hoy llamamos el *campo electromagnético.* Otra amalgamación es la unificación de los fenómenos químicos, las diversas propiedades de las diversas sustancias y el comportamiento de las partículas atómicas, que se da en la *mecánica cuántica de la química.*

Por supuesto, la cuestión es: ¿será posible amalgamarlo *todo, y* descubrir simplemente que este mundo representa aspectos diferentes de *una* cosa? Nadie lo sabe. Todo lo que sabemos es que a medida que seguimos adelante descubrimos que podemos amalgamar piezas, y luego encontramos algunas piezas que no encajan con las otras y seguimos tratando de componer el rompecabezas. La cuestión de si hay o no un número finito de piezas, o incluso de si hay o no un límite para el rompecabezas, es, por supuesto, una incógnita. Nunca se sabrá hasta que terminemos el cuadro, si lo hacemos alguna vez. Lo que queremos hacer aquí es ver hasta qué punto se ha llegado en este proceso de unificación, y cuál es la situación actual en la comprensión de los

fenómenos físicos en términos del menor conjunto de principios. Para expresarlo de un modo simple, *¿de qué están hechas las cosas y cuántos elementos existen?*

La física antes de 1920

Es un poco difícil empezar de golpe con la visión actual, de modo que primero veremos cómo se veían las cosas alrededor de 1920 y luego sacaremos algunas cosas de dicha imagen. Antes de 1920, nuestra imagen del mundo era algo parecido a esto: el «escenario» en el que se presenta el universo es el *espacio* tridimensional de la geometría, tal como es descrito por Euclides, y las cosas cambian en un medio llamado *tiempo.* Los elementos sobre el escenario son las *partículas,* por ejemplo los átomos, que tienen ciertas *propiedades.* En primer lugar, la propiedad de inercia: si una partícula se está moviendo continuará moviéndose en la misma dirección a menos que sobre ella actúen *fuerzas.* El segundo elemento, por lo tanto, son las *fuerzas,* que entonces se pensaba que eran de dos tipos: el primero, un enormemente complicado y detallado tipo de fuerza de interacción que mantenía los diferentes átomos en diferentes combinaciones de una forma complicada, que determinaba si la sal se disolvería más rápida o más lentamente cuando aumentamos la temperatura. La otra fuerza que se conocía era una interacción de largo alcance —una atracción suave y silenciosa— que variaba de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, y fue denominada *gravi*tación. Esta ley era conocida y era muy simple. Lo que no se conocía, por supuesto, era *por qué* las cosas permanecen en movimiento cuando se están moviendo, o *por qué* existe una ley de la gravitación.

Lo que aquí nos interesa es una descripción de la naturaleza. Desde este punto de vista, un gas, y en realidad *toda* la materia, es una infinidad de partículas en movimiento. Así, muchas de las cosas que vimos mientras permanecíamos de pie en la orilla del mar pueden ser relacionadas inmediatamente. Primero la presión: ésta procede de las colisiones de los átomos con las paredes o lo que sea; el impulso de los átomos, si todos se están moviendo en una cierta dirección en promedio, es el viento; los movimientos *aleatorios* internos son el *calor.* Hay ondas de exceso de densidad, donde se han reunido demasiadas partículas y, por ello, cuando se separan precipitadamente empujan a montones de partículas situadas más lejos, y así sucesivamente. Esta onda de exceso de densidad es el *sonido.* Constituye un enorme logro que seamos capaces de comprender tanto. Algunas de estas cosas se describieron en el capítulo anterior.

¿Qué *tipos* de partículas existen? En esa época se consideraba que había 92: 92 tipos diferentes de átomos se descubrieron finalmente. Tenían nombres diferentes asociados a sus propiedades químicas.

La siguiente parte del problema era: *¿cuáles son las fuerzas de corto alcance?* ¿Por qué el carbono atrae a un oxígeno o quizá dos oxígenos, pero no a tres oxígenos? ¿Cuál es el mecanismo de la interacción entre los átomos? ¿Es la gravitación? La respuesta es no. La gravedad es demasiado débil. Pero imaginemos una fuerza análoga a la gravedad, que varíe de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, aunque enormemente más potente y con una diferencia: en la gravedad cada objeto

atrae a todos los demás, pero imaginemos ahora que existen *dos tipos* de «objetos», y que esta nueva fuerza (que, por supuesto, es la fuerza eléctrica) tiene la propiedad de que los semejantes *se repelen* pero los diferentes *se atraen.* El «objeto» que porta esta interacción fuerte se denomina *carga.*

Entonces ¿qué es lo que tenemos? Supongamos que tenemos dos objetos diferentes que se atraen mutuamente, un más y un menos, y que están muy próximos. Supongamos que tenemos otra carga a cierta distancia. ¿Sentiría alguna atracción? No sentiría *prácticamente ninguna,* porque si las dos primeras cargas tienen el mismo tamaño, la atracción de una y la repulsión de la otra se cancelan. Por lo tanto, hay una fuerza muy pequeña a distancias apreciables. Por el contrario, si nos acercamos *mucho* con la carga extra aparece una *atracción,* porque la repulsión de los iguales y la atracción de los diferentes hará que los diferentes se coloquen más próximos y los iguales se aparten. Entonces la repulsión será *menor* que la atracción. Esta es la razón de que los átomos, que están constituidos por cargas eléctricas más y menos, experimenten una fuerza muy pequeña (aparte de la gravedad) cuando están separados por una distancia apreciable. Cuando se acercan pueden «ver dentro» del otro y redistribuir sus cargas, con el resultado de que tienen una interacción muy fuerte. La base última de la interacción entre los átomos es *eléctrica.* Puesto que esta fuerza es tan enorme, todos los más y todos los menos se unirán normalmente en una combinación tan íntima como sea posible. Todas las cosas, incluso nosotros mismos, tienen un granulado fino, con partes «más» y «menos» que interaccionan fuertemente, todas ellas globalmente compensadas. De cuando en cuando, por accidente, podemos robar algunos menos o algunos más (normalmente es más fácil robar menos), y en tales circunstancias encontramos la fuerza de la electricidad *descompensada y* podemos ver los efectos de estas atracciones eléctricas.

Para dar una idea de lo mucho más fuerte que es la electricidad respecto a la gravitación, consideremos dos granos de arena de un milímetro de diámetro, separados a una distancia de treinta metros. Si la fuerza entre ellos no estuviera compensada, si cualquier cosa atrajese a cualquier otra en lugar de repeler a los iguales, de modo que no hubiera cancelación, ¿qué intensidad tendría la fuerza? ¡Habría una fuerza de *tres millones de toneladas* entre los dos! Verán ustedes que basta con un exceso o un déficit muy pequeño del número de cargas negativas o positivas para producir efectos eléctricos apreciables. Esta es, por supuesto, la razón de que ustedes no puedan ver la diferencia entre un objeto eléctricamente cargado y otro descargado: están implicadas tan pocas partículas que apenas supone diferencia en el peso o el tamaño de un objeto.

Con esta imagen, los átomos eran más fáciles de comprender. Se pensaba que los átomos tienen un «núcleo» en el centro, con carga eléctrica positiva y muy masivo, y el núcleo está rodeado de cierto número de «electrones», que son muy ligeros y están cargados negativamente. Ahora avancemos un poco más en nuestra historia para comentar que en el propio núcleo se encontraron dos tipos de partículas, protones y neutrones, ambos muy pesados y casi de la misma masa. Los protones están eléctricamente cargados y los neutrones son neutros. Si tenemos un átomo con seis protones en su núcleo, y éste está rodeado por seis electrones (las partículas negativas en la materia ordinaria son todas electrones, y son muy ligeras comparadas con los protones y los neutrones que constituyen los núcleos), sería el átomo número seis en

la tabla química, y se llama carbono. El átomo número ocho se llama oxígeno, etc., porque las propiedades químicas dependen de los electrones en el *exterior* y, de hecho, sólo de *cuántos* electrones hay. De este modo, las propiedades químicas de una sustancia dependen sólo de un número, el número de electrones. (La lista entera de elementos químicos podría haber sido en realidad 1, 2, 3, 4, 5, etc. En lugar de decir «carbono», podríamos decir «elemento seis», entendiendo seis electrones, pero, por supuesto, cuando los elementos se descubrieron por primera vez no se sabía que podían ser numerados de esta forma y, además, hubiera hecho que todo pareciese muy complicado. Es mejor tener nombres y símbolos para estas cosas, más que llamar a todas las cosas por un número.)

Muchas cosas se descubrieron acerca de la fuerza eléctrica. La interpretación natural de la interacción eléctrica es que dos objetos se atraen mutuamente: el más atrae al menos. Sin embargo, se des cubrió que esta era una idea inadecuada para representarlo. Una representación más adecuada de la situación consiste en decir que la existencia de la carga positiva distorsiona o crea en cierto sentido una «condición» en el espacio, de modo que cuando en dicho espacio colocamos la carga negativa, ésta siente una fuerza. Esta potencialidad para producir una fuerza se denomina un campo *eléctrico.* Cuando colocamos un electrón en un campo eléctrico, decimos que es «atraído». Tenemos entonces dos reglas: a) las cargas crean un campo, y b) las cargas situadas en los campos experimentan fuerzas y se mueven. La razón para esto se hará clara cuando discutamos los fenómenos siguientes: si cargamos eléctricamente un cuerpo, digamos un peine, y luego colocamos un pedazo de papel cargado a cierta distancia y movemos el peine de un lado a otro, el papel responderá apuntando siempre al peine. Si lo movemos más rápidamente, se verá que el papel se queda un poco rezagado, hay *un retraso* en la acción. (En la primera etapa, cuando movemos *el* peine lentamente, nos encontramos con una complicación que es el *magnetismo.* Las influencias magnéticas tienen que ver con *cargas en movimiento relativo,* de modo que las fuerzas eléctricas y las fuerzas magnéticas pueden atribuirse realmente a un mismo campo, como dos aspectos diferentes de exactamente la misma cosa. Un campo eléctrico variable no puede existir sin magnetismo.) Si alejamos más el papel cargado, el retraso es mayor. Entonces se observa algo interesante. Aunque las fuerzas entre dos objetos cargados deberían variar de forma inversamente proporcional al *cuadra*do de la distancia, cuando movemos una carga se encuentra que la influencia se extiende *mucho más lejos* de lo que podríamos conjeturar a primera vista. Esto es, el efecto decrece más lentamente que la inversa del cuadrado.

He aquí una analogía: si estamos en una piscina y existe un corcho flotando muy cerca, podemos moverlo «directamente» desplazando el agua con otro corcho. Si ustedes mirasen sólo los *dos corchos,* todo lo que verían sería que uno se movía inmediatamente en respuesta al movimiento del otro: hay algún tipo de *«interacción»* entre ellos. Por supuesto, lo que realmente hacemos es perturbar el *agua;* el *agua* perturba entonces al otro corcho. Podíamos construir una «ley» según la cual si ustedes desplazan el agua un poco, un objeto próximo en el agua se moverá. Si estuviese más lejos, por supuesto, el segundo corcho se movería menos, pues nosotros movemos el agua *localmente.* Por el contrario, si agitamos el corcho aparece un nuevo fenómeno: el movimiento del agua hace que se mueva el agua que hay más allá, etc., y se propagan *ondas,* de modo que, por agitación, hay una influencia *mucho más lejana,*

una influencia oscilatoria, que no puede entenderse a partir de la interacción directa. Por consiguiente, la idea de interacción directa debe ser reemplazada por la existencia del agua, o en el caso eléctrico, por lo que denominamos el *campo electromagnético.*

Frecuencia en oscilaciones/segundo	Nombre	Comportamiento aproximado
10^2	Perturbación eléctrica	Campo
$5 \times 10^5 - 10^6$	Emisión radiofónica	Ondas
10^8	FM - TV	
10^{10}	Radar	
$5 \times 10^{14} - 10^{15}$	Luz	
10^{18}	Rayos X	Partícula
10^{21}	rayos γ, nucleares	
10^{24}	rayos γ, «artificiales»	
10^{27}	rayos γ, en rayos cósmicos	

2.1 El espectro electromagnético

El campo electromagnético puede transportar ondas; algunas de estas ondas son luz, otras se utilizan en *emisiones radiofónicas,* pero el nombre general es de *ondas electromagnéticas.* Estas ondas oscilantes pueden tener diversas *frecuencias.* La única cosa que es realmente diferente de una onda a otra es la *frecuencia de oscilación. Si* movemos una carga de un lado a otro cada vez con mayor rapidez y observamos los efectos, obtenemos toda una serie de tipos diferentes de efectos, todos los cuales quedan unificados al especificar solamente un número, el número de oscilaciones por segundo. La «toma de corriente» normal que sacamos de los circuitos eléctricos de las paredes de un edificio tiene una frecuencia del orden de 100 ciclos por segundo. Si aumentamos la frecuencia a 500 o 1.000 kilociclos (1 kilociclo = 1.000 ciclos) por segundo, estamos «en el aire», pues este es el intervalo de frecuencias que se utiliza para emisiones radiofónicas. (Por supuesto, ¡esto no tiene nada que ver con el *aire!* Podemos tener emisiones radiofónicas en ausencia de aire.) Si aumentamos de nuevo la frecuencia, entramos en el intervalo que se utiliza para FM y TV. Yendo aún más lejos, utilizamos ciertas ondas cortas, por ejemplo para *radar.* Aumentamos aún más la frecuencia y ya no necesitamos un instrumento para «ver» el material: podemos verlo con el ojo humano. En el rango de frecuencia entre 5 x 10^{14} y 5 x 10^{15} ciclos por segundo nuestros ojos verían la oscilación del peine cargado, si pudiéramos agitarlo con tanta rapidez, como luz roja, azul o violeta, dependiendo de la frecuencia. Las frecuencias por debajo de este intervalo se denominan infrarrojas, y por encima del mismo, ultravioletas. El hecho de que podamos ver en un intervalo de frecuencias concreto no hace que esta parte del espectro electromagnético sea más impresionante que las otras partes desde el punto de vista de un físico, pero desde el punto de vista humano, por supuesto, sí es más interesante. Si subimos aún más alto en frecuencias, obtenemos rayos X. Los rayos X no son otra cosa que luz de frecuencia muy alta. Si vamos aún más arriba, obtenemos rayos gamma. Estos dos términos, rayos X y rayos gamma, se utilizan casi como sinónimos. Normalmente los rayos electromagnéticos procedentes de los núcleos se denominan rayos gamma, mientras que aquellos de alta

energía procedentes de átomos se denominan rayos X, pero a la misma frecuencia son físicamente indistinguibles, no importa cuál sea su fuente. Si vamos a frecuencias aún más altas, digamos a 10^{24} ciclos por segundo, encontramos que podemos producir dichas ondas artificialmente, por ejemplo con el sincrotrón que existe aquí en el Caltech. Podemos hallar ondas electromagnéticas con frecuencias enormemente altas —incluso con una oscilación mil veces más rápida— en las ondas encontradas en los rayos cósmicos. Estas ondas no pueden ser controladas por nosotros.

Física cuántica

Después de describir la idea de campo electromagnético, y de que este campo puede transportar ondas, pronto aprendemos que dichas ondas se comportan realmente de una manera extraña que parece muy poco ondulatoria. ¡A frecuencias más altas se comportan de forma mucho más parecida a *partículas*! Es la *mecánica cuántica*, descubierta inmediatamente después de 1920, la que explica este extraño comportamiento. En los años anteriores a 1920 la imagen del espacio como un espacio tridimensional, y del tiempo como algo separado, fue transformada por Einstein, primero en una combinación que llamamos espacio-tiempo y luego aún más en un espacio-tiempo *curvo* para representar la gravitación. De este modo, el «escenario» se cambió por el espacio-tiempo, y la gravitación es presumiblemente una alteración del espacio-tiempo. Luego se descubrió también que las reglas para los movimientos de las partículas eran incorrectas. Las reglas mecánicas para la «inercia» y las «fuerzas» son *erróneas* —las leyes de Newton son *erróneas*— en el mundo de los átomos. En su lugar se descubrió que las cosas a pequeña escala *no* se comportan *como* las cosas a gran escala. Esto es lo que hace la física difícil, y muy interesante. Es difícil porque a pequeña escala las cosas se comportan de una forma muy «poco natural»; no tenemos experiencia directa de ellas. Aquí las cosas no se comportan como nada que conozcamos, de modo que es imposible describir este comportamiento de otra manera que no sea una forma analítica. Es difícil, y requiere una gran imaginación.

La mecánica cuántica tiene muchos aspectos. En primer lugar, la idea de que una partícula tiene una posición definida y una velocidad definida ya no está permitida; es errónea. Para dar un ejemplo de lo errónea que es la física clásica existe una regla en la mecánica cuántica que dice que uno no puede saber a la vez dónde está algo y a qué velocidad se está moviendo. La incertidumbre del momento y la incertidumbre de la posición son complementarias, y el producto de las dos es constante. Podemos escribir la ley de esta forma: $\Delta x \, \Delta p \geq h/2\pi$, pero la explicaremos luego con más detalle. Esta regla explica una paradoja muy misteriosa: si los átomos están formados de cargas más y menos, ¿por qué las cargas menos no se sitúan sencillamente encima de las cargas más (se atraen mutuamente) y se acercan hasta cancelarse completamente? *¿Por qué los átomos son tan grandes?* ¿Por qué está el núcleo en el centro y los electrones a su alrededor? Se pensaba al principio que esto se debía a que el núcleo era grande; pero no, el núcleo es *muy pequeño.* El átomo tiene un diámetro de unos 10^{-8} cm. El núcleo tiene un diámetro de unos 10^{-13} cm. Si tuviéramos un átomo y quisiésemos ver el núcleo, tendríamos que ampliarlo hasta que el átomo completo tuviese el tamaño de una gran habitación, y el núcleo sería una simple mota que usted apenas podría ver a

simple vista. Pero *todo el peso* del átomo está casi por completo en este *núcleo* infinitesimal. ¿Qué impide que los electrones caigan simplemente dentro? Este principio: si estuvieran en el núcleo sabríamos su posición exactamente, y el principio de incertidumbre exigiría entonces que tuvieran un momento muy *grande* (aunque incierto), es decir, una *energía cinética* muy grande. Con esta energía saldrían despedidos del núcleo. Ellos llegan a un compromiso: se permiten algún espacio para esta incertidumbre y luego se mueven con una cierta cantidad de movimiento mínimo de acuerdo con esta regla. (Recuerden que dijimos que cuando se enfría un cristal hasta el cero absoluto, los átomos no dejan de moverse, sino que aún se agitan. ¿Por qué? Si dejasen de moverse sabríamos dónde estaban y que tenían movimiento nulo, y eso está en contra del principio de incertidumbre. No podemos saber dónde están y con qué velocidad se están moviendo, ¡de modo que deben estar agitándose allí continuamente!)

Otro cambio muy interesante en las ideas y la filosofía de la ciencia que trajo la mecánica cuántica es este: no es posible predecir *exactamente* lo que va a suceder en cualquier circunstancia. Por ejemplo, es posible preparar un átomo que esté a punto de emitir luz, y podemos medir cuándo ha emitido la luz si registramos un fotón, algo que describiremos en breve. Sin embargo, no podemos predecir *cuándo* va a emitir la luz, o, en el caso de que haya varios átomos, *cuál de ellos* es el que va a hacerlo. Ustedes podrían decir que esto se debe a algunos «engranajes» internos que no hemos mirado suficientemente de cerca. No, no *hay* engranajes internos; la naturaleza, tal como la entendemos hoy, se comporta de tal modo que es *fundamentalmente imposible* hacer una predicción precisa de *qué sucederá exactamente* en un experimento dado. Esto es algo horrible; de hecho, los filósofos habían dicho antes que uno de los requisitos fundamentales de la ciencia es que siempre que ustedes fijen las mismas condiciones debe suceder lo mismo. Esto sencillamente *no* es *cierto,* no es una condición esencial de la ciencia. El hecho es que no suceden las mismas cosas, que sólo podemos encontrar un promedio estadístico de lo que va a suceder. De todas formas, la ciencia no ha colapsado por completo. Dicho sea de paso, los filósofos dicen muchas cosas acerca de lo que es *absolutamente necesario* para la ciencia, y siempre, hasta donde podemos ver, son bastante ingenuas y probablemente erróneas. Por ejemplo, algún filósofo dijo que es fundamental para la empresa científica que si un experimento se realiza en, digamos, Estocolmo, y luego se lleva a cabo el mismo experimento en, digamos, Quito, deben darse los *mismos resultados.* Esto es completamente falso. No es necesario que la *ciencia* sea así; puede ser un *hecho experimental,* pero no es necesario. Por ejemplo, si uno de los experimentos consiste en mirar al cielo y ver la aurora boreal en Estocolmo, ustedes no la verán en Quito; el fenómeno aquí es diferente. «Pero —dirán ustedes— esto es algo que tiene que ver con el exterior; ¿pueden ustedes encerrarse en una caja en Estocolmo y bajar las persianas, y obtener alguna diferencia? Ciertamente. Si tomamos un péndulo con una suspensión universal, lo desplazamos de la vertical y luego lo soltamos, entonces el péndulo oscilará casi en un plano, pero no del todo. Los planos de oscilación cambian lentamente en Estocolmo, pero no en Quito. Las persianas siguen estando bajadas. El hecho de que esto suceda no lleva a la destrucción de la ciencia. ¿Cuál es la hipótesis fundamental de la ciencia, la filosofía fundamental? La enunciamos en el primer capítulo: *la única prueba de la validez de cualquier idea es el*

experimento. Si resulta que la mayoría de los experimentos dan lo mismo en Quito que en Estocolmo, entonces esta «mayoría de experimentos» se utilizará para formular alguna ley general, y se dirá que aquellos experimentos que no den el mismo resultado fueron consecuencia del entorno próximo a Estocolmo. Inventaremos alguna manera de resumir los resultados del experimento, y no se nos tiene que decir por adelantado qué aspecto tendrá. Si se nos dice que el mismo experimento producirá siempre el mismo resultado, que todo está muy bien, pero cuando lo intentamos *no* resulta, entonces *no* va bien. Simplemente tenemos que tomar lo que vemos, y formular entonces el resto de nuestras ideas en términos de nuestra experiencia real.

Volviendo a la mecánica cuántica y la física fundamental, no podemos, por supuesto, entrar ahora en los detalles de los principios mecanocuánticos porque son bastante difíciles de entender. Supondremos que están allí, y proseguiremos para describir cuáles son algunas de las consecuencias. Una de las consecuencias es que las cosas que solemos considerar como ondas se comportan también como partículas, y las partículas se comportan como ondas; de hecho, todas las cosas se comportan de la misma forma. No hay distinción entre una onda y una partícula. De este modo, la mecánica cuántica *unifica* la idea del campo, con sus ondas, y la de partículas en una sola. Es cierto que cuando la frecuencia es baja, el aspecto de campo del fenómeno es más evidente, o más útil como descripción aproximada en términos de experiencias cotidianas. Pero a medida que aumenta la frecuencia, los aspectos de partícula del fenómeno se hacen más evidentes con el equipamiento con el que normalmente hacemos las medidas. De hecho, aunque mencionamos muchas frecuencias, todavía no se ha detectado directamente ningún fenómeno que implique una frecuencia superior a aproximadamente 10^{12} ciclos por segundo. Sólo *deducimos* las frecuencias superiores a partir de la energía de las partículas, mediante una regla que supone que es válida la idea partícula-onda de la mecánica cuántica.

Tenemos así una nueva visión de la interacción electromagnética. Tenemos un nuevo tipo de *partícula* que añadir al electrón, el protón y el neutrón. Esta nueva partícula se denomina *fotón*. Y la nueva visión de la interacción de electrones y protones que constituye la teoría electromagnética, pero ahora con todo correcto mecanocuánticamente, se denomina *electrodinámica cuántica.* Esta teoría fundamental de la interacción de luz y materia, o campo eléctrico y cargas, constituye nuestro mayor éxito hasta ahora en física. En esta sola teoría tenemos las reglas básicas para todos los fenómenos ordinarios excepto para la gravitación y los procesos nucleares. Por ejemplo, de la electrodinámica cuántica salen todas las leyes eléctricas, mecánicas y químicas: las leyes para el choque de bolas de billar, los movimientos de conductores en campos magnéticos, el calor específico del monóxido de carbono, el color de los tubos de neón, la densidad de la sal, y las reacciones del hidrógeno y el oxígeno para formar agua, son todas consecuencias de esta única ley. Todos estos detalles pueden ser calculados si la situación es suficientemente simple para hacer una aproximación, lo que no sucede casi nunca, aunque a menudo podemos entender más o menos lo que está sucediendo. Por el momento no se encuentran excepciones a las leyes de la electrodinámica cuántica fuera del núcleo, y no sabemos si dentro de él hay una excepción porque sencillamente no sabemos qué está sucediendo en el núcleo.

En principio, entonces, la electrodinámica cuántica es la teoría de toda la química, y de la vida, si la vida se reduce finalmente a química, y por consiguiente a física

porque la química ya está reducida (al ser ya conocida la parte de la física implicada en la química). Más aún, la misma electrodinámica cuántica, esta gran cosa, predice un montón de cosas nuevas. En primer lugar, predice las propiedades de fotones de muy alta energía, rayos gamma, etc. Predijo otra cosa muy notable: además del electrón debería haber otra partícula de la misma masa, pero de carga opuesta, llamada *positrón,* y ambas partículas, al encontrarse, podrían aniquilarse mutuamente con emisión de luz o rayos gamma. (Después de todo, la luz y los rayos gamma son lo mismo, son tan sólo diferentes puntos en una escala de frecuencias.) La generalización de esto, el hecho de que para cada partícula existe una antipartícula, resulta ser cierta. En el caso de los electrones, la antipartícula tiene otro nombre —se denomina un *positrón*, pero para la mayoría de las demás partículas se denomina anti-tal-o-cual, como antiprotón o antineutrón. En electrodinámica cuántica se introducen *dos números* y se supone que la mayoría de los otros números en el mundo salen de allí. Los dos números que se introducen se denominan la masa del electrón y la carga del electrón. En realidad, esto no es completamente cierto, pues tenemos todo un conjunto de números para la química que nos dice cuán pesados son los núcleos. Esto nos lleva a la siguiente parte.

Núcleos y partículas

¿De qué están hechos los núcleos y cómo se mantienen unidos? Resulta que los núcleos se mantienen unidos por fuerzas enormes. Cuando los núcleos se liberan, la energía liberada es enorme comparada con la energía química, en la misma proporción que hay entre una explosión de una bomba atómica y una explosión de TNT, porque, por supuesto, la bomba atómica tiene que ver con cambios en el interior del núcleo, mientras que la explosión de TNT tiene que ver con cambios de los electrones en el exterior de los átomos. La cuestión es: ¿cuáles son las fuerzas que mantienen unidos los protones y los neutrones en el núcleo? De la misma forma que la interacción eléctrica puede relacionarse con una partícula, un fotón, Yukawa sugirió que las fuerzas entre neutrones y protones también tienen algún tipo de campo, y que cuando este campo se agita se comporta como una partícula. Así pues, podría haber algunas otras partículas en el mundo además de los protones y los neutrones, y él fue capaz de deducir las propiedades de estas partículas a partir de las características ya conocidas de las fuerzas nucleares. Por ejemplo, predijo que deberían tener una masa de doscientas o trescientas veces la masa de un electrón; ¡y, abracadabra, en los rayos cósmicos se descubrió una partícula con la masa correcta! Pero más tarde se vio que era la partícula equivocada. Se denominó un mesón-μ, o muón.

