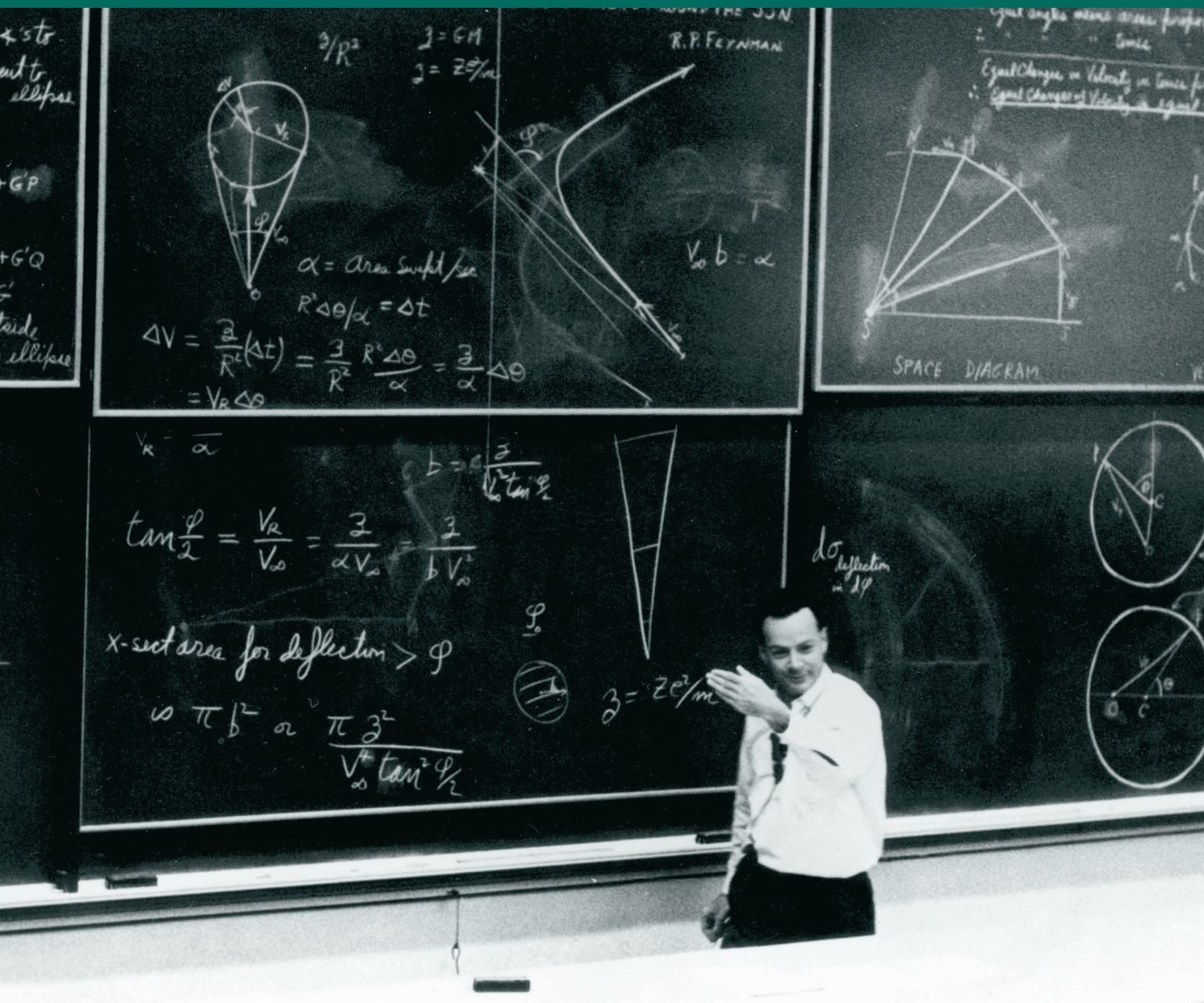


Lecciones de física de Feynman, Mecánica, radiación y calor

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton
y Matthew Sands



EDICIONES
CIENTÍFICAS
UNIVERSITARIAS

TEXTO CIENTÍFICO
UNIVERSITARIO

Richard P. Feynman (Nueva York, 1918-Los Ángeles, 1988) reconocido físico estadounidense, ciencias en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y el doctorado en la Universidad de Princeton. Enseñó en Cornell y en el Instituto de Tecnología de California (Caltech). En 1965 recibió el Premio Nobel de Física, junto con Sin-Itiro Tomonaga y Julian Schwinger que por su trabajo fundamental en electrodinámica cuántica, con profundas consecuencias para la física de las partículas elementales.

Robert B. Leighton (Detroit, 1919-Pasadena, 1997) realizó un trabajo pionero en física de estado sólido, física de rayos cósmicos, los comienzos de la física moderna de partículas, física solar, fotografía planetaria, astronomía infrarroja y astronomía de ondas milimétricas y submilimétricas a lo largo de su vida. Fue ampliamente conocido por su diseño innovador de instrumentos científicos, y muy admirado como profesor.

Matthew Sands (Oxford, Massachusetts 1919- Santa Cruz, California, 2014), reconocido físico y profesor, doctor por el MIT. Después de la guerra, Sands ayudó a fundar la Federación de Científicos Atómicos de Los Álamos, que presionó contra el uso de armas nucleares. Participó en la construcción del sincrotrón de Caltech, fue director del Acelerador Lineal de Stanford, entre otros cargos científicos y educativos.

EDICIONES CIENTÍFICAS UNIVERSITARIAS

SERIE TEXTO CIENTÍFICO UNIVERSITARIO

LECCIONES DE FÍSICA DE FEYNMAN, I

RICHARD P. FEYNMAN
ROBERT B. LEIGHTON • MATTHEW SANDS

Lecciones de física de Feynman

I. Mecánica, radiación y calor



FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Primera edición en inglés, 1963
Primera edición en español, 1971
Primera edición FCE, 2018
Primera edición electrónica (PDF), 2018

Feynman, Richard P., Robert B. Leighton y Matthew Sands

Lecciones de física de Feynman I. Mecánica, radiación y calor / Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands ; trad. de Enrique Oelker L., Hugo Espinosa D., Carlos Alberto Heras, Juan Martín y Marfil ; colab. de Ricardo Gómez. — México : FCE, 2018

xvii, 7, [596] p. ; ilustr. ; 28 × 21 cm — (Colec. Ediciones Científicas Universitarias)

Título original: *The Feynman Lectures on Physics, I. Mainly Mechanics, Radiation, and Heat*

ISBN 978-607-16-5972-9 (Obra completa)

ISBN 978-607-16-5973-6 (Vol. 1)

1. Mecánica 2. Radiación 3. Calor 4. Física I. Leighton, Robert B., coaut. II. Sands, Matthew, coaut. III. Oelker L., Enrique, tr. IV. Espinosa D., Hugo, tr. V. Heras, Carlos Alberto, tr. VI. Martín y Marfil, Juan, tr. VII. Gómez, Ricardo, colab. VIII. Ser. IX. t.

LC QC23.F47

Dewey 530 F574l

Diseño de portada: Laura Esponda Aguilar

Fotografía de portada: Richard Feynman (1918-1988), físico teórico estadounidense.

Crédito: US Department of Energy/Science Photo Library

La presente edición se basa en la *New Millennium Edition* publicada por Basic Books e incluye la corrección de erratas hasta su 7ª reimpresión. Ésta es una versión corregida y revisada de la traducción de Enrique Oelker L., Hugo Espinosa D., Carlos Alberto Heras, Juan Martín y Marfil, con la colaboración de Ricardo Gómez, que fue publicada originalmente bajo el sello del Fondo Educativo Interamericano, S. A.

Título original: *The Feynman Lectures on Physics,*

I. Mainly Mechanics, Radiation, and Heat

Copyright © 1963, 2006, 2010 por el California Institute of Technology,

Michael A. Gottlieb y Rudolf Pfeiffer

Proyecto apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



D. R. © 2018, Fondo de Cultura Económica

Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 Ciudad de México

www.fondodeculturaeconomica.com

Comentarios: editorial@fondodeculturaeconomica.com

Tel. (55) 5227-4672

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio, sin la anuencia por escrito del titular de los derechos.

ISBN 978-607-16-5972-9 (Obra completa)

ISBN 978-607-16-5973-6 (Vol. 1)

ISBN 978-607-16-6121-0 (pdf)

ISBN 978-607-16-6120-3 (obra completa en pdf)

Hecho en México - *Made in Mexico*

Sobre Richard Feynman

Nacido en 1918 en la ciudad de Nueva York, Richard P. Feynman recibió su doctorado de la Universidad de Princeton en 1942. A pesar de que era muy joven, tuvo un papel importante en el Proyecto Manhattan en Los Álamos durante la segunda Guerra Mundial. Más tarde, dio clases en la Universidad Cornell y en el Instituto de Tecnología de California. En 1965 recibió el premio Nobel de física, junto con Sin-Itiro Tomonaga y Julian Schwinger, por su trabajo en la electrodinámica cuántica.

El Dr. Feynman ganó el premio Nobel por haber resuelto con éxito algunos problemas de la teoría de la electrodinámica cuántica. También creó una teoría matemática que explica el fenómeno de la superfluidez en el helio líquido. Después, con Murray Gell-Mann, realizó un trabajo fundamental en el área de las interacciones débiles tales como la desintegración beta. En años posteriores, Feynman desempeñó un papel clave en el desarrollo de la teoría de los quarks al presentar su modelo de partones de procesos de colisión de protones de alta energía.

Más allá de estos logros, el Dr. Feynman introdujo nuevas técnicas básicas de computación y notación en la física: se destacan los omnipresentes diagramas de Feynman que, quizá más que ningún otro formalismo en la historia científica cercana, han cambiado la manera en la que los procesos físicos básicos son conceptualizados y calculados.

Feynman fue un maestro sobresaliente en su labor. De todos sus numerosos galardones, estaba orgulloso en particular de la Medalla Oersted para la enseñanza, a la cual se hizo acreedor en 1972. Un reseñista de *Scientific American* describió las *Lecciones de Feynman sobre física*, publicadas originalmente en 1963, como “arduas, pero sustanciosas y llenas de sabor. Después de 25 años son la guía para maestros y para los mejores alumnos que comienzan”. Con el fin de mejorar la comprensión de la física entre los no especialistas, el Dr. Feynman escribió: *El carácter de la ley física y Electrodinámica cuántica. La extraña teoría de la luz y la materia*. También fue autor de varias publicaciones avanzadas que se han vuelto referencias y manuales clásicos para investigadores y estudiantes.

Richard Feynman fue un hombre público productivo. Su trabajo en la comisión Challenger es bien conocido, en especial su famosa demostración de la susceptibilidad de las juntas tóricas al frío, un experimento elegante que requería de nada más que un vaso de agua helada y una abrazadera. Fueron menos célebres los esfuerzos del Dr. Feynman en los años sesenta en el comité curricular de la Universidad Estatal de California, donde protestó por la mediocridad de los libros de texto.

Una recitación de los incontables logros científicos y educativos de Richard Feynman no puede capturar adecuadamente la esencia de este hombre. Como lo sabe cualquier lector de sus publicaciones, incluso las más técnicas, la personalidad dinámica y multifacética de Feynman resplandece a lo largo de toda su obra. Además de físico, en muchas ocasiones fue reparador de radios, forzador de cerraduras, artista, bailarín, intérprete de bongó y descifrador de jeroglíficos mayas. Con una curiosidad perpetua por su mundo, fue un empirista ejemplar.

Richard Feynman murió el 15 de febrero de 1988 en Los Ángeles.

Prefacio a la Edición del nuevo milenio

Han pasado casi 50 años desde que Richard Feynman impartió el curso introductorio de física en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) que dio origen a estos tres volúmenes, las *Lecciones de Feynman sobre física*. En esos 50 años, nuestra comprensión del mundo físico ha cambiado en gran medida, pero esta obra ha perdurado. Las lecciones de Feynman son tan poderosas hoy en día como lo eran recién publicadas, gracias a lo singular de sus observaciones sobre la física y su método de enseñanza. Físicos principiantes y experimentados las han estudiado por igual en todo el mundo; han sido traducidas al menos a una docena de lenguas, con más de 1.5 millones de ejemplares impresos sólo en inglés. Quizá ninguna otra serie de libros de física haya tenido un impacto tan amplio y duradero.

Esta *Edición del nuevo milenio* abre paso a una nueva era para las *Lecciones de Feynman* sobre física: la era de la edición digital en el siglo XXI. Las *lecciones* se han vuelto *Lecciones-e* cuyo texto y ecuaciones se expresan en el lenguaje de composición tipográfica L^AT_EX y cuyas figuras fueron hechas de nuevo en su totalidad con software de dibujo moderno.

Las consecuencias para la edición *impresa* de esta edición *no* sorprenden; se ve casi igual a los libros rojos originales que los estudiantes de física han conocido y disfrutado por décadas. Las diferencias principales están en un índice alfabético ampliado y mejorado, en la corrección de 885 erratas que los lectores encontraron a lo largo de cinco años desde la primera impresión de la edición anterior, y en la facilidad de corregir erratas que los futuros lectores lleguen a encontrar. Regresaré a esto líneas adelante.

La *Versión electrónica* de esta edición y la *Versión electrónica aumentada* son innovaciones electrónicas. En contraste con la mayoría de las versiones electrónicas de libros técnicos del siglo XX, cuyas ecuaciones, figuras y en ocasiones incluso texto pierden calidad en cuanto uno trata de ampliarlos, el manuscrito en L^AT_EX de la *Edición del nuevo milenio* hace posible la creación de libros electrónicos de la más alta calidad, en los que todas las características de la página (excepto las fotografías) pueden ampliarse sin límites y conservar sus formas y definición precisas. Y la *Versión electrónica aumentada*, que cuenta con audio y fotografías de pizarrones de las lecciones originales de Feynman, además de hipervínculos a otros recursos, es una innovación que le habría dado mucha satisfacción a Feynman.

Recuerdos de las lecciones de Feynman

Estos tres volúmenes son un tratado pedagógico autosuficiente. También son un registro histórico de las lecciones universitarias de física de Feynman entre 1961 y 1964, una materia obligatoria para todos los estudiantes de primer y segundo año en Caltech, sin importar la especialidad a la que aspirarán.

Los lectores se preguntarán, como lo hice yo, cuál fue el impacto que las lecciones de Feynman tuvieron en los estudiantes que las presenciaron. En su Prefacio a estos volúmenes, Feynman ofreció un punto de vista algo negativo al respecto: “No creo que me haya ido muy bien con los estudiantes”, escribió. Matthew Sands, en su breve texto autobiográfico en *Feynman’s Tips on Physics*, expresó un punto de vista mucho más optimista. Por pura curiosidad, en la primavera de 2005 envié correos electrónicos o hablé con una muestra cuasi aleatoria de 17 alumnos (de unos 150) de la clase de Feynman entre 1961 y

1963 —entre ellos algunos a los que se les dificultó mucho la clase y otros que no tuvieron ningún problema para dominarla, biólogos, químicos, ingenieros, geólogos, matemáticos y astrónomos, al igual que físicos—.

Puede que los años intermedios hayan esmaltado sus recuerdos de un matiz eufórico, pero alrededor del 80 % de ellos recuerdan las lecciones de Feynman como uno de los puntos más memorables de sus años de universidad. “Era como ir a la iglesia”. Las lecciones eran “una experiencia transformativa”, “una experiencia de vida, probablemente lo más importante que obtuve de Caltech”. “Yo estudiaba biología, pero las lecciones de Feynman se destacan como uno de los puntos más altos en mi experiencia universitaria. . . aunque debo admitir que en esa época no podía hacer la tarea y casi no entregué ninguna”. “Yo me encontraba entre los estudiantes menos prometedores de su clase, y nunca me perdí una sola sesión. . . recuerdo y todavía puedo sentir la dicha de Feynman por el descubrimiento. . . Sus lecciones tenían un. . . impacto emocional que quizá se perdió en las *Lecciones impresas*”.

En contraste, varios de los estudiantes tienen recuerdos negativos debido en gran medida a dos cuestiones: (i) “No podías aprender a trabajar con los problemas de tarea al asistir a las lecciones. Feynman era demasiado ingenioso: conocía trucos y sabía qué aproximaciones podían hacerse, tenía una intuición basada en la experiencia y en una genialidad que un estudiante que apenas comienza no posee”. Feynman y sus colegas, conscientes de esta falla en el curso, la resarcieron en parte con materiales que se han incorporado a *Feynman's Tips on Physics*: tres lecciones hechas por el propio Feynman sobre resolución de problemas, y un conjunto de ejercicios y respuestas preparado por Robert B. Leighton y Rochus Vogt. (ii) “La inseguridad de no saber lo que podría discutirse en la siguiente lección, la falta de un libro de texto o referencia que tuviera cualquier relación con el material de lectura y la consecuente inhabilidad que teníamos para adelantar lecturas eran muy frustrantes. . . Las lecciones me parecían emocionantes y comprensibles en el aula, pero afuera eran sánscrito (cuando trataba de reconstruir los detalles)”. Desde luego, este problema se resolvió en estos tres volúmenes, la versión impresa de las *Lecciones de Feynman sobre física*. Éstas se volvieron el libro de texto que los estudiantes de Caltech han usado para estudiar durante muchos años después, y sobreviven hoy en día como uno de los mayores legados de Feynman.