Sin embargo, un poco después, en 1947 o 1948, se encontró otra partícula, el mesón-π, o pión, que satisfacía el criterio de Yukawa. Además del protón y el neutrón, para tener fuerzas nucleares de hemos añadir el pión. Ahora ustedes dirán: «¡Qué grande!, hagamos con esta teoría la nucleodinámica cuántica, utilizando los piones tal como precisamente quería hacerlo Yukawa, y veamos si funciona, y entonces todo quedará explicado». Mala suerte. Resulta que los cálculos implicados en esta teoría son tan difíciles que nadie ha sido nunca capaz de calcular cuáles son las consecuencias

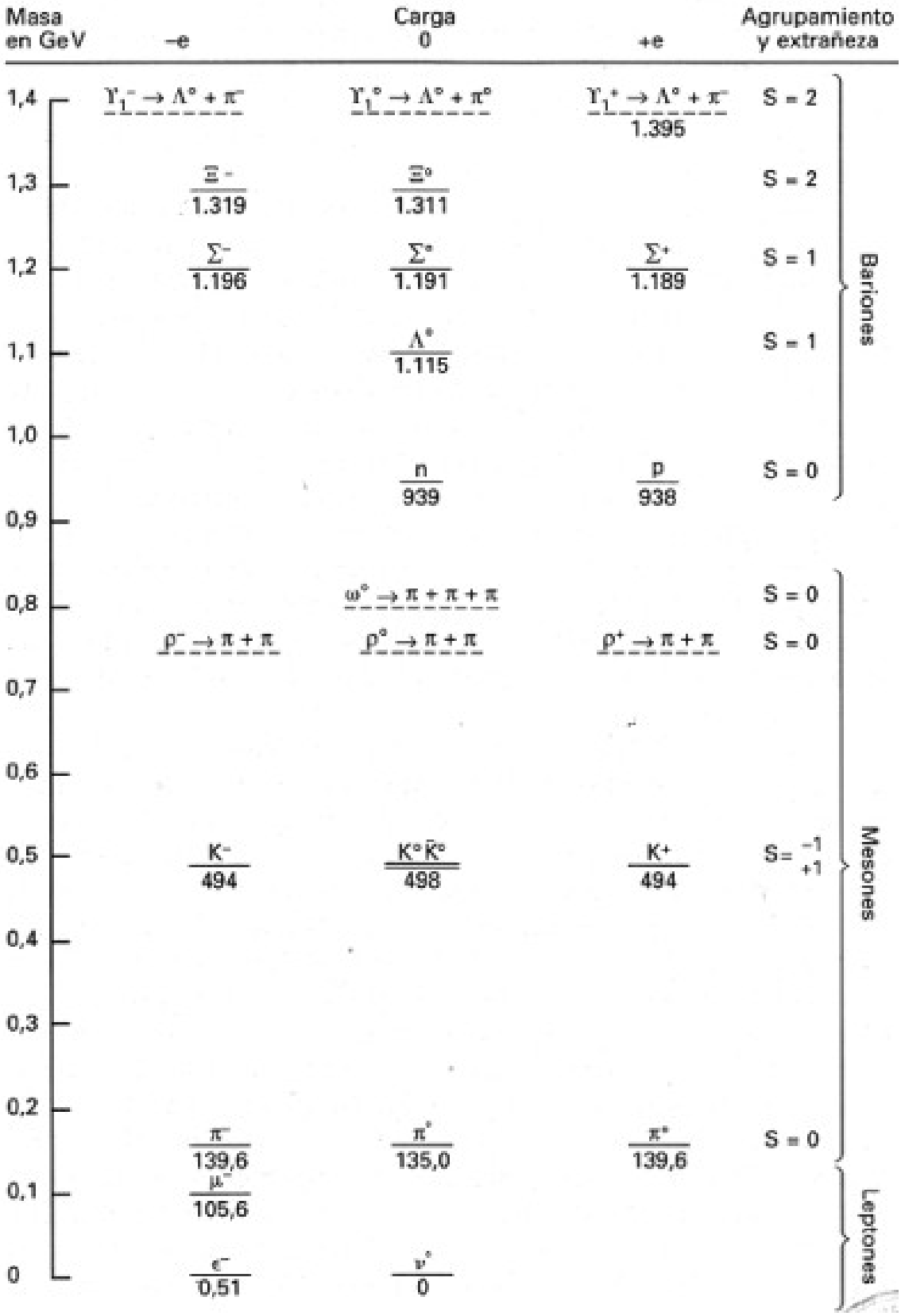
de la teoría, o comprobarla experimentalmente, y ¡esto ha estado sucediendo durante casi veinte años!

Así que estamos bloqueados con una teoría, y no sabemos si es correcta o errónea, aunque sabemos que es *algo* errónea, o al menos incompleta. Mientras nosotros hemos estado divagando teóricamente, tratando de calcular las consecuencias de esta teoría, los físicos experimentales han estado descubriendo algunas cosas. Por ejemplo, ellos ya habían descubierto este mesón— μ o muón, y nosotros no sabemos aún dónde encaja. También en los rayos cósmicos se encontró un gran número de otras partículas «extra». Resulta que hoy tenemos aproximadamente treinta partículas, y es muy difícil comprender las relaciones entre todas estas partículas y para qué las quiere la naturaleza, o cuáles son los vínculos entre unas y otras. Hoy no entendemos estas diversas partículas como aspectos diferentes de la misma cosa, y el hecho de que tengamos tantas partículas inconexas es un reflejo del hecho de que tenemos mucha información inconexa sin una buena teoría. Comparado con los grandes éxitos de la electrodinámica cuántica, el conocimiento que se tiene de la física nuclear es conocimiento aproximado, a mitad de camino entre la experiencia y la teoría: se supone un tipo de fuerza entre protones y neutrones y se trata de ver qué sucederá, pero sin entender realmente de dónde procede la fuerza. Aparte de esto, hemos hecho muy pocos progresos. Hemos coleccionado un número enorme de elementos químicos. En el caso de la química apareció de repente una relación entre dichos elementos que no se esperaba y que está incorporada en la tabla periódica de Mendeleiev. Por ejemplo, el sodio y el potasio tienen casi las mismas propiedades químicas y se encuentran en la misma columna de la tabla de Mendeleiev. Hemos estado buscando una tabla del tipo de la de Mendeleiev para las nuevas partículas. Una de estas tablas de las nuevas partículas fue construida de forma independiente por Gell-Mann en los Estados Unidos y Nishijima en Japón. Su clasificación se basa en un nuevo número, similar a la carga eléctrica, que puede asignarse a cada partícula, y se denomina «extrañeza», *S*. Este número se conserva, como la carga eléctrica, en las reacciones que tienen lugar mediante fuerzas nucleares.

En el cuadro 2.2 se da la lista de todas las partículas. No podemos discutirlas mucho en esta etapa, pero el cuadro les mostrará al menos cuánto ignoramos. Debajo de cada partícula se da su masa en una unidad determinada, llamada MeV Un MeV es igual a $1{,}782 \times 10^{-27}$ gramos. La razón por la que fue escogida esta unidad es histórica, y no entraremos en ello ahora. Las partículas más masivas se sitúan más arriba en el cuadro; vemos que un neutrón y un protón tienen casi la misma masa. En columnas verticales hemos colocado las partículas con la misma carga eléctrica: todos los objetos neutros en una columna, todos los cargados positivamente a la derecha de ésta, y todos los objetos cargados negativamente a la izquierda.

Las partículas se muestran con una línea continua y las «resonancias» con una línea a trazos. Se han omitido varias partículas del cuadro. Entre las omitidas se incluyen las importantes partículas de masa nula y carga nula, el fotón y el gravitón, que no entran en el esquema clasificatorio barión-mesón-leptón, y también algunas de las resonancias más recientes (k*, ϕ, η). Las antipartículas de los mesones figuran en el cuadro, pero las antipartículas de los leptones y bariones tendrían que darse en otro cuadro exactamente igual a éste pero reflejadas en la columna de carga cero. Aunque

todas las partículas salvo el electrón, el neutrino, el fotón, el gravitón y el protón son inestables, sólo se han mostrado los productos de la desintegración para las resonancias. Las asignaciones de extrañeza no son aplicables a los leptones, puesto que no interaccionan fuertemente con los núcleos.



2.2 Partículas elementales.

Todas las partículas que están junto a los neutrones y los protones se denominan *bariones,* y existen los siguientes: hay una partícula «lambda», con una masa de 1.154

MeV y otras tres, llamadas sigmas, menos, neutra y más, con masas diferentes pero casi iguales. Hay grupos o multipletes casi de la misma masa, con una diferencia de un 1 o un 2 por 100. Todas las partículas de un multiplete dado tienen la misma extrañeza. El primer multiplete es el doblete protón-neutrón, y luego hay un singlete (el lambda), luego el triplete sigma, y finalmente el doblete xi. Muy recientemente, en 1961, se encontraron algunas partículas más. Pero *¿son* partículas? Viven un tiempo tan corto, se desintegran casi instantáneamente en cuanto se han formado, que no sabemos si deberían ser consideradas como nuevas partículas o como algún tipo de interacción de «resonancia» de cierta energía definida entre los productos Λ y π en los que se desintegra.

Además de los bariones, las otras partículas implicadas en la interacción nuclear se denominan *mesones.* Están en primer lugar los piones, que se dan en tres variedades, positiva, negativa y neutra; forman otro multiplete. También hemos encontrado algunas cosas nuevas denominadas mesones-K, y se dan como un doblete, K^+ y $K°$. Además, cada partícula tiene su antipartícula, a menos que una partícula *sea su propia* antipartícula. Por ejemplo, el π^- *y* el π^+ son antipartículas uno del otro, pero el $\pi°$ es su propia antipartícula. El K^- y el K^+ son antipartículas uno del otro, como lo son el $K°$ y el $K'°$. Además, en 1961 se encontraron también algunos mesones más o quizá mesones que se desintegran casi inmediatamente. Algo llamado ω que se desintegra en tres piones tiene una masa de 780 en esta escala, y con algo menos de seguridad hay un objeto que se desintegra en dos piones. Estas partículas, llamadas mesones y bariones, y las antipartículas de los mesones están en la misma tabla, pero las antipartículas de los bariones deben colocarse en otra tabla, «reflejada» en la columna de carga cero.

De la misma forma que la tabla de Mendeleiev era muy buena, excepto por el hecho de que había un número de elementos de tierras raras que colgaban algo sueltos, también tenemos algunas cosas que cuelgan algo sueltas de esta tabla: partículas que no interaccionan fuertemente en los núcleos, no tienen nada que ver con la interacción nuclear, y no tienen una interacción fuerte (entiendo por esto el poderoso tipo de interacción de la energía nuclear). Éstas se denominan leptones, y son los siguientes: está el electrón, que tiene una masa muy pequeña en esta escala, tan sólo 0,510 MeV. Luego hay otra, el mesón-π, el muón, que tiene una masa mucho mayor, 206 veces más pesada que un electrón. Hasta donde podemos decir, por todos los experimentos realizados hasta ahora, el electrón y el muón sólo difieren en la masa. Todo funciona exactamente igual para el muón que para el electrón, excepto que uno es más pesado que el otro. ¿Por qué hay uno más pesado que otro; para qué sirve? No lo sabemos. Además, existe un leptón que es neutro, denominado un neutrino, y esta partícula tiene masa nula. De hecho, ahora se sabe que existen *dos* tipos diferentes de neutrinos, uno relacionado con los electrones y el otro relacionado con los muones.

Finalmente, tenemos otras dos partículas que no interaccionan fuertemente con las nucleares: una es el fotón, y quizá, si el campo gravitatorio tiene también un análogo mecanocuántico (todavía no se ha elaborado una teoría cuántica de la gravitación), entonces habrá una partícula, un gravitón, que tendrá masa nula.

¿Qué es esta «masa nula»? Las masas dadas aquí son las masas de las partículas *en reposo.* El hecho de que una partícula tenga masa nula significa, en cierto modo,

que *no* puede estar en *reposo.* Un fotón nunca está en reposo, siempre se está moviendo a 300.000 km por segundo. Entenderemos mejor lo que significa esta masa cuando comprendamos la teoría de la relatividad, lo que llegará a su debido tiempo.

2.3 Interacciones elementales		
Acoplamiento	Intensidad[1]	Ley
Fotón con partículas cargadas	≈10–2	Conocida
Gravedad con cualquier energía	≈10–40	Conocida
Desintegraciones débiles	≈10–5	Parcialmente conocida
Mesones con bariones	≈1	Desconocida (alguna regla conocida)

De este modo nos enfrentamos a un gran número de partículas que, en conjunto, parecen ser los constituyentes fundamentales de la materia. Afortunadamente, estas partículas no son *todas* diferen*tes respecto a sus interacciones* mutuas. De hecho, parece haber sólo *cuatro tipos* de interacción entre partículas que, en orden de intensidad decreciente, son la fuerza nuclear, las interacciones eléctricas, la interacción de la desintegración-beta y la gravedad. El fotón se acopla a todas las partículas cargadas y la intensidad de la interacción se mide por cierto número cuyo valor es 1/137. Se conoce la ley detallada de este acoplamiento, que es la electrodinámica cuántica. La gravedad se acopla con cualquier *energía,* pero su acoplamiento es extraordinariamente débil, mucho más débil que el de la electricidad. Esta ley es también conocida. Luego existen las denominadas desintegraciones débiles: la desintegración-beta, que provoca que el neutrón se desintegre en un protón, un electrón y un neutrino, de forma relativamente lenta. Esta ley sólo se conoce en parte. La denominada interacción fuerte, la interacción mesón-barión, tiene una intensidad de 1 en esta escala, y la ley es completamente desconocida, aunque existe un cierto número de reglas conocidas, tales como que el número total de bariones no cambia en ninguna reacción.

Esta es la horrible situación de nuestra física actual. Para resumirla, yo diría esto: fuera del núcleo, parece que lo conocemos todo; dentro de él, la mecánica cuántica es válida: no se ha encontrado ningún fallo en los principios de la mecánica cuántica. El escenario en el que situamos todo nuestro conocimiento, por así decir, es el espacio-tiempo relativista; quizá la gravedad está implicada en el espacio-tiempo. No sabemos cómo comenzó el universo, y nunca hemos hecho experimentos que pongan a prueba con precisión nuestras ideas de espacio y tiempo por debajo de alguna distancia minúscula, de modo que solamente *sabemos* que nuestras ideas funcionan por encima de dicha distancia. Deberíamos añadir también que las reglas del juego son los principios mecanocuánticos, y dichos principios se aplican, hasta donde podemos decir, tanto a las nuevas partículas como a las viejas. El origen de las fuerzas en los núcleos nos lleva a nuevas partículas, pero por desgracia éstas aparecen en gran profusión y carecemos de una comprensión completa de su interrelación, aunque ya sabemos que existen algunas relaciones muy sorprendentes entre ellas. Parece que poco a poco vamos a tientas hacia una comprensión del mundo de las partículas subatómicas, pero realmente aún no sabemos hasta dónde tendremos que seguir en esta tarea.

[1] La intensidad es una medida adimensional de la constante de acoplamiento de la interacción.

— 3 —

La relación de la física con las otras ciencias

Introducción

La física es la más fundamental y general de las ciencias, y ha tenido un efecto profundo sobre todo el desarrollo científico. De hecho, la física es el equivalente actual a lo que se solía llamar *filosofía natural*, de la que surgieron la mayoría de nuestras ciencias modernas. Quienes estudian muchos otros campos tienen que estudiar también física debido al papel básico que ésta desempeña en todos los fenómenos. En este capítulo trataremos de explicar cuáles son los problemas fundamentales en las otras ciencias, aunque, por supuesto, es imposible tratar en un espacio tan pequeño las materias complejas, sutiles y bellas que constituyen estos otros campos. La falta de espacio nos impide también discutir las relaciones de la física con la ingeniería, la industria, la sociedad y la guerra, e incluso la relación más notable entre matemáticas y física. (La matemática no es una ciencia desde nuestro punto de vista, en el sentido de que no es una ciencia *natural*. La prueba de su validez no es el experimento.) Dicho sea de paso, debemos dejar claro de entrada que el hecho de que algo no sea una ciencia no quiere decir necesariamente que sea malo. Por ejemplo, el amor no es una ciencia. Por lo tanto, si se dice que algo no es una ciencia, no quiere decir que haya algo erróneo en ello; quiere decir simplemente que no es una ciencia.

Química

La ciencia que quizá está más profundamente afectada por la física es la química. Históricamente, la química empezó siendo casi exclusivamente lo que ahora llamamos química inorgánica, la química de las sustancias que no están asociadas con los seres vivos. Se necesitó mucho trabajo analítico para descubrir la existencia de los diversos

elementos y sus relaciones: cómo se forman los diversos compuestos relativamente simples encontrados en las rocas, la tierra, etc. Esta química primitiva fue muy importante para la física. La interacción entre las dos ciencias fue muy intensa porque la teoría de los átomos estaba apoyada en gran medida en experimentos de química. La teoría de la química, o sea, de las propias reacciones, estaba resumida en gran medida en la tabla periódica de Mendeleiev, que revelaba muchas relaciones extrañas entre los diversos elementos; y fue la colección de reglas acerca de qué sustancias se combinaban con cuáles, y cómo, lo que constituyó la química inorgánica. Todas estas reglas fueron finalmente explicadas por la mecánica cuántica, de modo que la química teórica es de hecho física. Por otra parte, debe resaltarse que se trata de una explicación *en teoría.* Ya hemos discutido la diferencia entre conocer las reglas del juego de ajedrez y ser capaz de jugarlo. Por eso podemos conocer las reglas y no ser capaces de jugar muy bien. Resulta que es muy difícil predecir exactamente lo que sucederá en una reacción química dada; en cualquier caso, la parte más profunda de la química teórica debe terminar en la mecánica cuántica.

Existe también una rama de la física y la química que fue desarrollada por ambas ciencias a la par, y que es extraordinariamente importante. Se trata de los métodos estadísticos aplicados a situaciones para las que existen leyes mecánicas, lo que con propiedad se denomina *mecánica estadística.* En cualquier situación química están implicados un gran número de átomos, y hemos visto que todos los átomos están agitándose de una forma muy aleatoria y complicada. Si pudiéramos analizar cada colisión y ser capaces de seguir en detalle el movimiento de cada molécula, quizá podríamos calcular lo que iba a suceder, pero los enormes números necesarios para seguir la pista a todas estas moléculas superan tan abrumadoramente la capacidad de cualquier ordenador, y ciertamente la capacidad del cerebro, que se hacía necesario desarrollar un método para tratar con situaciones tan complicadas. La mecánica estadística es entonces la ciencia de los fenómenos del calor, o termodinámica. La química inorgánica, como ciencia, está ahora reducida esencialmente a lo que se denominan química física y química cuántica; la química física para estudiar las velocidades a las que tienen lugar las reacciones y lo que está sucediendo en detalle (¿cómo chocan las moléculas?, ¿qué fragmentos se desprenden primero?, etc.), y la química cuántica para ayudar a entender lo que sucede en términos de las leyes físicas.

La otra rama de la química es la *química orgánica,* la química de las sustancias que están asociadas con seres vivos. Durante un tiempo se creyó que las sustancias que están asociadas con seres vivos eran tan maravillosas que no podían fabricarse artificialmente a partir de materiales inorgánicos. Esto no es cierto en absoluto: son simplemente las mismas sustancias fabricadas en la química inorgánica, aunque ahora estén implicadas disposiciones más complejas de átomos. La química orgánica tiene obviamente una relación muy estrecha con la biología que le suministra sus sustancias, y con la industria; y además, mucha química física y mucha mecánica cuántica pueden aplicarse a los compuestos orgánicos tanto como a los inorgánicos. Sin embargo, los principales problemas de la química orgánica no radican en estos aspectos, sino más bien en el análisis y la síntesis de las sustancias que se forman en sistemas biológicos, en seres vivos. Esto conduce imperceptiblemente, paso a paso, hacia la bioquímica, y luego a la propia biología, o la biología molecular.

Biología

Así es como llegamos a la ciencia de la *biología,* que es el estudio de los seres vivos. En los primeros días de la biología los biólogos tenían que tratar el problema puramente descriptivo de descubrir *qué* seres vivos había, y así tenían simplemente que contar cosas tales como los pelos de las patas de las moscas. Una vez que todas estas materias hubieran sido desarrolladas con una gran dedicación, los biólogos se adentraron en la *maquinaria* interior de los cuerpos vivientes, primero desde un punto de vista muy general, naturalmente, porque se necesita algún esfuerzo para entrar en los detalles más finos.

Hubo una interesante relación inicial en la que la biología ayudó a la física en el descubrimiento de la *conservación de la energía,* que fue demostrada inicialmente por Mayer en relación con la cantidad de calor tomada y cedida por una criatura viviente.

Si consideramos más de cerca los procesos de la biología de los animales vivos vemos *muchos* fenómenos físicos: la circulación de la sangre, el bombeo, la presión, etc. Están los nervios: sabemos qué está sucediendo cuando pisamos una piedra puntiaguda, y que de un modo u otro la información viene de la pierna. Es interesante cómo sucede esto. En su estudio de los nervios, los biólogos han llegado a la conclusión de que los nervios son tubos muy finos con una pared compleja y muy delgada; las células bombean iones a través de esta pared, de modo que hay iones positivos en el exterior e iones negativos en el interior, como en un condensador. Esta membrana tiene una propiedad interesante; si se «descarga» en un lugar, es decir, si algunos de los iones son capaces de atravesarla en un lugar, de modo que la tensión eléctrica se reduce en ese punto, la influencia eléctrica se hace sentir en los iones próximos, y afecta a la membrana de tal forma que hace que los iones también la atraviesen en puntos vecinos. Esto, a su vez, afecta a las zonas situadas un poco más lejos, etc.; y así hay una onda de «penetrabilidad» de la membrana que recorre la fibra cuando es «excitada» en un extremo al pisar la piedra puntiaguda. Esta onda es análoga en cierto modo a una larga hilera de fichas de dominó verticales; si se empuja una ficha en un extremo, ésta empuja a la siguiente, etc. Por supuesto, esto transmitirá sólo un mensaje a menos que las fichas de dominó se pongan de pie de nuevo; y de forma análoga, en las células nerviosas existen procesos que bombean de nuevo los iones lentamente para dejar al nervio dispuesto para el próximo impulso. Así es como sabemos lo que estamos haciendo (o al menos dónde estamos). Por supuesto, los efectos eléctricos asociados con este impulso nervioso deben ser registrados con instrumentos eléctricos, y puesto que hay efectos eléctricos, la física de los efectos eléctricos ha tenido obviamente mucha influencia en la comprensión del fenómeno.

El efecto opuesto consiste en que, desde alguna parte del cerebro, se envía un mensaje a lo largo de un nervio. ¿Qué sucede en el extremo del nervio? Allí el nervio se ramifica en cosas pequeñas y finas, conectadas a una estructura próxima a un músculo, denominada placa terminal. Por razones que no se entienden exactamente, cuando el impulso llega al extremo del nervio se desprenden pequeños paquetes de una sustancia química denominada acetilcolina (cinco o diez moléculas cada vez), y éstos afectan a la fibra muscular y hacen que se contraiga, ¡qué fácil! ¿Qué hace que un músculo se contraiga? Un músculo consiste en un número muy grande de fibras juntas, que contienen dos sustancias diferentes, miosina y actomiosina, pero el

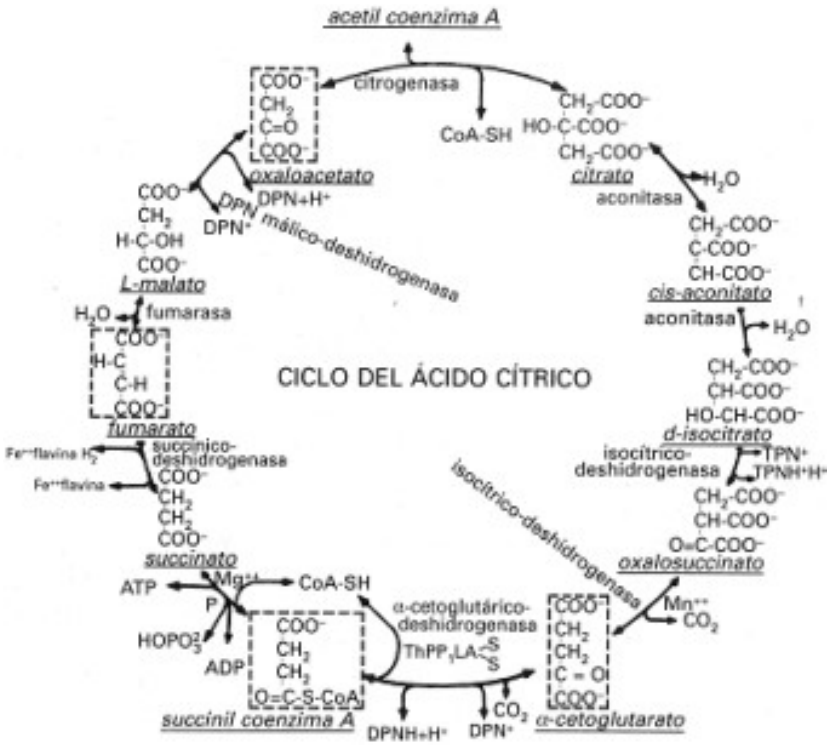
mecanismo por el que la reacción química inducida por la acetilcolina puede modificar las dimensiones de la molécula no se conoce aún. Así pues, los procesos fundamentales en el músculo que crean los movimientos mecánicos no son conocidos.

La biología es un campo tan enormemente amplio que hay muchos otros problemas que ni siquiera podemos mencionar: problemas acerca del mecanismo de la visión (qué hace la luz en el ojo), el mecanismo del oído, etc. (La forma en que trabaja el *pensamien*to la discutiremos más adelante en la psicología.) Ahora bien, estas cosas concernientes a la biología que acabamos de discutir no son, desde un punto de vista biológico, realmente fundamentales, no están en la base de la vida, en el sentido de que incluso si las comprendiéramos seguiríamos sin comprender la propia vida. Para ilustrarlo: los hombres que estudian los nervios piensan que su trabajo es muy importante porque, después de todo, no puede haber animales sin nervios. Pero ustedes *pueden* tener *vida* sin nervios. Las plantas no tienen nervios ni músculos, pero están trabajando, están vivas, en cualquier caso. De modo que para ver los problemas fundamentales de la biología debemos mirar más profundamente; cuando lo hacemos descubrimos que todos los seres vivos tienen muchas características en común. La característica más común es que están hechos de *células*, dentro de cada una de las cuales hay una maquinaria compleja para hacer cosas por medios químicos. En las células de las plantas, por ejemplo, hay maquinaria para captar la luz y generar sacarosa, que es consumida en la oscuridad para mantener viva la planta. Cuando un animal la come, la propia sacarosa genera en éste una serie de reacciones químicas relacionadas muy estrechamente con la fotosíntesis (y su efecto opuesto en la oscuridad) en las plantas.

En las células de los sistemas vivos se producen muchas reacciones químicas elaboradas, en las que un compuesto se transforma en otro y en otro más, y así sucesivamente. Para dar alguna idea de los enormes esfuerzos que están implicados en el estudio de la bioquímica, la gráfica de la figura 3.1 resume nuestro conocimiento hasta la fecha de sólo una pequeña parte de las muchas series de reacciones que tienen lugar en las células, quizá un 1 por 100 más o menos de ellas.

Aquí vemos una serie completa de moléculas que se transforman unas en otras en una secuencia o ciclo de pasos bastante pequeños. Se denomina el ciclo de Krebs, el ciclo respiratorio. Cada una de las sustancias químicas y cada uno de los pasos es bastante simple, en términos de los cambios que se producen en la molécula, pero y este es un descubrimiento de capital importancia en la bioquímica estos cambios son *relativamente difíciles de llevar a cabo en un laboratorio. Si* tenemos una sustancia y una segunda sustancia muy similar, una no se transforma simplemente en la otra, porque las dos formas están normalmente separadas por una «colina» o barrera energética. Consideremos esta analogía: si quisiéramos llevar un objeto de un lugar a otro, situado al mismo nivel pero al otro lado de una colina, tendríamos que subirlo hasta la cima, pero hacer eso requiere añadir alguna energía. Así pues, la mayoría de las reacciones químicas no ocurren porque existe lo que se denomina una *energía de activación* en el camino. Para añadir un átomo extra a nuestra sustancia química es necesario *acercarlo* lo suficiente para que puedan producirse algunas recombinaciones; entonces se quedará adherido. Pero si no podemos darle bastante energía para acercarlo lo suficiente, no llegará a la culminación, sino que se quedará sin llegar a la cima de la «colina» y volverá a bajar. Sin embargo, si pudiéramos tomar

literalmente las moléculas con nuestras manos y empujar y apartar los átomos para abrir un hueco hasta el nuevo átomo, y luego tapar el hueco de nuevo, habríamos encontrado otra vía, *alrededor* de la colina, que no requeriría energía extra y la reacción tendría lugar fácilmente. Ahora bien, *existen* realmente, en las células, moléculas *muy* grandes, mucho mayores que aquellas cuyos cambios hemos estado describiendo, que de un modo complicado mantienen a las moléculas más pequeñas en la forma precisa para que la reacción pueda ocurrir fácilmente. Estas cosas muy grandes y complicadas se denominan *enzimas.* (Inicialmente se denominaron fermentos, porque fueron originalmente descubiertos en la fermentación del azúcar. De hecho, algunas de las primeras reacciones del ciclo se descubrieron allí.) En presencia de una enzima la reacción continuará.



3.1 El ciclo de Krebs.

Una enzima está hecha de otra sustancia denominada *proteína.* Las enzimas son muy grandes y complicadas, y cada una es diferente de la otra, pues cada una de ellas está construida para controlar una determinada reacción. Los nombres de las enzimas están escritos junto a cada reacción en la figura 3.1. (A veces la misma enzima puede controlar dos reacciones.) Hacemos énfasis en que las propias enzimas no están implicadas directamente en la reacción. Ellas no cambian; simplemente llevan un átomo de un lugar a otro. Una vez hecho esto, la enzima está dispuesta para hacerlo con la siguiente molécula, como una máquina en una fábrica. Por supuesto, debe haber un suministro de ciertos átomos y un medio de desprenderse de otros átomos. Tomemos el hidrógeno, por ejemplo: existen enzimas que tienen unidades especiales que transportan el hidrógeno para todas las reacciones químicas. Por ejemplo, existen tres o cuatro enzimas reductoras de hidrógeno que se utilizan en diferentes lugares a

lo largo de nuestro ciclo completo. Es interesante que la maquinaria que libera parte del hidrógeno en un lugar tomará dicho hidrógeno y lo utilizará en algún otro lugar.

El aspecto más importante del ciclo de la figura 3.1 es la transformación de ADP en ATP (difosfato de adenosina en trifosfato de adenosina) debida a que una sustancia tiene una energía mucho mayor que la otra. De la misma forma que hay una «caja» en ciertas enzimas para transportar átomos de hidrógeno, existen «cajas» especiales para transportar *energía* en las que está implicado el grupo trifosfato. Así, el ATP tiene más energía que el ADP y, si el ciclo tiene lugar en una dirección, estamos produciendo moléculas que tienen energía extra y que pueden dar impulso a algún otro ciclo que *requiera* energía, por ejemplo la contracción de un músculo. El músculo no se contraerá a menos que haya ATP. Podemos tomar una fibra muscular, ponerla en agua y añadir ATP, y la fibra se contrae, transformando ATP en ADP si están presentes las enzimas correctas. De este modo, el sistema real consiste en la transformación ADP-ATP; en la oscuridad el ATP que ha sido almacenado durante el día se utiliza para recorrer el ciclo entero en sentido contrario. Ven ustedes que una enzima no se preocupa de la dirección en que marcha la reacción, pues si lo hiciera violaría una de las leyes de la física.

La física es de gran importancia en biología y otras ciencias por una razón adicional, que tiene que ver con las *técnicas experimentales.* De hecho, si no fuera por el gran desarrollo de la física experimental estas tablas bioquímicas no serían conocidas hoy. La razón es que la herramienta más útil de todas para analizar este sistema fantásticamente complejo consiste en *etiquetar* los átomos que se utilizan en las reacciones. Así, si pudiéramos introducir en el ciclo algún dióxido de carbono que tenga una «marca verde» encima, y luego medir dónde está la marca verde al cabo de tres segundos, y medirla otra vez al cabo de diez segundos, etc., podríamos rastrear el curso de las reacciones. ¿Cuáles son las «marcas verdes»? Son diferentes *isótopos.* Recordemos que las propiedades químicas de los átomos están determinadas por el número de *electrones, no* por la masa del núcleo. Pero, por ejemplo, en el carbono puede haber seis neutrones o siete neutrones, además de los seis protones que tienen todos los núcleos de carbono. Químicamente, los dos átomos C^{12} y C^{13} son iguales, pero difieren en peso y tienen propiedades nucleares diferentes, y por ello son distinguibles. Utilizando estos isótopos de pesos diferentes, o incluso isótopos radiactivos como el C^{14}, que proporcionan un medio más sensible para rastrear cantidades muy pequeñas, es posible seguir el curso de las reacciones.

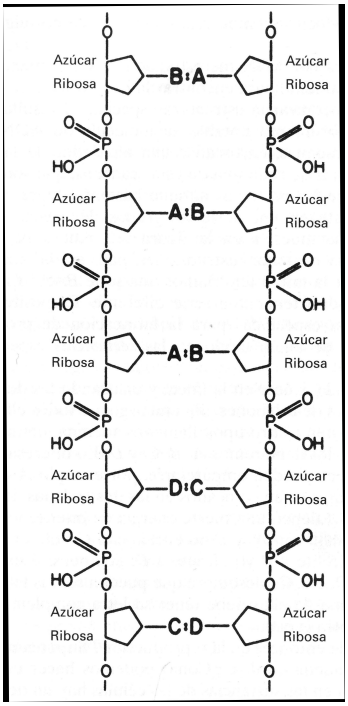
Volvamos ahora a la descripción de las enzimas y las proteínas. No todas las proteínas son enzimas, pero todas las enzimas son proteínas. Existen muchas proteínas, tales como las proteínas de los músculos, las proteínas estructurales que están, por ejemplo, en los cartílagos y el pelo, la piel, etc., que no son enzimas propiamente dichas. Sin embargo, las proteínas son unas sustancias muy características de la vida: en primer lugar, constituyen todas las enzimas, y en segundo lugar constituyen buena parte del resto del material viviente. Las proteínas tienen una estructura simple y muy interesante. Cada una de ellas es una serie, o cadena, de *aminoácidos* diferentes. Existen veinte aminoácidos distintos, y todos ellos pueden combinarse entre sí para formar cadenas en las que la columna vertebral es CO–NH, etc. Las proteínas no son otra cosa que cadenas de varios de estos veinte aminoácidos. Cada uno de los aminoácidos sirve probablemente para algún propósito concreto.

Algunos, por ejemplo, tienen un átomo de azufre en un determinado lugar; cuando dos átomos de azufre están en la misma proteína forman un enlace, es decir, se unen a la cadena siguiente en dos puntos y forman un lazo. Otras tienen átomos de oxígeno extra que las convierten en sustancias ácidas, otras tienen una característica básica. Algunas de ellas tienen grupos grandes que cuelgan de un extremo, de modo que ocupan mucho espacio. Uno de los aminoácidos, llamado prolina, no es realmente un aminoácido, sino un iminoácido. Hay una ligera diferencia, con el resultado de que, cuando la prolina está en la cadena, hay un codo en la misma. Si quisiéramos fabricar una proteína particular daríamos estas instrucciones: colóquese aquí uno de aquellos ganchos de azufre; a continuación añádase algo para ocupar espacio; únase entonces algo para poner un codo en la cadena. De este modo, obtendríamos una cadena de apariencia complicada, retorcida sobre sí misma y con cierta estructura compleja; esta es presumiblemente la manera en que se han hecho todas las diversas enzimas. Uno de los grandes triunfos de los tiempos recientes (a partir de 1960) fue el descubrimiento final de la disposición atómica espacial exacta de ciertas proteínas, que implican aproximadamente cincuenta y seis o sesenta aminoácidos en una hilera. Más de mil átomos (más cerca de dos mil, si contamos los átomos de hidrógeno) han sido localizados en una estructura compleja en dos proteínas. La primera fue la hemoglobina. Uno de los aspectos decepcionantes de este descubrimiento es que no podemos ver nada a partir de la estructura; no entendemos por qué funciona tal como lo hace. Por supuesto, este es el siguiente problema que hay que atacar.

Otro problema es: ¿cómo saben las enzimas lo que hay que hacer? Una mosca de ojos rojos hace una mosca bebé de ojos rojos, de modo que la información de la estructura global de las enzimas para hacer pigmento rojo debe ser transmitida de una mosca a la siguiente. Esto se hace mediante una sustancia que hay en el núcleo de la célula, y que no es una proteína, denominada ADN (abreviatura de ácido desoxirribonucleico). Esta es la sustancia clave que se transmite de una célula a otra (por ejemplo, las células del esperma consisten básicamente en ADN) y transporta la información sobre cómo hacer las enzimas. El ADN es el «plano». ¿Qué aspecto tiene el plano y cómo funciona? En primer lugar, el plano debe ser capaz de reproducirse a sí mismo. En segundo lugar, debe ser capaz de instruir a la proteína. Respecto a la reproducción, podríamos pensar que ésta procede como la reproducción celular. Las células sencillamente se hacen más grandes y luego se dividen por la mitad. ¿Sucederá entonces lo mismo con las moléculas de ADN, que se hacen demasiado grandes y se dividen por la mitad? ¡Ciertamente cada átomo no se hace más grande ni se divide por la mitad! No, es imposible reproducir una molécula salvo que sea por algún medio más astuto.

La estructura del ADN fue estudiada durante mucho tiempo, primero químicamente para encontrar la composición, y luego con rayos X para encontrar la estructura espacial. El resultado fue el siguiente descubrimiento notable: la molécula de ADN consiste en un par de cadenas, enroscadas una alrededor de la otra. La columna vertebral de cada una de estas cadenas, que son análogas a las cadenas de las proteínas aunque bastante diferentes químicamente, consiste en una serie de grupos de azúcares y fosfatos, tal como se muestra en la figura 3.2. Ahora vemos cómo puede la cadena contener instrucciones, pues si pudiera dividirse esta cadena por la mitad tendríamos una serie *BAAD*C… y cada ser viviente podría tener una serie diferente. Es

posible así que las *instrucciones* específicas para la fabricación de proteínas estén contenidas de algún modo en las *secuencias* específicas del ADN.



3.2 Diagrama esquemático del ADN

Unidos a cada azúcar en la línea, y enlazando las dos cadenas, hay ciertos pares de eslabones. Sin embargo, no todos ellos son del mismo tipo; existen cuatro tipos, llamados adenina, timina, citosina y guanina, pero los llamaremos *A*, *B, C, y D. Lo* interesante es que sólo ciertos pares pueden emparejarse, por ejemplo *A* con *B* y *C* con *D.* Estos pares están colocados en las dos cadenas de tal modo que «encajan», y tienen una fuerte energía de interacción. Sin embargo, *C* no encaja con *A, y B* no encaja con C; sólo encajan ciertas parejas, *A* frente a *B y* C frente a *D.* Así pues, si uno es *C*, el otro debe ser *D,* etc. Cualesquiera que puedan ser las letras en una cadena, cada una de ellas debe tener su letra complementaria específica en la otra cadena.

¿Qué sucede entonces en la reproducción? Supongamos que dividimos esta cadena en dos. ¿Cómo podemos hacer otra exactamente igual? Si en las sustancias de las células hay un departamento de fabricación que aporta fosfato, azúcar, y unidades *A, B, C, D* que no están conectadas en una cadena, las únicas que se unirán a nuestra cadena escindida serán las correctas, las complementarias de *BAAD*C… , a saber, *ABBCD…* Así pues, lo que sucede es que la cadena se divide por la mitad durante la división celular, y una mitad va finalmente a una célula y la otra mitad termina en la otra célula; cuando se han separado, cada media cadena construye una nueva cadena complementaria.

Ahora viene la pregunta, ¿cómo queda determinada exactamente la disposición de los aminoácidos en la proteína por el orden de las unidades A, B, C y D? Este es el problema central todavía no resuelto en la biología. No obstante, las primeras claves, o fragmentos de información, son estas: hay en la célula minúsculas partículas llamadas microsomas, y se sabe ahora que es en este lugar donde se fabrican las proteínas. Pero

los microsomas no están en el núcleo, que es donde está el ADN y sus instrucciones. Parece que falta algo. Sin embargo, se sabe también que fragmentos de pequeñas moléculas salen del ADN, no tan largos como la gran molécula de ADN que transporta toda la información, sino como una pequeña sección de ella. Esto se denomina ARN, pero esto no es esencial. Es una especie de copia del ADN, una copia abreviada. El ARN, que de algún modo lleva un mensaje acerca de qué tipo de proteína hacer, llega al microsoma; esto es conocido. Cuando está allí, la proteína es sintetizada en el microsoma. Esto también es conocido. Sin embargo, los detalles de cómo entran los aminoácidos y se ordenan de acuerdo con un código que está en el ADN son todavía desconocidos. No sabemos cómo leerlo. Si conociésemos, por ejemplo, la «secuencia» A, B, C, C, A, no podríamos decirles qué proteína iba a ser fabricada.

Ciertamente ninguna disciplina o campo está haciendo actualmente más progresos en tantos frentes como la biología, y si tuviéramos que nombrar la hipótesis más poderosa de todas, que nos lleva a perseverar en el intento de comprender la vida, tal hipótesis es que *todas las cosas están hechas de átomos,* y que todo lo que hacen los seres vivos puede entenderse en términos de las agitaciones y oscilaciones de los átomos.

Astronomía

En esta rápida explicación del mundo en conjunto, debemos dirigirnos ahora a la astronomía. La astronomía es más vieja que la física. De hecho, la astronomía puso en marcha la física al mostrar la bella simplicidad del movimiento de las estrellas y los planetas, cuya comprensión constituyó el *principio* de la física. Pero el descubrimiento más notable de toda la astronomía es que *las estrellas están hechas de átomos del mismo tipo que los de la Tierra*[2]. ¿Cómo se hizo? Los átomos liberan luz que tiene frecuencias definidas, algo parecido al timbre de un instrumento musical que tiene unos tonos o frecuencias de sonido definidos.

Cuando estamos oyendo diferentes tonos podemos separarlos, pero cuando miramos con nuestros ojos una mezcla de colores no podemos decir de qué partes está compuesta porque el ojo no discrimina tan bien como el oído en este aspecto. Sin embargo, con un espectroscopio *podemos* analizar las frecuencias de las ondas luminosas y de este modo podemos ver los propios tonos de los átomos que hay en

[2] ¡Estoy yendo muy rápido! ¡Cuánto contenido hay en cada frase de esta breve historia! «Las estrellas están hechas de átomos del mismo tipo que los de la Tierra.» Suelo escoger temas como este para dar alguna conferencia. Los poetas dicen que la ciencia despoja de belleza a las estrellas, meros montones de átomos de gas. Nada es «mero». También yo puedo ver las estrellas en una noche clara, y sentirlas. Pero ¿veo menos o veo más? La vastedad de los cielos extiende mi imaginación: atado a este carrusel mi ojo puede captar luz de hace un millón de años. En esta vasta estructura —de la que yo formo parte— tal vez la materia que me constituye fue vomitada desde alguna estrella olvidada, del mismo modo otra está siendo vomitada allí. O vemos las estrellas con el gran ojo de Palomar, alejándose rápidamente de un punto de partida común en el que quizá estaban juntas. ¿Cuál es la estructura, o el significado, o el porqué? Al misterio no le perjudica que se sepa algo sobre él. ¡Pues la verdad es mucho más maravillosa que lo que cualquier artista del pasado pudo imaginar! ¿Por qué los poetas del presente no hablan de ello? ¿Qué clase de hombres son los poetas que pueden hablar de Júpiter como si fuera un hombre, pero deben guardar silencio si es una inmensa esfera de metano y amoniaco en rotación?

diferentes estrellas. De hecho, dos de los elementos químicos fueron descubiertos en una estrella antes de que se descubrieran en la Tierra. El helio fue descubierto en el Sol, de ahí su nombre, y el tecnecio fue descubierto en ciertas estrellas frías. Esto nos permite, por supuesto, entrar en la comprensión de las estrellas, ya que están hechas de los mismos tipos de átomos que hay en la Tierra. Ahora sabemos muchas cosas sobre los átomos, especialmente respecto a su comportamiento en condiciones de alta temperatura pero no muy alta densidad, de modo que podemos analizar el comportamiento de la sustancia estelar mediante la mecánica estadística. Aunque no podemos reproducir estas condiciones en la Tierra, sí podemos decir a menudo, utilizando las leyes físicas básicas, lo que va a suceder exactamente, o con mucha aproximación. Así es como la física ayuda a la astronomía. Por extraño que pueda parecer, entendemos la distribución de materia en el interior del Sol mucho mejor de lo que entendemos el interior de la Tierra. Lo que sucede *dentro de* una estrella se entiende mejor de lo que cabría imaginar ante la dificultad de tener que mirar un pequeño punto luminoso a través de un telescopio, y ello se debe a que podemos *calcular* lo que harían los átomos en las estrellas en la mayoría de las circunstancias.

Uno de los descubrimientos más impresionantes fue el origen de la energía de las estrellas, que hace que sigan quemándose. Uno de los hombres que lo descubrió estaba con su novia la noche siguiente al momento en que comprendió que en las estrellas deben tener lugar *reacciones nucleares* para hacer que brillen. Ella dijo: «¡Mira qué bellas brillan las estrellas!». Él dijo: «Sí, y en este momento yo soy el único hombre en el mundo que sabe *por qué* brillan». Ella simplemente le sonrió. No estaba impresionada por estar con el único hombre que, en ese instante, sabía por qué brillan las estrellas. Bien, es triste estar solo, pero así son las cosas en este mundo.

Es la «combustión» nuclear del hidrógeno la que proporciona la energía del Sol; el hidrógeno se transforma en helio. Más aún, la fabricación de los diversos elementos químicos tiene lugar, en definitiva, en los centros de las estrellas a partir del hidrógeno. La materia de la que *nosotros* estamos hechos fue «cocinada» alguna vez en una estrella y luego escupida. ¿Cómo lo sabemos? Porque hay una clave. La proporción de los diferentes isótopos cuánto C^{12}, cuánto C^{13}, etc. es algo que permanece invariable en las reacciones *químicas,* porque las reacciones químicas son exactamente las mismas para los dos. Las proporciones son simplemente el resultado de reacciones *nucleares.* Mirando las proporciones de los isótopos en el rescoldo frío y muerto que somos nosotros, podemos descubrir cómo era el *horno* en el que se formó la materia de la que estamos hechos. Este horno era como las estrellas, y por ello es muy probable que nuestros elementos fueran «hechos» en las estrellas y escupidos en las explosiones que llamamos novas y supernovas. La astronomía está tan cerca de la física que estudiaremos muchas cosas relativas a la astronomía a medida que sigamos adelante.

Geología

Dirijámonos ahora a lo que se denominan *ciencias de la* Tierra, o *geología*. En primer lugar, la meteorología y la predicción del tiempo. Por supuesto, los *instrumentos* de la

meteorología son instrumentos físicos, y el desarrollo de la física experimental hizo posibles estos instrumentos, como se explicó antes. Sin embargo, la teoría de la meteorología nunca ha sido desarrollada de forma satisfactoria por los físicos. «Bien dirán ustedes—, no hay nada más que aire, y conocemos las ecuaciones de los movimientos del aire.» Sí, las conocemos. «Entonces, si conocemos la situación del aire hoy, ¿por qué no podemos calcular la situación del aire mañana?» En primer lugar, no sabemos *realmente* cuál es la situación hoy, porque el aire está moviéndose y girando en todas partes. Resulta ser muy sensible, e incluso inestable. Si ustedes han visto alguna vez el agua que circula suavemente en una presa, y luego se convierte en un gran número de pegotes y gotas cuando cae, ustedes entenderán lo que quiero decir por inestable. Ustedes conocen la situación del agua antes de que llegue al aliviadero: es perfectamente uniforme. Pero en el momento que comienza a caer, ¿dónde empiezan a formarse las gotas? ¿Qué es lo que determina el tamaño de las gotas y dónde estarán? Esto no se conoce, porque el agua es inestable. Incluso una masa de aire en movimiento suave se transforma en vórtices y remolinos complejos cuando rebasa una montaña. En muchos campos encontramos esta situación de *flujo turbulento* que no podemos analizar hoy. ¡Dejemos rápidamente el tema de la predicción del tiempo y discutamos la geología!

La pregunta básica de la geología es: ¿qué hace que la Tierra sea como es? Los procesos más obvios están delante de sus propios ojos: los procesos de erosión de los ríos, los vientos, etc. Son bastante fáciles de entender, pero por cada cantidad de erosión hay una cantidad equivalente de algún otro proceso. Las montañas no son hoy más bajas, en promedio, de lo que eran en el pasado. Debe haber procesos de formación-de-montañas. Ustedes descubrirán, si estudian geología, que hay procesos de formación de montañas y vulcanismo, que nadie entiende pero que es la mitad de la geología. El fenómeno de los volcanes no es realmente entendido. No hay una comprensión definitiva de lo que da lugar a un terremoto. Se entiende que si algo empuja a alguna otra cosa, la aparta y la arrastra, esto es correcto. Pero ¿qué es lo que empuja y por qué? La teoría es que hay corrientes dentro de la Tierra corrientes circulatorias, debidas a la diferencia de temperaturas en el interior y el exterior que, en su movimiento, arrastran lentamente a la superficie. Entonces, si hay dos circulaciones opuestas próximas, la materia se acumulará en la región donde ambas se encuentran y se formarán cinturones de montañas que están en condiciones de mucha tensión, y producen así volcanes y terremotos.

¿Qué pasa en el interior de la Tierra? Se conoce mucho sobre la velocidad de las ondas de un terremoto a través de la Tierra y sobre la distribución de la densidad en la Tierra. Sin embargo, los físicos han sido incapaces de obtener una buena teoría acerca de la densidad que debería tener una sustancia a las presiones que cabría esperar en el centro de la Tierra. En otras palabras, no podemos calcular muy bien las propiedades de la materia en estas circunstancias. Sabemos mucho menos de la Tierra de lo que sabemos sobre las condiciones de la materia en las estrellas. Las matemáticas implicadas parecen demasiado difíciles, por ahora. Pero quizá no pase mucho tiempo antes de que alguien se dé cuenta de que es un problema importante, y realmente lo resuelva. El otro aspecto, por supuesto, es que incluso si conociéramos la densidad, no podríamos concebir las corrientes circulatorias. Ni podemos calcular realmente las

propiedades de rocas a alta presión. No podemos decir con qué rapidez «cederían» las rocas; todo esto debe ser estudiado a partir de experimentos.

Psicología

A continuación, vamos a considerar la ciencia de la *psicología*. Dicho sea de paso, el psicoanálisis no es una ciencia: como mucho es un procedimiento médico, y quizá algo más parecido a la brujería. Tiene una teoría sobre las causas de la enfermedad: montones de «espíritus» diferentes, etc. El hechicero tiene la teoría de que una enfermedad como el paludismo es causada por un espíritu que está en aire; no se cura agitando una serpiente, pero la quinina sirve para el paludismo. Por esto, si ustedes se ponen enfermos yo les aconsejaría que vayan al hechicero porque él es la persona de la tribu que sabe más sobre la enfermedad; por otra parte, su conocimiento no es ciencia. El psicoanálisis no ha sido puesto a prueba cuidadosamente por experimentos, y no hay forma de encontrar una lista del número de casos en el que funciona, el número de casos en los que no funciona, etc.

Las otras ramas de la psicología, que incluyen cosas como la psicología de la sensación qué sucede en el ojo, y qué sucede en el cerebro son, si ustedes quieren, menos interesantes. Pero se han hecho algunos progresos pequeños aunque reales en su estudio. Uno de los problemas técnicos más interesantes puede o no puede ser llamado psicología. El problema central de la mente, si ustedes quieren, o del sistema nervioso, es este: cuando un animal aprende algo, puede hacer algo diferente de lo que podía hacer antes y, si está hecho de átomos, sus células cerebrales deben haber cambiado también. *¿De qué manera es diferente?* No sabemos dónde mirar, o qué buscar, cuando algo es memorizado. No sabemos lo que significa, o qué cambio hay en el sistema nervioso, cuando se aprende algo. Este es un problema muy importante que no ha sido resuelto en absoluto. Suponiendo, sin embargo, que existe algún tipo de memoria, el cerebro es una masa tan enorme de cables interconectados y nervios que probablemente no pueda ser analizado de una forma directa. Hay una analogía con los ordenadores y elementos de computación, en cuanto que también tienen un montón de líneas, y tienen algún tipo de elemento análogo quizá a la sinapsis o conexión de un nervio con otro. Este es un tema muy interesante que no tenemos tiempo de discutir más: la relación entre pensamiento y máquinas computadoras. Debe entenderse, por supuesto, que este tema nos dirá muy poco sobre las complejidades reales del comportamiento humano ordinario. Los seres humanos son muy diferentes. Necesitaríamos mucho tiempo antes de llegar a ello. Debemos empezar mucho más atrás. Si pudiéramos siquiera concebir cómo funciona un *perro,* habríamos llegado muy lejos. Los perros son más fáciles de entender, pero nadie sabe todavía cómo funciona un perro.

¿Cómo se llegó a ello?

Para que la física sea útil a otras ciencias de un modo *teórico*, además de por la invención de instrumentos, la ciencia en cuestión debe suministrar al físico una descripción del objeto en el lenguaje del físico. Se puede preguntar «¿porqué salta una rana?», y el físico no puede responder. Si le dicen lo que es una rana, que tiene tantas moléculas, hay un nervio aquí, etc., eso es diferente. Si nos dicen, más o menos, cómo es la Tierra o las estrellas, entonces podemos trabajar. Para que una teoría física sea útil debemos saber dónde están situados los átomos. Para entender la química debemos saber exactamente qué átomos están presentes, pues de otra forma no podemos analizarla. Esto no es más que una limitación, por supuesto.

Hay otro tipo de problemas en las ciencias hermanas que no se dan en la física; podríamos llamarlo, a falta de un término mejor, la cuestión histórica. ¿Cómo llegó a ser así? Si entendemos todo sobre la biología, querremos saber cómo llegaron a ser todas las cosas que hay en la Tierra. Existe la teoría de la evolución, una parte importante de la biología. En geología no sólo queremos saber cómo se forman las montañas, sino cómo se formó toda la Tierra en el principio, el origen del Sistema Solar, etc. Eso, por supuesto, nos lleva a querer saber qué tipo de materia había en el mundo. ¿Cómo evolucionaron las estrellas? ¿Cuáles eran las condiciones iniciales? Este es el problema de la historia astronómica. Se ha descubierto mucho acerca de la formación de las estrellas, la formación de los elementos de los que estamos hechos, e incluso algo sobre el origen del universo.

No hay cuestión histórica por estudiar en la física en el momento actual. No nos planteamos una pregunta: «Aquí están las leyes de la física, ¿cómo llegaron a ser así?». No imaginamos, por el momento, que las leyes de la física estén cambiando de algún modo con el tiempo, que fueran diferentes en el pasado de lo que son ahora. Por supuesto, *podrían* serlo, y en el momento en que descubramos que lo son, la cuestión histórica de la física será tratada con el resto de la historia del universo, y entonces el físico estará hablando de los mismos problemas que los astrónomos, los geólogos y los biólogos.

Finalmente, existe un problema físico que es común a muchos campos, que es muy viejo y que no ha sido resuelto. No es el problema de encontrar nuevas partículas fundamentales, sino algo que se viene arrastrando desde hace mucho tiempo, durante un centenar de años. Nadie en la física ha sido realmente capaz de analizarlo de forma matemáticamente satisfactoria a pesar de su importancia para las ciencias hermanas. Es el análisis de los fluidos cir*culantes o turbulentos. Si* observamos la evolución de una estrella llega un momento en el que podemos deducir que va a empezar la convección, y a partir de entonces ya no podemos deducir qué sucederá. Unos millones de años más tarde la estrella explota, pero no podemos concebir la razón. No podemos analizar el tiempo meteorológico. No sabemos la pauta de los movimientos que debería haber dentro de la Tierra. La forma más simple del problema consiste en tomar un tubo muy largo y hacer pasar a través de él agua a gran velocidad. Preguntamos: ¿cuánta presión se necesita para impulsar una cantidad dada de agua a través de dicho tubo? Nadie puede analizarlo a partir de primeros principios y las propiedades del agua. Si el agua fluye muy lentamente, o si utilizamos algo muy viscoso como la miel, entonces lo podemos hacer bastante bien. Ustedes encontrarán eso en sus libros de texto. Lo que

realmente no podemos hacer es tratar el agua real y húmeda que fluye a través de un tubo. Este es el problema central que deberíamos resolver un día, y que no hemos hecho.