Una historia de erratas

Feynman y sus coautores, Robert B. Leighton y Matthew Sands, produjeron las *Lecciones de Feynman sobre física* con gran rapidez, trabajando a partir de grabaciones y fotografías de pizarrones de las lecciones de Feynman* (ambas se incorporaron en la *Versión electrónica aumentada* de esta *Edición del nuevo milenio*). Debido al ritmo tan acelerado al que trabajaron Feynman, Leighton y Sands, era inevitable que muchos errores se colaran en la primera edición. Feynman acumuló largas listas de erratas alegadas en los años subsiguientes, erratas que hallaron los estudiantes y profesores de Caltech así como lectores alrededor del mundo. En los años sesenta e inicios de los setenta, Feynman hizo un espacio en su ajetreada vida para verificar la mayor parte de las erratas, aunque no todas, de los volúmenes I y II e insertar las correcciones en las reimpressiones siguientes. Pero el sentido del deber de Feynman nunca logró sobreponerse a su entusiasmo por nuevos descubrimientos para lograr que se ocupara de las erratas en el volumen III†. Después de su muerte prematura en 1988, las listas de erratas de los tres volúmenes se guardaron en el Archivo de Caltech y quedaron ahí olvidadas.

* Para descripciones de la génesis de las lecciones de Feynman y de estos volúmenes, véanse el Prefacio y las Introducciones a cada uno de los tres volúmenes, y también el texto autobiográfico de Matt Sands en *Feynman's Tips on Physics*, y el Prefacio especial a la *Edición conmemorativa* de las *Lecciones de Feynman*, escrito en 1989 por David Goodstein y Gerry Neugebauer, que también aparece en la *Edición definitiva* de 2005.

† En 1975 comenzó a buscar las erratas del volumen III, pero se distrajo con otras cosas y nunca terminó la tarea, de modo que no se hicieron correcciones.

En 2002, Ralph Leighton (hijo del fallecido Robert Leighton y compañero de Feynman) me informó de las viejas erratas y de una nueva y larga lista que había compilado su amigo Michael Gottlieb. Leighton propuso que Caltech realizara una nueva edición de las *Lecciones de Feynman* con todas las erratas corregidas, y que la publicara junto con un nuevo volumen de material complementario, *Feynman's Tips on Physics*, que él y Gottlieb estaban preparando.

Feynman era mi héroe y fue mi amigo cercano. Cuando vi las listas de erratas y el contenido del nuevo volumen propuesto, accedí pronto a supervisar el proyecto en representación de Caltech (que durante mucho tiempo fue el hogar académico de Feynman, al cual él, Leighton y Sands habían encomendado todos los derechos y responsabilidades de las *Lecciones de Feynman*). Después de un año y medio de trabajo meticuloso por parte de Gottlieb, y del atento examen del Dr. Michael Hartl (un investigador posdoctoral notable de Caltech que evaluó todas las erratas además del nuevo volumen), la *Edición definitiva de las lecciones de Feynman sobre física* vio la luz en 2005; tenía alrededor de 200 erratas corregidas y estaba acompañada por *Feynman's Tips on Physics*, de Feynman, Gottlieb y Leighton.

Yo *pensé* que esa edición iba a ser la “definitiva”. Lo que no anticipé fue la respuesta entusiasta de los lectores alrededor del mundo ante el llamado de Gottlieb para identificar más erratas y enviarlas por medio del sitio web que él creó y aún mantiene, *The Feynman Lectures Website*, www.feynmanlectures.info. En los cinco años a partir de entonces, se han enviado 965 erratas nuevas que sobrevivieron el meticuloso escrutinio de Gottlieb, Hartl y Nate Bode (un estudiante de posgrado notable de Caltech, quien sucedió a Hartl como el examinador de erratas por parte de esta institución). De estas 965 erratas evaluadas, 80 se corrigieron en la tercera reimpresión de la *Edición definitiva* (agosto de 2006) y las otras 885 se corrigieron en esta primera impresión de la *Edición del nuevo milenio* (332 en el volumen I, 263 en el volumen II y 200 en el volumen III). Para los detalles de las erratas, véase www.feynmanlectures.info.

Está claro que liberar de errores las *Lecciones de Feynman sobre física* se ha vuelto una empresa comunitaria a nivel mundial. En nombre de Caltech agradezco a los 50 lectores que han contribuido desde 2005 y a los muchos más que lleguen a contribuir en los años por venir. Los nombres de todos los que contribuyeron se encuentran en www.feynmanlectures.info/flp_errata.html.

Casi todas las erratas han sido de tres tipos: (i) errores tipográficos en prosa; (ii) errores tipográficos y matemáticos en ecuaciones, tablas y figuras —errores en signos, números incorrectos (por ejemplo, un 5 que debería ser un 4), así como subíndices, signos de suma, paréntesis y términos faltantes en ecuaciones—; (iii) referencias cruzadas incorrectas a otros capítulos, tablas y figuras. Esta clase de errores, a pesar de que no son gravísimos para un físico experimentado, pueden ser frustrantes y confusos para la audiencia primaria de Feynman: los estudiantes.

Cabe resaltar que entre las 1165 erratas que se corrigieron bajo mi auspicio son pocas las que considero como verdaderos errores en física. Un ejemplo está en el volumen II, página 5-10 que ahora dice “[...] si una cavidad está completamente encerrada por un conductor a tierra, ninguna distribución estática de cargas en el *interior* puede producir campos [eléctricos] en el *exterior*” (la precisión “a tierra” fue omitida en ediciones previas). Este error le fue señalado a Feynman por varios lectores, entre los que estaba Beulah Elizabeth Cox, estudiante en el College of William and Mary, quien confió en el pasaje erróneo de Feynman para un examen. En 1975 Feynman le escribió lo siguiente a la señorita Cox:* “Tu profesor tuvo razón en no darte puntos, pues tu respuesta es incorrecta, como lo demostró él usando la ley de Gauss. En la ciencia, se deben usar argumentos lógicos y elaborados con cuidado, no sólo creer en las autoridades. También leíste el libro correctamente y lo entendiste. Cometí un error, y el libro está mal. Tal vez estaba pensando en una esfera conductora a tierra, o bien en el hecho de que mover las cargas en lugares distintos del interior no afecta las cosas en el exterior. No estoy seguro, pero metí la pata. Y tú también metiste la pata por creerme.”

* Páginas 288-289 de *Perfectly Reasonable Deviations from the Beaten Track, The Letters of Richard P. Feynman*, editado por Michelle Feynman (Basic Books, Nueva York, 2005).

Cómo cobró vida esta Edición del nuevo milenio

Entre noviembre de 2005 y julio de 2006, 340 erratas fueron enviadas al sitio web de las *Lecciones de Feynman* www.feynmanlectures.info. Llama la atención que el grueso de éstas viniera de una sola persona: el Dr. Rudolf Pfeiffer, que entonces era becario de posdoctorado en la Universidad de Viena, Austria. La editorial, Addison Wesley, arregló 80 erratas, pero se resistió a arreglar más debido al costo: los libros se imprimían mediante un proceso de foto offset y trabajaban con imágenes fotográficas de las páginas de los años sesenta. Corregir un error implicaba volver a formar la página entera, y para asegurar que no se colaran nuevos errores, la página debía volver a formarse por dos personas diferentes, para que luego la leyeran y corrigieran varias personas distintas: se trata de un proceso muy costoso cuando hay cientos de erratas en juego.

Gottlieb, Pfeiffer y Ralph Leighton estaban muy disgustados con esto, por lo que formularon un plan para facilitar el arreglo de todas las erratas, y también producir la versión electrónica y la aumentada de las *Lecciones de Feynman sobre física*. Me propusieron su plan a mí, como representante de Caltech, en 2007. Me emocioné, pero procedí con cautela. Después de ver más detalles, entre ellos un capítulo de muestra de la *Versión electrónica aumentada*, recomendé que Caltech cooperara con Gottlieb, Pfeiffer y Leighton para llevar a cabo su plan. El plan recibió la aprobación de tres catedráticos sucesivos de la División de Física, Matemáticas y Astronomía de Caltech: Tom Tombrello, Andrew Lange y Tom Soifer, y los detalles contractuales y legales complejos fueron resueltos por el abogado de Propiedad Intelectual de Caltech, Adam Cochran. Con la publicación de esta *Edición del nuevo milenio*, el plan se llevó a cabo con éxito, a pesar de su complejidad. Específicamente:

Pfeiffer y Gottlieb convirtieron a \LaTeX los tres volúmenes de las *Lecciones* (y también más de 1000 ejercicios del curso de Feynman para incorporarlos a *Feynman's Tips on Physics*). Las figuras de las *Lecciones* se volvieron a trazar en formato electrónico moderno en India, bajo la supervisión del traductor al alemán de las *Lecciones*, Henning Heinze, para su uso en la edición alemana. Gottlieb y Pfeiffer intercambiaron el uso no exclusivo de sus ecuaciones en \LaTeX en la edición alemana (publicada por Oldenbourg) por el uso no exclusivo de las figuras de Heinze en esta *Edición del nuevo milenio* inglesa. Pfeiffer y Gottlieb verificaron con cuidado todo el texto y ecuaciones en \LaTeX y todas las figuras que se volvieron a trazar, e hicieron las correcciones necesarias. Nate Bode y yo, en representación de Caltech, hemos hecho controles aleatorios del texto, ecuaciones y figuras; y sorprendentemente, no hemos encontrado errores. Pfeiffer y Gottlieb son meticulosos y precisos en un grado increíble. Gottlieb y Pfeiffer concertaron que John Sullivan de la Biblioteca Huntington digitalizara las fotos de los pizarrones de Feynman entre 1962 y 1964, y que George Blood Audio digitalizara las grabaciones de las lecciones —con apoyo financiero y moral del profesor de Caltech Carver Mead, apoyo logístico de la archivista Shelley Erwin, y apoyo legal de Cochran—.

La problemática legal era seria: en los años sesenta, Caltech cedió los derechos a Addison Wesley para publicar la edición impresa, y en los años noventa, los derechos para distribuir el audio de las lecciones de Feynman y una variante de una edición electrónica. En la década del 2000, a través de una serie de adquisiciones de esas licencias, los derechos impresos se transfirieron al grupo editorial Pearson, mientras que los derechos electrónicos y de audio se transfirieron al grupo editorial Perseus. Con ayuda de Ike Williams, abogado especialista en lo editorial, Cochran logró unir todos estos derechos con Perseus (Basic Books), con lo que hizo posible esta *Edición del nuevo milenio*.

Agradecimientos

En nombre de Caltech, agradezco a las numerosas personas que han hecho posible esta *Edición del nuevo milenio*. En específico, quiero agradecer a las personas clave mencionadas líneas arriba: Ralph Leighton, Michael Gottlieb, Tom Tombrello, Michael Hartl, Rudolf Pfeiffer, Henning Heinze, Adam Cochran, Carver Mead, Nate Bode, Shelley Erwin, Andrew Lange, Tom Soifer, Ike Williams, y a las 50 personas que enviaron las erratas (quienes se enlistan en www.feynmanlectures.info). También agradezco a Michelle Feynman (hija de Richard Feynman) por su apoyo y consejo continuos, a Alan Rice por su asistencia tras bambalinas y asesoría en Caltech, a Stephan Puchegger y Calvin Jackson por su ayuda y orientación, a Pfeiffer por la conversión de las *Lecciones* a L^AT_EX, y a Michael Figl, Manfred Smolik y Andreas Stangl por las discusiones sobre correcciones de erratas; así como al personal de Perseus/Basic Books, y (por las ediciones previas) al personal de Addison Wesley.

Kip S. Thorne
Profesor emérito Feynman de física teórica
Instituto de Tecnología de California

octubre de 2010

Prefacio de Feynman



Estas son las lecciones de física que di el año pasado y el antepasado a los estudiantes de los primeros años en el Instituto Tecnológico de California (Caltech). Por supuesto que éstas no son textuales; han sido editadas, a veces con gran extensión y a veces con muy poca. Las clases constituyen sólo parte del curso completo. El grupo total de 180 estudiantes se reunía dos veces por semana en un aula grande para atender a las explicaciones, y luego se dividía en grupos pequeños de 15 a 20 estudiantes en secciones de discusión y práctica bajo la guía de un ayudante de docencia. Había, además, una sección de laboratorio por semana.

Con estas clases tratábamos de resolver un problema especial: mantener el interés de los estudiantes muy entusiastas y bastante despiertos que regresaban de la escuela secundaria para entrar en el Caltech. Muchos habían oído hablar de lo interesante y estimulante que es la física: la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica y otras ideas modernas. Pero al terminar los dos años del curso anterior al nuestro, muchos de ellos se sentían descorazonados porque realmente se les presentaban muy pocas ideas geniales, nuevas o interesantes. Se les hacía estudiar planos inclinados, electrostática y cuestiones por el estilo, y después de dos años era como para volverse tonto. Se trataba, pues de ver si podíamos hacer un curso que salvara a los estudiantes más avanzados y animados manteniéndoles el entusiasmo.

Aunque mi intención no fue convertir las clases en un campo de estudio e investigación preparé las lecciones para los más inteligentes de la clase a fin de asegurarme, si era posible, que aun los estudiantes más inteligentes no podrían abarcar completamente el contenido de cada lección; para ello introduje recomendaciones sobre la aplicación de las ideas y conceptos en diversas direcciones, las cuales se apartaban de la línea principal de ataque. Por esta razón, sin embargo, traté concienzudamente de hacer que todos los enunciados fueran lo más precisos posibles de señalar en cada caso dónde encajaban las ecuaciones en el cuerpo de la física y cómo —cuando aprendieron más— se modificarían las cosas. Pensé, además, que para los estudiantes es importante indicar qué es lo que deben ser capaces —si son suficientemente inteligentes— de comprender por deducción de lo que se ha dicho antes y qué se está introduciendo como cosa nueva. Cuando se presentaban nuevas ideas, traté de deducirlas si eran deducibles o de explicar que era una nueva idea sin base alguna en lo que ya habían aprendido y que se suponía que no era demostrable, sino simplemente un agregado.

Al comenzar estas lecciones supuse que los estudiantes traían cierto conocimiento de la escuela secundaria —tal como óptica geométrica, ideas simples sobre química, etcétera—. Creí, también, que no había ninguna razón para dictar las lecciones en un orden determinado, en el sentido de que no debería mencionar algo hasta que no estuviera en condiciones de estudiarlo en detalle. Había abundante material que surgiría, pero sin discusión completa. Las discusiones completas se harían más tarde cuando hubiera mayor preparación para seguir las. Ejemplos de esto son el tratamiento de la inductancia y el de los niveles de energía, que primero se introducen en forma muy cualitativa y luego se desarrollan en forma más detallada.

Al mismo tiempo que me dirigía al estudiante más activo, quise cuidar del individuo para quien los adornos en demasía y las aplicaciones laterales son meramente intranquilizadores, cuando no se puede esperar, de ningún modo, que aprendan la mayor parte del material. Para ese estudiante traté que hubiera un núcleo central o columna vertebral de material que pudiera captar. Tenía la esperanza de que no se pondría nervioso aunque no entendiera todo el contenido de una lección. No esperaba que comprendiera todo sino los rasgos centrales y más directos. Naturalmente que se necesitaba cierta inteligencia de su parte para ver cuáles eran los teoremas e ideas centrales y cuáles los resultados y aplicaciones laterales más avanzados que sólo podría entender en años posteriores.

Había una dificultad seria para dar estas lecciones: por la forma en que se daba el curso, no había una retroacción del estudiante hacia el profesor que indicara cómo estaban yendo las lecciones. Esta es una dificultad muy seria que me impide saber con certeza hasta qué punto, en realidad, fueron muy provechosas mis clases. Todo era esencialmente un experimento. Y si lo hiciera nuevamente no lo haría en la misma forma —¡espero que no tenga que hacerlo de nuevo!— Creo, no obstante, que en lo que respecta a la física las cosas anduvieron muy satisfactoriamente el primer año.

El segundo año no quedé tan satisfecho. En la primera parte del curso, que trataba de la electricidad y el magnetismo, no pude encontrar ningún modo realmente único o diferente de hacerlo —ninguna manera que fuera especialmente más estimulante que la forma habitual de presentarlo—. Por lo tanto, no creo que hice mucho en las clases sobre electricidad y magnetismo. Al final del segundo año había pensado originalmente continuar dando, después de la electricidad y el magnetismo, algunas clases sobre las propiedades de los materiales, pero con el interés de explicar los modos fundamentales, las soluciones de la ecuación de difusión, los sistemas vibrantes, las funciones ortogonales... desarrollando, así, las primeras etapas de lo que usualmente se denomina “métodos matemáticos de la física”. Pensando en retrospectiva, creo que si lo hiciera de nuevo volvería a esa idea original. Pero como no se había contemplado que yo daría estas clases nuevamente, se sugirió que sería conveniente tratar de dar una introducción a la mecánica cuántica —que es lo que ustedes encontrarán en el tercer volumen—.