Un poeta dijo en cierta ocasión: «Todo el universo está en un vaso de vino». Probablemente nunca sabremos en qué sentido lo decía, pues los poetas no escriben para ser entendidos. Pero es cierto que si miramos un vaso de vino suficientemente cerca, vemos el universo entero. Están los objetos de la física: el líquido que se mueve y que se evapora dependiendo del viento y del clima, los reflejos en el vaso, y nuestra imaginación añade los átomos. El vaso es una destilación de las rocas de la Tierra, y en su composición vemos los secretos de la edad del universo y la evolución de las estrellas. ¿Qué extraña ordenación de elementos químicos hay en el vino? ¿Cómo llegaron a formarse? Existen los fermentos, las enzimas, los substratos y los productos. Allí en el vino se encuentra la gran generalización: toda la vida es fermentación. Nadie puede descubrir la química del vino sin descubrir, como hizo Louis Pasteur, la causa de muchas enfermedades. ¡Qué vivo es el color, que impone su existencia en la consciencia de quien lo observa! Aunque, por conveniencia, nuestras pequeñas mentes dividan este vaso de vino, este universo, en partes física, biología, geología, astronomía, psicología y demás—, es bueno recordar que ¡la naturaleza no lo sabe! Así que volvamos a situarlo todo en su sitio, sin olvidar en última instancia para qué sirve. Permitámonos un placer final: ¡bebámoslo y olvidémoslo todo!

— 4 —

La conservación de la energía

¿Qué es la energía?

Una vez acabada nuestra descripción de las cosas en general, iniciamos en este capítulo nuestro estudio más detallado de los diferentes aspectos de la física. Para ilustrar las ideas y el tipo de razonamientos que podrían utilizarse en física teórica vamos a examinar ahora una de las leyes más básicas de la física, la ley de conservación de la energía.

Hay un hecho, o si ustedes prefieren, una *ley,* que gobierna todos los fenómenos naturales conocidos hasta la fecha. No hay excepción conocida a esta ley: es exacta hasta donde sabemos. Se denomina ley de *conservación de la energía.* Establece que hay una cierta magnitud, que llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que sufre la naturaleza. Esta es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático; dice que hay una magnitud numérica que no cambia cuando algo sucede. No es una descripción de un mecanismo, o algo concreto; se trata sólo del extraño hecho de que podemos calcular cierto número, y que si lo volvemos a calcular después de haber estado observando a la naturaleza haciendo sus trucos, este número es el mismo. (Algo parecido al alfil en una casilla blanca que, después de varias jugadas cuyos detalles se desconocen—, sigue estando en una casilla blanca. Es una ley de este tipo.) Puesto que es una idea abstracta, ilustraremos su significado con una analogía.

Imaginemos a un niño, quizá «Daniel el Travieso», que tiene unos bloques que son absolutamente indestructibles y no pueden dividirse en piezas. Cada uno de ellos es igual que los otros. Supongamos que tiene 28 bloques. Su madre le ha dejado por la mañana con sus 28 bloques en una habitación. Al caer la tarde, sintiendo curiosidad, ella cuenta los bloques con mucho cuidado y descubre una ley fenoménica: haga él lo que haga con los bloques, ¡siempre sigue habiendo 28! Esto continúa durante varios días, hasta que un día sólo hay 27 bloques; pero tras una pequeña búsqueda la madre

encuentra que hay uno bajo la alfombra; ella debe mirar en todas partes para estar segura de que el número de bloques no ha variado. Un día, sin embargo, el número parece haber cambiado: hay sólo 26 bloques. Una investigación cuidadosa pone de manifiesto que la ventana estaba abierta, y al buscar fuera aparecen los otros dos bloques. Otro día, un recuento cuidadoso indica que ¡hay 30 bloques! Esto provoca una consternación considerable, hasta que la madre cae en la cuenta de que Bruce vino de visita trayendo sus propios bloques, y dejó algunos en casa de Daniel. Una vez que ella se ha deshecho de los bloques extra, cierra la ventana, no deja que entre Bruce, y entonces todo sigue correcto… hasta que en cierto momento cuenta y encuentra sólo 25 bloques. Sin embargo, hay una caja en la habitación, una caja de juguetes; la madre va a abrir la caja de juguetes pero el niño dice: «No, no abras mi caja de juguetes», y chilla. La madre tiene prohibido abrir la caja de juguetes. Como es extraordinariamente curiosa y algo ingeniosa, ¡ella inventa una treta! Sabe que cada bloque pesa 100 gramos, así que pesa la caja en un instante en que ella ve 28 bloques y el peso de la caja es de 600 gramos. Cada nueva ocasión en que quiere hacer la comprobación, pesa de nuevo la caja, resta 600 gramos y lo divide por 100. Descubre lo siguiente:

Número de bloques vistos +
(peso de la caja – 600 g) / 100 g =
constante (4.1)

En otras ocasiones parece que hay algunas nuevas desviaciones, pero un cuidadoso estudio indica que el nivel del agua sucia de la bañera está cambiando. El niño está arrojando bloques al agua y la madre no puede verlos porque el agua está muy sucia, pero puede descubrir cuántos bloques hay en el agua añadiendo otro término a su fórmula. Puesto que la altura original del agua era de 15 centímetros y cada bloque eleva el agua medio centímetro, esta nueva fórmula sería:

Número de bloques vistos +
(peso de la caja – 600 g) / 100 g +
(altura del agua – 15 cm / 0,5 cm =
constante (4.2)

A medida que aumenta la complejidad de su mundo, la madre encuentra toda una serie de términos que representan formas de calcular cuántos bloques hay en los lugares donde ella no puede mirar. Como resultado, encuentra una fórmula compleja, una magnitud que *debe ser calculada,* que siempre tiene el mismo valor.

¿Qué analogía hay entre esta historia y la conservación de la energía? El aspecto más notable que debe abstraerse de esta imagen es que *no hay bloques.* Quitemos los primeros términos en 4.1 y 4.2 y nos encontraremos calculando cosas más o menos abstractas. La analogía abarca los puntos siguientes. En primer lugar, cuando estamos calculando la energía, a veces parte de ella sale del sistema y se pierde, o a veces algo de ella entra. Para verificar la conservación de la energía debemos tener cuidado en no introducir ni quitar nada. En segundo lugar, la energía tiene muchas *formas diferentes,* y hay una fórmula para cada una. Estas son: energía gravitatoria, energía cinética,

energía térmica, energía elástica, energía eléctrica, energía química, energía radiante, energía nuclear, energía de masa. Si sumamos las fórmulas para cada una de estas contribuciones, la suma no cambiará, salvo que entre o salga energía.

Es importante darse cuenta de que en la física actual no tenemos conocimiento de qué *es* la energía. No tenemos una imagen en la que la energía aparezca en pequeñas gotas de un tamaño definido. *No* es así. Sin embargo, existen fórmulas para calcular cierta magnitud numérica, y cuando las sumamos dan «28»: siempre el mismo número. Es algo abstracto en cuanto que no nos dice el mecanismo o las razones para las diversas fórmulas.

Energía potencial gravitatoria

La conservación de la energía sólo puede entenderse si disponemos de las fórmulas para todas sus formas. Quiero discutir la fórmula para la energía gravitatoria cerca de la superficie de la Tierra, y quiero derivar esta fórmula de una manera que no tiene nada que ver con la historia, sino que es simplemente una línea de razonamiento concebida para esta lección concreta a fin de ofrecerles una ilustración del hecho notable de que muchas cosas acerca de la naturaleza pueden extraerse de unos pocos hechos y por razonamiento riguroso. Es una ilustración del tipo de trabajo en que se ven envueltos los físicos teóricos. Está estructurado siguiendo un excelente razonamiento del señor Carnot sobre la eficiencia de las máquinas de vapor[3].

Consideremos máquinas para levantar pesos: máquinas que tienen la propiedad de que levantan un peso mediante el descenso de un segundo peso. Hagamos también una hipótesis: que *no hay nada semejante a un movimiento perpetuo* en estas máquinas de levantar pesos. (De hecho, el que no hay movimiento perpetuo en absoluto es un enunciado general de la ley de la conservación de la energía.) Debemos tener cuidado al definir el movimiento perpetuo. Hagámoslo, en primer lugar, para las máquinas de levantar pesos. Si, una vez que hemos elevado y bajado muchos pesos y restituido la máquina a la condición original, encontramos que el resultado neto consiste en haber *levantado un peso,* entonces tenemos una máquina de movimiento perpetuo porque podemos utilizar dicho peso levantado para mover alguna otra cosa. Esto es, *siempre y cuando* la máquina que levantó el peso sea devuelta a su *condición original* exacta, y que además sea completamente *autocontenida:* que no haya recibido la energía para levantar el peso de alguna fuente externa, como los bloques de Bruce.

Una máquina de levantar pesos muy sencilla se muestra en la figura 4.3. Esta máquina levanta pesos de tres unidades de «fuerza». Colocamos tres unidades en un plato de una balanza, y una unidad en el otro plato. Sin embargo, para hacer que realmente funcione debemos quitar un peso pequeño del plato izquierdo. Recíprocamente, podríamos levantar un peso de una unidad bajando un peso de tres unidades si hacemos una pequeña trampa quitando un pequeño peso del otro plato. Por supuesto, nos damos cuenta de que en cualquier máquina de levantar pesos *real*

[3] Nuestro interés aquí no es tanto el resultado (4.3), que de hecho ustedes quizá ya conozcan, como la posibilidad de llegar al mismo mediante razonamiento teórico.

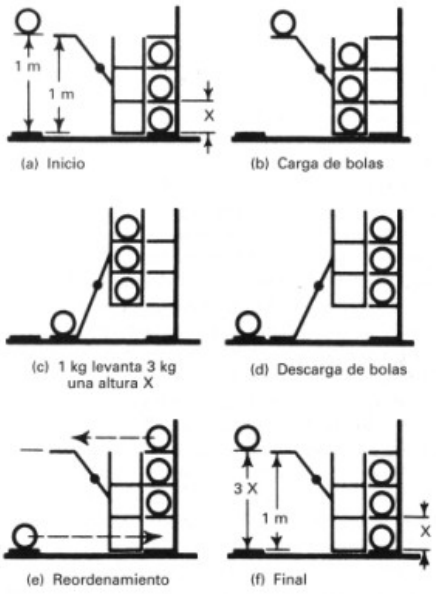
debemos añadir algo extra para hacerla funcionar. Pasaremos esto por alto, *por el momento.* Las máquinas ideales, aunque no existen, no requieren nada extra. Una máquina que realmente usamos puede ser, en cierto modo, *casi* reversible: es decir, si levantásemos un peso de tres bajando un peso de uno, entonces también levantaríamos la misma altura el peso de uno bajando el peso de tres.

4.3 Máquina simple para levantar pesos.

Imaginemos que hay dos clases de máquinas, las que no son reversibles, que incluyen todas las máquinas reales, y las que son reversibles, que por supuesto no son realmente alcanzables por muy cuidadosos que seamos en nuestro diseño de los engranajes, brazos, etc. Supondremos, sin embargo, que existe tal cosa una máquina reversible que hace descender una unidad de peso (un kilo o cualquier otra unidad) una unidad de distancia, y al mismo tiempo levanta un peso de tres unidades. Llamemos Máquina A a esta máquina reversible. Supongamos que esta máquina reversible particular levanta el peso de tres unidades una distancia *X*. Supongamos además que tenemos otra máquina, la Máquina B, que no es necesariamente reversible, que también hace descender un peso unidad una unidad de distancia pero que eleva tres unidades de peso a una distancia *Y*. Podemos ahora probar que *Y* no está más alto que *X*; es decir, es imposible construir una máquina que levante un peso a *una altura mayor* que la que sería levantado por una máquina reversible. Veamos por qué. Supongamos que *Y* fuera mayor que *X*. Tomemos un peso de una unidad y hagámoslo descender una altura unidad con la Máquina B, lo que hace que se eleve el peso de tres unidades a una distancia *Y*. Entonces podríamos bajar el peso desde *Y* hasta *X*, *obteniendo potencia libre, y* utilizar luego la Máquina A reversible, funcionando al revés, para hacer descender el peso de tres unidades una distancia *X* y elevar el peso de una unidad a una altura unidad. ¡Esto volvería a situar el peso de una unidad donde estaba antes, y dejaría ambas máquinas listas para ser utilizadas de nuevo! Tendríamos entonces movimiento perpetuo si *Y* estuviera más alto que *X*, pero habíamos supuesto que el movimiento perpetuo era imposible. Con estas hipótesis deducimos que *Y no está más alto que X,* de modo que, de todas las máquinas que pueden ser diseñadas, la máquina reversible es la mejor.

Podemos ver también que todas las máquinas reversibles deben levantar el peso *exactamente a la misma altura.* Supongamos que B fuese también realmente reversible. El argumento de que *Y* no está más alto que *X* sigue siendo, por supuesto, igual de bueno que lo era antes, pero también podemos seguir nuestro argumento al revés, utilizando las máquinas en el orden contrario, y probar que *X no está más alto que Y.* Esta es una observación muy notable porque nos permite analizar la altura a la que diferentes máquinas van a levantar algo *sin mirar el mecanismo interior.* Inmediatamente sabemos que si alguien construye un sistema de palancas enormemente elaborado que levanta tres unidades de peso una cierta distancia al

tiempo que hace descender una unidad de peso en una distancia unidad, y lo comparamos con una balanza simple que hace lo mismo y es fundamentalmente reversible, su máquina no levantará más alto, sino probablemente a menos altura. Si su máquina es reversible, sabemos también exactamente a *qué* altura levantará. Para resumir: cualquier máquina reversible, independientemente de cómo opere, que baja un kilogramo un metro y con ello eleva un peso de tres kilogramos, lo eleva siempre la misma distancia, *X*. Esta es evidentemente una ley universal de gran utilidad. La siguiente pregunta es, por supuesto, ¿cuánto vale *X*?



4.4 Una máquina reversible.

Supongamos que tenemos una máquina reversible que va a levantar esta distancia *X*, con la misma proporción de pesos tres a uno. Coloquemos tres bolas en una estantería fija, como se muestra en la figura 4.4. Una bola se mantiene en una plataforma a una distancia de un metro sobre el nivel del suelo. La máquina puede levantar tres bolas, haciendo descender una bola una distancia 1. Ahora bien, hemos dispuesto que la estantería móvil que sostiene las tres bolas tiene un suelo y dos baldas más, exactamente espaciadas una distancia *X*, y, además, que las baldas de la estantería fija también están espaciadas una distancia *X*, (a). En primer lugar hacemos rodar las bolas horizontalmente desde la estantería fija a las baldas de la estantería móvil, (b), y supongamos que esto no necesita energía porque no cambiamos la altura. Entonces entra en acción la máquina reversible: baja la bola individual al suelo y levanta la estantería móvil una distancia *X*, (c). La estantería móvil está dispuesta ingeniosamente de modo que dichas bolas están de nuevo niveladas con las baldas fijas. Entonces descargamos las bolas de la estantería móvil en la fija, (d); habiendo descargado las bolas, podemos devolver la máquina a su situación original. Ahora tenemos tres bolas en las tres baldas superiores y una bola en el suelo. Pero lo curioso es que, en cierto modo, no hemos levantado dos de ellas en absoluto porque, después de todo, antes ya había bolas en las baldas 2 y 3. El efecto neto resultante ha sido el de levantar *una bola* a una distancia 3*X*. Ahora bien, si 3*X* excediera de un metro, podríamos *bajar* la bola para devolver la máquina a la situación inicial, (f), y podríamos

volver a poner en marcha el aparato. Por lo tanto, 3*X* no puede ser mayor que un metro, pues si lo fuera podríamos tener movimiento perpetuo. Análogamente, podemos probar que *un metro no puede ser mayor que 3X* haciendo que toda la máquina funcione al revés, puesto que es una máquina reversible. Por lo tanto, 3*X* no es *ni mayor ni menor que un metro,* y descubrimos así, mediante puro razonamiento, la ley según la cual *X* = 1/3 de metro. La generalización es clara: un kilogramo desciende una cierta distancia al operar una máquina reversible; luego la máquina puede elevar p kilogramos a esta misma distancia dividida por p. Otra forma de poner el resultado es que tres kilogramos multiplicado por la altura elevada, que en nuestro problema era *X*, es igual a un kilogramo multiplicado por la distancia descendida, que es un metro en este caso. Si tomamos todos los pesos y los multiplicamos por las alturas a las que están inicialmente sobre el nivel del suelo, dejamos operar la máquina, y luego volvemos a multiplicar todos los pesos por todas las nuevas alturas, *no habrá cambio.* (Tenemos que generalizar el ejemplo en el que movíamos sólo un peso al caso en el que, cuando bajamos uno, elevamos varios pesos diferentes, pero esto es fácil.)

La suma de los productos de los pesos por sus alturas se denomina *energía potencial gravitatoria:* es la energía que tiene un objeto debido a su posición en el espacio con respecto a la Tierra. Así, la fórmula para la energía gravitatoria, siempre que no estemos demasiado lejos de la Tierra (la fuerza se debilita a medida que subimos más alto) es

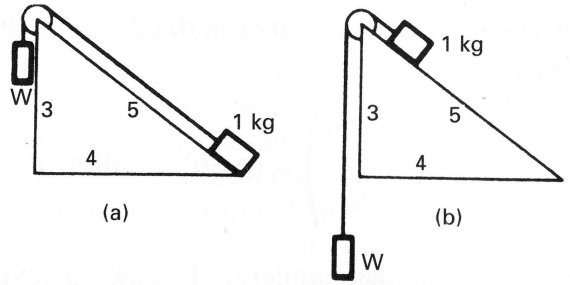
Energía potencial gravitatoria de un objeto = peso x altura (4.5)

Esta es una bella línea de razonamiento. El único problema es que quizá no sea verdadera. (Después de todo, la naturaleza no *tiene* que ir a la par con nuestro razonamiento.) Por ejemplo, quizá el movimiento perpetuo sea de hecho posible. Algunas de las hipótesis pueden ser falsas, o quizá hayamos cometido un error en el razonamiento, de modo que siempre es necesario comprobarlo. De hecho, *experimentalmente resulta* ser verdadero.

El nombre genérico de la energía que tiene que ver con la posición con respecto a alguna otra cosa se denomina energía *potencial.* En este caso particular, por supuesto, la llamamos *energía potencial gravitatoria.* Si en lugar de trabajar contra fuerzas gravitatorias es contra fuerzas eléctricas contra las que estamos trabajando, si estamos «elevando» cargas alejándolas de otras cargas mediante un montón de palancas, entonces la energía contenida se denomina *energía potencial eléctrica.* El principio general es que el cambio en la energía es la fuerza multiplicada por la distancia que se desplaza dicha fuerza; en general

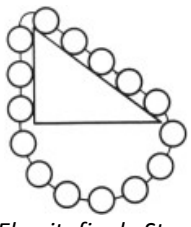
Cambio en energía = fuerza x distancia a lo largo de la que actúa la fuerza (4.6)

Volveremos a muchos de estos otros tipos de energía a medida que avancemos en el curso.



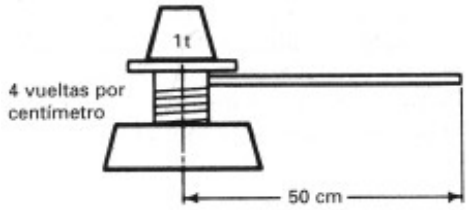
4.7 Plano inclinado.

El principio de la conservación de la energía es muy útil para deducir lo que sucederá en diversas circunstancias. En la escuela secundaria aprendimos muchas leyes sobre poleas y palancas utilizadas de diferentes maneras. Podemos ahora ver que *todas* estas «leyes» *son la misma,* y que no había necesidad de memorizar 75 reglas para descubrirla. Un ejemplo simple lo constituye un plano inclinado liso que es, afortunadamente, un triángulo rectángulo de lados tres-cuatro-cinco (figura 4.7). Colguemos un peso de un kilogramo en el plano inclinado con una polea, y en el otro extremo de la polea colguemos un peso W. Queremos saber cuánto debe pesar W para equilibrar el peso de un kilogramo en el plano inclinado. ¿Cómo podemos descubrir la respuesta? Si decimos que está exactamente equilibrado, el sistema es reversible y por lo tanto puede subir y bajar, y podemos considerar la situación siguiente. En la situación inicial, (a), el peso de un kilogramo está en el extremo inferior del plano inclinado y el peso W está arriba. Una vez que W se ha deslizado hacia abajo de modo reversible, tenemos un peso de un kilogramo en la parte superior y el peso W ha descendido una distancia igual a la longitud del plano inclinado, (b), es decir, cinco metros, desde el nivel en el que estaba antes. Hemos *elevado* el peso de un kilogramo sólo *tres metros* y hemos hecho descender cinco metros el peso de W kilogramos. Por lo tanto, W = 3/5 de kilogramo. Nótese que dedujimos esto a partir de la *conservación de la energía,* y no a partir de componentes de fuerzas. La astucia, sin embargo, es relativa. Puede deducirse de un modo que es incluso más brillante, descubierto por Stevinus y grabado en su tumba. La figura 4.8 explica que tiene que ser 3/5 de kilogramo, porque la cadena no desliza y no da vueltas. Es evidente que la parte más baja de la cadena está equilibrada por sí misma, de modo que la tracción de los cinco pesos en un lado debe compensar la tracción de los tres pesos en el otro, o cualquiera que sea la proporción de los brazos. Mirando este diagrama ven ustedes que W debe ser 3/5 de kilogramo. (Si ustedes consiguen un epitafio como este en su tumba, están en el buen camino.)



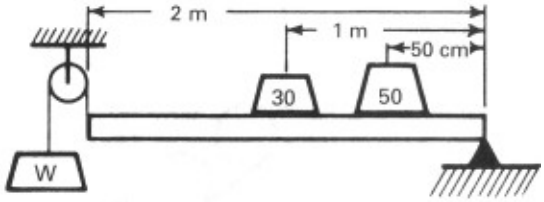
4.8 El epitafio de Stevinus

Ilustremos ahora el principio de la energía con un problema más complicado, el tornillo elevador mostrado en la figura 4.9 Para girar el tornillo, que tiene un paso de rosca de 4 vueltas por centímetro, se utiliza una manivela de medio metro de longitud. Nos gustaría saber cuánta fuerza habría que aplicar a la manivela para levantar una tonelada (1.000 kilogramos).



4.9 Un tornillo elevador.

Si queremos elevar la tonelada un centímetro, pongamos por caso, debemos dar cuatro vueltas completas a la manivela. Cuando ésta da una vuelta completa recorre aproximadamente 3,14 metros. Por lo tanto, la manivela debe recorrer un total de 12,5 metros, y si utilizásemos un sistema de poleas, etc., estaríamos levantando la misma tonelada con un peso menor W desconocido aplicado al extremo de la manivela. Así es como encontramos que W es aproximadamente 0,8 kilogramos. Esto es un resultado de la conservación de la energía.



4.10 Barra con pesos apoyada en un extremo

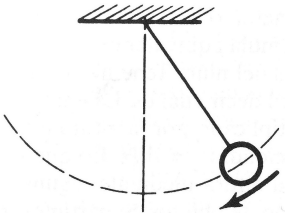
Tomemos ahora el ejemplo algo más complicado mostrado en la figura 4.10. Una varilla o barra de 2 metros de longitud está apoyada en un extremo. En mitad de la barra hay un peso de 30 kilo gramos, y a una distancia de medio metro del apoyo hay un peso de 50 kilogramos. ¿Qué fuerza debemos aplicar hacia arriba en el extremo libre de la barra para mantenerla equilibrada, suponiendo que el peso de la propia barra es despreciable? Imaginemos que ponemos una polea en un extremo y colgamos un peso de la polea. ¿Cuál tendría que ser el peso W para mantener la barra equilibrada? Supongamos que el peso desciende una distancia arbitraria —para hacerlo fácil, supongamos que desciende 10 centímetros—, ¿a qué altura deberían subir los dos pesos de carga? El centro se eleva 5 centímetros, y el punto que está a un cuarto de la distancia desde el extremo fijo se eleva 2,5 centímetros. Por lo tanto, el principio de que la suma de las alturas multiplicadas por los pesos no cambia nos dice que el peso W multiplicado por 10 centímetros hacia abajo, más 30 kilogramos multiplicados por 5 centímetros hacia arriba, más 50 kilogramos multiplicados por 2,5 centímetros tiene que sumar cero:

$$-10W + (5)(30) + (2,5)(50) = 0;\ W = 27,5\ Kg \qquad (4.11)$$

Así pues, debemos colgar un peso de 27,5 kilogramos para equilibrar la barra. De esta forma podemos calcular las leyes del «equilibrio»: la estática de puentes complicados, y demás. Este tratamiento se denomina *principio de los trabajos virtuales,* porque para aplicar este argumento tuvimos que *imaginar* que la estructura se mueve un poco; incluso si *en realidad* no se está moviendo o ni siquiera es *móvil.* Utilizamos el pequeñísimo movimiento imaginario para aplicar el principio de conservación de la energía.

Energía Cinética

Para ilustrar otro tipo de energía consideremos un péndulo (figura 4.11). Si tiramos de la masa hacia un lado y luego la soltamos, oscilará de un lado a otro. En su movimiento pierde altura cuando va de cualquiera de los extremos hasta el centro. ¿Dónde va a parar la energía potencial? Desaparece energía gravitatoria cuando la masa está abajo del todo; pero, en cualquier caso, volverá a subir. La energía gravitatoria debe haber ido a otra forma de energía. Evidentemente es en virtud de su *movimiento* por lo que es capaz de subir de nuevo, de modo que tenemos conversión de energía gravitatoria en alguna otra forma de energía cuando llega al fondo.



4.11. Péndulo.

Debemos obtener una fórmula para la energía de movimiento. Ahora, recordando nuestros argumentos sobre máquinas reversibles, podemos ver fácilmente que en el movimiento cuando la masa está en el fondo debe haber una cantidad de energía que le permite subir a una cierta altura, y que no tiene nada que ver con el *me*canismo por el que actúa o con la trayectoria por la que sube. Así que tenemos una fórmula equivalente, algo similar a la que escribimos para los bloques del niño. Tenemos otra forma para representar la energía. Es fácil decir cuál es. La energía cinética en el fondo es igual al peso multiplicado por la altura a la que podría subir de acuerdo con su velocidad: $E_C = WH$. Lo que necesitamos es la fórmula que nos dice la altura mediante alguna regla que tenga que ver con el movimiento de objetos. Si partimos de algo con una cierta velocidad, digamos hacia arriba, llegará a una cierta altura; todavía no sabemos cuál es, pero depende de la velocidad; hay una fórmula para eso. Entonces para encontrar la fórmula para la energía cinética de un objeto en movimiento con velocidad V, debemos calcular la altura que podría alcanzar y multiplicarla por el peso. Descubriremos pronto que podemos escribirla de este modo:

$$E_c = WV^2 / 2g \qquad (4.12)$$

Por supuesto, el hecho de que el movimiento tenga energía no tiene nada que ver con el hecho de que estemos en un campo gravitatorio. No importa *de dónde* proceda el movimiento. Esta es una fórmula general para diversas velocidades. Tanto (4.5) como (4.12) son fórmulas aproximadas, la primera porque es incorrecta cuando las alturas son grandes, es decir, cuando las alturas son tan altas que la gravedad se debilita; la segunda, debido a la corrección relativista a altas velocidades. Sin embargo, cuando obtenemos finalmente la fórmula exacta para la energía, la ley de conservación de la energía es correcta.

Otras formas de energía

Podemos continuar de este modo para ilustrar la existencia de otras formas de energía. En primer lugar, consideremos la energía elástica. Para comprimir verticalmente un muelle debemos hacer algún trabajo, pues cuando lo tenemos comprimido podemos levantar pesos con él. Por lo tanto, en su condición comprimida tiene una posibilidad de hacer algún trabajo. Si calculásemos la suma de los productos de los pesos por las alturas, ésta no cuadraría: debemos añadir algo más para dar cuenta del hecho de que el muelle está bajo tensión. La energía elástica es la fórmula para un muelle cuando está comprimido. ¿Cuánta energía es? Si lo soltamos, la energía elástica se convierte en energía cinética cuando el muelle pasa por el punto de equilibrio, y pasa alternativamente de una forma a otra, entre compresiones o estiramientos del muelle y la energía cinética de movimiento. (Hay también alguna energía gravitatoria que entra y sale, pero podemos hacer este experimento «en horizontal» si queremos.) Sigue así hasta que todo se para: ¡Ajá! Hemos trampeado todo el rato colocando pequeños pesos para mover cosas, o diciendo que las máquinas son reversibles o que siguen actuando indefinidamente, pero ahora podemos ver que las cosas llegan a pararse. ¿Dónde está la energía cuando el muelle ha dejado de subir y bajar? Esto nos lleva a *otra* forma de energía: *la energía tér*mica.

En el interior de un muelle o una palanca hay cristales que están formados por montones de átomos; con gran cuidado y delicadeza en la disposición de las partes podemos tratar de ajustar las cosas de modo que, cuando algo rueda sobre alguna otra cosa, ninguno de los átomos se agite en absoluto. Pero hay que ser muy cuidadosos. Normalmente, cuando las cosas ruedan hay un bamboleo y una agitación debidos a las irregularidades del material, y los átomos empiezan a vibrar en su interior. De este modo perdemos la pista de dicha energía; una vez que el movimiento se ha detenido, encontramos que los átomos están vibrando en el interior de un modo aleatorio y confuso. Sigue habiendo energía cinética, por supuesto, pero no está asociada con movimiento visible. ¡Qué imaginación! ¿Cómo *sabemos* que sigue habiendo energía cinética? Resulta que con termómetros es posible descubrir que el muelle o la palanca están *más caliente,* y que realmente hay un aumento de energía cinética en una cantidad precisa. Llamamos a esta forma de energía *energía térmica,* pero sabemos que no es realmente una forma nueva: es simplemente energía cinética, movimiento interno. (Una de las dificultades con todos estos experimentos que hacemos con materia a gran escala es que no podemos demostrar realmente la conservación de la energía y no podemos hacer realmente nuestras máquinas reversibles, porque cada

vez que movemos un gran montón de materia los átomos no quedan absolutamente imperturbables, y de este modo entra en el sistema atómico cierta cantidad de movimiento aleatorio. No podemos verlo, pero podemos medirlo con termómetros, etc.)

Hay otras muchas formas de energía, y por supuesto no podemos describirlas ahora con más detalle. Hay energía eléctrica, que tiene que ver con las atracciones y repulsiones de cargas eléctricas. Hay energía radiante, la energía de la luz que sabemos que es una forma de energía eléctrica porque la luz puede representarse como oscilaciones del campo electromagnético. Hay energía química, la energía que se libera en las reacciones químicas. En realidad, la energía elástica es, en cierta medida, similar a la energía química, porque la energía química es la energía de la atracción mutua de los átomos, y por lo tanto es energía elástica. Nuestra comprensión moderna es la siguiente: la energía química tiene dos partes, energía cinética de los electrones dentro de los átomos, de modo que una parte es cinética, y energía eléctrica de interacción entre electrones y protones, de modo que el resto es energía eléctrica. A continuación llegamos a la energía nuclear, la energía implicada en la disposición de las partículas dentro del núcleo, y tenemos fórmulas para ella aunque no tenemos las leyes fundamentales. Sabemos que no es eléctrica ni gravitatoria, ni puramente química, pero no sabemos qué es. Parece ser una forma adicional de energía. Finalmente, asociada con la teoría de la relatividad hay una modificación de las leyes de la energía cinética, o como quiera que ustedes prefieran llamarla, de modo que la energía cinética se combina con otra cosa llamada *energía de masa.* Un objeto tiene energía por su sola *existencia.* Si yo tengo un positrón y un electrón quietos sin hacer nada prescindiendo de la gravedad, prescindiendo de cualquier cosa y se juntan y desaparecen, se liberará energía radiante en una cantidad definida, que puede ser calculada. Todo lo que necesitamos saber es la masa del objeto. No depende de qué objeto sea: hacemos que dos cosas desaparezcan y obtenemos una cierta cantidad de energía. La fórmula fue descubierta por primera vez por Einstein; es $E = mc^2$.

Resulta obvio de nuestra discusión que la ley de la conservación de la energía es enormemente útil para hacer análisis, tal como hemos ilustrado en algunos ejemplos sin conocer todas las fórmulas. Si tuviéramos todas las fórmulas para todos los tipos de energía podríamos analizar cuántos procesos deberían estar en acción sin tener que entrar en detalles. Por lo tanto, las leyes de conservación son muy interesantes. Naturalmente surge la cuestión de qué otras leyes de conservación hay en física. Hay otras dos leyes de conservación que son análogas a la conservación de la energía. Una se denomina conservación del momento lineal. La otra se denomina conservación del momento angular. Descubriremos más cosas sobre estas leyes más adelante. En última instancia, no entendemos en profundidad las leyes de conservación. No entendemos la conservación de la energía. No entendemos la energía como un cierto número de pequeñas gotas. Quizá ustedes hayan oído decir que los fotones vienen en gotas y que la energía de un fotón es la constante de Planck multiplicada por la frecuencia. Esto es cierto pero, puesto que la frecuencia de la luz puede ser cualquiera, no hay ninguna ley que diga que la energía tiene que ser una cierta cantidad definida. A diferencia de los bloques de Daniel, puede haber cualquier cantidad de energía, al menos tal como se entiende actualmente. Así pues, por ahora no entendemos esta energía como el recuento de algo, sino sólo como una magnitud matemática, lo que es una

circunstancia abstracta y bastante peculiar. En mecánica cuántica resulta que la conservación de la energía está muy íntimamente relacionada con otra importante propiedad del mundo: las cosas *no dependen del tiempo absoluto.* Podemos montar un experimento en un instante dado y hacerlo, y luego hacer el mismo experimento en un instante posterior, y se comportará exactamente de la misma forma. Si esto es estrictamente cierto o no, no lo sabemos. Si suponemos que es cierto, y añadimos los principios de la mecánica cuántica, entonces podemos deducir el principio de la conservación de la energía. Es algo sutil e interesante, y no es nada fácil de explicar. Las otras leyes de conservación también están relacionadas. La conservación del momento está asociada en mecánica cuántica con la afirmación de que, independientemente de *dónde* hagan ustedes el experimento, los resultados siempre serán los mismos. Del mismo modo que la independencia respecto al espacio tiene que ver con la conservación del momento, la independencia respecto al tiempo tiene que ver con la conservación de la energía; y finalmente, si *giramos* nuestro aparato, esto tampoco supone ninguna diferencia, y así la invariancia del mundo respecto a la orientación angular está relacionada con la conservación del *momento angular.* Además de estas, existen otras tres leyes de conservación, exactas hasta donde hoy podemos decir, que *son* mucho más simples de entender porque son más parecidas al recuento de bloques.

La primera de estas tres es la *conservación de la carga,* que significa simplemente que ustedes pueden contar el número de cargas eléctricas positivas y restar el número de cargas negativas que tienen, y el número resultante nunca cambia. Ustedes pueden cancelar una carga positiva con una negativa, pero no pueden crear un exceso neto de cargas positivas sobre cargas negativas. Otras dos leyes son análogas a esta: una se denomina la *conservación de bariones.* Hay cierto número de partículas raras, un neutrón y un protón son ejemplos de ellas, que se denominan bariones. En cualquier reacción que tenga lugar en la naturaleza, si contamos cuántos bariones intervienen en un proceso, el número de bariones[4] que resulta de ello será exactamente el mismo. Hay otra ley: la *conservación de leptones.* Podemos decir que el grupo de partículas denominadas leptones está constituido por el electrón, el mesón-μ y el neutrino. Existe un antielectrón que es un positrón, es decir, -1 leptón. Contando el número total de leptones en una reacción se pone de manifiesto que el número inicial es siempre igual que el número final, al menos hasta donde sabemos actualmente.

Estas son las seis leyes de conservación, tres de ellas sutiles, que implican el espacio y el tiempo, y tres de ellas simples, en el sentido de contar algo.

Con respecto a la conservación de la energía deberíamos advertir que la energía *disponible* es otra cuestión: hay un montón de agitación en los átomos del agua del mar, porque el mar tiene una cierta temperatura, pero es imposible encauzarlos en un movimiento definido sin tomar energía de alguna otra parte. Es decir, aunque sabemos y damos por hecho que la energía se conserva, la energía disponible para utilización humana no se conserva tan fácilmente. Las leyes que gobiernan cuánta energía hay disponible se denominan *leyes de la termodinámica* e implican un concepto denominado entropía para procesos termodinámicos irreversibles.

[4] Restando los antibariones.

Para terminar, haremos un comentario sobre la cuestión de dónde podemos obtener hoy nuestros suministros energéticos. Nuestros suministros energéticos proceden del Sol, la lluvia, el carbón, el uranio y el hidrógeno. El Sol provoca la lluvia, y también provoca el carbón, de modo que todos ellos proceden del Sol. Aunque la energía se conserva, la naturaleza no parece interesada en ello: ella libera un montón de energía desde el Sol, pero sólo una parte en dos mil millones llega a la Tierra. La naturaleza conserva la energía, pero no se preocupa realmente; malgasta un montón en todas direcciones. Ya hemos obtenido energía del uranio; también podemos obtener energía del hidrógeno, pero por el momento sólo en situaciones explosivas y peligrosas. Si pudiera ser controlada en reacciones termonucleares, resultaría que la energía que puede obtenerse de 10 litros de agua por segundo equivale a toda la potencia eléctrica generada en los Estados Unidos. Con 600 litros de agua corriente por minuto, ¡ustedes tendrían combustible suficiente para suministrar toda la energía que se utiliza hoy en los Estados Unidos! Por lo tanto, es tarea del físico descubrir la forma de liberarnos de la necesidad de disponer de energía. Puede hacerse.

— 5 —

La teoría de la gravitación

Movimientos planetarios

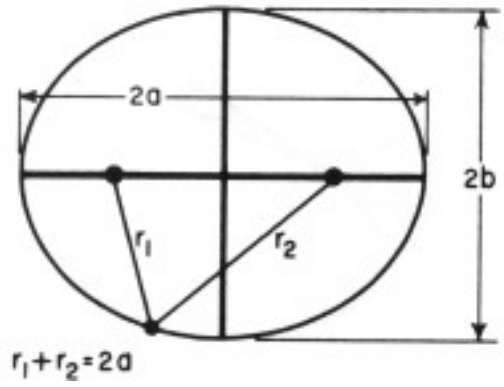
En este capítulo discutiremos una de las generalizaciones de mayor alcance hechas por la mente humana. Aunque estamos admirando la mente humana, deberíamos dedicar algún tiempo a reverenciar a una *naturaleza* que pudo seguir con tal perfección y generalidad un principio tan elegantemente simple como la ley de la gravitación. ¿Cuál es esta ley de la gravitación? Se trata de que cualquier objeto en el universo atrae a cualquier otro objeto con una fuerza que para dos cuerpos cualesquiera es proporcional a la masa de cada uno de ellos y varía de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos. Este enunciado puede expresarse matemáticamente mediante la ecuación

$$F = G\frac{mm'}{r^2} \tag{5.1}$$

Si a esto añadimos el hecho de que un objeto responde a una fuerza acelerándose en la dirección de la fuerza en una cantidad que es inversamente proporcional a la masa del objeto, habremos dicho todo lo necesario para que un matemático con suficiente habilidad pueda deducir luego todas las consecuencias de estos dos principios. Sin embargo, puesto que se supone que ustedes todavía no tienen la habilidad suficiente, discutiremos las consecuencias con más detalle, y no nos limitaremos a dejarles sólo con estos dos principios desnudos. Relataremos brevemente la historia del descubrimiento de la ley de la gravitación y discutiremos algunas de sus consecuencias, sus efectos en la historia, los misterios que entraña una ley semejante y algunos refinamientos de la ley hechos por Einstein; discutiremos también las relaciones entre esta ley y las otras leyes de la física. Todo esto no puede

hacerse en un capítulo, sino que estos temas serán tratados a su debido tiempo en capítulos posteriores.

La historia empieza con los antiguos observando los movimientos de los planetas entre las estrellas, y deduciendo finalmente que aquéllos daban vueltas alrededor del Sol, un hecho que fue redescubierto más tarde por Copérnico. Para descubrir *cómo* se mueven exactamente los planetas alrededor del Sol, y con *qué movimiento* exacto, se necesitó algo más de trabajo. A comienzos del siglo XV había grandes debates sobre si realmente giraban alrededor del Sol o no. Tycho Brahe tuvo una idea diferente de cualquier cosa propuesta por los antiguos: su idea era que estos debates acerca de la naturaleza de los movimientos planetarios se resolverían mejor si se midiesen con suficiente precisión las posiciones reales de los planetas en el cielo. Si las medidas mostraran exactamente cómo se movían los planetas, entonces quizá sería posible establecer un punto de vista u otro. Esta fue una idea espectacular: que para descubrir algo es preferible realizar algunos experimentos cuidadosos antes que desarrollar profundos argumentos filosóficos. Siguiendo esta idea, Tycho Brahe estudió las posiciones de los planetas durante muchos años en su observatorio de la isla de Hven, cerca de Copenhague. Construyó tablas astronómicas voluminosas que luego fueron estudiadas por el matemático Kepler, tras la muerte de Tycho. A partir de estos datos, Kepler descubrió algunas relaciones muy bellas y notables, aunque sencillas, acerca del movimiento planetario.

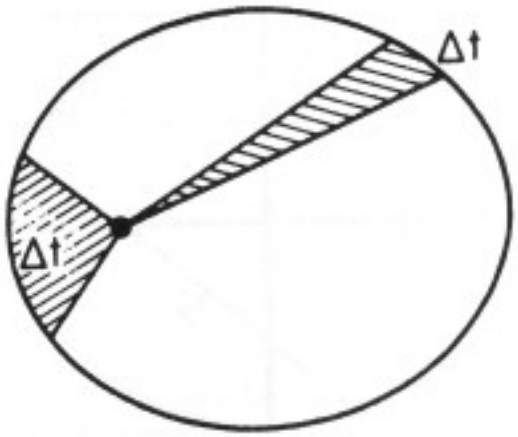


5.2 Una elipse.

Leyes de Kepler

En primer lugar, Kepler descubrió que cada planeta se mueve alrededor del Sol siguiendo una curva denominada *elipse,* con el Sol en uno de los focos de dicha elipse. Una elipse no es exactamente un óvalo, sino que es una curva muy concreta y precisa que puede obtenerse utilizando dos tachuelas, una en cada foco, un lazo de cuerda y un lápiz; de forma más matemática, es el lugar geométrico de los puntos tales que la suma de sus distancias a dos puntos fijos (los focos) es constante. O, si ustedes quieren, es un círculo en escorzo (5.2).

La segunda observación de Kepler era que los planetas no se mueven alrededor del Sol a una velocidad uniforme, sino que se mueven más deprisa cuando están más próximos al Sol y más despacio cuando están más alejados del Sol, precisamente de la forma siguiente: supongamos que se observa un planeta en dos instantes sucesivos, digamos con un intervalo de una semana, y que se traza el radio vector[5] hasta el planeta para cada posición observada. El arco orbital recorrido por el planeta durante la semana y los dos radios vectores limitan una cierta área plana, el área rayada que se muestra en la figura 5.3. Si se hacen otras dos observaciones similares con un intervalo de una semana en una parte de la órbita más alejada del Sol (donde el planeta se mueve más lentamente), el área acotada de este mismo modo tiene exactamente el mismo valor que en el primer caso. Así, de acuerdo con la segunda ley, la velocidad orbital de cada planeta es tal que el radio vector «barre» áreas iguales en tiempos iguales.



5.3 Ley de las áreas de Kepler.

Finalmente, una tercera ley fue descubierta por Kepler mucho más tarde; esta ley es de una categoría diferente de las otras dos, porque no trata con un solo planeta sino que relaciona un planeta con otro diferente. Esta ley dice que cuando se comparan los periodos orbitales y los tamaños de las órbitas de dos planetas cualesquiera, los periodos son proporcionales a la potencia 3/2 del tamaño de la órbita. En este enunciado el periodo es el tiempo que necesita un planeta para recorrer completamente su órbita, y el tamaño se mide por la longitud del diámetro mayor de la órbita elíptica, conocido técnicamente como eje mayor. De forma más sencilla, si los planetas siguieran trayectorias circulares, que es lo que hacen aproximadamente, el tiempo requerido para recorrer el círculo sería proporcional a la potencia 3/2 del diámetro (o del radio). Así pues, las tres leyes de Kepler son:

I. Cada planeta se mueve alrededor del Sol en una elipse, con el Sol en uno de los focos.

II. El radio vector desde el Sol al planeta barre áreas iguales en intervalos de tiempo iguales.

III. Los cuadrados de los periodos de dos planetas cualesquiera son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores de sus respectivas órbitas: $T \approx a^{3/2}$.

[5] Un radio vector es una recta trazada desde el Sol a un punto de la órbita del planeta.

Desarrollo de la dinámica

Mientras Kepler estaba descubriendo estas leyes, Galileo estaba estudiando las leyes del movimiento. El problema era: ¿qué hace que los planetas den vueltas? (En aquellos días, una de las teorías propuestas decía que los planetas daban vueltas porque en su parte posterior había ángeles invisibles que batían sus alas y empujaban los planetas hacia adelante. ¡Verán ustedes que esta teoría se ha modificado ahora! Resulta que para mantener los planetas dando vueltas, los ángeles invisibles deben volar en una dirección diferente y no tienen alas. ¡Por lo demás, es una teoría en cierto modo similar!) Galileo descubrió un hecho muy notable acerca del movimiento que resultó esencial para comprender dichas leyes. Se trata del principio de *inercia:* si algo se está moviendo, sin que nadie lo toque y completamente imperturbado, continuará moviéndose para siempre, manteniendo una velocidad uniforme en línea recta. *(¿Por qué* sigue moviéndose? No lo sabemos, pero así es.)

Newton modificó esta idea al decir que la única forma de cambiar el movimiento de un cuerpo es aplicando una *fuerza*. Si el cuerpo se acelera es que ha sido aplicada una fuerza *en la dirección del movimiento.* Por otra parte, si su movimiento cambia hacia una nueva *dirección,* ello implica que una fuerza ha sido aplicada *transversalmente.* Newton añadió así la idea de que una fuerza es necesaria para cambiar la velocidad *o la dirección* del movimiento de un cuerpo. Por ejemplo, si una piedra está atada en el extremo de una cuerda y se la hace dar vueltas en un círculo, se necesita una fuerza para mantenerla en dicho círculo. Tenemos que *tirar* de la cuerda. De hecho, la ley consiste en que la aceleración producida por la fuerza es inversamente proporcional a la masa, o que la fuerza es proporcional a la masa multiplicada por la aceleración. Cuanto más masiva es una cosa, más intensa es la fuerza necesaria para producir una aceleración dada. (La masa puede medirse colocando otras piedras en el extremo de la misma cuerda y haciéndolas girar en el mismo círculo y con la misma velocidad. De esta forma se encuentra que se requiere más o menos fuerza: cuanto más masivo es el objeto, más fuerza se requiere.) La idea brillante que resulta de estas consideraciones es que no se necesita ninguna fuerza *tangencial* para mantener un planeta en su órbita (los ángeles no tienen que volar tangencialmente) porque el planeta seguiría en dicha dirección por sí mismo. Si no hubiera nada en absoluto que lo perturbara, el planeta seguiría en una *línea recta.* Pero el movimiento real se desvía de la línea que hubiera seguido el cuerpo si no hubiera fuerza, y la desviación se produce esencialmente *a ángulos rectos* respecto al movimiento, no en la dirección del movimiento. En otras palabras, debido al principio de inercia, la fuerza necesaria para controlar el movimiento de un planeta alrededor del Sol no es una fuerza *alrededor* del Sol sino *hacia* el Sol. (Si hay una fuerza hacia el Sol, ¡el Sol podría ser el ángel, por supuesto!)

Ley de la gravitación de Newton

Partiendo de su mejor comprensión de la teoría del movimiento, Newton se dio cuenta de que *el Sol* podría ser la sede u organización de fuerzas que gobiernan el movimiento de los planetas. Newton se demostró para sí (y quizá seremos capaces de demostrarlo

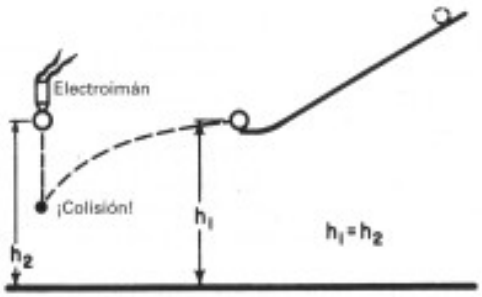
pronto) que el hecho mismo de que áreas iguales son barridas en tiempos iguales es un indicador preciso de la proposición según la cual todas las desviaciones son exactamente *radiales:* que la ley de las áreas es una consecuencia directa de la idea de que todas las fuerzas están dirigidas exactamente *hacia el Sol.*

Seguidamente, analizando la tercera ley de Kepler es posible demostrar que cuanto más lejos está el planeta, más débiles son las fuerzas. Si se comparan dos planetas a distancias diferentes del Sol, el análisis muestra que las fuerzas son inversamente proporcionales a los cuadrados de las distancias respectivas. Combinando ambas leyes, Newton concluyó que debe haber una fuerza, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, dirigida a lo largo de la línea que une los dos objetos.

Siendo un hombre con una gran preferencia por las generalizaciones, Newton supuso, por supuesto, que esta relación era válida para el caso más general y no sólo para el Sol que mantiene a los planetas. Era ya conocido, por ejemplo, que el planeta Júpiter tiene lunas que giran a su alrededor como la Luna de la Tierra gira alrededor de la Tierra, y Newton dio por cierto que cada planeta mantiene a sus lunas con una fuerza. El conocía ya la fuerza que nos mantiene sobre la Tierra, de modo que propuso que esta era una fuerza *universal: que todas las cosas atraen a todas las de*más.

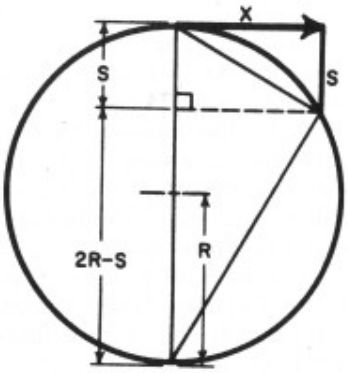
El problema siguiente era si la atracción de la Tierra sobre sus habitantes era la «misma» que su atracción sobre la Luna, es decir, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Si un objeto en la superficie de la Tierra cae 4,9 metros durante el primer segundo una vez que ha sido liberado partiendo del reposo, ¿cuánto caerá la Luna en el mismo tiempo? Podríamos decir que la Luna no cae en absoluto. Pero si no hubiera ninguna fuerza sobre la Luna, ella seguiría en línea recta, mientras que de hecho sigue en un círculo, de modo que realmente *cae* desde donde habría estado si no hubiera ninguna fuerza. A partir del radio de la órbita de la Luna (que es de aproximadamente 384.000 kilómetros) y el tiempo que necesita para dar una vuelta alrededor de la Tierra (aproximadamente 29 días) podemos calcular cuánto se mueve la Luna en su órbita en 1 segundo, y podemos calcular entonces cuánto cae en un segundo[6]. Esta distancia resulta ser aproximadamente 4/3 mm por segundo. Esto encaja muy bien con la ley de la inversa del cuadrado, porque el radio de la Tierra es de unos 6.400 kilómetros, y si algo que está a 6.400 kilómetros del centro de la Tierra cae 4,9 metros en un segundo, algo que esté a 384.000 kilómetros, o 60 veces más, caería sólo 1/3.600 de 4,9 metros, que también es aproximadamente 4/3 de milímetro. Deseando poner a prueba esta teoría de la gravitación por cálculos similares, Newton hizo sus cálculos con mucho cuidado y encontró una discrepancia tan grande que consideró que la teoría era contradicha por los hechos, y no publicó sus resultados. Seis años más tarde, una nueva medida del tamaño de la Tierra demostró que los astrónomos habían estado utilizando una distancia incorrecta a la Luna. Cuando Newton oyó esto, hizo de nuevo el cálculo, con las cifras corregidas, y encajó a la perfección.

[6] Es decir, cuánto cae el círculo de la órbita de la Luna por debajo de la tangente; a la órbita en el punto donde estaba la Luna un segundo antes.



5.4 Aparato para demostrar la independencia de los movimientos vertical y horizontal.

Esta idea de que la Luna «cae» es algo confusa, porque, como ustedes ven, ella no *se acerca.* La idea es suficientemente interesante para merecer una explicación adicional: la Luna cae en el sentido de que *se aparta de la línea recta que hubiera seguido de no haber fuerzas.* Veamos un ejemplo en la superficie de la Tierra. Un objeto liberado cerca de la superficie de la Tierra caerá 4,9 metros en el primer segundo. Un objeto disparado *horizontalmente* también caerá 4,9 metros; incluso si se está moviendo horizontalmente, aún cae los mismos 4,9 metros en el mismo tiempo. La figura 5.4 muestra un aparato que lo pone de manifiesto. En el carril horizontal hay una bola que va a ser impulsada hacia adelante a una pequeña distancia. A la misma altura hay una bola que va a caer verticalmente, y hay un interruptor eléctrico dispuesto de modo que en el momento en que la primera bola deja el carril, se libera la segunda bola. El hecho de que han descendido la misma altura en el mismo tiempo queda de manifiesto porque colisionan en el aire. Un objeto como una bala, disparada horizontalmente, podría recorrer un largo camino en un segundo quizá 700 metros—, pero seguiría cayendo 4,9 metros si está disparada horizontalmente. ¿Qué sucede si disparamos una bala con una velocidad cada vez mayor? No olvidemos que la superficie de la Tierra es curva. Si disparamos con velocidad suficiente, entonces después de haber caído 4,9 metros puede estar precisamente a la misma altura del suelo que estaba antes. ¿Cómo puede ser eso? Sigue cayendo, pero la Tierra se curva por debajo de ella, de modo que cae «alrededor» de la Tierra. La cuestión es: ¿cuánto tiene que recorrer en un segundo para que la Tierra esté a 4,9 metros bajo el horizonte?



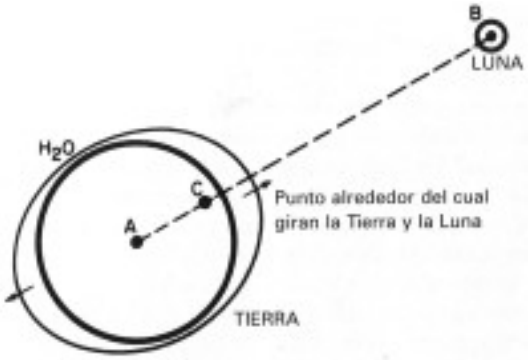
5.5 Aceleración hacia el centro de una trayectoria circular. De la geometría plana, x/s = (2R - S)/x = 2R/x, donde R es el radio de la Tierra, 6.400 kilómetros; x es la distancia «recorrida horizontalmente» en un segundo; y S es la distancia «caída» en un segundo (4,9 metros).

En la figura 5.5 vemos la Tierra con su radio de 6.400 kilómetros, y la trayectoria tangencial en línea recta que hubiera seguido la bala si no hubiera ninguna fuerza. Ahora bien, si utilizamos uno de esos maravillosos teoremas de la geometría, que dice que nuestra tangente es la media proporcional entre las dos partes en que una cuerda igual divide al diámetro, vemos que la distancia horizontal recorrida es la media proporcional entre los 4,9 metros (0,0049 kilómetros) caídos y los 12.800 kilómetros de diámetro de la Tierra. La raíz cuadrada de 0,0049 x 12.800 está muy cercana a 8 kilómetros. Entonces vemos que si la bala se mueve a 8 kilómetros por segundo, continuará cayendo hacia la Tierra a la misma velocidad de 4,9 metros cada segundo, pero nunca estará más cerca de la Tierra porque la Tierra sigue curvándose por debajo de ella. Así es como Gagarin se mantuvo en el espacio mientras viajó 40.000 kilómetros alrededor de la Tierra a aproximadamente 8 kilómetros por segundo. (Él necesitó un tiempo un poco mayor porque estaba un poco más alto.)