Queda perfectamente claro que los estudiantes que sigan estudiando física deberán esperar hasta el tercer año para estudiar mecánica cuántica. Por otra parte, se esgrimió el argumento de que muchos de los estudiantes de nuestro curso estudian física como base para su especialización en otros campos. Y la forma habitual de tratar la mecánica cuántica hace que el tema sea casi inalcanzable para la gran mayoría de los estudiantes debido a que necesitan mucho tiempo para aprenderlo. No obstante, en sus aplicaciones concretas, —especialmente en sus aplicaciones más complejas, como en la ingeniería eléctrica y en la química— realmente no se usa la maquinaria completa del tratamiento con ecuaciones diferenciales. Por ello, traté de describir los principios de la mecánica cuántica de un modo que no exigiera un conocimiento básico de la matemática de las ecuaciones diferenciales. Creo que aun para un físico es muy interesante presentar la mecánica cuántica de esta manera inversa —por varias razones que se pueden ver en las lecciones mismas—. Sin embargo, creo que el experimento en lo correspondiente a la mecánica cuántica no tuvo éxito completo —en gran parte debido a que no tuve tiempo al final (por ejemplo, debería haber tenido tres o cuatro lecciones más para tratar detenidamente temas tales como las bandas de

energía y la dependencia espacial de las amplitudes)—. Además, nunca había presentado antes el tema de este modo, por lo que la falta de retroacción fue particularmente seria. Ahora creo que se debe dar la mecánica cuántica más tarde. A lo mejor algún día tenga la oportunidad de hacerlo de nuevo. Entonces lo haré mejor.

La razón de que no haya lecciones sobre cómo resolver problemas se debe a que había secciones de discusión y práctica. Aunque en el primer año incluí tres lecciones sobre cómo resolver problemas, en este curso no pude hacerlo. También había una lección sobre guía inercial que debe estar ciertamente después de la lección sobre sistemas que rotan, pero que desafortunadamente se omitió. Las lecciones quinta y sexta fueron dadas por Matthew Sands porque yo estaba fuera de la ciudad.

La pregunta es, por supuesto, hasta qué punto este experimento ha tenido éxito. Mi punto de vista —que, sin embargo, no lo comparten la mayoría de los que trabajaron con los estudiantes— es pesimista. No creo haber obtenido gran éxito en lo que respecta a ellos. Cuando recuerdo el modo en que éstos manipulaban los problemas en los exámenes, pienso que el sistema es un fracaso. Por supuesto, mis amigos me indican que hubo una o dos docenas de estudiantes que —muy sorprendentemente— comprendieron casi todo el contenido en todas las lecciones y que fueron muy activos trabajando con el material y preocupándose con animación e interés por muchos tópicos. Estos individuos tienen actualmente, creo, una base de primera línea en física —y son, después de todo, aquellos a quienes quería llegar—. Pero entonces “El poder de la instrucción es, en general, poco eficaz, excepto en las felices disposiciones en que es casi superfluo” (Gibbons).

De todos modos, no quería dejar ningún estudiante completamente atrasado, como quizás lo hice. Creo que un modo más efectivo de ayudar al estudiante sería mediante la adición de tiempo y esfuerzo en el desarrollo de un conjunto de problemas que aclare algunas de las ideas contenidas en las lecciones. Los problemas dan la oportunidad de aumentar la comprensión del material expuesto haciéndolo más real, estructurado y accesible para el proceso de fijación.

Pienso, sin embargo, que la solución a este problema educativo no es otra que darse cuenta que la enseñanza sólo puede realizarse cuando hay una relación individual directa entre un estudiante y un buen profesor, situación en la cual el estudiante discute las ideas, piensa en las cosas y habla sobre ellas. Es imposible aprender simplemente asistiendo a una clase, o simplemente resolviendo los problemas asignados. Pero en los actuales momentos tenemos tantos estudiantes a quienes enseñar que tenemos que encontrar un sustituto de lo ideal. Quizás mis lecciones ejerzan alguna contribución. Quizás en algún lugar pequeño donde sea posible una relación individual entre profesores y estudiantes, éstos obtengan alguna inspiración o algunos conceptos de estas lecciones. Quizás entonces, también el proceso de fijar el material sea más alegre y placentero para ellos y dé origen al desarrollo de algunas ideas.

RICHARD P. FEYNMAN

junio 1963

Introducción

Este libro está basado en el curso de lecciones introductorias de física que dio el profesor R. P. Feynman en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) durante el año académico 1961-1962; abarca el primero de los dos años del curso introductorio que toman todos los estudiantes de primer y segundo año en Caltech, y a éste siguió en 1962-1963 una serie similar que abarcó el segundo año. Las lecciones constituyen una parte muy importante en la revisión del curso introductorio, la cual se llevó a cabo a lo largo de un periodo de cuatro años.

La necesidad de una revisión básica surgió tanto del rápido desarrollo de la física en las décadas recientes como del hecho de que los estudiantes recién llegados han mostrado un aumento constante en su habilidad matemática a partir de las mejoras en el contenido de las clases de matemáticas de preparatoria. Nuestra intención fue aprovechar este mayor bagaje matemático y al mismo tiempo introducir suficientes temas modernos para que el curso fuera exigente, interesante y más representativo de la física de hoy en día.

Para generar una variedad de ideas sobre qué material incluir y cómo presentarlo, se alentó a un número sustancial de profesores de física a que ofrecieran sus ideas en forma de planes temáticos para un curso revisado. Varios de éstos fueron presentados y discutidos de manera crítica y profunda. Casi de inmediato se llegó al acuerdo de que una revisión básica del curso no se podría lograr adoptando un libro de texto diferente, ni siquiera escribiendo uno ab initio, sino que el nuevo curso debía centrarse en un conjunto de lecciones presentadas a ritmo de dos o tres por semana; el material textual apropiado se produciría luego como una operación secundaria conforme avanzaba el curso, y también se organizarían experimentos de laboratorio adecuados para el material de las lecciones. En consecuencia, se fijó un plan del curso a grandes rasgos, pero se reconoció que era tentativo y estaba incompleto y sujeto a modificaciones considerables por parte de quien fuera a tener la responsabilidad de efectivamente preparar las lecciones.

En cuanto al mecanismo mediante el cual sería finalmente puesto en práctica el curso, se consideraron varios planes. Éstos se parecían mucho entre sí, incluían un esfuerzo cooperativo por N número de miembros del personal que compartirían la carga total de trabajo de manera simétrica y equitativa: cada uno tomaría la responsabilidad de $1/N$ del material, daría las lecciones y escribiría el material textual para su parte. Sin embargo, la falta de disponibilidad de personal suficiente y la dificultad de mantener un punto de vista uniforme ante las diferencias de personalidad y filosofía entre los participantes individuales hacían que estos planes fueran irrealizables.

Darse cuenta de que verdaderamente poseíamos los medios para crear no sólo un curso nuevo y diferente de física, sino quizás uno único, resultó ser una inspiración dichosa para el profesor Sands. Él sugirió que el profesor R. P. Feynman preparara y diera las lecciones, y que éstas fueran grabadas. Una vez transcritas y editadas, se convertirían en el libro de texto para el nuevo curso. En esencia, éste fue el plan que se adoptó.

Se esperaba que la edición necesaria fuera menor, pues consistiría principalmente en proporcionar figuras y revisar la puntuación y la gramática; la harían uno o dos estudiantes de posgrado a tiempo parcial. Desafortunadamente, esta expectativa fue pasajera. En realidad, fue una operación editorial mayor poder transformar la transcripción literal a una forma legible, aun sin la reorganización o revisión del tema tratado que a veces se requería. Además, no era trabajo para un editor técnico o para un estudiante de posgrado, sino uno que requería la atención minuciosa de un físico profesional ¡de 10 a 20 horas por lección!

La dificultad de la tarea editorial, junto con la necesidad de poner el material en manos de los estudiantes tan pronto como fuera posible, puso un límite estricto en qué tanto se podía “pulir” el material en realidad, y en consecuencia nos vimos forzados a apostar por un producto preliminar pero técnicamente correcto que pudiera usarse de inmediato, en lugar de uno que pudiera considerarse final o terminado. Debido a una necesidad urgente de más ejemplares para nuestros alumnos, y a un interés alentador por parte de profesores y estudiantes de varias instituciones distintas, decidimos publicar el material en su forma preliminar en lugar de esperar una revisión ulterior más profunda que quizá nunca llegaría. No nos hacemos ilusiones en cuanto a lo completo o fluido del material, ni en cuanto a su organización lógica; de hecho, planeamos varias modificaciones menores en el futuro inmediato, y esperamos que no se vuelva estático en su forma o contenido.

Además de las lecciones, que constituyen una parte de importancia central para el curso, era necesario también proporcionar ejercicios adecuados para acrecentar la experiencia y habilidad de los estudiantes, así como experimentos oportunos para facilitar un contacto de primera mano con el material de las lecciones en el laboratorio. Ninguno de estos aspectos se encuentra en un estado tan avanzado como el material de las lecciones, pero se ha hecho un progreso considerable. Algunos ejercicios fueron elaborados conforme progresaban las lecciones y luego expandidos y amplificados para su uso al año siguiente. Sin embargo, puesto que todavía no estamos convencidos de que los ejercicios proporcionen suficiente variedad y profundidad de aplicación de los materiales de las lecciones para dar al alumno plena conciencia del tremendo poder que está a su disposición, los ejercicios se publicaron por separado en un formato menos permanente para así alentar una revisión frecuente.

El profesor H. V. Neher ha ideado varios experimentos nuevos para el nuevo curso. Entre ellos se encuentran varios que utilizan la fricción extremadamente baja que presenta un cojinete de gas: un nuevo canal lineal de aire con el que es posible hacer mediciones cuantitativas de movimiento unidimensional, impactos y movimiento armónico, y un trompo de color de Maxwell soportado e impulsado por aire con el que se pueden estudiar el movimiento de rotación acelerado y la precesión y nutación giroscópicas. Se espera que el desarrollo de nuevos experimentos de laboratorio dure un tiempo considerable.

El programa de revisión se llevó a cabo bajo la dirección de los profesores R. B. Leighton, H. V. Neher y M. Sands. En el programa participaron oficialmente los profesores R. P. Feynman, G. Neugebauer, R. M. Sutton, H. P. Stabler, F. Strong y R. Vogt, de la división de física, matemáticas y astronomía, y los profesores T. Caughey, M. Plesset y C. H. Wilts de la división de ciencias de la ingeniería. Reconocemos y agradecemos la valiosa asistencia de todos aquellos que contribuyeron al programa de revisión. Estamos en deuda en especial con la Fundación Ford, sin cuyo apoyo financiero este programa no podría haberse llevado a cabo.

ROBERT B. LEIGHTON
julio 1963

Índice general

CAPÍTULO 1. ÁTOMOS EN MOVIMIENTO

1-1	Introducción	1-1
1-2	La materia está formada de átomos	1-2
1-3	Procesos atómicos	1-5
1-4	Reacciones químicas	1-7

CAPÍTULO 2. FÍSICA BÁSICA

2-1	Introducción	2-1
2-2	La física antes de 1920	2-3
2-3	Física cuántica	2-6
2-4	Núcleos y partículas	2-9

CAPÍTULO 3. LA RELACIÓN DE LA FÍSICA CON OTRAS CIENCIAS

3-1	Introducción	3-1
3-2	Química	3-1
3-3	Biología	3-2
3-4	Astronomía	3-7
3-5	Geología	3-8
3-6	Psicología	3-9
3-7	¿Cómo se llegó a eso?	3-9

CAPÍTULO 4. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

4-1	¿Qué es la energía?	4-1
4-2	Energía potencial gravitacional	4-2
4-3	Energía cinética	4-6
4-4	Otras formas de energía	4-6

CAPÍTULO 5. TIEMPO Y DISTANCIA

5-1	El movimiento	5-1
5-2	El tiempo	5-1
5-3	Tiempos cortos	5-2
5-4	Tiempos largos	5-3
5-5	Unidades y patrones de tiempo	5-5
5-6	Distancias grandes	5-6
5-7	Distancias pequeñas	5-8

CAPÍTULO 6. PROBABILIDAD

6-1	Posibilidad y probabilidad	6-1
6-2	Fluctuaciones	6-3
6-3	La caminata aleatoria	6-5
6-4	Una distribución de probabilidad	6-8
6-5	El principio de incertidumbre	6-10

CAPÍTULO 7. LA TEORÍA DE LA GRAVITACIÓN

7-1	Movimientos planetarios	7-1
7-2	Leyes de Kepler	7-2
7-3	Desarrollo de la dinámica	7-2
7-4	Ley de la gravitación de Newton	7-3
7-5	Gravitación universal	7-5
7-6	El experimento de Cavendish	7-9
7-7	¿Qué es la gravedad?	7-10
7-8	Gravedad y relatividad	7-12

CAPÍTULO 8. MOVIMIENTO

8-1	Descripción del movimiento	8-1
8-2	Velocidad	8-3
8-3	La velocidad como derivada	8-6
8-4	La distancia como una integral	8-7
8-5	Aceleración	8-8

CAPÍTULO 9. LEYES DE NEWTON DE LA DINÁMICA

9-1	Momentum y fuerza	9-1
9-2	La velocidad tiene dirección	9-2
9-3	Componentes de la velocidad, de la aceleración y de la fuerza	9-3
9-4	¿Cuál es la fuerza?	9-4
9-5	Significado de las ecuaciones de la dinámica	9-5
9-6	Solución numérica de las ecuaciones	9-5
9-7	Movimientos planetarios	9-6

CAPÍTULO 10. CONSERVACIÓN DEL MOMENTUM

10-1	La tercera ley de Newton	10-1
10-2	Conservación del momentum	10-2
10-3	¡El momentum <i>se</i> conserva!	10-5
10-4	Momentum y energía	10-7
10-5	Momentum relativista	10-9

CAPÍTULO 11. VECTORES

11-1	Simetría en física	11-1
11-2	Traslaciones	11-2
11-3	Rotaciones	11-3
11-4	Vectores	11-5
11-5	Álgebra vectorial	11-6
11-6	Leyes de Newton en notación vectorial	11-8
11-7	Producto escalar de vectores	11-9

CAPÍTULO 12. CARACTERÍSTICAS DE LA FUERZA

12-1 ¿Qué es una fuerza? 12-1
 12-2 Fricción 12-3
 12-3 Fuerzas moleculares 12-6
 12-4 Fuerzas fundamentales. Campos 12-7
 12-5 Pseudofuerzas 12-11
 12-6 Fuerzas nucleares 12-13

CAPÍTULO 13. TRABAJO Y ENERGÍA POTENCIAL (A)

13-1 Energía de un cuerpo que cae 13-1
 13-2 Trabajo realizado por la gravedad 13-4
 13-3 Suma de energías 13-6
 13-4 Campo gravitacional de objetos grandes 13-8

CAPÍTULO 14. TRABAJO Y ENERGÍA POTENCIAL (CONCLUSIÓN)

14-1 Trabajo 14-1
 14-2 Movimientos con ligadura 14-3
 14-3 Fuerzas conservativas 14-3
 14-4 Fuerzas no conservativas 14-6
 14-5 Potenciales y campos 14-8

CAPÍTULO 15. TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

15-1 El principio de relatividad 15-1
 15-2 La transformación de Lorentz 15-3
 15-3 El experimento de Michelson-Morley 15-4
 15-4 Transformación del tiempo 15-6
 15-5 La contracción de Lorentz 15-8
 15-6 Simultaneidad 15-8
 15-7 Vectores de cuatro dimensiones 15-9
 15-8 Dinámica relativista 15-9
 15-9 Equivalencia de masa y energía 15-11

CAPÍTULO 16. ENERGÍA RELATIVISTA Y MOMENTUM

16-1 La relatividad y los filósofos 16-1
 16-2 La paradoja de los mellizos 16-3
 16-3 Transformación de velocidades 16-4
 16-4 Masa relativista 16-6
 16-5 Energía relativista 16-8

CAPÍTULO 17. ESPACIO-TIEMPO

17-1 La geometría del espacio-tiempo 17-1
 17-2 Intervalos de espacio-tiempo 17-3
 17-3 Pasado, presente y futuro 17-4
 17-4 Más acerca de los vectores de cuatro dimensiones 17-5
 17-5 Álgebra de vectores de cuatro dimensiones 17-7

CAPÍTULO 18. ROTACIÓN EN DOS DIMENSIONES

18-1 El centro de masa 18-1
 18-2 Rotación de un cuerpo rígido 18-3
 18-3 Momentum angular 18-5
 18-4 Conservación del momentum angular 18-7