Cualquier gran descubrimiento de una nueva ley es útil sólo si podemos sacar más de lo que hemos introducido. Ahora bien, Newton *utilizó* la segunda y la tercera de las leyes de Kepler para deducir su ley de la gravitación. ¿Qué es lo que él *predijo?* En primer lugar, su análisis del movimiento de la Luna era una predicción porque relacionaba la caída de objetos en la superficie de la Tierra y la de la Luna. En segundo lugar, la pregunta es: *¿es la órbita una elipse?* Veremos en un capítulo posterior cómo es posible calcular exactamente el movimiento, y de hecho podemos probar que debería ser una elipse[7], de modo que ningún hecho extra se necesita para explicar la *primera* ley de Kepler. Así es como Newton hizo su primera predicción poderosa.

La ley de la gravitación explica muchos fenómenos que no se entendían antes. Por ejemplo, la atracción de la Luna sobre la Tierra provoca las mareas, hasta entonces misteriosas. La Luna atrae el agua que hay debajo de ella y causa las mareas (había gente que habían pensado antes en eso, pero no eran tan inteligentes como Newton y por ello pensaban que debería haber sólo una marea cada día). El argumento era que la Luna atrae el agua que está debajo de ella, dando lugar a una marea alta y una marea baja; y puesto que la Tierra está girando alrededor de su eje bajo la Luna, esto hace que la marea en un lugar suba y baje cada 24 horas. En realidad, la marea sube y baja cada 12 horas. Otra escuela de pensamiento afirmaba que la marea alta debería producirse en el lado opuesto de la Tierra porque, razonaban ellos, ¡la Luna atrae a la Tierra apartándola del agua! Ambas teorías son erróneas. Realmente funciona así: la atracción de la Luna hacia la Tierra y hacia el agua está «equilibrada» en el centro. Pero el agua que está más próxima a la Luna está más atraída que la media y el agua que está más alejada de la Luna es atraída *menos* que la media. Además, el agua puede fluir mientras que la Tierra es más rígida y no puede hacerlo. La imagen correcta es una combinación de estas dos cosas.

[7] No daremos la demostración en este curso.



5.6 El sistema Tierra-Luna, con mareas.

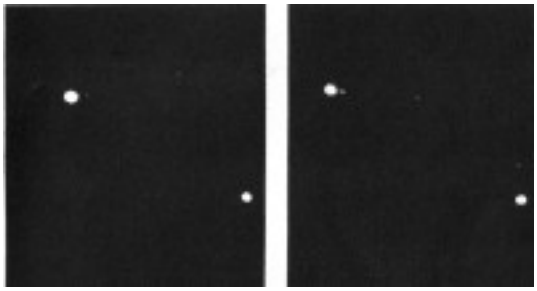
¿Qué entendemos por «equilibrada»? ¿Qué es lo que equilibra? Si la Luna atrae a toda la Tierra hacia ella, ¿por qué la Tierra no «sube» directamente hacia la Luna? Porque la Tierra hace el mismo truco que la Luna, da vueltas en un círculo alrededor de un punto imaginario que está en el interior de la Tierra pero no en su centro. La Luna tampoco da vueltas exactamente alrededor de la Tierra, sino que la Tierra y la Luna giran alrededor de un punto central, cayendo cada una de ellas hacia este punto común, como se muestra en la figura 5.6. Este movimiento alrededor del centro común es el que equilibra la caída de cada una de ellas. Así pues, la Tierra tampoco sigue una línea recta; viaja en un círculo. El agua en el lado lejano está «desequilibrada» porque la atracción de la Luna allí es más débil que en el centro de la Tierra, donde justamente equilibra a la «fuerza centrífuga». El resultado de este desequilibrio es que el agua se eleva, alejándose del centro de la Tierra. En el lado próximo a la Luna, la atracción de ésta es más fuerte, y el desequilibrio está dirigido en dirección opuesta en el espacio, pero de nuevo *alejándose* del centro de la Tierra. El resultado neto es que tenemos *dos* abultamientos de marea.

Gravitación universal

¿Qué otra cosa podemos entender cuando entendemos la gravedad? Todo el mundo sabe que la Tierra es redonda. ¿Por qué la Tierra es redonda? Es fácil; es debido a la gravitación. Se puede entender que la Tierra es redonda simplemente porque cada cosa atrae a todas las demás, y así ¡tiene que atraerse a sí misma entera todo lo que pueda! Si vamos un poco más lejos, la Tierra no es *exactamente* una esfera porque está girando sobre su eje y esto produce efectos centrífugos que tienden a oponerse a la gravedad en la proximidad del ecuador. Resulta que la Tierra debería ser elipsoidal, e incluso obtenemos la forma correcta para el elipsoide. Podemos así deducir que el Sol, la Luna y la Tierra deberían ser (casi) esferas, solamente a partir de la ley de la gravitación.

¿Qué otra cosa pueden hacer ustedes con la ley de la gravitación? Si miramos las lunas de Júpiter podemos entenderlo todo sobre la forma en que se mueven alrededor del planeta. Dicho sea de paso, hubo en tiempos una cierta dificultad con las lunas de Júpiter que vale la pena comentar. Dichos satélites fueron estudiados muy cuidadosamente por Roemer, quien notó que las lunas parecían a veces ir adelantadas

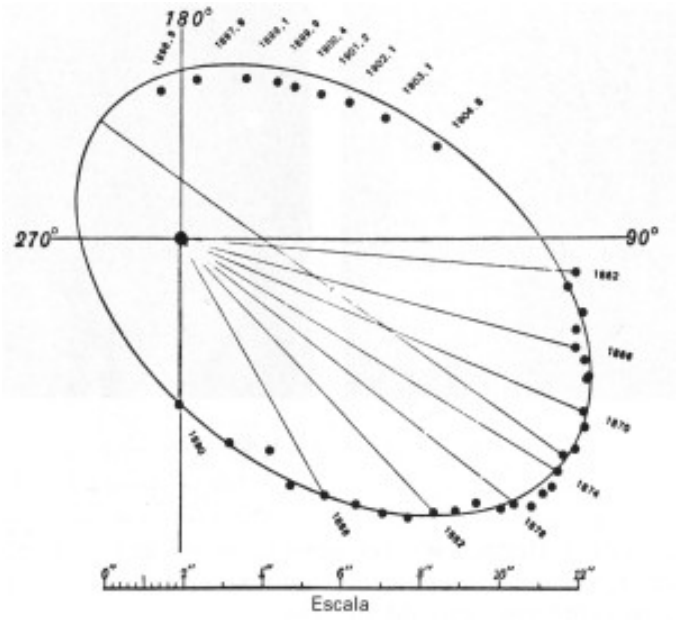
respecto a su horario, y a veces retrasadas. (Podemos calcular sus horarios esperando un largo tiempo y midiendo cuánto tiempo se necesita en promedio para que las lunas den una vuelta.) Resulta que estaban *adelantadas* cuando Júpiter estaba particularmente *próximo* a la Tierra, y estaban *retrasadas* cuando Júpiter estaba más *alejado* de la Tierra. Esto hubiera sido algo muy difícil de explicar según la ley de la gravitación; hubiera sido, de hecho, la muerte de esta maravillosa teoría si no hubiera otra explicación. Basta que una ley no funcione tan sólo en *una situación* en donde debiera hacerlo para que sea sencillamente errónea. Pero la razón para esta discrepancia era muy simple y bella. Se necesita un pequeño intervalo para *ver* las lunas de Júpiter debido al tiempo que tarda la luz en viajar desde Júpiter hasta la Tierra. Cuando Júpiter está más cerca de la Tierra el tiempo es algo menor, y cuando está más alejado de la Tierra el tiempo es mayor. Esta es la razón de que las lunas parezcan estar, en promedio, un poco adelantadas o un poco retrasadas, dependiendo de si están más próximas o más alejadas de la Tierra. Este fenómeno demostró que la luz no viaja instantáneamente, y proporcionó la primera estimación de la velocidad de la luz. Esto sucedió en 1656.



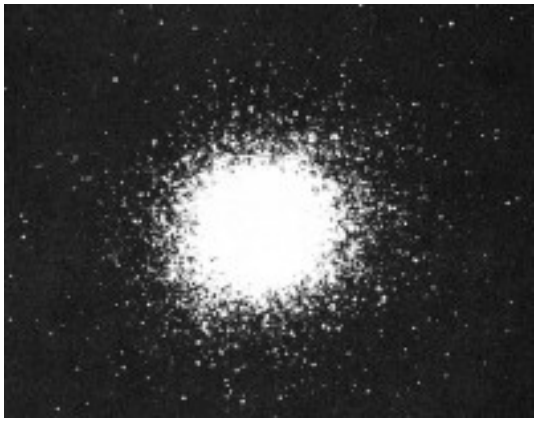
5.7 Un sistema de estrella doble.

Si todos los planetas se empujan y se atraen, la fuerza que controla, digamos, el viaje de Júpiter alrededor del Sol no es solamente la fuerza del Sol; existe también una atracción de, digamos, Saturno. Esta fuerza no es realmente muy intensa, puesto que el Sol es mucho más masivo que Saturno, pero existe cierta atracción, de modo que la órbita de Júpiter no debería ser una elipse perfecta, y no lo es; se aparta de ella ligeramente y «oscila» alrededor de la órbita elíptica correcta. Semejante movimiento es un poco más complicado. Se hicieron intentos de analizar los movimientos de Júpiter, Saturno y Urano basados en la ley de la gravitación. Se calcularon los efectos de cada uno de estos planetas sobre cada uno de los demás para ver si podían entenderse por completo las minúsculas desviaciones e irregularidades de dichos movimientos a partir de esta sola ley. Como, por arte de magia, para Júpiter y Saturno, todo iba bien, pero Urano era «extraño». Se comportaba de una manera muy peculiar. No estaba viajando en una elipse exacta, pero eso era comprensible debido a las atracciones de Júpiter y Saturno. Pero incluso si se tenían en cuenta dichas atracciones, Urano aún no seguía la curva correcta, de modo que las leyes de la gravitación estaban en peligro de ser desbordadas, una posibilidad que no podía descartarse. Dos hombres, Adams y Leverrier, en Inglaterra y Francia, llegaron independientemente a otra posibilidad: quizá hubiera *otro* planeta, oscuro e invisible, que los hombres no habían visto. Este planeta, *N*, podría atraer a Urano. Ellos calcularon dónde tendría que estar semejante planeta para provocar las

perturbaciones observadas. Enviaron mensajes a los respectivos observatorios, diciendo: «Señores, apunten su telescopio a tal y cual lugar, y ustedes verán un nuevo planeta». A menudo, el que se les preste o no atención depende de con quien estén ustedes trabajando. Prestaron atención a Leverrier; miraron y ¡allí estaba el planeta *N*! El otro observatorio se apresuró en mirar también en los días siguientes y también lo vio.



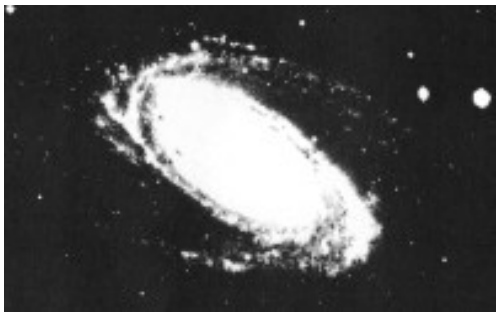
5.8 Órbita de Sirio B con respecto a Sirio A.



5.9 Un cúmulo globular de estrellas.

Este descubrimiento muestra que las leyes de Newton son absolutamente correctas en el Sistema Solar; pero ¿se extienden más allá de las distancias relativamente pequeñas que hay hasta los planetas más próximos? El primer test radica en la cuestión ¿se atraen las *estrellas entre sí,* igual que lo hacen los planetas? Tenemos evidencia precisa de que sí lo hacen en las *estrellas dobles.* La figura 5.7 muestra una estrella doble: dos estrellas muy próximas (hay también una tercera estrella en la imagen que nos permitirá saber que la fotografía no está invertida). Las

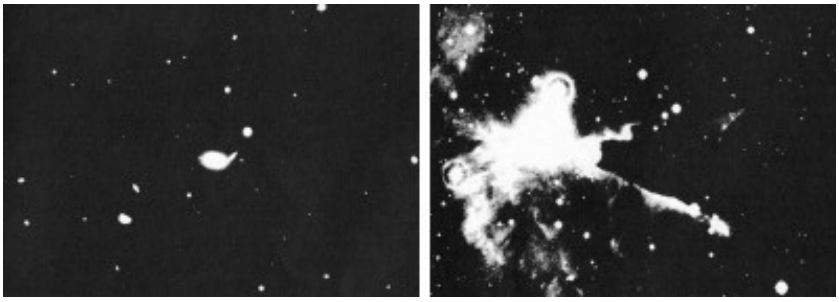
estrellas se muestran también tal como aparecen varios años más tarde. Vemos que, con respecto a la estrella «fija», el eje que une el par ha rotado; es decir, las dos estrellas han girado cada una alrededor de la otra. ¿Rotan de acuerdo con las leyes de Newton? Medidas cuidadosas de las posiciones relativas de un sistema semejante de estrellas dobles se muestran en la figura 5.8. En ella vemos una bella elipse, con medidas que empiezan en 1862 y continúan hasta 1904 (en el momento actual deben haber girado otra vuelta). Todo coincide con las leyes de Newton, excepto que la estrella Sirio A *no está en el foco.* ¿A que podría deberse esto? Se debe a que el plano de la elipse no coincide con el «plano del cielo». No estamos mirando perpendicularmente a la órbita plana, y cuando una elipse se ve con cierta inclinación sigue siendo una elipse pero el foco ya no está en el mismo lugar. Así pues, podemos analizar estrellas dobles, moviéndose una alrededor de la otra, de acuerdo con los requisitos de la ley gravitatoria.



5.10. Una galaxia.

El hecho de que la ley de la gravitación es verdadera a distancias incluso mayores viene indicado en la figura 5.9. Si alguien no puede ver aquí la gravitación en acción, es que no tiene alma. Esta figura muestra una de las cosas más bellas que hay en el cielo: un cúmulo globular de estrellas. Todos los puntos son estrellas. Aunque se ven como si estuviesen sólidamente agrupados en el centro, eso es debido a la falta de precisión de nuestros instrumentos. En realidad, las distancias entre las estrellas incluso más próximas al centro son muy grandes y muy raramente colisionan. Hay más estrellas en el interior que en la región más externa, y a medida que nos movemos hacia afuera hay cada vez menos. Es obvio que hay una atracción entre estas estrellas. Está claro que la gravitación existe a estas dimensiones enormes, quizá 100.000 veces mayores que el tamaño del Sistema Solar. Vayamos ahora más lejos, y miremos una *galaxia completa,* mostrada en la figura 5.10. La forma de esta galaxia indica una tendencia obvia de su materia a aglomerarse. Por supuesto, no podemos demostrar que la ley aquí sea exactamente de la inversa del cuadrado, sino sólo que sigue habiendo una atracción a estas enormes dimensiones que mantiene unido el conjunto. Uno podría decir: «Bien, todo esto es muy ingenioso, pero ¿por qué no es simplemente una bola?». Porque está *girando y* tiene *momento angular* que no puede ceder cuando se contrae; debe contraerse fundamentalmente en un plano. (Dicho sea de paso, si ustedes están buscando un buen problema, los detalles exactos de cómo se forman los brazos y qué es lo que determina las formas de dichas galaxias todavía no han sido calculados.) Está claro, sin embargo, que la forma de la galaxia se debe a la gravitación incluso si las complejidades de su estructura no nos han permitido analizarla

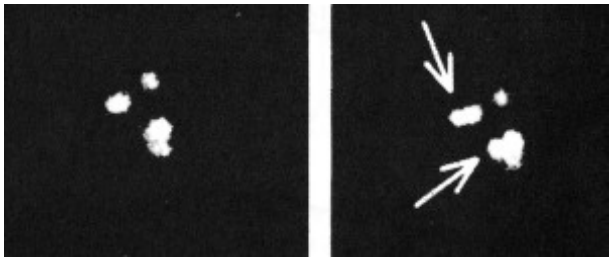
completamente por el momento. En una galaxia tenemos una escala de quizá 50.000 a 100.000 años-luz. La distancia de la Tierra al Sol es de 8 1/3 *minutos-luz,* así que ustedes pueden ver qué grandes son estas dimensiones.



5.11. Un cúmulo de galaxias y 5.12. Una nube de polvo interestelar.

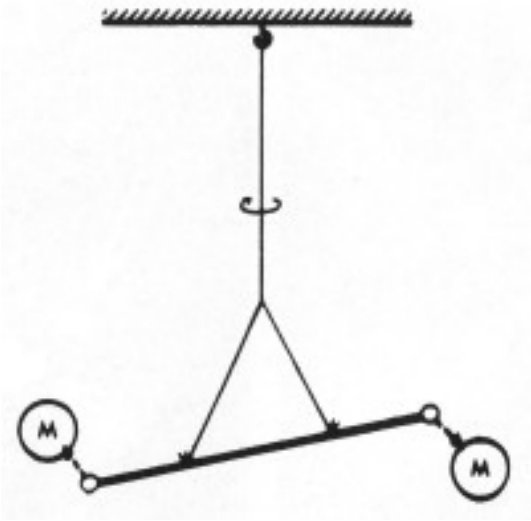
La gravedad parece existir a dimensiones incluso más grandes, como se indica en la figura 5.11 que muestra muchas cosas «pequeñas» acumuladas. Se trata de un *cúmulo de galaxias,* similar a un cúmulo de estrellas. Así pues, las galaxias se atraen mutuamente a tales distancias y están también agrupadas en cúmulos. Quizá la gravitación exista incluso a distancias de *decenas de millones* de años-luz; hasta donde sabemos ahora, la gravedad parece seguir para siempre inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

No sólo podemos entender las nebulosas, sino que a partir de la ley de la gravitación podemos incluso hacernos alguna idea sobre el origen de las estrellas. Si tenemos una nube grande de polvo y gas, como se indica en la figura 5.12, las atracciones gravitatorias mutuas de los fragmentos de polvo podrían hacerles formar pequeños grumos. Apenas visibles en las figuras hay «pequeños» puntos negros que quizá sean el comienzo de las acumulaciones de polvo y gases que, debido a su gravitación, empiezan a formar estrellas. Aún se debate si hemos visto o no formarse una estrella alguna vez. La figura 5.13 muestra la única pieza de convicción que sugiere que sí lo hemos visto. A la izquierda hay una fotografía de una región de gas con algunas estrellas en ella tomada en 1947, y a la derecha hay otra fotografía, tomada sólo 7 años más tarde, que muestra dos nuevos puntos brillantes. ¿Se ha acumulado gas, ha actuado la gravedad con fuerza suficiente y ha reunido una bola lo bastante grande para que en su interior se inicien reacciones nucleares estelares y la conviertan en una estrella? Quizá sí, y quizá no. Es poco razonable que en sólo 7 años tuviéramos la suerte de ver una estrella transformarse en forma visible; ¡es mucho menos probable que viéramos *dos*!



5.13. ¿Formación de nuevas estrellas?

El experimento de Cavendish



5.14. Un diagrama simplificado del aparato utilizado por Cavendish para verificar la ley de la gravitación universal para objetos pequeños y medir la constante gravitatoria G.

La gravitación, por lo tanto, se extiende sobre distancias enormes. Pero si hay una fuerza entre *cualquier* par de objetos, deberíamos ser capaces de medir la fuerza entre nuestros propios objetos. En lugar de tener que observar estrellas que giran una alrededor de la otra, ¿por qué no tomar una bola de plomo y una canica y observar cómo la canica va hacia la bola de plomo? La dificultad de este experimento, cuando se hace de una forma tan simple, es la propia debilidad o delicadeza de la fuerza. Debe hacerse con extremo cuidado, lo que significa cubrir el aparato para mantenerlo al abrigo del aire, estar seguros de que no está eléctricamente cargado, y cosas parecidas; entonces puede medirse la fuerza. Fue medida por primera vez por Cavendish con un aparato que se muestra esquemáticamente en la figura 5.14. Esto mostró por primera vez la fuerza directa entre dos bolas grandes y fijas de plomo y dos bolas más pequeñas de plomo situadas en los extremos de un brazo sustentado por un hilo muy fino, llamado hilo de torsión. Midiendo cuánto se retuerce el hilo, uno puede medir la intensidad de la fuerza, verificar que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y determinar su intensidad. Así, uno puede determinar de forma precisa el coeficiente G en la fórmula

$$F = G\frac{mm'}{r^2} \tag{5.15}$$

Todas las masas y distancias son conocidas. Ustedes pensarán: «Ya lo conocíamos para la Tierra». Pero lo cierto es que no conocíamos la *masa* de la Tierra. Obteniendo G a partir de este experimento y conociendo con qué fuerza atrae la Tierra, ¡podemos saber indirectamente cuál es la masa de la Tierra! Este experimento se denominó «pesar la Tierra». Cavendish afirmó que él estaba pesando la Tierra, pero lo que estaba midiendo era el coeficiente G de la ley de la gravedad. Esta es la única manera en que puede determinarse la masa de la Tierra. G resulta ser

$$6{,}670 \times 10^{-11} newton \times \frac{m^2}{kg^2} \tag{5.16}$$

Es difícil exagerar la importancia del efecto producido en la historia de la ciencia por este gran éxito de la teoría de la gravitación. Comparemos la confusión, la falta de confianza, el conocimiento incompleto que prevalecía en épocas anteriores, cuando había debates y paradojas interminables, con la claridad y simplicidad de esta ley: este hecho según el cual hay una *regla* tan *simple* que gobierna todas las lunas, los planetas y las estrellas; y además, ¡que el hombre pudo *entenderla* y deducir cómo deberían moverse los planetas! Esta fue la razón del éxito de las ciencias en los años siguientes, pues hizo concebir esperanzas de que los otros fenómenos del mundo podrían tener también leyes tan hermosamente simples.

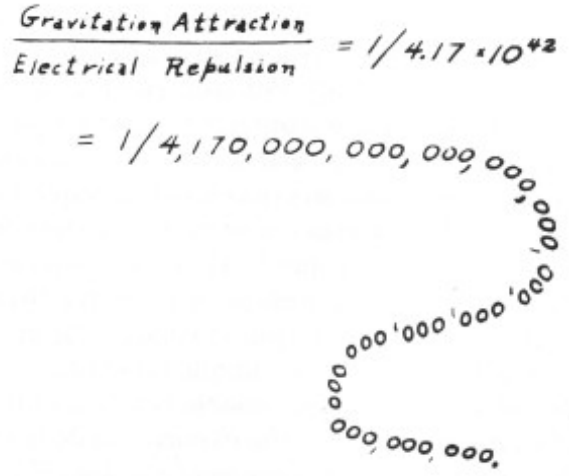
¿Qué es la gravedad?

Pero ¿es esta una ley tan simple? ¿Cuál es su mecanismo? Todo lo que hemos hecho es describir *cómo* se mueve la Tierra alrededor del Sol, pero no hemos dicho *qué la hace moverse.* Newton no hizo hipótesis sobre esto; se contentó con encontrar qué hacía sin entrar en su mecanismo. *Nadie ha proporcionado desde entonces ningún mecanismo.* Es característico de las leyes físicas el que tengan este carácter abstracto. La ley de la conservación de la energía es un teorema concerniente a magnitudes que tienen que ser calculadas y sumadas sin mención del mecanismo; y, del mismo modo, las grandes leyes de la mecánica son leyes matemáticas cuantitativas para las que no se dispone de ningún mecanismo. ¿Por qué podemos utilizar las matemáticas para describir la naturaleza sin un mecanismo subyacente? Nadie lo sabe. Tenemos que continuar porque descubrimos más cosas de ese modo.

Se han sugerido muchos mecanismos para la gravitación. Es interesante considerar uno de ellos, en el que han pensado muchas personas de cuando en cuando. Al principio, uno se siente bastan te excitado y feliz cuando lo «descubre», pero pronto comprende que no es correcto. Fue propuesto por primera vez alrededor de 1750. Supongamos que hubiera muchas partículas moviéndose en el espacio a gran velocidad en todas direcciones y que son sólo ligeramente absorbidas al atravesar la materia. Cuando *son* absorbidas por la Tierra, le comunican un impulso. Sin embargo, puesto que hay tantas marchando en una dirección como en cualquier otra, todos los impulsos se compensan. Pero cuando el Sol está próximo, las partículas que llegan hacia la Tierra a través del Sol son parcialmente absorbidas por éste, de modo que llegan menos procedentes del Sol que las que llegan del lado opuesto. Por consiguiente, la Tierra experimenta un impulso neto hacia el Sol y no se necesita mucho tiempo para ver que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, debido a la variación del ángulo sólido que subtiende el Sol en función de la distancia. ¿Qué está mal en este mecanismo? Implica algunas consecuencias nuevas que *no son ciertas*. Esta idea concreta presenta la siguiente dificultad. La Tierra, al moverse alrededor del Sol, sería golpeada por más partículas procedentes del lado frontal que del lado posterior (cuando ustedes corren bajo la lluvia, ¡la lluvia en su cara es más

intensa que en la parte trasera de su cabeza!). Por consiguiente, la Tierra recibiría más impulso desde la parte frontal, y la Tierra experimentaría una *resistencia al movimiento y* se estaría frenando en su órbita. Podemos calcular el tiempo que sería necesario para que la Tierra se parase como consecuencia de esta resistencia y esto nos dice que no pasaría mucho tiempo antes de que la Tierra se quedase quieta en su órbita, de modo que este mecanismo no funciona. No se ha concebido nunca ningún mecanismo que «explique» la gravedad sin predecir también algún otro fenómeno que no existe.

A continuación discutiremos la posible relación entre la gravitación y otras fuerzas. No hay ninguna explicación de la gravitación en términos de otras fuerzas en el momento actual. No es una variante de la electricidad o nada semejante a eso, de modo que no tenemos explicación. Sin embargo, la gravitación y las otras fuerzas son muy similares, y es interesante advertir las analogías. Por ejemplo, la fuerza de la electricidad entre dos objetos cargados es muy semejante a la ley de la gravitación: la fuerza de la electricidad viene dada por una constante, con signo menos, multiplicada por el producto de las cargas, y varía de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Está dirigida en dirección opuesta: los iguales se repelen. Pero ¿no sigue siendo muy notable que en las dos leyes aparezca la misma función de la distancia? Quizá la gravitación y la electricidad estén relacionadas mucho más estrechamente de lo que pensamos. Se han hecho muchos intentos para unificarlas; la denominada teoría de campo unificado es sólo un intento muy elegante de combinar electricidad y gravitación; pero, al comparar la gravitación y la electricidad, lo más interesante está en las *intensidades relativas* de las fuerzas. Cualquier teoría que contenga a ambas debe ser capaz de deducir también qué intensidad tiene la gravedad.



5.17. Las intensidades relativas de las interacciones eléctrica y gravitatoria entre dos electrones.

Si tomamos, en alguna unidad natural, la repulsión de dos electrones (la carga universal de la naturaleza) debida a la electricidad y la atracción de dos electrones debida a sus masas, podemos medir la razón entre la repulsión eléctrica y la atracción gravitatoria. La razón es independiente de la distancia y es una constante fundamental de la naturaleza. La razón se muestra en la figura 5.17. El valor de la atracción

gravitatoria con respecto a la repulsión eléctrica entre dos electrones es ¡1 dividido por 4,17 *X* 1042! La cuestión es, ¿de dónde sale un número tan grande? No es accidental, como lo es la razón del volumen de la Tierra con respecto al volumen de una pulga. Hemos considerado dos aspectos naturales de la misma cosa, un electrón. Este número fantástico es una constante natural, de modo que implica algo profundo en la naturaleza. ¿De dónde podría salir un número tan extraordinario? Algunos dicen que algún día encontraremos la «ecuación universal», y una de sus raíces será este número. Es muy difícil encontrar una ecuación de la que un número tan fantástico sea una raíz natural. Se han imaginado otras posibilidades; una consiste en relacionarla con la edad del universo. Evidentemente, tenemos que encontrar *otro* número grande en alguna parte. Pero ¿queremos decir la edad del universo en *años?* No, porque los años no son «naturales»; fueron ideados por los hombres. Como ejemplo de algo natural, consideremos el tiempo que tarda la luz en atravesar un protón, 10^{-24} segundos. Si comparamos este tiempo con la *edad del universo*, $2x10^{10}$ años, la respuesta es 10^{-42}. Tiene aproximadamente el mismo número de ceros, de modo que se ha propuesto que la constante gravitatoria está relacionada con la edad del universo. Si fuera así, la constante gravitatoria cambiaría con el tiempo, porque a medida que el universo se hace más viejo la razón entre la edad del universo y el tiempo que necesita la luz para atravesar un protón estaría aumentando poco a poco. ¿Es posible que la constante gravitatoria *esté* cambiando con el tiempo? Por supuesto, los cambios serían tan pequeños que es bastante difícil estar seguros.

Un test que podemos imaginar para ello consiste en determinar cuál habría sido el efecto del cambio durante los últimos 10^9 años, que es aproximadamente el tiempo transcurrido desde la aparición de las formas de vida más primitivas en la Tierra hasta ahora, un intervalo equivalente a una décima parte de la edad del universo. Durante este tiempo la constante gravitatoria habría aumentado aproximadamente en un 10 por 100. Resulta que si consideramos la estructura del Sol el balance entre el peso de su material y el ritmo al que se genera energía radiante en su interior—, podemos deducir que, si la gravedad fuera un 10 por 100 más intensa, el Sol sería mucho más que un 10 por 100 más brillante: ¡el brillo iría como la *sexta potencia* de la constante gravitatoria! Si calculamos lo que le sucede a la órbita de la Tierra cuando la gravedad está cambiando, encontramos que la Tierra habría estado entonces *más cerca.* En conjunto, la Tierra estaría aproximadamente 100 °C más caliente, y el agua no habría estado en el mar sino en forma de vapor en el aire, de modo que la vida no habría comenzado en el mar: Por esta razón *no* creemos ahora que la constante de la gravedad esté cambiando con la edad del universo. Pero argumentos tales como el que acabamos de dar no son muy concluyentes, y el tema no está completamente cerrado.

Es un hecho que la fuerza de la gravitación es proporcional a la *masa,* la magnitud que es fundamentalmente una medida de la *iner*cia, de con cuánta fuerza hay que sujetar algo que está dando vueltas en un círculo. Por consiguiente, dos objetos, uno pesado y uno ligero, que giran alrededor de un objeto más grande debido a la gravedad, describiendo un mismo círculo y a la misma velocidad, permanecerán juntos porque para ir en un círculo se *requiere* una fuerza que es más intensa cuanto más grande es la masa. Es decir, la gravedad es más intensa para una masa dada en *la proporción exacta* para que los dos objetos sigan dando vueltas juntos. Si un objeto

estuviera dentro del otro seguiría *estando* dentro. Es un balance perfecto. Por lo tanto, Gagarin o Titov encontrarían las cosas «ingrávidas» dentro de una nave espacial; si ellos soltasen un trozo de tiza, por ejemplo, éste seguiría dando vueltas a la Tierra exactamente de la misma forma que la nave espacial entera, y por lo tanto parecería estar suspendido ante ellos en el espacio. Es muy interesante que esta fuerza sea *exactamente* proporcional a la masa con gran precisión, porque si no fuera exactamente proporcional habría algún efecto en el que la inercia y el peso diferirían. La ausencia de un efecto semejante ha sido verificada con gran precisión mediante experimentos hechos por primera vez por Eötvös en 1909 y más recientemente por Dicke. Para todas las sustancias ensayadas, las masas y los pesos son exactamente proporcionales dentro de un margen de 1 parte en 1.000 millones, o menos. Este es un experimento notable.

Gravedad y relatividad

Otro tema que merece discusión es la modificación de Einstein a la ley de la gravitación de Newton. A pesar de toda la excitación que creó, ¡la ley de la gravitación de Newton no es correcta! Fue modificada por Einstein para tener en cuenta la teoría de la relatividad. Según Newton, el efecto gravitatorio es instantáneo, es decir, si moviéramos una masa, experimentaríamos de golpe una nueva fuerza debido a la nueva posición de dicha masa; por medios semejantes podríamos enviar señales a velocidad infinita. Einstein presentó argumentos que sugieren que *no podemos enviar señales más rápidas que la velocidad de la luz,* de modo que la ley de la gravitación debe ser errónea. Corrigiéndola para tener en cuenta los retrasos, tenemos una nueva ley, llamada ley de la gravitación de Einstein. Una característica de esta nueva ley que es bastante fácil de entender es la siguiente: en la teoría de la relatividad de Einstein, cualquier cosa que tenga *energía* tiene masa; masa en el sentido de que es atraída gravitatoriamente. Incluso la luz, que tiene una energía, tiene una «masa». Cuando un haz de luz, que tiene energía, pasa cerca del Sol hay una atracción sobre él por parte del Sol. Así pues, la luz no sigue en línea recta, sino que es desviada. Durante un eclipse de Sol, por ejemplo, las estrellas que se ven cerca del Sol aparecerán desplazadas del lugar donde se verían si el Sol no estuviera allí, y esto ha sido observado.

Para terminar, comparemos la gravitación con otras teorías. En años recientes hemos descubierto que toda la masa está hecha de partículas minúsculas y que existen varios tipos de interacciones, tales como fuerzas nucleares, etc. Todavía no se ha encontrado ninguna de estas fuerzas nucleares o eléctricas que explique la gravitación. Los aspectos mecanocuánticos de la naturaleza no han sido todavía trasladados a la gravitación. Cuando la escala es tan pequeña que necesitamos los efectos cuánticos, los efectos gravitatorios son tan débiles que la necesidad de una teoría cuántica de la gravitación no se ha desarrollado todavía. Por otra parte, para la consistencia de nuestras teorías físicas sería importante ver si la ley de Newton modificada en la ley de Einstein puede ser modificada posteriormente para ser consistente con el principio de incertidumbre. Esta última modificación no ha sido todavía completada.

— 6 —

Comportamiento cuántico

Mecánica atómica

En los últimos capítulos hemos discutido las ideas esenciales necesarias para una comprensión de la mayoría de los fenómenos luminosos importantes, o de la radiación electromagnética en general. (Hemos dejado unos pocos temas especiales para el próximo año. Concretamente, la teoría del índice de refracción de los materiales densos y la reflexión total interna.) Lo que hemos tratado se denomina «teoría clásica» de las ondas eléctricas, que resulta ser una descripción muy adecuada de la naturaleza para muchos efectos. No hemos tenido que preocuparnos todavía por el hecho de que la energía luminosa se da en porciones o «fotones».

Como nuestro siguiente tema, nos gustaría abordar el problema del comportamiento de pedazos de materia relativamente grandes: sus propiedades mecánicas y térmicas, por ejemplo. Al discutir éstas, encontraremos que la teoría «clásica» (o más antigua) falla casi de inmediato, porque la materia está hecha realmente de partículas de tamaño atómico. Seguiremos tratando sólo con la parte clásica, porque esa es la única parte que podemos entender utilizando la mecánica clásica que hemos estado aprendiendo. Pero no tendremos mucho éxito. Veremos que en el caso de la materia, a diferencia del caso de la luz, nos encontraremos en dificultades relativamente pronto. Podríamos, por supuesto, prescindir sistemáticamente de los efectos atómicos, pero en lugar de ello insertaremos aquí una pequeña digresión en la que describiremos las ideas básicas de las propiedades cuánticas de la materia, es decir, las ideas cuánticas de la física atómica, de modo que ustedes podrán hacerse una idea de lo que estamos omitiendo. Pues, en efecto, tendremos que dejar fuera algunos temas importantes aunque inevitablemente nos acerquemos a ellos.

Así pues, daremos ahora una *introducción* al tema de la mecánica cuántica, pero no seremos realmente capaces de profundizar en el tema hasta mucho más tarde.

La «mecánica cuántica» es la descripción del comportamiento de la materia en todos sus detalles y, en particular, de lo que sucede a escala atómica. Las cosas a una escala muy pequeña no se comportan como nada de lo que ustedes tengan experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, no se comportan como nubes, o como bolas de billar, o como pesos colgados de muelles, o como nada que ustedes hayan visto alguna vez.

Newton pensaba que la luz estaba hecha de partículas, pero luego se descubrió, como hemos visto aquí, que se comporta como una onda. Sin embargo, posteriormente (a comienzos del siglo XX) se encontró que la luz sí se comportaba a veces como una partícula. En épocas pasadas se pensaba que el electrón, por ejemplo, se comportaba como una partícula, y luego se encontró que en muchos aspectos se comportaba como una onda. Así que realmente no se comporta como ninguna de las dos cosas. Ahora hemos cedido. Decimos: «No es *ni* una cosa *ni* otra».

Hay, no obstante, una feliz circunstancia: los electrones se comportan exactamente igual que la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones y demás) es el mismo para todos; todos son «partículas-ondas», o como quiera que ustedes prefieran llamarlos. Así que lo que aprendamos sobre las propiedades de los electrones (que utilizaremos como ejemplos) se aplicará también a todas las «partículas», incluyendo los fotones de la luz.

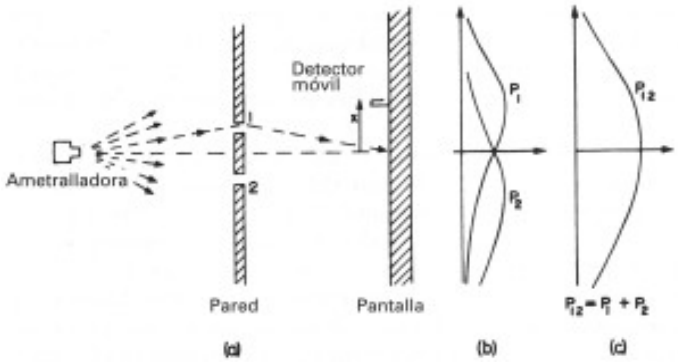
La acumulación gradual de información sobre el comportamiento atómico y a pequeña escala durante el primer cuarto de este siglo, que proporcionó algunos indicios sobre el comportamiento de las cosas pequeñas, produjo una confusión cada vez mayor que fue resuelta finalmente en 1926 y 1927 por Schrödinger, Heisenberg y Born. Estos obtuvieron finalmente una descripción consistente del comportamiento de la materia a pequeña escala. Abordaremos las principales características de esta descripción en este capítulo.

Puesto que el comportamiento atómico es tan diferente de la experiencia ordinaria, resulta muy difícil acostumbrarse a él y se presenta como algo peculiar y misterioso para todos, tanto para el novato como para el físico avezado. Ni siquiera los expertos lo entienden tan bien como quisieran, y es perfectamente razonable que no lo hagan porque toda la experiencia y la intuición humana directa se aplican a objetos grandes. Sabemos cómo actuarán los objetos grandes, pero las cosas a pequeña escala no actúan de ese modo. Así que tenemos que aprender acerca de ellas de manera abstracta o imaginativa y no mediante una conexión con nuestra experiencia directa.

En este capítulo nos encontraremos inmediatamente con el elemento básico del misterioso comportamiento en su forma más extraña. Decidimos examinar un fenómeno que es imposible, *absolutamente* imposible, de explicar de cualquier forma clásica, y que contiene el corazón de la mecánica cuántica. En realidad, contiene el *único* misterio. No podemos explicar el misterio en el sentido de «explicar» cómo funciona. Les *contaremos* cómo funciona. Para contarles cómo funciona tendremos que hablarles de las peculiaridades básicas de toda la mecánica cuántica.

Un experimento con balas

Para tratar de entender el comportamiento cuántico de los electrones, compararemos y contrastaremos su comportamiento, en un montaje experimental concreto, con el comportamiento más familiar de partículas tales como balas y con el comportamiento de ondas tales como las ondas de agua. Consideremos primero el comportamiento de las balas en el montaje experimental mostrado esquemáticamente en la figura 6.1. Tenemos una ametralladora que dispara un chorro de balas. No es una ametralladora muy buena, pues las balas se dispersan (aleatoriamente) sobre una extensión angular bastante grande, tal como se indica en la figura. Frente a la ametralladora tenemos una pared (constituida por una lámina acorazada) que tiene dos agujeros del tamaño suficiente para permitir el paso de una bala. Detrás de la pared hay una pantalla (digamos una pared gruesa de madera) que «absorberá» las balas cuando incidan en ella. Delante de la pantalla tenemos un objeto que llamaremos un «detector» de balas. Podría ser una caja que contenga arena. Cualquier bala que entre en el detector quedara frenada y almacenada. Cuando lo deseemos, podemos vaciar la caja y contar el número de balas que han sido recogidas. El detector puede moverse de un lado a otro (en lo que denominaremos la dirección x).



6.1 Experimento de interferencia con balas.

Con este aparato podemos encontrar experimentalmente la respuesta a la pregunta: «¿Cuál es la probabilidad de que una bala que pasa a través de los agujeros de la pared llegue a un punto de la pantalla situado a una distancia *x* del centro?». En primer lugar, ustedes deben darse cuenta de que tenemos que hablar de probabilidad, porque no podemos decir categóricamente dónde irá a parar cada bala concreta. Una bala que incida por casualidad en uno de los agujeros puede rebotar en los bordes del mismo y terminar en cualquier parte. Por «probabilidad» entendemos las posibilidades de que la bala llegue al detector, que podemos medir contando el número de balas que llegan al detector en un intervalo de tiempo dado y tomando luego el cociente entre este número y el número *total* de balas que inciden en la pantalla durante este tiempo. O, si suponemos que la ametralladora dispara siempre al mismo ritmo durante las medidas, la probabilidad que buscamos es simplemente proporcional al número de balas que llegan al detector en un intervalo de tiempo estándar.

Para nuestros propósitos actuales nos gustaría imaginar un experimento algo idealizado en el que las balas no son balas reales, sino que son balas *indestructibles,*

que no pueden partirse en dos. En nuestro experimento encontramos que las balas siempre llegan en porciones, y cuando encontramos algo en el detector, se trata siempre de una bala entera. Si el ritmo al que dispara la ametralladora se hace muy lento, encontramos que en cualquier instante dado o bien no llega nada o bien llega una y sólo una exactamente una bala a la pantalla. Además, el tamaño de la porción no depende del ritmo de disparo de la ametralladora. Diremos: «Las balas llegan *siempre* en porciones idénticas». Lo que medimos con nuestro detector es la probabilidad de llegada de una porción. Y medimos la probabilidad como una función de *x*. El resultado de tales medidas con este aparato (aún no hemos hecho el experimento, de modo que en realidad estamos imaginando el resultado) se representa en la gráfica dibujada en la parte (c) de la figura 6.1. En la gráfica representamos la probabilidad hacia la derecha y *x* en vertical, de modo que la escala *x* se ajusta al diagrama del aparato. Llamaremos a esta probabilidad P_{12} porque las balas pueden haber atravesado el agujero 1 o el agujero 2. Ustedes no se sorprenderán de que P_{12} sea alta cerca del centro de la gráfica y se haga pequeña si *x* es muy grande. Ustedes pueden preguntarse, sin embargo, por qué P_{12} tiene su valor máximo en $x = 0$. Podemos entender este hecho si repetimos nuestro experimento después de tapar el agujero 2 y lo volvemos a repetir mientras está tapado el agujero 1. Cuando el agujero 2 está tapado, las balas sólo pueden pasar a través del agujero 1, y obtenemos la curva marcada P_1 en la parte (b) de la figura. Como ustedes esperarían, el máximo de P_1 ocurre en el valor de *x* que está alineado con la ametralladora y el agujero 1. Cuando el agujero 1 está cerrado, obtenemos la curva simétrica P_2 dibujada en la figura. P_2 es la distribución de probabilidad para las balas que pasan a través del agujero 2. Comparando las partes (b) y (c) de la figura 6.1, encontramos el importante resultado de que

$$P_{12} = P_1 + P_2 \tag{6.2}$$

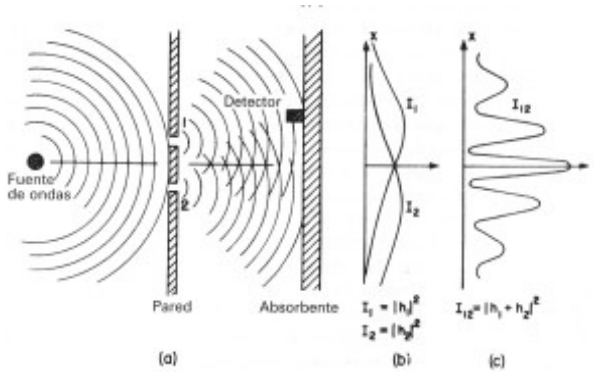
Las probabilidades simplemente se suman. El efecto cuando ambos agujeros están abiertos es la suma de los efectos con cada agujero abierto por separado. Llamaremos a este resultado una observación de *«ausencia de interferencia»,* por una razón que verán más adelante. Hasta aquí lo relativo a las balas. Ellas llegan en porciones, y su probabilidad de llegada no muestra interferencia.

Un experimento con ondas

Ahora queremos considerar un experimento con ondas de agua. El aparato se muestra esquemáticamente en la figura 6.3. Tenemos una cubeta profunda de agua. Un pequeño objeto etiquetado como «fuente de ondas» oscila verticalmente movido por un motor y produce ondas circulares. A la derecha de la fuente tenemos de nuevo una pared con dos agujeros, y más allá de ella hay una segunda pared que, para simplificar las cosas, es un «absorbente», de modo que no hay reflexión de las ondas que llegan a ella. Puede hacerse construyendo una «playa» de arena en pendiente. Delante de la playa colocamos un detector que puede moverse de un lado a otro en la dirección x, como antes. El detector es ahora un dispositivo que mide la «intensidad» del

movimiento del agua. Ustedes pueden imaginar un aparato que mida la altura del movimiento del agua pero cuya escala esté calibrada en proporción al *cuadrado* de la altura real, de modo que la lectura sea proporcional a la intensidad de la onda. Nuestro detector lee entonces en proporción a la *ener*gía transportada por la onda; o más bien, al ritmo al que la energía es transportada al detector.

Lo primero que hay que notar, con nuestro aparato de ondas, es que la intensidad puede tener *cualquier* valor. Si el movimiento de la fuente es muy pequeño, entonces hay solamente un movimiento muy pequeño de ondas en el detector. Cuando hay más movimiento en la fuente, hay más intensidad en el detector. La intensidad de la onda puede tener cualquier valor. *No* diríamos que haya «saltos» en la intensidad de la onda.



6.3 Experimento de interferencia con ondas de agua.

Midamos ahora la intensidad de la onda para varios valores de *x* (manteniendo siempre igual la actividad de la fuente de ondas). Obtenemos la interesante curva marcada I_{12} en la parte (c) de la figura.

Ya hemos calculado cómo pueden surgir tales figuras cuando estudiamos la interferencia de las ondas eléctricas. En este caso observaríamos que la onda original se difracta en los agujeros, y nuevas ondas circulares se dispersan a partir de cada agujero. Si tapamos un agujero cada vez y medimos la distribución de intensidades en el absorbente encontraremos las curvas de intensidad bastante simples mostradas en la parte (b) de la figura. I_1 es la intensidad de la onda procedente del agujero 1 (la que encontramos midiendo cuando el agujero 2 está bloqueado) e I_{12} es la intensidad de la onda procedente del agujero 2 (vista cuando el agujero 1 está bloqueado).

La intensidad I_{12} observada cuando ambos agujeros están abiertos no es ciertamente la suma de I_1 e I_2. Decimos que hay «interferencia» de las dos ondas. En algunos lugares (donde la curva I_{12} tiene sus máximos) las ondas están «en fase» y los picos de las ondas se suman para dar una gran amplitud y, por consiguiente, una gran intensidad. Decimos que las dos ondas están «interfiriendo constructivamente» en tales lugares. Habrá tal interferencia constructiva donde quiera que la distancia desde el detector a un agujero sea un número entero de longitudes de onda mayor (o menor) que la distancia desde el detector al otro agujero.

En aquellos lugares donde las dos ondas llegan al detector con una diferencia de fase de π (donde están en «oposición de fase») el movimiento ondulatorio resultante en el detector será la diferencia de las dos amplitudes. Las ondas «interfieren

destructivamente» y obtenemos un valor pequeño para la intensidad de la onda. Esperamos estos valores pequeños donde quiera que la distancia entre el agujero 1 y el detector difieren de la distancia entre el agujero 2 y el detector en un número impar de semilongitudes de onda. Los bajos valores de I_{12} en la figura 6.3 corresponden a los lugares donde las dos ondas interfieren destructivamente.

Recordarán ustedes que la relación cuantitativa entre I_1, I_2 e I_{12} puede expresarse de la siguiente forma: la altura instantánea de la onda de agua en el detector para la onda procedente del agujero 1 puede escribirse como (la parte real de) $\hat{h}_1 e^{iwt}$, donde la «amplitud» $\hat{h}_1$ es, en general, un número complejo. La intensidad es proporcional a la altura media al cuadrado o, cuando utilizamos los números complejos, a $|\hat{h}_1|^2$. Análogamente, para el agujero 2 la altura es $\hat{h}_2 e^{iwt}$ y la intensidad es proporcional a $|\hat{h}_2|^2$. Y cuando ambos agujeros están abiertos, las alturas de las ondas se suman para dar la altura $(\hat{h}_1+\hat{h}_2)e^{iwt}$ y la intensidad $|\hat{h}_1+\hat{h}_2|^2$. Omitiendo la constante de proporcionalidad para nuestro propósito actual, las relaciones adecuadas para las ondas que interfieren son

$$I_1 = |\hat{h}_1|^2, \quad I_2 = |\hat{h}_2|^2, \quad I_{12} = |\hat{h}_1+\hat{h}_2|^2 \tag{6.4}$$

Notarán ustedes que el resultado es completamente diferente del que se obtenía con balas (6.2). Si desarrollamos $|\hat{h}_1+\hat{h}_2|$ vemos que

$$|\hat{h}_1+\hat{h}_2|^2 = |\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 + 2\,|\hat{h}_1|\,|\hat{h}_2|\cos\delta \tag{6.5}$$

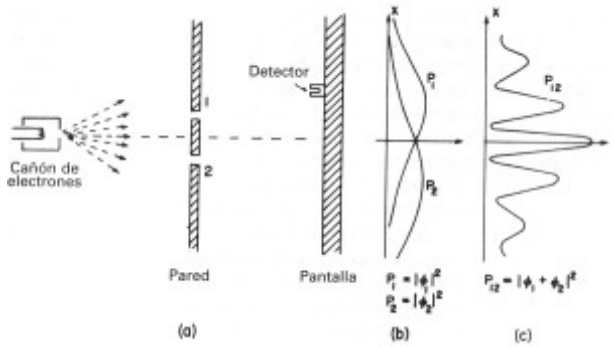
donde δ es la diferencia de fases entre $\hat{h}_1$ y $\hat{h}_2$. En términos de intensidades escribiríamos

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\,(I_1 I_2)^{1/2}\cos\delta \tag{6.6}$$

El último término en (6.6) es el «término de interferencia». Hasta aquí lo relativo a las ondas de agua. La intensidad puede tener cualquier valor, y muestra interferencia.

Un experimento con electrones

Imaginemos ahora un experimento similar con electrones. Se muestra esquemáticamente en la figura 6.7. Tenemos un cañón de electrones que consiste en un filamento de tungsteno calentado mediante una corriente eléctrica y rodeado por una caja metálica con un agujero. Si el filamento está a un voltaje negativo con respecto a la caja, los electrones emitidos por el filamento serán acelerados hacia las paredes y algunos pasarán a través del agujero. Todos los electrones que salgan del cañón tendrán (aproximadamente) la misma energía. Frente al cañón hay de nuevo una pared (simplemente una placa metálica delgada) con dos agujeros. Detrás de la pared hay otra placa que servirá de «pantalla». Delante de la pantalla colocamos un detector móvil. El detector podría ser un contador geiger o, quizá mejor, un multiplicador electrónico, que está conectado a un altavoz.



6.7 Experimento de interferencia con electrones.

Habría que decir antes de seguir que ustedes no deberían tratar de montar este experimento (como podrían haber hecho con los dos que ya hemos descrito). Este experimento nunca ha sido realizado exactamente así. La dificultad está en que el aparato tendría que construirse a una escala imposiblemente pequeña para mostrar los efectos en los que estamos interesados. Estamos realizando un «experimento mental», que hemos escogido porque es fácil de imaginar. Sabemos los resultados que se *obtendrían* porque se *han* realizado muchos experimentos en los que la escala y las proporciones han sido escogidas para mostrar los efectos que vamos a describir.

Lo primero que notamos con nuestro experimento con electrones es que oímos «clicks» agudos procedentes del detector (esto es, del altavoz). Y todos los «clicks» son iguales. *No* hay «medios clicks».

Deberíamos notar también que los «clicks» se producen de forma muy errática. Algo parecido a: click… click click… click… click… click click… click…, etc., como, sin duda, ustedes habrán oído en un contador geiger en acción. Si contamos los clicks que llegan durante un intervalo de tiempo suficientemente largo digamos muchos minutos y luego los contamos de nuevo durante otro periodo de tiempo igual, encontramos que los dos números son aproximadamente iguales. De este modo podemos hablar del *ritmo promedio* al que se oyen los clicks (tantos y tantos clicks por minuto en promedio).

Cuando desplazamos el detector, el *ritmo* con el que aparecen los clicks se hace más rápido o más lento, pero el tamaño (el ruido) de cada click es siempre el mismo. Si bajamos la temperatura del filamento en el cañón, el ritmo de clicks disminuye, pero cada click sigue sonando igual. Tendríamos que notar también que si colocamos dos detectores separados en la pantalla, uno u otro hará click, pero nunca los dos a la vez. (Salvo que, de cuando en cuando, si hubiera dos clicks muy próximos en el tiempo, nuestro oído quizá no notase la separación.) Concluimos, por consiguiente, que sea lo que sea lo que llega a la pantalla lo hace en «porciones». Todas las «porciones» son del mismo tamaño: sólo llegan «porciones» enteras, y llegan a la pantalla de una en una. Diremos: «Los electrones llegan siempre en porciones idénticas».

Podemos proceder ahora de la misma forma que hicimos en nuestro experimento con balas para encontrar experimentalmente la respuesta a la pregunta: «¿Cuáles son las probabilidades relativas de que una «porción» electrónica llegue a la pantalla a diferentes distancias *x* del centro?». Como antes, obtenemos la probabilidad relativa observando el ritmo de clicks mientras se mantiene constante la actividad del cañón.

La probabilidad de que llegue una porción a un *x* concreto es proporcional al ritmo promedio de clicks en dicho *x*.

El resultado de nuestro experimento es la interesante curva señalada P_{12} en la parte (c) de la figura 6.7. ¡Sí! Así es como funcionan los electrones.

La interferencia de las ondas electrónicas

Tratemos ahora de analizar la curva de la figura 6.7 para ver si podemos entender el comportamiento de los electrones. Lo primero que tendríamos que decir es que, puesto que llegan en porciones, cada porción, que podemos llamar un electrón, ha atravesado o bien el agujero 1 o bien el agujero 2. Escribamos esto en forma de una «Proposición»:

Proposición A: cada electrón y atraviesa el agujero 1 o atraviesa el agujero 2. (6.8)

Aceptando la Proposición A, todos los electrones que llegan a la pantalla pueden dividirse en dos clases: 1) los que han atravesa*do* el agujero 1, y 2) los que han atravesado el agujero 2. Nuestra curva observada debe ser entonces la suma de los efectos de los *electrones que atraviesan el* agujero 1 y los electrones que atraviesan el agujero 2. Comprobemos esta idea mediante el experimento.

En primer lugar, haremos una medida para los electrones que atraviesan el agujero 1. Bloqueamos el agujero 2 y hacemos nuestro recuento de clicks del detector. A partir del ritmo de recuento, obtenemos P_1. El resultado de la medida se muestra en la curva señalada P_1 en la parte (b) de la figura 6.7. El resultado parece bastante razonable. De modo análogo medimos P_2, la distribución de probabilidad para los electrones que atraviesan el agujero 2. El resultado de esta medida se muestra también en la figura.