CAPÍTULO 19. CENTRO DE MASA; MOMENTO DE INERCIA

19-1 Propiedades del centro de masa 19-1
 19-2 Cómo ubicar el centro de masa 19-4
 19-3 Cómo obtener el momento de inercia 19-5
 19-4 Energía cinética de rotación 19-8

CAPÍTULO 20. ROTACIÓN EN EL ESPACIO

20-1 Torques en tres dimensiones 20-1
 20-2 Las ecuaciones de rotación usando productos vectoriales 20-5
 20-3 El giroscopio 20-6
 20-4 Momentum angular de un cuerpo sólido 20-8

CAPÍTULO 21. EL OSCILADOR ARMÓNICO

21-1 Ecuaciones diferenciales lineales 21-1
 21-2 El oscilador armónico 21-1
 21-3 Movimiento armónico y movimiento circular 21-4
 21-4 Condiciones iniciales 21-5
 21-5 Oscilaciones forzadas 21-6

CAPÍTULO 22. ÁLGEBRA

22-1 Adición y multiplicación 22-1
 22-2 Las operaciones inversas 22-2
 22-3 Abstracción y generalización 22-3
 22-4 Cómo obtener valores aproximados de números irracionales 22-4
 22-5 Números complejos 22-7
 22-6 Exponentes imaginarios 22-10

CAPÍTULO 23. RESONANCIA

23-1 Números complejos y movimiento armónico 23-1
 23-2 El oscilador forzado amortiguado 23-3
 23-3 Resonancia eléctrica 23-5
 23-4 Resonancia en la naturaleza 23-7

CAPÍTULO 24. TRANSITORIOS

24-1 La energía de un oscilador 24-1
 24-2 Oscilaciones amortiguadas 24-3
 24-3 Transitorios eléctricos 24-5

CAPÍTULO 25. SISTEMAS LINEALES Y REPASO

25-1 Ecuaciones diferenciales lineales	25-1
25-2 Superposición de soluciones	25-2
25-3 Oscilaciones en sistemas lineales	25-5
25-4 Analogías en física	25-7
25-5 Impedancias en serie y en paralelo	25-9

CAPÍTULO 26. ÓPTICA: EL PRINCIPIO DEL TIEMPO MÍNIMO

26-1 La luz	26-1
26-2 Reflexión y refracción	26-2
26-3 El principio de Fermat del tiempo mínimo	26-3
26-4 Aplicaciones del principio de Fermat	26-5
26-5 Un enunciado más preciso del principio de Fermat	26-7
26-6 Cómo funciona	26-8

CAPÍTULO 27. ÓPTICA GEOMÉTRICA

27-1 Introducción	27-1
27-2 La distancia focal de una superficie esférica	27-1
27-3 La distancia focal de una lente	27-4
27-4 Aumento	27-5
27-5 Lentes compuestas	27-6
27-6 Aberraciones	27-7
27-7 Poder de resolución	27-8

CAPÍTULO 28. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

28-1 Electromagnetismo	28-1
28-2 Radiación	28-4
28-3 El radiador dipolar	28-5
28-4 Interferencia	28-6

CAPÍTULO 29. INTERFERENCIA

29-1 Ondas electromagnéticas	29-1
29-2 Energía de radiación	29-2
29-3 Ondas sinusoidales	29-2
29-4 Dos radiadores dipolares	29-4
29-5 La matemática de la interferencia	29-6

CAPÍTULO 30. DIFRACCIÓN

30-1 La amplitud resultante debida a n osciladores iguales	30-1
30-2 La red de difracción	30-3
30-3 Poder de resolución de una red	30-6
30-4 La antena parabólica	30-7
30-5 Películas coloreadas, cristales	30-8
30-6 Difracción por pantallas opacas	30-8
30-7 El campo de un plano de cargas oscilantes	30-10

CAPÍTULO 31. EL ORIGEN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

31-1 El índice de refracción	31-1
31-2 El campo debido al medio	31-4
31-3 Dispersión	31-6
31-4 Absorción	31-9
31-5 La energía transportada por una onda eléctrica	31-10
31-6 Difracción de la luz por una pantalla	31-11

CAPÍTULO 32. AMORTIGUAMIENTO POR RADIACIÓN. DISPERSIÓN DE LA LUZ

32-1 Resistencia de radiación	32-1
32-2 La rapidez de radiación de energía	32-2
32-3 Amortiguamiento por radiación	32-4
32-4 Fuentes independientes	32-5
32-5 Dispersión de la luz	32-7

CAPÍTULO 33. POLARIZACIÓN

33-1 El vector eléctrico de la luz	33-1
33-2 Polarización de luz dispersada	33-3
33-3 Birrefringencia	33-3
33-4 Polarizadores	33-5
33-5 Actividad óptica	33-6
33-6 Intensidad de la luz reflejada	33-7
33-7 Refracción anómala	33-9

CAPÍTULO 34. EFECTOS RELATIVISTAS EN LA RADIACIÓN

34-1 Fuentes en movimiento	34-1
34-2 Un modo de hallar el movimiento “aparente”	34-2
34-3 Radiación sincrotrónica	34-4
34-4 Radiación sincrotrónica cósmica	34-6
34-5 Bremsstrahlung	34-7
34-6 El efecto Doppler	34-7
34-7 El vector de dimensión cuatro ω, \mathbf{k}	34-9
34-8 Aberración	34-11
34-9 El momentum de la luz	34-11

CAPÍTULO 35. VISIÓN DE LOS COLORES

35-1 El ojo humano	35-1
35-2 El color depende de la intensidad	35-2
35-3 Medición de la sensación de color	35-3
35-4 El diagrama cromático	35-7
35-5 El mecanismo de la visión de los colores	35-8
35-6 Físicoquímica de la visión de los colores	35-10

CAPÍTULO 36. EL MECANISMO DE LA VISIÓN

36-1 La sensación del color	36-1
36-2 La fisiología del ojo	36-3
36-3 Las células bastoncitos	36-6
36-4 El ojo compuesto (del insecto)	36-7

36-5 Otros ojos	36-9
36-6 Neurología de la visión	36-10

CAPÍTULO 37. COMPORTAMIENTO CUÁNTICO

37-1 Mecánica atómica	37-1
37-2 Un experimento con proyectiles	37-2
37-3 Un experimento con ondas	37-3
37-4 Un experimento con electrones	37-5
37-5 La interferencia de ondas de electrones	37-6
37-6 Observando los electrones	37-7
37-7 Primeros principios de la mecánica cuántica	37-11
37-8 El principio de incertidumbre	37-12

CAPÍTULO 38. RELACIÓN ENTRE LOS PUNTOS DE VISTA ONDULATORIO Y CORPUSCULAR

38-1 Amplitudes de ondas de probabilidad	38-1
38-2 Medida de la posición y del momentum	38-2
38-3 Difracción en cristales	38-5
38-4 El tamaño de un átomo	38-6
38-5 Niveles de energía	38-7
38-6 Implicaciones filosóficas	38-9

CAPÍTULO 39. LA TEORÍA CINÉTICA DE LOS GASES

39-1 Propiedades de la materia	39-1
39-2 La presión de un gas	39-2
39-3 Compresibilidad de la radiación	39-6
39-4 Temperatura y energía cinética	39-7
39-5 La ley de los gases ideales	39-11

CAPÍTULO 40. LOS PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA ESTADÍSTICA

40-1 La atmósfera exponencial	40-1
40-2 La ley de Boltzmann	40-2
40-3 Evaporación de un líquido	40-3
40-4 La distribución de las velocidades moleculares	40-4
40-5 Calores específicos de gases	40-7
40-6 El fracaso de la física clásica	40-9

CAPÍTULO 41. EL MOVIMIENTO BROWNIANO

41-1 Equipartición de la energía	41-1
41-2 Equilibrio térmico de la radiación	41-3
41-3 La equipartición y el oscilador cuántico	41-6
41-4 La caminata aleatoria	41-9

CAPÍTULO 42. APLICACIONES DE LA TEORÍA CINÉTICA

42-1 Evaporación	42-1
42-2 Emisión termoiónica	42-4
42-3 Ionización térmica	42-5

42-4 Cinética química	42-7
42-5 Leyes de radiación de Einstein	42-9

CAPÍTULO 43. DIFUSIÓN

43-1 Colisiones entre moléculas	43-1
43-2 El camino libre medio	43-3
43-3 La velocidad de arrastre	43-4
43-4 Conductividad iónica	43-6
43-5 Difusión molecular	43-7
43-6 Conductividad térmica	43-10

CAPÍTULO 44. LEYES DE LA TERMODINÁMICA

44-1 Máquinas térmicas, primera ley	44-1
44-2 Segunda ley	44-3
44-3 Máquinas reversibles	44-5
44-4 Eficiencia de una máquina ideal	44-7
44-5 Temperatura termodinámica	44-9
44-6 Entropía	44-11

CAPÍTULO 45. EJEMPLOS DE TERMODINÁMICA

45-1 Energía interna	45-1
45-2 Aplicaciones	45-4
45-3 La ecuación de Clausius-Clapeyron	45-6

CAPÍTULO 46. RUEDA DENTADA Y TRINQUETE

46-1 Cómo trabaja una rueda dentada	46-1
46-2 La rueda dentada como máquina	46-2
46-3 Reversibilidad en mecánica	46-5
46-4 Irreversibilidad	46-6
46-5 Orden y entropía	46-7

CAPÍTULO 47. SONIDO. LA ECUACIÓN DE ONDA

47-1 Ondas	47-1
47-2 Propagación del sonido	47-3
47-3 La ecuación de onda	47-4
47-4 Soluciones de la ecuación de onda	47-6
47-5 La velocidad del sonido	47-7

CAPÍTULO 48. PULSACIONES

48-1 Sumando dos ondas	48-1
48-2 Notas pulsadas y modulación	48-3
48-3 Bandas laterales	48-4
48-4 Trenes de ondas localizados	48-6
48-5 Amplitudes de probabilidad para partículas	48-8
48-6 Ondas en tres dimensiones	48-9
48-7 Modos normales de vibración	48-10

CAPÍTULO 49. MODOS DE VIBRACIÓN

49-1 Reflexión de ondas 49-1
49-2 Ondas confinadas, con frecuencias naturales . . 49-2
49-3 Modos de vibración en dos dimensiones 49-4
49-4 Péndulos acoplados 49-6
49-5 Sistemas lineales 49-7

CAPÍTULO 50. ARMÓNICOS

50-1 Tonos musicales 50-1
50-2 La serie de Fourier 50-2
50-3 Timbre y consonancia 50-3
50-4 Coeficientes de Fourier 50-5
50-5 Teorema de la energía 50-8
50-6 Respuestas no lineales 50-9

CAPÍTULO 51. ONDAS

51-1 Ondas de proa 51-1
51-2 Ondas de choque 51-2
51-3 Ondas en sólidos 51-5
51-4 Ondas de superficie 51-7

CAPÍTULO 52. SIMETRÍA EN LA LEYES FÍSICAS

52-1 Operaciones de simetría 52-1
52-2 Simetría en el espacio y en el tiempo 52-1
52-3 Simetría y leyes de conservación 52-4
52-4 Reflexiones en un espejo 52-4
52-5 Vectores polares y axiales 52-7
52-6 ¿Cuál mano es la derecha? 52-8
52-7 ¡La paridad no se conserva! 52-9
52-8 Antimateria 52-11
52-9 Simetrías rotas 52-12

Índice analítico

Índice de nombres

Lista de símbolos

Átomos en movimiento

1-1 Introducción

Este curso de física de dos años se presenta desde el punto de vista de que usted, el lector, va a ser un físico. Este, desde luego, no necesariamente es el caso, pero, ¡es lo que supone cada profesor en cada tema! Si usted va a ser un físico, tendrá que estudiar mucho: 200 años del campo de conocimiento de más rápido desarrollo que existe. Tanto conocimiento, en efecto, que usted pensaría que no lo podría aprender todo en cuatro años y realmente no puede; ¡deberá ir, además, a la escuela de graduados!

Es bastante sorprendente que, a pesar de la cantidad tremenda de trabajo que ha sido realizado en todo este tiempo, es posible condensar en gran parte la enorme masa de resultados (esto es, hallar *leyes* que resumen todo nuestro conocimiento). Aun así, las leyes son tan difíciles de entender que es injusto para usted comenzar a explorar este tremendo tema sin algún tipo de mapa o bosquejo de la relación de una parte a la otra del contenido de la ciencia. De acuerdo con estas notas preliminares, los primeros tres capítulos darán, por lo tanto, un bosquejo de la relación de la física con el resto de las ciencias, las relaciones de las ciencias entre sí y el significado de ciencia, para ayudarnos a desarrollar una mejor comprensión de este tema.

Usted podría preguntarse por qué no podemos enseñar física dando simplemente las leyes básicas en la página uno y luego mostrar cómo operan en todas las circunstancias posibles, como lo hacemos en geometría euclidiana, donde establecemos los axiomas y luego hacemos toda clase de deducciones. (Así que, no satisfecho con aprender física en cuatro años, ¿la quiere aprender en sólo cuatro minutos?) No lo podemos hacer de esta manera por dos razones. Primero, aún no *conocemos* todas las leyes básicas: existe una frontera de ignorancia en expansión. Segundo, el planteamiento correcto de las leyes de la física contiene algunas ideas muy poco familiares que requieren matemática avanzada para su descripción. Por esta razón se necesita una cantidad apreciable de entrenamiento preparatorio para entender lo que significan estas *palabras*. No, no es posible hacerlo de esta manera. Sólo podemos hacerlo parte por parte.

Cada parte del todo de la naturaleza es siempre sólo una *aproximación* a la verdad completa o la verdad completa hasta donde la conocemos. En realidad, todo lo que sabemos es sólo una cierta forma de aproximación, porque *sabemos que aún no conocemos todas las leyes*. Por eso, las cosas deben ser aprendidas, sólo para luego desaprenderlas o, más a menudo, para corregirlas.

El principio de la ciencia, casi la definición, es la siguiente: *La comprobación 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 provienen las leyes que deben ser comprobadas? El experimento mismo ayuda para producir estas leyes, en el sentido de que nos da sugerencias. Pero también la *imaginación* es necesaria para crear, basada en estas sugerencias, las grandes generalizaciones (adivinar sus admirables, simples, pero muy extraños esquemas que hay detrás de todas ellas, y luego experimentar para comprobar nuevamente si hemos hecho la suposición correcta). Este proceso de imaginación es tan difícil que existe una división de las labores en física: hay físicos *teóricos* que imaginan, deducen y hacen suposiciones acerca de nuevas leyes, pero no experimentan; y luego hay los físicos *experimentales* que experimentan, imaginan, deducen y hacen suposiciones.

1-1 Introducción

1-2 La materia está formada de átomos

1-3 Procesos atómicos

1-4 Reacciones químicas

Decíamos que las leyes de la naturaleza son aproximadas: que primero encontramos las “equivocadas” y luego encontramos las “correctas”. Pero ¿cómo puede un experimento estar “equivocado”? Primero, en forma trivial: si algo anda mal con los aparatos y ustedes no se dieron cuenta. Pero estas cosas se arreglan fácilmente y se comprueban en todos los sentidos. Pero sin aferrarnos a estos problemas menores, ¿cómo *pueden* estar equivocados los resultados del experimento? Sólo siendo poco precisos. Por ejemplo, parece que la masa de un objeto nunca cambia: un trompo que gira tiene la misma masa que cuando está en reposo. Así se inventó una “ley”: la masa es constante e independiente de la velocidad. Se sabe ahora que esa “ley” es incorrecta. Se encuentra que la masa aumenta con la velocidad, pero aumentos apreciables requieren velocidades cercanas a la de la luz. Una ley *verdadera* es: si un objeto se mueve con rapidez menor que 100 millas por segundo, la masa es constante dentro de una parte por millón. De esta manera aproximada ésta es una ley correcta. Se podría pensar que en la práctica esta nueva ley no da diferencia apreciable. Bueno, sí y no. Para velocidades ordinarias podemos olvidarla por cierto y usar la ley de masa constante como una buena aproximación. Pero para velocidades altas nos equivocamos y mientras mayor sea la velocidad tanto más equivocados estamos.

Por último, y esto es lo más interesante, *filosóficamente estamos completamente equivocados* con la ley aproximada. Nuestra imagen completa del mundo debe alterarse incluso si la masa cambia solamente un poco. Esto es un asunto muy peculiar de la filosofía o de las ideas que hay detrás de las leyes. Aun un efecto muy pequeño requiere a veces profundos cambios en nuestras ideas.

Ahora bien, ¿qué debemos enseñar primero? ¿Debemos enseñar la ley *correcta*, pero poco familiar con sus ideas extrañas y conceptualmente difíciles, por ejemplo, la teoría de la relatividad, el espacio-tiempo cuadrimensional, etcétera? ¿O debemos enseñar primero la ley sencilla de “masa constante”, que es sólo aproximada, pero no incluye ideas tan difíciles? Lo primero es más excitante, más maravilloso y más entretenido, pero lo segundo es más fácil de comprender, y es el primer paso para un verdadero entendimiento de la primera idea. Este punto aparece repetidas veces al enseñar física. En diferentes ocasiones debemos resolverlo de maneras diferentes, pero en cada paso vale la pena aprender lo que se sabe ahora, hasta qué punto es exacto, cómo se ajusta a todo lo demás y cómo podrá cambiarse cuando aprendamos más.