Es evidente que el resultado P_{12} obtenido con *ambos* agujeros abiertos no es la suma de P_1 y P_2, las probabilidades para cada agujero por separado. Por analogía con nuestro experimento con ondas de agua, decimos: «Hay interferencia».

Para electrones: $P_{12} :\neq P_1 + P_2$ (6.9)

¿Cómo puede producirse una interferencia semejante? Quizá deberíamos decir: «Bien, esto significa, presumiblemente, que *no* es *verdad* que las porciones atraviesen el agujero 1 o el agujero 2, porque, si así fuera, las probabilidades deberían sumarse. Quizá siguen un camino más complicado. Se dividen por la mitad y...». Pero ¡no! No pueden, llegan siempre en porciones... «Bien, quizá algunos de ellos pasan a través de 1, y luego vuelven a pasar a través de 2, y luego vuelven algunas veces más, o por algún otro camino complicado... entonces, al cerrar el agujero 2 cambiamos las posibilidades de que un electrón que *empezó* atravesando el agujero 1 llegue finalmente a la pantalla...» ¡Pero, un momento! Hay algunos puntos a los que llegan muy pocos electrones cuando *ambos* agujeros están abiertos, pero que reciben muchos electrones si cerramos un agujero, así que *cerrar* un agujero *aumenta* el

número de electrones procedentes del otro. Nótese, sin embargo, que en el centro de la figura P_{12} es más del doble de la suma $P_1 + P_2$. Es como si cerrar un agujero *disminuyese* el número de electrones que atraviesan el otro agujero. Parece difícil explicar *ambos* efectos proponiendo que los electrones viajan por caminos complicados.

Todo esto es bastante misterioso. Y cuanto más lo miren, más misterioso parece. Se han propuesto muchas ideas para tratar de explicar la curva P_{12} en términos de electrones individuales que siguen vías complicadas a través de los agujeros. Ninguna de ellas ha tenido éxito. Ninguna de ellas puede dar la curva correcta para P_{12} en términos de P_1 y P_2.

Pero, de forma bastante sorprendente, las *matemáticas* que relacionan P_1 y P_2 con P_{12} son extraordinariamente sencillas. En efecto, P_{12} es exactamente igual que la curva I_{12} de la figura 6.3, y ésta era sencilla. Lo que está pasando en la pantalla puede describirse mediante dos números complejos que podemos llamar ϕ_1 y ϕ_2 (son funciones de *x*, por supuesto). El cuadrado del valor absoluto de ϕ_1 da el efecto cuando sólo el agujero 1 está abierto. Es decir, $P_1 = |\phi_1|^2$. El efecto cuando sólo el agujero 2 está abierto viene dado por ϕ_2 de la misma forma. Es decir, $P_2 = |\phi_2|^2$. Y el efecto combinado de los dos agujeros es simplemente $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$. ¡Las *matemáticas* son las mismas que teníamos para las ondas de agua! (Es difícil ver cómo se podría obtener un resultado tan sencillo a partir de un juego complicado de electrones que van y vienen a través de la placa siguiendo alguna trayectoria extraña.)

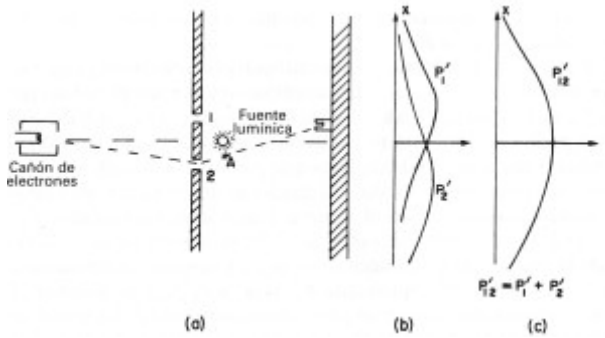
Concluimos lo siguiente: los electrones llegan en porciones, como partículas, y la probabilidad de la llegada de estas porciones se distribuye como la distribución de la intensidad de una onda. En este sentido es en el que decimos que un electrón se comporta «a veces como partícula y a veces como onda».

Dicho sea de paso, cuando estábamos tratando con ondas clásicas definíamos la intensidad como la media temporal del cuadrado de la amplitud de la onda, y utilizábamos números complejos como un truco matemático para simplificar el análisis. Pero en mecánica cuántica resulta que las amplitudes *deben* representarse con números complejos. Las partes reales solas no bastan. Este es un punto técnico, por el momento, porque las fórmulas parecen exactamente Iguales.

Puesto que la probabilidad de llegada a través de ambos agujeros viene dada de una forma tan simple, aunque no sea igual a (P_1+P_2), esto es realmente todo lo que hay que decir. Pero hay muchas sutilezas implicadas en el hecho de que la naturaleza funcione de este modo. Quisiéramos ahora ilustrar para ustedes algunas de estas sutilezas. En primer lugar, puesto que el número que llega a un punto concreto *no* es igual al número que llega a través de 1 más el número que llega a través de 2, tal como hubiéramos concluido a partir de la proposición A, indudablemente deberíamos concluir que la *Proposición A es falsa. No* es verdad que los electrones pasen *o bien* a través del agujero 1 *o bien a* través del agujero 2. Pero esta conclusión puede ser verificada con otro experimento.

Observando los electrones

Intentaremos ahora el siguiente experimento. A nuestro aparato de electrones le añadiremos una fuente lumínica muy intensa, colocada detrás de la pared y entre los dos agujeros, como se muestra en la figura 6.10. Sabemos que las cargas eléctricas dispersan la luz. Así, cada vez que pase un electrón, e independientemente de por dónde pase, en su camino hacia el detector dispersará luz hacia nuestros ojos y podremos *ver* dónde está el electrón. Si, por ejemplo, un electrón fuera a tomar el camino a través del agujero 2 que está indicado en la figura 6.10, deberíamos ver un destello luminoso procedente de la vecindad del lugar señalado en la figura. Si un electrón atraviesa el agujero 1 esperaríamos ver un destello en la vecindad del agujero superior. Si se diera el caso de recibir luz de ambos lugares al mismo tiempo, porque el electrón se divide por la mitad... ¡Hagamos simplemente el experimento!



6.10 Un experimento diferente con electrones.

Esto es lo que vemos: *cada* vez que oímos un «click» procedente de nuestro detector electrónico (en la pantalla), *vemos también* un destello luminoso *o bien* cerca del agujero 1 *o bien* cerca del agujero 2, ¡pero *nunca* ambos al mismo tiempo! Y observamos el mismo resultado sea cual sea la posición del detector. A partir de esta observación concluimos que, cuando miramos los electrones, encontramos que ellos atraviesan un agujero o el otro. Experimentalmente, la Proposición A es necesariamente verdadera.

¿Qué es entonces lo que está mal en nuestro argumento *en contra* de la Proposición A? ¿Por qué P_{12} *no es* exactamente igual a $P_1 + P_2$*?* ¡Volvamos al experimento! Sigamos la pista de los electrones y descubramos qué están haciendo. Para cada posición (localización *x*) del detector contaremos los electrones que llegan y *también* tomaremos nota de qué agujero atraviesan, observando los destellos. Podemos tomar nota de las cosas del modo siguiente: cada vez que oigamos un «click» anotaremos un punto en la columna 1 si vemos el destello cerca del agujero 1, y si vemos el destello cerca del agujero 2, anotaremos un punto en la columna 2. Cada electrón que llega queda registrado en una de las dos categorías: aquellos que atraviesan 1 y aquellos que atraviesan 2. A partir del número registrado en la columna 1 obtenemos la probabilidad P'_1 de que un electrón llegue al detector vía el agujero 1; y a partir del número registrado en la columna 2 obtenemos P'_2, la probabilidad de que un electrón llegue al detector vía el agujero 2. Si ahora repetimos tales medidas para

muchos valores de *x*, obtenemos las curvas para P'_1 y P'_2 mostradas en la parte (b) de la figura 6.10.

Bien, ¡esto no es demasiado sorprendente! Obtenemos para P'_1 algo bastante similar a lo que obtuvimos antes para P_1 al bloquear el agujero 2; y P'_2 es similar a lo que obtuvimos al bloquear el agujero 1. Así pues, *no* hay ningún asunto complicado como pudiera ser el paso a través de ambos agujeros. Cuando los observamos, los electrones los atraviesan simplemente como esperaríamos que los atravesasen. Ya estén los agujeros abiertos o cerrados, aquellos electrones que vemos pasar a través del agujero 1 se distribuyen de la misma forma independientemente de que el agujero 2 esté abierto o cerrado.

¡Pero esperen! ¿Qué tenemos *ahora* para la probabilidad *total*, la probabilidad de que un electrón llegue al detector por cualquier camino? Ya tenemos esa información. Simplemente hagamos como si no hubiéramos mirado los destellos luminosos y acumulemos los clicks del detector que hemos separado en las dos columnas. Tan sólo *debemos sumar* los números. Para la probabilidad de que un electrón llegue a la pantalla atravesando un agujero u otro encontramos $P'_{12} = P_1 + P_2$. Es decir, aunque tuvimos éxito en observar por qué agujero pasó el electrón, ya no obtenemos la antigua curva de interferencia P_{12}, sino una nueva, P'_{12}, ¡que ahora no muestra interferencia! Si desconectamos la luz, recuperamos P_{12}.

Debemos concluir que *cuando miramos los electrones* la distribución de los mismos en la pantalla es diferente de cuando no los miramos. ¿Quizá es el encendido de nuestra fuente luminosa lo que perturba las cosas? Probablemente los electrones son muy delicados, y la luz, cuando es dispersada por los electrones, les da un empujón que cambia su movimiento. Sabemos que el campo eléctrico de la luz actuando sobre una carga ejercerá una fuerza sobre ella. Quizá *deberíamos* esperar por ello que el movimiento sea alterado. En cualquier caso, la luz ejerce una gran influencia sobre los electrones. Al tratar de «observar» los electrones hemos alterado sus movimientos. Es decir, el empujón dado a un electrón cuando el fotón es dispersado por él es tal que altera el movimiento del electrón lo suficiente para que, si *hubiera* podido ir allí donde P_{12} tenía un máximo, en su lugar aterrizará donde P_{12} tenía un mínimo; por esto es por lo que ya no vemos los efectos de interferencia ondulatoria.

Quizá ustedes estén pensando: «¡No utilicemos una fuente tan brillante! ¡Reduzcamos la intensidad! Las ondas luminosas serán entonces más débiles y no perturbarán tanto a los electrones. Seguramente al hacer la luz cada vez más tenue llegará a ser finalmente suficientemente débil para tener un efecto despreciable». Muy bien. Intentémoslo. Lo primero que observamos es que los destellos luminosos dispersados por el paso de los electrones *no* se hacen más débiles. Los *destellos tienen siempre el mismo tamaño.* Lo único que sucede cuando la luz se hace más tenue es que a veces oímos un «click» procedente del detector pero no vemos *ningún destello en absoluto.* El electrón ha pasado sin ser «visto». Lo que estamos observando es que la luz actúa *también* como los electrones; *sabíamos* que era «ondulada», pero ahora encontramos también que viene «en porciones». Siempre llega o es dispersada en porciones que llamamos «fotones». Cuando disminuimos la int*ensidad* de la fuente lumínica no cambiamos el *tamaño* de los fotones, sino sólo el *ritmo* al que son emitidos. *Esto* explica por qué, cuando nuestra fuente es tenue, algunos electrones

pasan sin ser vistos. Resulta que no había ningún fotón presente en el instante en que el electrón atravesó el agujero.

Todo esto es algo descorazonador. Si es cierto que cada vez que «vemos» el electrón vemos un destello del mismo tamaño, entonces los electrones que vemos son *siempre* los perturbados. Intentemos, en cualquier caso, el experimento con una luz tenue. Ahora, cada vez que oigamos un click en el detector anotaremos un punto en alguna de las tres columnas: en la columna (1) los electrones vistos en el agujero 1, en la columna (2) los electrones vistos en el agujero 2, y en la columna (3) los electrones no vistos. Cuando juntamos nuestros datos (para calcular las probabilidades) encontramos estos resultados: los «vistos en el agujero 1» tienen una distribución similar a P'_1; los «vistos en el agujero 2» tienen una distribución similar a P'_2 (de modo que los «vistos por el agujero 1 o por el agujero 2 tienen una distribución similar a P'_{12}); y los «no vistos» tienen una distribución «ondulatoria» exactamente igual que P_{12} de la figura 6.6! Si *los electrones no son vistos, ¡tenemos interferencia!*

Esto es comprensible. Cuando no vemos el electrón, ningún fotón lo perturba, y cuando lo vemos es que un fotón lo ha perturbado. Hay siempre la misma cantidad de perturbación, puesto que todos los fotones de la luz producen efectos del mismo tamaño, y el efecto de los fotones al ser dispersados es suficiente para borrar cualquier efecto de interferencia.

¿No hay *alguna* forma de que podamos ver los electrones sin perturbarlos? Aprendimos en un capítulo anterior que el momento) transportado por un «fotón» es inversamente proporcional a su longitud de onda ($p = h/\lambda$). Ciertamente el empujón dado al electrón cuando el fotón es dispersado hacia nuestros ojos depende del momento que transporta el fotón. ¡Ajá! Si sólo queríamos perturbar ligeramente a los electrones no deberíamos haber disminuido *la intensidad* de la luz, sino que deberíamos haber disminuido su *frecuencia* (que es lo mismo que incrementar su longitud de onda). Utilicemos luz de un color más rojo. Podríamos entonces utilizar luz infrarroja, o radioondas (como el radar), y «ver» dónde fue el electrón con ayuda de algún equipo que pueda «ver» luz de estas longitudes de onda más largas. Si utilizamos luz «más suave» quizá podamos evitar el perturbar tanto a los electrones.

Intentemos el experimento con ondas más largas. Seguiremos repitiendo nuestro experimento cada vez con luz de una mayor longitud de onda. Al principio, parece que nada cambia. Los resultados son los mismos. Luego sucede algo terrible. Recordarán ustedes que cuando discutimos el microscopio señalamos que, debido a la *naturaleza ondulatoria* de la luz, hay una limitación a lo próximos que dos puntos pueden estar y seguir viéndose como dos puntos separados. Esta distancia es del orden de la longitud de onda de la luz. Por ello, ahora, al hacer la longitud de onda más larga que la distancia entre nuestros agujeros, vemos un *gran* destello borroso cuando la luz es dispersada por los electrones. ¡Ya no podemos decir por qué agujero pasó el electrón! ¡Simplemente sabemos que fue a alguna parte! Y es solamente con luz de este color cuando encontramos que los empujones dados a los electrones son suficientemente pequeños para que P'_{12} empiece a parecerse a P_{12}, que empezamos a obtener algún efecto de interferencia. Y es sólo con longitudes de onda mucho más largas que la separación de los dos agujeros (cuando no tenemos ninguna posibilidad de decir dónde fue el electrón) cuando la perturbación debida a la luz se hace suficientemente pequeña para que obtengamos de nuevo la curva P_{12} mostrada en la figura 6.7.

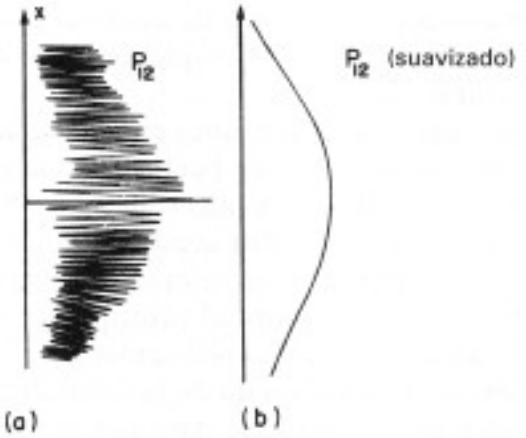
En nuestro experimento encontramos que es imposible disponer la luz de tal modo que uno pueda decir por qué agujero pasó el electrón y al mismo tiempo no se perturbe la figura. Heisenberg sugirió que las entonces nuevas leyes de la naturaleza sólo podrían ser consistentes si hubiera alguna limitación básica a nuestras capacidades experimentales que hasta entonces no se había reconocido. Él propuso, como un principio general, su *principio de incertidumbre,* que podemos establecer en términos de nuestro experimento de la siguiente forma: «Es imposible diseñar un aparato para determinar por qué agujero pasó el electrón y que no perturbe al mismo tiempo los electrones lo suficiente para destruir la figura de interferencia». Si un aparato es capaz de determinar por qué agujero pasó el electrón, no *puede* ser tan delicado que no perturbe la figura de una forma esencial. Nadie ha encontrado nunca (ni siquiera imaginado) una forma de evitar el principio de incertidumbre. Por ello debemos suponer que describe una característica básica de la naturaleza.

La teoría completa de la mecánica cuántica que utilizamos ahora para describir los átomos y, de hecho, toda la materia, depende de la corrección del principio de incertidumbre. Puesto que la mecánica cuántica es una teoría tan acertada, nuestra creencia en el principio de incertidumbre se ve reforzada. Pero si se descubriera alguna vez una forma de «batir» al principio de incertidumbre, la mecánica cuántica daría resultados inconsistentes y tendría que ser descartada como una teoría válida de la naturaleza.

«Bien dirán ustedes, ¿qué pasa con la Proposición A? ¿Es cierto, o no es cierto, que el electrón pasa a través del agujero 1 o pasa a través del agujero 2?» La única respuesta que puede darse es que hemos encontrado a partir de experimentos que tenemos que pensar de una forma especial para no caer en inconsistencias. Lo que debemos decir (para evitar hacer predicciones erróneas) es lo siguiente: si uno mira los agujeros, o más precisamente, si uno tiene un aparato que es capaz de determinar si los electrones atraviesan el agujero 1 o el agujero 2, entonces uno *puede* decir que atraviesan el agujero 1 o el agujero 2. Pero, cuando uno no trata de decir qué camino sigue el electrón, cuando no hay nada en el experimento que perturbe a los electrones, entonces uno *no puede* decir que un electrón atraviesa o el agujero 1 o el agujero 2. Si uno dice eso, y empieza a hacer deducciones a partir de dicho enunciado, cometerá errores en el análisis. Esta es la cuerda floja lógica sobre la que debemos caminar si queremos describir acertadamente la naturaleza.

Si el movimiento de toda la materia así como el de los electrones debe describirse en términos de ondas, ¿qué pasa con las balas en nuestro primer experimento? ¿Por qué no vimos allí una figura de interferencia? Resulta que para las balas las longitudes de onda eran tan minúsculas que las figuras de interferencia se hacían muy apretadas. Tan apretadas, de hecho, que con ningún detector de tamaño finito se podrían distinguir los máximos y los mínimos separados. Lo que vimos era sólo una especie de promedio, que es la curva clásica. En la figura 6.11 hemos tratado de indicar esquemáticamente lo que sucede con objetos a gran escala. La parte (a) de la figura muestra la distribución de probabilidad que podría predecirse para las balas, utilizando la mecánica cuántica. Se supone que las rápidas oscilaciones representan la figura de interferencia que se obtiene para ondas de muy corta longitud de onda. Cualquier detector físico, sin embargo, promediará varias oscilaciones de la curva de

probabilidad, de modo que las medidas muestran la curva suave dibujada en la parte (b) de la figura.



6.11 Figura de interferencia con balas: (a) real (esquemática); (b) observada.

Primeros principios de la mecánica cuántica

Escribiremos ahora un resumen de las principales conclusiones de nuestros experimentos. Sin embargo, pondremos los resultados en una forma que los haga verdaderos para una clase general de tales experimentos. Podemos escribir nuestro resumen de forma más sencilla si definimos primero un «experimento ideal» como uno en el que no hay influencias externas inciertas, es decir, no hay agitación u otras cosas que pasan y que no podemos tener en cuenta. Seríamos bastante precisos si dijéramos: «Un experimento ideal es uno en el que todas las condiciones iniciales y finales del experimento están perfectamente especificadas». Lo que llamaremos «un suceso» es, en general, sólo un conjunto específico de condiciones iniciales y finales. (Por ejemplo: «un electrón sale del cañón, llega al detector, y no sucede ninguna otra cosa».) Ahora nuestro resumen.

RESUMEN

1) La probabilidad de un suceso en un experimento ideal viene dada por el cuadrado del valor absoluto de un número complejo ø que se denomina amplitud de probabilidad.

P = probabilidad
ø = amplitud de probabilidad

$$P = |\phi|^2 \tag{6.12}$$

2) Cuando un suceso puede ocurrir de varias formas alternativas, la amplitud de probabilidad para el suceso es la suma de las amplitudes de probabilidad para cada forma considerada por separado. Existe interferencia.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$
$$P = |\phi_1 + \phi_2|^2 \tag{6.13}$$

3) Si se realiza un experimento que es capaz de determinar si se ha seguido una u otra alternativa, la probabilidad del suceso es la suma de las probabilidades para cada alternativa. Se pierde la interferencia.

$$P = P_1 + P_2 \tag{6.14}$$

A uno aún le gustaría preguntar: «¿Cómo funciona? ¿Cuál es el mecanismo que subyace en la ley?». Nadie ha encontrado ningún mecanismo tras la ley. Nadie puede «explicar» nada más que lo que acabamos de «explicar». Nadie les dará ninguna representación más profunda de la situación. No tenemos ninguna idea sobre un mecanismo más básico a partir del cual puedan deducirse estos resultados.

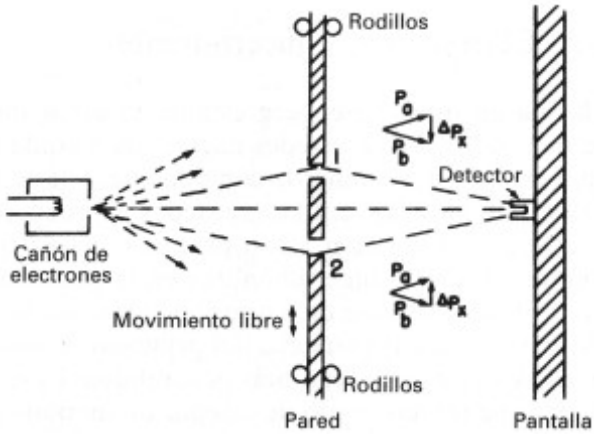
Nos gustaría resaltar una diferencia muy importante entre la mecánica clásica y la cuántica. Hemos estado hablando de la posibilidad de que un electrón llegue en una circunstancia dada. Hemos dado por hecho que en nuestro montaje experimental (o incluso en el mejor montaje posible) sería imposible predecir exactamente lo que sucedería. ¡Sólo podemos predecir las probabilidades! Esto significaría, si fuera cierto, que la física ha abandonado el problema de tratar de predecir exactamente lo que sucederá en una circunstancia definida. ¡Sí! La física ha abandonado. No *sabemos cómo predecir lo que sucedería en una circunstancia dada, y* ahora creemos que es imposible, que lo único que puede predecirse es la probabilidad de sucesos diferentes. Hay que reconocer que esto es un retroceso en nuestro ideal primario de comprender la naturaleza. Quizá sea un paso atrás, pero nadie ha visto la forma de evitarlo.

Haremos ahora unos pocos comentarios sobre una sugerencia que se ha propuesto a veces para tratar de evitar la descripción que hemos dado: «Quizá el electrón tiene algún tipo de mecanismo interno —algunas variables internas— que aún no conocemos. Quizá sea por esto por lo que no podemos predecir lo que sucederá. Si pudiéramos mirar más de cerca el electrón podríamos ser capaces de decir dónde acabaría». Hasta donde sabemos, esto es imposible. Seguiríamos estando en dificultades. Imaginemos que dentro del electrón hay algún tipo de mecanismo que determina dónde va a ir a parar. Este mecanismo debe determinar *también* por qué agujero va a pasar en su camino. Pero no debemos olvidar que lo que está dentro del electrón no debería ser dependiente de lo que *nosotros* hacemos, y en particular de si abrimos o cerramos uno de los agujeros. Así, si un electrón, antes de salir, ha decidido ya a) por qué agujero va a pasar, y b) dónde va a acabar, deberíamos encontrar P_1 para aquellos electrones que han elegido el agujero 1, P_2 para aquellos que han elegido el agujero 2, y *necesariamente* la suma $P_1 + P_2$ para aquellos que llegan a través de los dos agujeros. No parece haber ninguna forma de evitar esto. Pero hemos verificado experimentalmente que este no es el caso. Y nadie ha imaginado una forma de escapar a este rompecabezas. Así, en el momento actual debemos limitarnos a calcular probabilidades. Decimos «en el momento actual», pero sospechamos con mucha fuerza que hay algo que seguirá para siempre con nosotros que es imposible romper el rompecabezas y que así es realmente la naturaleza.

El principio de incertidumbre

Esta es la forma en que Heisenberg estableció originalmente el principio de incertidumbre: si ustedes hacen una medida en cualquier objeto, y pueden determinar la componente *x* de su momento con una incertidumbre *Δp*, entonces ustedes no pueden, al mismo tiempo, conocer su posición *x* con precisión mayor que $\Delta x = h/\Delta p$. Los productos de las incertidumbres en la posición *y* en el momento en cualquier instante deben ser mayores que la constante de Planck. Este es un caso especial del principio de incertidumbre que fue establecido antes con más generalidad. El enunciado más general era que no hay modo de diseñar un montaje para determinar cuál de las dos alternativas es tomada sin destruir al mismo tiempo la figura de interferencia.

Mostremos para un caso particular que el tipo de relación dada por Heisenberg debe ser cierta para evitar el vernos en dificultades. Imaginemos una modificación del experimento de la figura 6.6, en la que la pared con los agujeros consiste en una placa montada sobre rodillos de modo que se puede mover libremente arriba y abajo (en la dirección *x*), como se muestra en la figura 6.15. Observando cuidadosamente el movimiento de la placa podemos tratar de decir por qué agujero pasa un electrón. Imaginemos lo que sucede cuando el detector está colocado en $x = 0$. Cabría esperar que un electrón que pasa a través del agujero 1 fuera desviado hacia abajo por la placa para llegar al detector. Puesto que la componente vertical del momento del electrón es alterada, la placa debe retroceder con un momento igual en dirección opuesta. La placa recibirá un empujón hacia arriba. Si el electrón atraviesa el agujero inferior, la placa debería experimentar un empujón hacia abajo. Es evidente que, para cada posición del detector, el momento recibido por la placa tendrá un valor diferente para un paso a través del agujero 1 que; para un paso a través del agujero 2. ¡Así, sin perturbar los electrones en *absoluto*, sino simplemente observando la *placa*, podemos decir qué camino siguió el electrón!



6.15 Un experimento en el que se mide el retroceso de la pared.

Ahora bien, para hacer esto es necesario saber cuál es el momento de la pantalla antes de que el electrón la atraviese. De este modo, cuando medimos el momento después de que ha pasado el electrón, podemos calcular cuánto ha cambiado el momento de la placa. Recordemos, no obstante, que según el principio de

incertidumbre no podemos conocer al mismo tiempo la posición de la placa con una precisión arbitraria. Pero si no sabemos exactamente *dónde* está la placa no podemos decir exactamente dónde están los dos agujeros. Estarán en un lugar diferente para cada electrón que pase. Esto significa que el centro de nuestra figura de interferencia tendrá una posición diferente para cada electrón. Las oscilaciones de la figura de interferencia quedarán borradas. Se podría mostrar cuantitativamente que si determinamos el momento de la placa con precisión suficiente para determinar a partir de la medida del retroceso qué agujero fue utilizado, entonces la incertidumbre en la posición *x* de la placa será, según el principio de incertidumbre, suficiente para que la figura observada en el detector se desplace en un sentido u otro a lo largo de la dirección *x* una distancia aproximadamente igual a la que hay desde un máximo a su mínimo más próximo. Tal desplazamiento aleatorio es suficiente para borrar la figura de modo que no se observe interferencia.

El principio de incertidumbre «protege» a la mecánica cuántica. Heisenberg reconoció que si fuera posible medir el momento y la posición simultáneamente con una precisión mayor, la mecánica cuántica se vendría abajo. Por ello, propuso que debe ser imposible. Luego la gente se sentó y trató de imaginar formas de hacerlo, y nadie pudo imaginar una forma de medir la posición y el momento de algo una pantalla, un electrón, una bola de billar, cualquier cosa con una precisión mayor. La mecánica cuántica mantiene su peligrosa pero precisa existencia.