Sigamos ahora con nuestro bosquejo, o mapa general, de lo que sabemos hoy día de ciencia (en particular de la física, pero también de otras ciencias que están en la periferia), de manera que cuando nos concentremos más tarde en algún punto particular tengamos alguna idea de los fundamentos, por qué ese punto particular resulta interesante y cómo se ajusta dentro de la gran estructura. De esta manera, ¿cuál *es* nuestra visión general del mundo?

1-2 La materia está formada de átomos

Si en algún cataclismo fuera destruido todo el conocimiento científico y solamente pasara una frase a la generación siguiente de criaturas, ¿cuál enunciado contendría el máximo de información en el mínimo de palabras? Yo creo que es la *hipótesis atómica* (o el *hecho atómico*, o como quieran llamarlo), que *todas las cosas están formadas por átomos, pequeñas partículas que se mueven con movimiento perpetuo, atrayéndose unas a otras cuando están separadas por una pequeña distancia, pero repeliéndose cuando se las trata de apretar una contra otra*. En esa sola frase, verán ustedes, hay una cantidad *enorme* de información referente al mundo, si se aplica sólo un poco de imaginación y pensamiento.

Para ilustrar el poder de la idea atómica, supongamos que tenemos una gota de agua de medio centímetro de lado. Si la miramos muy de cerca, no vemos más que agua —agua pareja y continua—. Incluso si la aumentamos con el mejor microscopio óptico disponible —aproximadamente 2000 veces— entonces la gota de agua va a tener unos 12 metros de tamaño, casi tan grande como una pieza grande, y si miráramos de cerca, veríamos *todavía* agua relativamente pareja, pero de vez en cuando cuerpos parecidos a una pelota de fútbol nadando de aquí

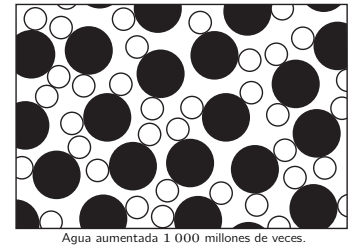
para allá. Muy interesante. Éstos son paramecios. Pueden detenerse en este punto y ponerse tan curiosos acerca de los paramecios con sus vibrantes cilios y cuerpos en contorsión, que no van a ir más allá, excepto tal vez para aumentar el tamaño del paramecio aún más y ver su interior. Esto, desde luego, es un tema de la biología, pero por el presente la dejamos y miramos con mayor atención aún el material del agua misma, aumentándolo nuevamente 2 000 veces. Ahora la gota de agua se extiende por unos 24 kilómetros y si la miramos muy de cerca vemos una especie de hormigueo, algo que ya no tiene una apariencia pareja; se parece a una multitud en un partido de futbol visto desde bastante distancia. Para ver qué es este hormigueo, lo aumentamos 250 veces más todavía y veremos algo parecido a lo que nos muestra la figura 1-1. Ésta es una representación del agua aumentada unas 1 000 millones de veces, pero idealizada en diferentes aspectos. En primer lugar, las partículas están dibujadas de manera sencilla con bordes definidos, lo cual no es exacto. Segundo, por simplicidad están bosquejadas en forma casi esquemática en un arreglo de dos dimensiones, pero se mueven desde luego en tres dimensiones. Nótese que hay dos tipos de “pompas” o círculos para representar los átomos de oxígeno (negro) e hidrógeno (blanco) y que cada oxígeno tiene dos hidrógenos unidos a él. (Cada pequeño grupo de un oxígeno con sus dos hidrógenos se denomina molécula). El dibujo está idealizado más aún en el sentido de que las verdaderas partículas en la naturaleza vibran y rebotan continuamente, rotando y contorsionándose la una alrededor de la otra. Deben imaginarse esto más bien como una representación dinámica y no estática. Otra cosa que no puede representarse en un dibujo es que las partículas están “pegadas entre sí” (que se atraen unas a otras, ésta tirada por aquélla, etcétera). El grupo completo está “encolado en un conjunto”, por decirlo así. Por otra parte, las partículas no pueden atravesarse unas a otras. Si tratan de juntar dos de ellas demasiado cerca se repelen.

Los átomos tienen un radio de $1 \text{ o } 2 \times 10^{-8}$ cm. Ahora bien, 10^{-8} cm se denomina un *ángstrom* (un nombre como cualquier otro), de manera que decimos que tienen un radio de uno o dos *ángstroms* (Å). Otra manera de recordar su tamaño es ésta: si una manzana se aumenta al tamaño de la Tierra, entonces los átomos de la manzana son aproximadamente del tamaño de la manzana original.

Ahora imagínense esta gran gota de agua, con todas estas partículas agitándose unidas entre sí y moviéndose lentamente en conjunto. El agua mantiene su volumen; no se deshace debido a la atracción mutua entre las moléculas. Si la gota está en una pendiente, donde se puede mover de un lugar a otro, el agua escurrirá, pero no desaparece simplemente —las cosas no se deshacen así tan fácilmente—, debido a la atracción molecular. Ahora bien, el movimiento de agitación es lo que nosotros representamos por *calor*: cuando aumentamos la temperatura, aumentamos el movimiento. Si calentamos el agua, la agitación aumenta y se incrementa el volumen entre los átomos, y si el calentamiento continúa, llega el momento en que la atracción entre las moléculas ya no es suficiente para mantenerlas unidas y ellas, *ahora sí*, vuelan en todas direcciones y se separan unas de otras. Desde luego, ésta es la manera como producimos vapor a partir del agua aumentando la temperatura —las partículas vuelan en todas direcciones debido al aumento del movimiento—.

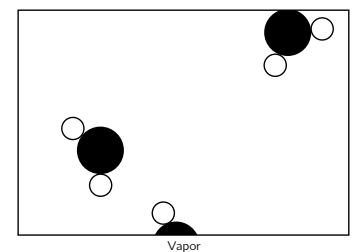
En la figura 1-2 tenemos una representación del vapor. Esta representación del vapor falla en un aspecto: a presión atmosférica ordinaria ciertamente no habría más de tres moléculas de agua en esta figura. La mayoría de los cuadrados de este tamaño no contendrán ninguna, pero nosotros tenemos accidentalmente dos y media o tres en el dibujo (de esta manera no estará completamente vacío). Ahora bien, en el caso del vapor vemos las moléculas características con más claridad que en el caso del agua. Por simplicidad, las moléculas están dibujadas de manera que haya un ángulo de 120° entre los átomos de hidrógeno. En realidad el ángulo es de $105^\circ 3'$, y la distancia entre el centro de un hidrógeno y el centro del oxígeno es de 0.957 \AA , de manera que conocemos esta molécula bastante bien.

Veamos cuáles son las propiedades del vapor de agua o de otro gas cualquiera. Las moléculas, estando separadas entre sí, van a rebotar contra las paredes.



Agua aumentada 1 000 millones de veces.

Figura 1-1



Vapor

Figura 1-2

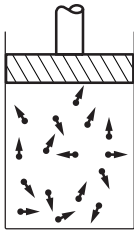


Figura 1-3

Imagínense una pieza con un número de pelotas de tenis (unas 100 o algo así) rebotando en todas direcciones en movimiento perpetuo. Cuando bombardean la pared, esto empuja la pared apartándola. (Desde luego que tendremos que empujar la pared de vuelta). Esto quiere decir que el gas ejerce una fuerza a golpecitos que nuestros burdos sentidos (no habiendo sido aumentados nosotros mismos 1 000 millones de veces) sienten como un *empuje medio*. Para confinar un gas debemos aplicar una presión. La figura 1-3 muestra un recipiente común para contener gases (empleado en todos los textos), un cilindro con un pistón en él. Ahora bien, no importa cuál sea la forma de las moléculas de agua, de manera que por simplicidad las dibujaremos como pelotas de tenis o pequeños puntos. Estos objetos están en movimiento perpetuo en todas las direcciones. Así muchas de ellas están golpeando el pistón superior todo el tiempo, de modo que para evitar que sea botado fuera del tanque por este paciente y continuo golpeteo, debemos sujetar el pistón mediante una cierta fuerza que llamaremos *presión* (realmente, la presión multiplicada por el área es la fuerza). Está claro que la fuerza es proporcional al área, porque si incrementamos el área, pero mantenemos igual el número de moléculas por centímetro cúbico, aumentamos el número de colisiones con el pistón en la misma proporción que hemos incrementado el área.

Coloquemos ahora doble cantidad de moléculas en el tanque, con el fin de duplicar la densidad, y que tengan la misma velocidad, esto es, la misma temperatura. Entonces, con bastante aproximación, el número de colisiones será doble, y como cada una de ellas es tan “energética” como antes, la presión es proporcional a la densidad. Si consideramos la verdadera naturaleza de las fuerzas entre los átomos, podemos esperar un pequeño decrecimiento de la presión debido a la atracción entre los átomos, y un pequeño aumento debido al volumen finito que ocupan. Sin embargo, con una excelente aproximación, si la densidad es suficientemente baja para que no haya demasiados átomos, *la presión es proporcional a la densidad*.

Podemos ver también algo más: si aumentamos la temperatura sin cambiar la densidad del gas, esto es, si aumentamos la velocidad de los átomos, ¿qué le sucederá a la presión? Bueno, los átomos pegan más fuerte porque se mueven más rápido, y además pegan más a menudo, de manera que la presión aumenta. Veán lo sencillas que son las ideas de la teoría atómica.

Consideremos ahora otra situación. Supongamos que el pistón se mueve hacia adentro, de modo que los átomos son comprimidos lentamente a un espacio más pequeño. ¿Qué sucede si un átomo choca contra el pistón en movimiento? Evidentemente toma velocidad de la colisión. Pueden comprobarlo haciendo rebotar una pelota de ping-pong contra una paleta que se mueve hacia adelante, por ejemplo, y hallarán que sale con más velocidad con la que chocó. (Ejemplo especial: si un átomo resultara estar en reposo y el pistón lo golpea, ciertamente se moverá). De esta manera los átomos resultan más “calientes” cuando se alejan del pistón que cuando lo chocaron. Por lo tanto, todos los átomos del recipiente habrán adquirido más velocidad. Esto quiere decir que *cuando comprimimos lentamente un gas, la temperatura del gas aumenta*. Así que, bajo una lenta *compresión*, un gas *aumentará* su temperatura, y bajo una lenta *expansión* *disminuirá* la temperatura.

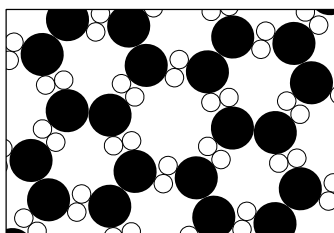


Figura 1-4

Retornamos ahora a nuestra gota de agua y miramos en otra dirección. Supongamos que bajamos la temperatura de nuestra gota de agua. Suponga que la agitación de las moléculas de los átomos en el agua está continuamente decreciendo. Sabemos que existen fuerzas de atracción entre los átomos, de modo que después de un rato ya no estarán en condiciones de agitarse tan bien. Lo que sucederá a temperaturas muy bajas queda indicado en la figura 1-4: las moléculas se acomodan en una nueva estructura que es el *hielo*. Este diagrama esquemático particular del hielo está equivocado porque está dibujado en dos dimensiones, pero cualitativamente está bien. El punto interesante es que el material tiene un *lugar definido para cada átomo* y se puede apreciar fácilmente que si de una manera u otra podemos mantener todos los átomos de un extremo de la gota en una cierta ordenación, cada átomo en un cierto lugar, entonces debido a la estructura de interconexiones, que es rígida, el otro extremo a kilómetros de

distancia (en nuestra escala aumentada) tendrá también una ubicación definida. Así, si sostenemos una aguja de hielo de un extremo, el otro extremo se resiste a ser desplazado, a diferencia del caso del agua, donde la estructura está destruida debido al aumento de la agitación, de manera que todos los átomos se mueven en forma diferente. La diferencia entre sólidos y líquidos es entonces que en un sólido los átomos están ordenados en un cierto tipo de estructura, llamada *estructura cristalina*, y no tienen una posición al azar a gran distancia; la posición de los átomos en un lado del cristal queda determinada por la de los otros átomos a distancia de millones de átomos al otro lado del cristal. La figura 1-4 es una ordenación inventada para el hielo, y a pesar de contener muchas de las características correctas del hielo, no es la verdadera ordenación. Uno de los aspectos correctos es que hay una parte de la simetría que es hexagonal. Pueden ver que si giran el dibujo en 60° alrededor de su eje, el dibujo resulta igual. Por lo tanto, hay una *simetría* en el hielo que es responsable del aspecto de seis caras de los copos de nieve. Otro asunto que podemos ver de la figura 1-4 es por qué el hielo se contrae cuando se derrite. La ordenación cristalina particular del hielo mostrada aquí tiene muchos “huecos” dentro de ella, como la estructura verdadera del hielo. Cuando se desmorona la estructura, estos huecos pueden ser ocupados por moléculas. La mayoría de las sustancias simples, con la excepción del agua y el metal de tipos de imprenta, se *dilatan* al fundirse, debido a que los átomos están muy compactos en el cristal sólido y al fundirse necesitan mayor espacio para agitarse, pero una estructura abierta sufre un colapso, como en el caso del agua.

Ahora bien, a pesar de que el hielo tiene una forma cristalina “rígida”, su temperatura puede cambiar —el hielo tiene calor—. Si queremos, podemos cambiar su cantidad de calor. ¿Qué es el calor en el caso del hielo? Los átomos no están quietos; están agitándose y vibrando. De manera que, a pesar de existir un orden definido en el cristal —una estructura definida—, todos los átomos están vibrando “en posición”. Si aumentamos la temperatura, vibran con amplitud cada vez mayor, hasta que finalmente se sacuden a sí mismos fuera de su posición. A esto lo llamamos *fusión*. Si decrecemos la temperatura, las vibraciones decrecen y decrecen hasta que, en el cero absoluto, los átomos quedan con una cantidad mínima de vibración, pero *no cero*. Este valor mínimo de movimiento que pueden tener los átomos no es suficiente para fundir las sustancias, con una excepción: el helio. El helio solamente decrece el movimiento atómico lo más que puede, pero aun en el cero absoluto todavía queda suficiente movimiento como para evitar su congelación. El helio, aun en el cero absoluto, no se congela, a menos que la presión se haga tan grande que los átomos se aplasten entre sí. Si aumentamos la presión, lo *podemos* hacer solidificar.

1-3 Procesos atómicos

Ya hablamos bastante de la descripción de los sólidos, líquidos y gases desde el punto de vista atómico. Sin embargo, la hipótesis atómica también describe *procesos*, y por eso veremos ahora algunos procesos desde el punto de vista atómico. El primer proceso que veremos está asociado con la superficie del agua. ¿Qué sucede en la superficie del agua? Haremos ahora el cuadro más complicado —y más realista— imaginándonos que la superficie está al aire. La figura 1-5 muestra la superficie de agua al aire. Vemos las moléculas de agua como antes, formando un cuerpo de agua líquida, pero ahora también vemos la superficie del agua. Sobre la superficie encontramos una serie de cosas: ante todo hay moléculas de agua, como en vapor. Éste es el *vapor de agua*, que siempre se encuentra sobre agua líquida. (Existe un equilibrio entre el vapor y el agua que será descrito posteriormente). Además encontramos otras moléculas —aquí dos átomos de oxígeno pegados entre sí—, formando una *molécula de oxígeno*, allá dos átomos de nitrógeno también pegados para formar una molécula de nitrógeno. El aire está formado casi enteramente por nitrógeno, oxígeno, algo de vapor de agua y cantidades menores de dióxido de carbono, argón y otras cosas. Así que sobre la superficie del agua está el aire, un gas, que contiene algo de vapor de agua.

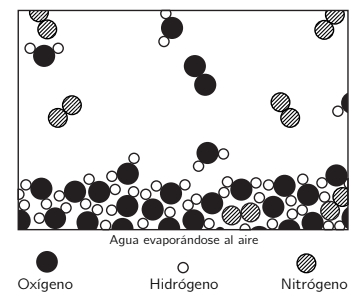


Figura 1-5

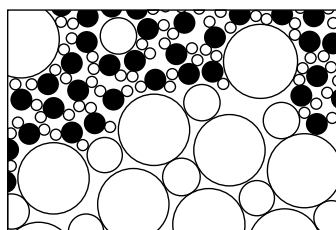
¿Qué sucede ahora en este cuadro? Las moléculas de agua están continuamente en agitación. De vez en cuando sucede que una de la superficie recibe un golpe un poco más fuerte que lo usual y sale. Es difícil ver este suceso en el dibujo, porque es un dibujo *estático*. Pero podemos imaginar que una molécula cerca de la superficie acaba de ser golpeada y está volando hacia afuera o que tal vez otra más ha sido afectada del mismo modo. De esta manera, molécula tras molécula, el agua desaparece —se evapora—. Pero si *cerramos* el recipiente por arriba, después de un tiempo hallaremos una gran cantidad de moléculas de agua entre las moléculas de aire. De vez en cuando, una de estas moléculas de vapor viene volando hacia abajo hacia el agua y queda aprisionada nuevamente. Vemos así que lo que parece ser una cosa muerta, sin interés —un vaso de agua con una tapa, que ha estado ahí quizá por 20 años—, realmente contiene un fenómeno dinámico e interesante que prosigue todo el tiempo. A nuestros ojos, nuestros imperfectos ojos, nada cambia, pero si pudiéramos verlo ampliado 1 000 millones de veces, veríamos que desde su propio punto de vista cambia continuamente: moléculas abandonan la superficie, moléculas regresan.

¿Por qué *no vemos cambio alguno*? ¿Porque tantas moléculas abandonan como regresan! A la larga “nada sucede”. Si ahora sacamos la tapa del recipiente y soplamos el aire húmedo a otra parte, remplazándolo por aire seco, el número de moléculas que abandonan el líquido sigue siendo el mismo como antes, porque esto depende de la agitación del agua, pero el número de las que regresan está fuertemente reducido porque hay tan pocas moléculas de agua sobre el agua. Por consiguiente, salen más de las que entran y el agua se evapora. ¡Luego, si desean evaporar agua, echen a andar el ventilador!

Aquí hay algo más. ¿Cuáles moléculas se van? Cuando una molécula se va es por una acumulación accidental extra de un poco más de energía de lo normal que ella necesita si debe escapar de la atracción de sus vecinas. Por lo tanto, ya que las que se van tienen más energía que el valor medio, las que se quedan tienen *menos* movimiento promedio de lo que tenían antes. De esta manera, el líquido gradualmente *se enfría* si se evapora. Desde luego, si una molécula de vapor baja desde el aire al agua, hay una gran atracción repentina a medida que la molécula se acerca a la superficie. Esto acelera la molécula que entra y da como resultado generación de calor. De modo, que cuando se van quitan calor; cuando regresan generan calor. Desde luego, cuando no hay evaporación neta, el resultado es nulo —el agua no cambia de temperatura—. Si soplamos el agua para mantener una preponderancia del número que se evapora, entonces el líquido se enfría. ¡Luego sopla la sopa para enfriarla!

Desde luego deben darse cuenta que los procesos recién descritos son más complicados de lo que hemos indicado. No solamente pasa el agua al aire, sino que también de cuando en cuando una de las moléculas de oxígeno o nitrógeno entrará y “se perderá” en la masa de las moléculas de agua y se las arreglará para permanecer en el agua. De este modo el aire se disuelve en el agua; moléculas de oxígeno y nitrógeno se las arreglan para entrar al agua, y el agua contendrá aire. Si retiramos repentinamente el aire del recipiente, entonces las moléculas del gas saldrán más rápidamente de lo que entran y haciendo esto producirá burbujas. Esto es muy peligroso para los buzos, como ustedes sabrán.

Ahora pasaremos a otro proceso. En la figura 1-6 vemos, desde el punto de vista atómico, un sólido que se disuelve en agua. Si ponemos un cristal de sal en agua ¿qué sucederá? La sal es un sólido, un cristal, un sistema organizado de “átomos de sal”. La figura 1-7 es una ilustración de la estructura tridimensional de la sal común, cloruro de sodio. Estrictamente hablando, el cristal no está hecho de átomos, sino de lo que llamamos *iones*. Un ion es un átomo que tiene unos pocos electrones extra, o que ha perdido algunos electrones. En un cristal de sal encontramos iones cloro (átomos de cloro con un electrón extra) y iones sodio (átomos de sodio con un electrón de menos). Los iones están unidos unos a otros por atracción electrostática en la sal sólida, pero si los colocamos en agua, encontramos, debido a las atracciones del oxígeno negativo y del hidrógeno positivo por los iones, que algunos iones se sueltan. En la figura 1-6 vemos un ion cloro soltándose y otros átomos flotando en el agua en forma de iones. Este



Sal disolviéndose en agua

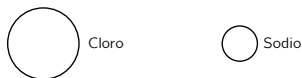
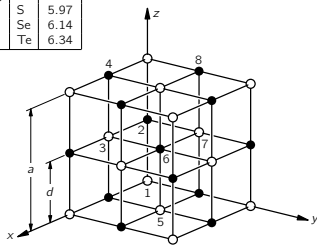


Figura 1-6

Cristal	●	○	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



Distancia al vecino más próximo $d = a/2$

Figura 1-7

dibujo fue hecho con algún cuidado. Nótese, por ejemplo, que los terminales de hidrógeno de las moléculas de agua están más próximos al ion cloro; en cambio, cerca del ion sodio encontramos más a menudo el terminal oxígeno, debido a que el sodio es positivo y el terminal oxígeno del agua es negativo, y se atraen eléctricamente. ¿Podemos decir con base en este dibujo si la sal se está *disolviendo* en agua o *cristalizando fuera* de ella? Desde luego que *no lo podemos* decir, porque mientras algunos de los átomos abandonan el cristal, otros átomos se vuelven a juntar con él. El proceso es *dinámico*, como 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. Entendemos por equilibrio la situación en la cual la rapidez con que se van los átomos iguala exactamente a la rapidez con que regresan. Si casi no hubiera sal en el agua, se van más átomos de los que retornan, y la sal se disuelve. Si, por otro lado, hay demasiados “átomos de sal”, regresan más de los que se van y la sal se cristaliza.

De paso, mencionaremos que el concepto de *molécula* de una sustancia es sólo aproximado y existe sólo para una cierta clase de sustancias. Está claro, en el caso del agua, que los tres átomos están realmente pegados unos a otros. No está tan claro en el caso del cloruro de sodio en el sólido. Hay una ordenación de iones sodio y cloro en el sólido. No hay manera natural de agruparlos como “moléculas de sal”.

Retornando a nuestra discusión de solución y precipitación, si aumentamos la temperatura de la solución salina, aumenta la rapidez con que los átomos se retiran, y así también la rapidez con que los átomos retornan. Resulta, en general, muy difícil predecir en qué sentido se realiza, si se disuelve más o menos sólido. La mayoría de las sustancias se disuelven más, pero algunas sustancias se disuelven menos al aumentar la temperatura.

1-4 Reacciones químicas

En todos los procesos que han sido descritos hasta ahora, los átomos y los iones no han cambiado sus compañeros, pero desde luego hay circunstancias en las cuales los átomos cambian de combinación formando nuevas moléculas. Esto se ilustra en la figura 1-8. Un proceso en el cual ocurre un reordenamiento de los participantes atómicos es lo que llamamos *reacción química*. Los otros procesos descritos hasta ahora se llaman procesos físicos, pero no hay una distinción neta entre los dos. (La naturaleza no se preocupa de cómo los denominamos, simplemente sigue actuando). Ésta figura se supone que representa carbono que se quema en oxígeno. En el caso del oxígeno, *dos* átomos de oxígeno están unidos muy fuertemente. (¿Por qué no se unen *tres* o *cuatro*? Ésta es una de las características muy peculiares de tales procesos atómicos. Los átomos son muy especiales: les gustan ciertas estructuras particulares, ciertas direcciones particulares, etc. Es el trabajo de la física analizar por qué cada uno quiere lo que quiere. En todo caso, dos átomos de oxígeno forman, saturados y contentos, 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 pasarse al carbono y cada átomo puede tomar un átomo de carbono y salir volando en una nueva combinación —“carbono-oxígeno”— que es una molécula del gas llamado monóxido de carbono. Se le da el nombre químico CO. Esto es muy sencillo: las letras “CO” son prácticamente el dibujo de aquella molécula. Pero el carbono atrae al oxígeno mucho más que el oxígeno al oxígeno o el carbono al carbono. Puede ser que el oxígeno llegue a este proceso con muy poca energía, pero el oxígeno y el carbono se unirán con tremenda violencia y conmoción y todo lo que está cerca de ellos captará esta energía. De este modo se genera una cantidad grande de energía de movimiento, energía cinética. Esto es, desde luego, *quemar*: obtener *calor* de la combinación del oxígeno y el carbono. El calor se tiene generalmente en forma de movimiento molecular del gas caliente,

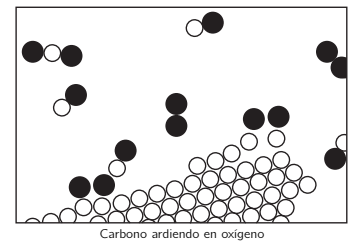


Figura 1-8

* Se puede quemar un diamante en el aire.

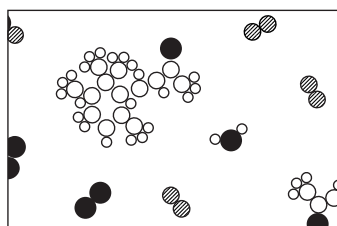
pero en ciertas circunstancias puede ser tan enorme que genera *luz*. Así es como se obtienen las *llamas*.

Además, el monóxido de carbono no está satisfecho del todo. Le es posible ligar otro oxígeno, de manera que podemos tener una reacción mucho más complicada en la cual el oxígeno se combina con el carbono, mientras que al mismo tiempo se lleva a cabo una colisión con una molécula de monóxido de carbono. Podría unirse un átomo de oxígeno al CO y formar finalmente una molécula compuesta por un carbono y dos oxígenos, que se designa por CO_2 y que se llama 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 le queda tiempo para formar dióxido de carbono) se forma una cantidad considerable de monóxido de carbono. En muchos de estos nuevos arreglos se libera una cantidad bastante grande de energía, produciendo explosiones, llamas, etc., según la reacción. Los químicos han estudiado estas combinaciones de átomos, y han encontrado que todas las sustancias son algún tipo de *combinaciones de átomos*.

Para ilustrar esta idea, consideremos otro ejemplo. Si entramos en un campo de pequeñas violetas, sabemos cuál es su “olor”. Es un cierto tipo de *molécula*, o combinación de átomos, que ha entrado en nuestras narices. Antes que nada, ¿cómo pudo llegar hasta allí? Es bastante sencillo. Si el olor es algún tipo de molécula en el aire, que se agita en todos los sentidos y siendo chocada a cada trecho, podría haber entrado *accidentalmente* en nuestras narices. Ciertamente no tiene ningún deseo particular de entrar en nuestra nariz. Es solamente una parte desvalida de un tumulto de moléculas, y en su vagar sin rumbo este pedazo de materia resulta que se encuentra en la nariz.

Ahora bien, los químicos pueden tomar moléculas particulares como el olor a violetas, analizarlas y decirnos cuál es el *ordenamiento exacto* de los átomos en el espacio. Sabemos que la molécula de dióxido de carbono es recta y simétrica: $\text{O}-\text{C}-\text{O}$. (Esto puede ser determinado fácilmente también por medios físicos). Sin embargo, aun para las combinaciones enormemente más complicadas de átomos que hay en la química, uno puede, mediante un largo y notable proceso de trabajo detectivesco, hallar la combinación de los átomos. La figura 1-9 representa el aire en la cercanía 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.) Pero también vemos un “monstruo” compuesto por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno, que han tomado una cierta forma especial para ordenarse. Es una ordenación mucho más complicada que la del dióxido de carbono; es, en efecto, una combinación enormemente complicada. Desgraciadamente no podemos representar todo lo que realmente se conoce de ella químicamente, porque la combinación precisa de todos los átomos se conoce en realidad en tres dimensiones, mientras que nuestro dibujo es solamente en dos. Los seis carbonos que forman un anillo no forman un anillo plano, sino una especie de anillo “arrugado”. Todos sus ángulos y distancias son conocidos. De este modo una *fórmula* química es sólo una representación de la molécula. Cuando un químico escribe una de esas cosas en el pizarrón, trata de “dibujar”, hablando llanamente, en dos dimensiones. Por ejemplo, nosotros vemos un “anillo” de seis carbonos y una “cadena” de carbonos colgando en el extremo, con un oxígeno en segundo lugar desde el extremo, tres hidrógenos unidos a un carbono, dos carbonos y tres hidrógenos asomados por aquí, etcétera.

¿Cómo descubre el químico cuál es la combinación? Mezcla botellas llenas de materiales y si se vuelve rojo, le dice que consiste de un hidrógeno y dos carbonos ligados aquí; si, por otra parte, se vuelve azul, se trata de un asunto totalmente diferente. Éste es uno de los trabajos detectivescos más fantásticos que se haya hecho nunca —la química orgánica—. Para descubrir el ordenamiento de los átomos en estas combinaciones tan enormemente complicadas, el químico se fija en lo que sucede si mezcla dos sustancias diferentes. El físico jamás creería que el químico sabe de lo que está hablando cuando describe las combinaciones de los átomos. Por unos 20 años ha sido posible en algunos casos observar estas moléculas (no tan complicadas como ésta, pero algunas que contienen parte



Olor a violetas

Figura 1-9

de ella) mediante un método físico, y ha sido posible localizar cada átomo, no mirando colores, sino *midiendo donde están*. ¡Y admírense!, los químicos casi siempre están en lo cierto.

Resulta, en efecto, que en el olor de las violetas hay tres moléculas levemente diferentes, que se diferencian solamente en la ordenación de los átomos de hidrógeno.

Un problema de la química es darle nombre a una sustancia, de manera que sepamos lo que es. ¡Encuentre un nombre para esta forma! El nombre no solamente debe dar idea de la forma, sino decir además que aquí hay un átomo de oxígeno, allá un hidrógeno (exactamente lo que es cada átomo y dónde está colocado). Así podemos apreciar que los nombres químicos deben ser complejos para que sean completos. Ustedes ven que el nombre de esta cosa en su forma más completa que les indique la estructura es 4-(2, 2, 3, 6 tetrametil-5-ciclohexenil)-3-buten-2-ona, y eso les dice que ésta es su ordenación. Podemos apreciar las dificultades que tienen los químicos, y también apreciar las razones para usar nombres tan largos. ¡No es que ellos deseen ser oscuros, sino que tienen un problema extremadamente difícil al tratar de describir las moléculas en palabras!

¿Cómo *sabemos* que existen los átomos? Mediante los trucos mencionados anteriormente: hacemos la *hipótesis* de que existen átomos, y un resultado tras otro sale como lo hemos predicho, como debería ser si las cosas *están* hechas de átomos. Hay además evidencias algo más directas, un buen ejemplo de lo cual es lo siguiente: los átomos son tan pequeños que no se pueden ver con un microscopio óptico —de hecho—, ni siquiera con un microscopio *electrónico*. (Con un microscopio óptico sólo pueden verse objetos que son mucho más grandes). Ahora, si los átomos están continuamente en movimiento, digamos en agua, y colocamos una pelota grande de algún material en el agua, una pelota mucho más grande que los átomos, la pelota se moverá en todas direcciones —muy parecido a un juego de pelota donde mucha gente trata de empujar una pelota muy grande—. La gente empuja en direcciones diferentes, y la pelota se mueve por el campo con una trayectoria irregular. Así, del mismo modo, la “pelota grande” se moverá por las desigualdades de las colisiones de un lado para el otro, de un instante al siguiente. Por eso, si miramos partículas muy pequeñas (coloides) en 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 llama *movimiento browniano*.

Podemos ver otra evidencia más de la existencia de los átomos en la estructura de los cristales. En muchos casos las estructuras deducidas por análisis de rayos X están de acuerdo en sus “formas” espaciales con la forma que realmente presentan los cristales como se encuentran en la naturaleza. Los ángulos entre las diferentes “caras” de un cristal concuerdan, a menos de segundos de arco, con los ángulos deducidos suponiendo que un cristal está formado por muchas “capas” de átomos.

Todo está formado por átomos. Ésta 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 vivientes que no pueda ser entendido desde el punto de vista de que están hechos de átomos y éstos actúan según las leyes de la física*. Esto no se conocía desde un comienzo: fue necesaria alguna experimentación y teorización para sugerir esta hipótesis, pero ahora es aceptada, y es la teoría más útil para producir nuevas ideas en el campo de la biología.

Si un trozo de acero o un trozo de sal, que consisten de átomos uno junto al otro, pueden tener propiedades tan interesantes; si el agua —que no es sino estas pequeñas gotitas, kilómetros y kilómetros de lo mismo sobre la tierra— puede formar olas y espuma y hacer ruidos de torrente y figuras extrañas cuando corre sobre cemento; si todo esto, toda la vida de una corriente de agua, puede ser nada más que una pila de átomos, *¿cuánto más es posible?* Si en lugar de arreglar los átomos en alguna estructura definida, que se repita una y otra vez, siempre de nuevo, o incluso formando pequeños grupos complejos como en el olor de las violetas, hacemos una combinación que es *siempre diferente* de lugar a lugar, con distintos tipos de átomos combinados de muchas maneras

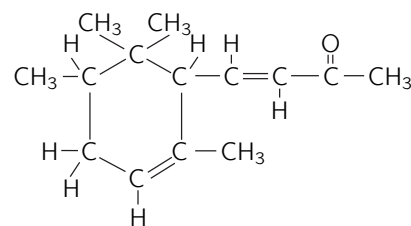


Figura 1-10. La sustancia representada es α -irona.

que cambian continuamente, no repitiéndose, ¿cuánto más maravillosamente es posible que este objeto se comporte? ¿Es posible que este “objeto” que camina de un lado a otro frente a ustedes hablándoles, sea un gran montón de estos átomos en un arreglo muy complejo, de modo que su mera complejidad hace vacilar la imaginación acerca de 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 del uno al otro podría muy bien tener las posibilidades que ven frente a ustedes en el espejo.

Física básica

2-1 Introducción

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

Las cosas de las cuales nos preocupamos en ciencia se presentan en miríada de formas y con una multitud de atributos. Por ejemplo, si estamos parados en la playa y observamos el mar, vemos agua, el romper de las olas, la espuma, el movimiento chapoteante del agua, el sonido, el aire, los vientos y las nubes, también el Sol y el cielo azul y luz; hay allí arena y rocas de diferente dureza y duración, color y textura. Hay animales y algas, hambre y enfermedad, y el observador en la playa; puede haber aun felicidad y pensamientos. Cualquier otro lugar en la naturaleza tiene una variedad similar de cosas e influencias. Siempre será tan complicado como aquello, cualquiera que sea el lugar. La curiosidad exige que formulemos preguntas, que intentemos enlazar las cosas y tratemos de entender esta multitud de aspectos que resultan quizá de la acción de un número relativamente pequeño de cosas elementales y fuerzas que actúan en una variedad infinita de combinaciones.

Por ejemplo: ¿es la arena diferente a las rocas? Es decir, ¿es la arena quizá nada más que un gran número de piedras muy diminutas? ¿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 chapoteante del agua en el mar? ¿Qué características comunes tienen los diferentes movimientos? ¿Qué es común a las diferentes clases de sonido? ¿Cuántos colores diferentes existen? Y así en tantas otras cosas. De esta manera tratamos de analizar gradualmente todas las cosas, de enlazar cosas que a primera vista parecen diferentes, con la esperanza de poder *reducir* el número de cosas *diferentes* y de esta manera comprenderlas mejor.

Hace algunos cientos de años se estableció un método para encontrar respuestas parciales a estas interrogantes. *Observación, razonamiento y experimentación* constituyen lo que llamamos el *método científico*. Tendremos que limitarnos a una mera descripción de nuestro punto de vista básico de lo que a veces se llama *física fundamental*, o ideas fundamentales que han surgido de la aplicación del método científico.

¿Qué queremos decir por “comprender” algo? Podemos imaginar que este conjunto complicado de cosas en movimiento, que constituyen “el mundo”, es algo como un enorme juego de ajedrez jugado por dioses y nosotros somos observadores del juego. No conocemos las reglas del juego; lo único que nos está permitido es *observar* el juego. Por cierto, si observamos el tiempo suficiente, podemos eventualmente darnos cuenta de alguna de las reglas. Son *las reglas del juego* lo que entendemos por *física fundamental*. Sin embargo, aun si entendiéramos todas las reglas, podríamos no estar en condiciones de comprender por qué se hace un movimiento particular en el juego, meramente porque es demasiado complicado y nuestras mentes son limitadas. Si ustedes juegan ajedrez, deberán saber que es fácil aprender todas las reglas, y aun así es a veces muy difícil seleccionar la mejor jugada o comprender por qué un jugador mueve de una manera determinada. Así es en la naturaleza, sólo que en mayor grado; pero en última instancia podríamos encontrar todas las reglas. En realidad, no tenemos ahora todas las reglas. (Alguna vez en algún momento puede suceder algo como

2-1 Introducción

2-2 La física antes de 1920

2-3 Física cuántica

2-4 Núcleos y partículas

el enroque que todavía no comprendemos.) Aparte de no conocer todas las reglas, lo que podemos explicar realmente a partir de aquellas reglas es muy limitado, porque casi todas las situaciones son tan enormemente complicadas que no podemos seguir las jugadas usando las reglas, mucho menos decir qué sucederá a continuación. Debemos, por lo tanto, limitarnos al problema más básico de las reglas del juego. Si conocemos las reglas, consideramos que “comprendemos” el mundo.

¿Cómo podemos decir si las reglas que “adivinamos” son realmente correctas, si no podemos analizar el juego muy bien? Existen, hablando a grandes rasgos, tres maneras. Primero, pueden existir situaciones donde la naturaleza se las ha arreglado, o nosotros arreglamos la naturaleza, para ser simple y tener tan pocas partes que podamos predecir exactamente lo que va a suceder, y de esta manera comprobar cómo funcionan nuestras reglas. (En una esquina del tablero puede haber solamente unas pocas piezas de ajedrez en juego y eso lo podemos descifrar exactamente.)

Una segunda manera útil para comprobar reglas es en términos de reglas menos específicas derivadas de aquéllas. Por ejemplo, la regla del movimiento de un alfil sobre un tablero de ajedrez es que se mueve solamente en diagonal. Se puede deducir, sin importar cuántos movimientos se hayan realizado, que un cierto alfil estará siempre sobre un cuadro blanco. Así, sin estar en condiciones de seguir los detalles, podemos comprobar siempre nuestra idea acerca del movimiento del alfil, averiguando si está siempre sobre un cuadro blanco. Por supuesto que estará allí por largo tiempo, hasta que de súbito encontramos que está sobre un cuadro *negro*. (Lo que sucedió, por supuesto, es que en el ínterin fue capturado, otro peón atravesó para ser coronado y se transformó en un alfil sobre un cuadro negro.) Así son las cosas en física. Por mucho tiempo tendremos una regla que funciona excelentemente en forma global, incluso cuando no podemos captar los detalles, y luego en algún momento podemos descubrir una *nueva regla*. Desde el punto de vista de la física básica, los fenómenos más interesantes se encuentran, por supuesto, en las partes *nuevas*, las partes donde las reglas no funcionan —¡no las partes donde *realmente* funcionan!—. Es de esta manera como descubrimos reglas nuevas.

La tercera manera de decir si nuestras ideas son correctas es relativamente tosca, pero probablemente la más poderosa de todas. Esto es, en forma *aproximada*. Aunque no seamos capaces de decir por qué Alekhine mueve *esa pieza particular*, quizá podamos entender *de algún modo* que está juntando sus piezas alrededor del rey para protegerlo, más o menos, ya que es lo sensato hacer en estas circunstancias. De la misma manera podemos a menudo comprender la naturaleza, más o menos, sin que seamos capaces de ver qué hace *cada pequeña pieza* en términos de nuestra comprensión del juego.

En un comienzo los fenómenos de la naturaleza se dividieron aproximadamente en clases, como el calor, la electricidad, la mecánica, el magnetismo, las propiedades de sustancias, los fenómenos químicos, la luz o la óptica, los rayos X, la física nuclear, la gravitación, los fenómenos mesónicos, etc. Sin embargo, el objetivo es ver la *naturaleza completa* como diferentes aspectos de un *conjunto único* de fenómenos. Éste es el problema básico de la física teórica de hoy —*encontrar las leyes que hay detrás del experimento; amalgamar estas clases*—. Históricamente hemos sido capaces siempre de amalgamarlas, pero con el transcurso del tiempo se encuentran cosas nuevas. Estábamos amalgamando muy bien, cuando de repente se descubrieron los rayos X. Entonces amalgamamos un poco más y se encontraron los mesones. Por lo tanto, en cada etapa del juego éste parece siempre bastante confuso. Mucho está amalgamado, pero siempre existen muchos alambres o hilos colgando en todas las direcciones. Ésta es hoy la situación que trataremos de describir.

Algunos ejemplos históricos de amalgamación son los siguientes. Tómese primero el *calor* y la *mecánica*. Cuando los átomos están en movimiento, mientras más movimiento más calor contiene el sistema y así *el calor y todos los efectos térmicos pueden representarse por las leyes de la mecánica*. Otra tremenda amalgamación fue el descubrimiento de la relación entre la electricidad, el magnetismo

y la luz, que se encontró que eran aspectos diferentes de una misma cosa, que llamamos hoy día el *campo electromagnético*. Otra amalgamación es la unificación de los fenómenos químicos, de las diversas propiedades de las diferentes sustancias y el comportamiento de las partículas atómicas, que está en la *mecánica cuántica de la química*.

La pregunta es, por supuesto, ¿será posible amalgamar *todo* y descubrir sólo que este mundo representa aspectos diferentes de *una* cosa? Nadie lo sabe. Todo lo que sabemos es que, si proseguimos, encontramos que podemos amalgamar partes y entonces encontramos algunas partes que no ajustan y seguimos tratando de armar el rompecabezas. Si existe un número finito de partes y aun si existe un límite para el rompecabezas, es, por supuesto, desconocido. Nunca se sabrá, hasta que hayamos terminado el cuadro, si es que lo logramos. Lo que deseamos hacer aquí es ver hasta qué punto ha avanzado este proceso de amalgamación, y cuál es la situación presente en la comprensión de fenómenos básicos en términos del conjunto más reducido de principios. Para expresarlo de una manera más simple, ¿de qué están hechas las cosas y cuántos elementos hay?

2-2 La física antes de 1920

Es un poco difícil empezar de inmediato con el panorama presente; así, pues, veremos primero cómo se veían las cosas alrededor de 1920 y después extraeremos algunas cosas de esta imagen. Antes de 1920 nuestra imagen del mundo era algo como esto: el “escenario” en que el universo se desarrolla es el *espacio* tridimensional de la geometría, como fue descrito por Euclides, y las cosas cambian en un medio llamado *tiempo*. Los elementos en el escenario son *partículas*, por ejemplo, los átomos, que tienen algunas *propiedades*. Primero, la propiedad de la inercia: si una partícula se mueve, sigue moviéndose en la misma dirección, a menos que *fuerzas* actúen sobre ella. El segundo elemento lo constituyen entonces las *fuerzas*, que entonces se creía eran de dos variedades: primero un tipo enormemente complicado y detallado de fuerza de interacción que mantiene los diversos átomos en diferentes combinaciones de una manera complicada, que determinaba si la sal se disolvía 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 tranquila— que variaba inversamente con el cuadrado de la distancia y que se llamó *gravitación*. Esta ley se conocía y era muy simple. *Por qué* las cosas se mantienen en movimiento cuando se están moviendo o *por qué* existe una ley de gravitación, era desconocido, por supuesto.

Una descripción de la naturaleza es lo que nos interesa aquí. Desde este punto de vista, entonces, un gas y por cierto *toda* la materia, es una miríada de partículas en movimiento. De esta manera, muchas de las cosas que hemos visto mientras permanecíamos de pie a la orilla del mar pueden ser relacionadas inmediatamente. Primero la presión: ésta proviene de los choques de los átomos con las paredes, o lo que sea; el desplazamiento de los átomos, si en general se mueven todos en una dirección, es el viento; los movimientos internos al *azar* son el *calor*. Existen ondas de exceso de densidad, donde se han juntado demasiadas partículas, y así, a medida que se descomprimen, provocan más allá apilamientos de partículas y así sucesivamente. Esta onda de exceso de densidad es el *sonido*. Es un logro tremendo ser capaz de entender tanto. Algunas de estas cosas fueron descritas en el capítulo anterior.

¿Qué *clase* de partículas existen? En aquel tiempo consideraban que existían 92: a la larga se encontraron 92 clases diferentes de átomos. Tenían nombres diferentes asociados con sus propiedades químicas.

La parte siguiente del problema era, ¿qué son las fuerzas de corto alcance? ¿Por qué el carbono atrae un oxígeno, o quizá dos oxígenos, pero no tres oxígenos? ¿Cuál es el mecanismo de interacción entre los átomos? ¿Será la gravitación? La respuesta es no. La gravedad es demasiado débil. Pero imaginemos una fuerza análoga a la gravedad, que varía inversamente con el cuadrado de la distancia, pero enormemente más poderosa y que tiene una diferencia. En la gravedad, todo

atrae a todo, pero ahora imaginemos que existen *dos clases* de “cosas”, y que esta nueva fuerza (que es, por supuesto, la fuerza eléctrica) tiene la propiedad que los iguales *se repelen* y que los desiguales *se atraen*. La “cosa” que lleva esta interacción fuerte se llama *carga*.

Entonces, ¿qué es lo que tenemos? Supóngase que tenemos dos desiguales que se atraen entre sí, uno positivo y uno negativo, y que quedan unidos a una distancia muy corta. Supóngase que tenemos otra carga a cierta distancia. ¿Sentirá ella alguna atracción? *Prácticamente* no sentirá *ninguna*, porque si las dos primeras son iguales en magnitud, la atracción de una y la repulsión de la otra se compensan. Por lo tanto, hay muy poca fuerza a cualquier distancia apreciable. Por otra parte, si nos *acercamos mucho* con la carga extra, surge *atracción*, porque la repulsión de las iguales y la atracción de las desiguales tenderán a acercar las desiguales y a separar las iguales. Entonces la repulsión será *menor* que la atracción. Ésta es la razón de que los átomos que están constituidos por cargas eléctricas positivas y negativas sienten una fuerza muy débil cuando están separados por una distancia apreciable (aparte de la gravedad). A medida que se acercan, cada una puede “mirar el interior” de la otra y reordenar sus cargas, con el resultado de que tienen una interacción muy fuerte. La base última de la interacción entre los átomos es *eléctrica*. Ya que esta fuerza es tan enorme, todos los positivos y todos los negativos se juntarán normalmente en una combinación tan íntima como sea posible. Todas las cosas, aun nosotros mismos, están hechas de partes positivas y negativas finamente granuladas que interactúan de manera muy fuerte, todas perfectamente compensadas. A veces, por accidente, podemos quitar por frotamiento unos pocos negativos o unos pocos positivos (corrientemente es más fácil quitar los negativos) y en esas circunstancias encontramos la fuerza eléctrica *no compensada* y entonces podemos ver los efectos de estas atracciones eléctricas.

Para dar una idea de cuánto más fuerte es la electricidad que la gravitación, considérese dos granos de arena, de un milímetro de diámetro, separados 30 metros. Si la fuerza entre ellos no estuviera compensada, si todo atrae a todo, en vez de repelerse los iguales, de modo que no haya cancelación, ¿cuánta fuerza habrá? ¡Habrá una fuerza de *tres millones de toneladas* entre ambos! Veán que hay muy, pero *muy* poco exceso o déficit en el número de cargas negativas o positivas necesarias para producir efectos eléctricos apreciables. Ésta es, ciertamente, la razón de por qué ustedes no pueden ver la diferencia entre una cosa cargada eléctricamente y una sin carga, tan pocas partículas entran en juego que es difícil que produzcan una diferencia en el peso o en el tamaño de un objeto.

Con esta imagen los átomos eran más fáciles de comprender. Se imaginaba que tienen un “núcleo” en el centro, que está cargado electropositivamente y es muy pesado, y el núcleo está rodeado por cierto número de “electrones”, que son sumamente livianos y están cargados negativamente. Ahora avanzamos un poco más en nuestra historia para hacer notar que en el núcleo mismo se encontraron dos clases de partículas, protones y neutrones, casi del mismo peso y muy pesados. Los protones están cargados eléctricamente y los neutrones son neutros. Si tenemos un átomo con seis protones en el interior de su núcleo y éste está rodeado por seis electrones (las partículas negativas en el mundo ordinario de la materia son todos electrones, y éstos son muy livianos comparados con los protones y neutrones que constituyen los núcleos), éste sería el número atómico seis en la tabla de la química, y se llama carbono. El número atómico ocho se llama oxígeno, etc., porque las propiedades químicas dependen de los electrones *externos* y, en realidad, sólo de *cuántos* electrones hay. Así las propiedades *químicas* de una sustancia dependen sólo de un número, el número de electrones. (La lista completa de elementos de los químicos podría haberse realmente denominado 1, 2, 3, 4, 5, etc. En vez de decir “carbono” podríamos decir “elemento seis”, significando esto seis electrones; pero, por supuesto, cuando los elementos fueron descubiertos, no se sabía que pudieran ser numerados de esta manera, y en segundo lugar haría aparecer todo más bien complicado. Es mejor tener nombres y símbolos para estas cosas, más bien que indicar todo por un número.)

Se descubrió aún más acerca de las fuerzas eléctricas. La interpretación natural

de la interacción eléctrica es que dos objetos simplemente se atraen: positivo contra negativo. Sin embargo, se descubrió que esto era una idea inadecuada para representarla. La representación más adecuada de la situación es afirmar que la existencia de la carga positiva en cierto sentido distorsiona o crea una “condición” en el espacio tal que si introducimos una carga negativa, ella siente una fuerza. Esta potencialidad para producir una fuerza se llama *campo eléctrico*. Cuando colocamos un electrón en un campo eléctrico decimos que “tira de él”. Tenemos entonces dos reglas: (a) las cargas producen un campo y (b) las cargas en campos experimentan fuerzas y se mueven. La razón para esto se aclarará cuando discutamos el siguiente fenómeno: si cargamos eléctricamente un cuerpo, digamos un peine, y después colocamos un trozo de papel cargado a cierta distancia y movemos el peine de atrás para adelante, el papel responderá apuntando siempre hacia el peine. Si lo agitamos más rápidamente se descubrirá que el papel se queda un poco más atrás, *hay un retardo* en la acción. (En la primera etapa, cuando movemos el peine más bien lentamente, encontramos una complicación que es el *magnetismo*. Las influencias magnéticas tienen que ver con *cargas en movimiento relativo*, por lo que las fuerzas magnéticas y eléctricas pueden ser realmente atribuidas a un campo, como dos aspectos diferentes de exactamente una misma cosa. Un campo eléctrico variable no puede existir sin magnetismo.) Si retiramos más el papel cargado, el retraso es mayor. Entonces se observa algo interesante. A pesar de que las fuerzas entre dos objetos cargados deberían variar inversamente con el *cuadrado* de la distancia, se encuentra que cuando agitamos la carga, la influencia se extiende *mucho más allá* de lo que podríamos suponer a primera vista. Esto es, el efecto decrece mucho más lentamente que la inversa del cuadrado.

Hay aquí una analogía: si estamos en una piscina y hay muy cerca un corcho flotando, podremos moverlo “directamente” empujando el agua con otro corcho. Si ustedes miran solamente ambos *corchos*, todo lo que verán es que uno se mueve inmediatamente en respuesta al movimiento del otro —existe algún tipo de “interacción” entre ellos—. Por cierto, lo que realmente hacemos es perturbar el *agua*; el *agua* perturba entonces el otro corcho. Podríamos establecer entonces una “ley”: si empuja un poco el agua, un objeto próximo en el líquido se moverá. Si estuviera más alejado, por supuesto, el segundo corcho apenas se movería, porque movemos *localmente* el agua. Por otra parte, si agitamos el corcho, un nuevo fenómeno estará implicado, en el cual el movimiento del agua mueve el agua allí, etc., y se propagan *ondas*; así que por agitación hay una influencia de *mucho mayor alcance*; una influencia oscilatoria, que no puede ser comprendida a partir de la interacción directa. Por lo tanto, la idea de interacción directa debe remplazarse por la existencia del agua, o en el caso eléctrico, por lo que llamamos el *campo electromagnético*.

El campo electromagnético puede transportar ondas; algunas de estas ondas son *luz*; otras se usan en *radiodifusión*, pero el nombre general es *ondas electro-*

Tabla 2-1
El espectro electromagnético

Frecuencia en oscilaciones/s	Nombre	Comportamiento aproximado
10^2	Perturbación eléctrica	Campo
$5 \times 10^5 - 10^6$	Radiodifusión	} Ondas
10^8	FM—TV	
10^{10}	Radar	
$5 \times 10^{14} - 10^{15}$	Luz	
10^{18}	Rayos X	} Partículas
10^{21}	Rayos γ nucleares	
10^{24}	Rayos γ “artificiales”	
10^{27}	Rayos γ en rayos cósmicos	

magnéticas. Estas ondas oscilatorias pueden tener varias *frecuencias*. Lo único que es realmente diferente de una a otra onda es la *frecuencia de oscilación*. Si sacudimos una carga de aquí para allá más y más rápidamente y observamos los efectos, obtenemos toda una serie de diferentes tipos de efectos que están unificados por la especificación de un solo número, el número de oscilaciones por segundo. La “captación” común que obtenemos de las corrientes eléctricas de los circuitos en las paredes de un edificio tiene una frecuencia de alrededor de 100 ciclos por segundo. Si aumentamos la frecuencia a 500 o 1 000 kilociclos (un kilociclo = 1 000 ciclos) por segundo, estamos “en el aire”, ya que éste es el intervalo de frecuencias que se usa para radiodifusión. (¡Por supuesto, ello no tiene nada que ver con el *aire*! Podemos tener radiodifusión sin aire alguno.) Si aumentamos nuevamente la frecuencia, llegamos al intervalo que es usado para FM y TV. Yendo todavía más allá, usamos ciertas ondas cortas, por ejemplo para *radar*. Aún más altas, ya no necesitamos un instrumento para “ver” la cosa, podemos verla con el ojo humano. En el intervalo de frecuencias de 5×10^{14} a 10^{15} ciclos por segundo nuestros ojos verían la oscilación del peine cargado, si lo pudiéramos sacudir así de rápidamente, como luz roja, azul o violeta, dependiendo de la frecuencia. Las frecuencias por debajo de este intervalo se llaman infrarroja y por encima, ultravioleta. El hecho de que podamos ver dentro de un intervalo particular de frecuencias no hace más impresionante esa parte del espectro electromagnético que las otras desde el punto de vista físico, pero desde el punto de vista humano, por supuesto, *es* más interesante. Si subimos aún más la frecuencia, obtenemos rayos X. Los rayos X no son otra cosa que luz de muy alta frecuencia. Si subimos todavía más, obtenemos rayos gamma. Estos dos términos, rayos X y rayos gamma, se usan casi en forma sinónima. Comúnmente los rayos electromagnéticos provenientes de los núcleos se llaman rayos gamma, mientras que los de alta energía de los átomos se llaman rayos, pero a la misma frecuencia son físicamente indistinguibles, cualquiera que sea su origen. Si vamos a frecuencias todavía más altas, digamos 10^{24} ciclos por segundo, encontramos que podemos producir esas ondas artificialmente, por ejemplo con el sincrotrón aquí en el Caltech. Podemos encontrar ondas electromagnéticas con frecuencias estupendamente altas —con oscilaciones aún 1 000 veces más rápidas— en las ondas encontradas en los *rayos cósmicos*. Estas ondas no pueden ser controladas por nosotros.

2-3 Física cuántica

Una vez descrita la idea del campo electromagnético y que este campo puede transportar ondas, pronto nos damos cuenta que estas ondas se comportan realmente de una manera extraña, que tienen una apariencia muy poco ondulatoria. ¡A frecuencias más elevadas se comportan mucho más como *partículas*! Es la *mecánica cuántica*, descubierta poco después de 1920, que explica este comportamiento extraño. En los años anteriores a 1920 la imagen del espacio tridimensional, y del tiempo como una cosa separada, fue cambiada por Einstein, primero en una combinación que llamamos espacio-tiempo, y después aún más en un espacio-tiempo *curvo*, para representar la gravitación. Así, el “escenario” se cambia a espacio-tiempo y la gravitación es presumiblemente una modificación del espacio-tiempo. Entonces se encontró también que las reglas para los movimientos de partículas eran incorrectas. Las reglas mecánicas de “inercia” y “fuerzas” están *equivocadas* —las leyes de Newton están *equivocadas*— en el mundo de los átomos. En cambio, se descubrió que las cosas a escala pequeña no se comportan *en absoluto* como las cosas a escala grande. Esto es lo que hace difícil la física —y muy interesante—. Es difícil porque la manera como se comportan las cosas a escala pequeña es tan “innatural”; no tenemos experiencia directa de eso. Aquí las cosas se comportan de un modo distinto a todo lo que conocemos; así que es imposible describir este comportamiento de ninguna otra manera que no sea la analítica. Esto es difícil y requiere mucha imaginación.

La mecánica cuántica tiene muchos aspectos. En primer lugar, la idea de que una partícula tiene una ubicación definida y una velocidad definida ya no

se acepta más; esto es erróneo. Para dar un ejemplo de lo errada que está la física clásica, existe una regla en la mecánica cuántica que afirma que no se puede saber simultáneamente dónde está algún objeto y a qué velocidad se mueve. La indeterminación del momentum y la indeterminación de la posición son complementarias y el producto de ambas está acotado por una constante pequeña. Podemos escribir la ley así: $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, pero la explicaremos con más detalles más adelante. Esta regla es la explicación de una paradoja muy misteriosa: si los átomos están hechos de cargas positivas y negativas, ¿por qué las cargas negativas no se ubican simplemente sobre las cargas positivas (se atraen entre sí) y se acercan tanto como para anularse completamente? ¿Por qué son tan grandes los átomos? ¿Por qué está el núcleo en el centro con los electrones a su alrededor? Se pensó en un comienzo que esto era porque el núcleo era tan grande; pero no, el núcleo es *muy pequeño*. Un átomo tiene un diámetro de alrededor de 10^{-8} cm. El núcleo tiene un diámetro de alrededor de 10^{-13} cm. Si tuviéramos un átomo y deseáramos ver el núcleo, tendríamos que aumentarlo hasta que todo el átomo fuera del tamaño de una pieza grande y entonces el núcleo no sería más que un granito, que apenas se podría distinguir con el ojo, pero casi *todo el peso* del átomo está en ese *núcleo* infinitesimal. ¿Qué impide a los electrones caer simplemente sobre él? Este principio: si estuvieran en el núcleo, conoceríamos exactamente su posición y el principio de incertidumbre requeriría entonces que ellos tuvieran un momentum muy *grande* (pero incierto), es decir, una *energía cinética* muy grande. Con esta energía se escaparían del núcleo. Así llegan a un acuerdo: se dejan un pequeño espacio para esta incertidumbre y entonces se agitan con un cierto movimiento mínimo, de acuerdo con esta regla. (Recuérdese que cuando se enfría un cristal al cero absoluto, decíamos que los átomos todavía se agitan, no se detienen. ¿Por qué? Si se detuvieran, sabríamos dónde se encuentran y que tienen movimiento nulo, lo cual está contra el principio de incertidumbre. No podemos saber dónde están y cuán rápido se mueven, ¡por lo tanto deben estar meneándose continuamente allí!)

Otro cambio del mayor interés en las ideas y la filosofía de las ciencias, introducido por la mecánica cuántica, es éste: no es posible predecir *exactamente* qué sucederá en cualquier circunstancia. Por ejemplo, es posible disponer un átomo de manera que esté a punto de emitir luz y podemos medir cuándo ha emitido luz, recogiendo una partícula fotónica, que describiremos pronto. Sin embargo, no podemos predecir *cuándo* emitirá la luz o, con varios átomos, *cuál* es el que lo hará. Ustedes podrían decir, que esto es porque hay algunos “engranajes” internos que no hemos mirado suficientemente de cerca. No, no *existen* engranajes internos; la naturaleza como la entendemos hoy se comporta de una manera tal, que es *fundamentalmente imposible* hacer una predicción precisa de *lo que va a suceder exactamente* en un experimento dado. Esto es una cosa horrible; en efecto, los filósofos habían dicho antes que uno de los requisitos fundamentales de la ciencia es que siempre que se ponen las mismas condiciones debe suceder lo mismo. Esto simplemente *no es cierto*, *no* es una condición fundamental de la ciencia. El hecho es que no sucede la misma cosa, que podemos encontrar sólo un promedio, estadísticamente, de lo que sucede. A pesar de todo, la ciencia no se ha derrumbado completamente. A propósito, los filósofos dicen mucho acerca de lo que es *absolutamente necesario* para la ciencia, y ello resulta siempre, hasta donde uno puede ver, más bien ingenuo y probablemente equivocado. Por ejemplo, alguno que otro filósofo decía que es fundamental para el logro científico que si un experimento se realiza, digamos en Estocolmo, y luego el mismo experimento se realiza en Quito, deben encontrarse los *mismos resultados*. Esto es totalmente falso. No es necesario que la *ciencia* haga eso; puede ser una *realidad de la experiencia*, pero no es necesario. Por ejemplo, si uno de los experimentos consiste en observar el cielo y ver las auroras boreales en Estocolmo, usted no las verá en Quito; aquél es un fenómeno diferente. “Pero —dirán ustedes—, esto es algo que tiene que ver con el exterior; ¿puede usted encerrarse en una caja en Estocolmo, bajar las cortinas y obtener alguna diferencia?” Por supuesto. Si tomamos un péndulo con una suspensión universal, lo desplazamos y lo soltamos, entonces el péndulo oscilará casi en un plano, pero no totalmente. De

forma lenta el plano irá cambiando en Estocolmo, pero no en Quito. Las celosías también están bajas. El hecho que esto ocurra no trae consigo la destrucción de la ciencia. ¿Cuál es la hipótesis fundamental de la ciencia, la filosofía fundamental? La establecimos en el primer capítulo: *la única prueba de la validez de cualquier idea es el experimento*. Si sucede que la mayoría de los experimentos se verifican lo mismo en Quito que en Estocolmo, entonces esta “mayoría de experimentos” se usará para formular alguna ley general, y de aquellos experimentos que no tengan el mismo resultado diremos que fueron el resultado del medio en Estocolmo. Inventaremos alguna manera de resumir los resultados del experimento y no necesitamos que se nos diga con anticipación qué aspecto tendrá esta manera. Si se nos dice que el mismo experimento va a dar siempre el mismo resultado, eso está todo muy bien; pero, si cuando lo ensayamos, *no* lo da, entonces *no* lo da. Debemos simplemente aceptar lo que vemos y, entonces, formular todo el resto de nuestras ideas en términos de nuestra experiencia real.

Volviendo nuevamente a la mecánica cuántica y la física fundamental, no podemos entrar en detalles de los principios cuánticos en este momento, por supuesto, porque éstos son bastante difíciles de comprender. Supondremos que existen y continuaremos describiendo cuáles son algunas de las consecuencias. Una de las consecuencias es que cosas que considerábamos como ondas, también se comportan como partículas y las partículas se comportan como ondas; en efecto, todo se comporta de la misma manera. No existe distinción entre ondas y partículas. Por lo tanto, la mecánica cuántica *unifica* la idea de campo y sus ondas y la de partículas, todo en una. Ahora bien, es cierto que si la frecuencia es baja, el aspecto de campo del fenómeno es más evidente, o más útil como una descripción más aproximada en términos de la experiencia diaria. Pero a medida que la frecuencia aumenta, los aspectos corpusculares del fenómeno se hacen más evidentes con el equipo con el que hacemos corrientemente las mediciones. En efecto, a pesar de que hemos mencionado muchas frecuencias, no se ha detectado aún ningún fenómeno en el que intervenga directamente una frecuencia por sobre aproximadamente 10^{12} ciclos por segundo. Solamente *deducimos* las frecuencias más altas a partir de la energía de las partículas, por medio de una regla que supone que la idea corpúsculo-onda de la mecánica cuántica es válida.

Así tenemos un nuevo punto de vista de la interacción electromagnética. Tenemos que agregar un nuevo tipo de *partícula* al electrón, al protón y al neutrón. La nueva partícula se llama *fotón*. El nuevo punto de vista de la interacción de electrones y fotones, que es la teoría electromagnética, pero con todo cuánticamente correcto, se llama *electrodinámica cuántica*. Esta teoría fundamental de la interacción de luz y materia, o campo eléctrico y cargas, es nuestro mayor éxito hasta ahora en física. En esta sola teoría tenemos todas 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 conocidas: las leyes para la colisión de bolas de billar, el movimiento de alambres en campos magnéticos, el calor específico del monóxido de carbono, el color de los letreros de neón, la densidad de la sal y las reacciones de hidrógeno y oxígeno para producir agua, son todas consecuencias de esta sola ley. Todos estos detalles se pueden elaborar si la situación es lo suficientemente simple para que nosotros hagamos una aproximación, lo que no sucede casi nunca, pero a menudo podemos comprender más o menos lo que está sucediendo. En el presente, no se han encontrado excepciones a las leyes de la electrodinámica cuántica fuera del núcleo y no sabemos si hay una excepción ahí, porque simplemente no sabemos qué sucede 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 en última instancia a la química y por lo tanto precisamente a la física, porque la química está ya reducida (siendo ya conocida la parte de la física que está comprendida en la química). Más aún, la misma electrodinámica cuántica, esta cosa grandiosa, predice muchas cosas nuevas. En primer lugar da 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

esas dos, al encontrarse, pueden aniquilarse entre sí, con la emisión de luz o rayos gamma. (Después de todo, luz y rayos gamma son lo mismo, son sólo puntos diferentes sobre una escala de frecuencias.) La generalización de esto, que para cada partícula existe una antipartícula, resulta ser cierta. En el caso de los electrones, la antipartícula tiene otro nombre —se llama positrón, pero para la mayoría de las otras partículas se llama anti-tal-o-cual, como antiprotón o antineutrón—. En electrodinámica cuántica se introducen *dos números* y se supone que de allí sale la mayoría de los otros números en el universo. Los dos números que se introducen se llaman la masa del electrón y la carga del electrón. En realidad, esto no es totalmente cierto, porque tenemos un conjunto completo de números para la química, que indican cuál es el peso de los núcleos. Esto nos conduce a la parte siguiente.

2-4 Núcleos y partículas

¿De qué están hechos los núcleos y cómo se mantienen? Se encuentra que los núcleos se mantienen unidos debido a fuerzas enormes. Cuando éstas se liberan, la energía liberada es tremenda comparada con la energía química, en la misma relación que la explosión de la bomba atómica con 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 pregunta es: ¿cuáles son las fuerzas que mantienen unidos los protones y neutrones en el núcleo? Tal como la interacción eléctrica puede ser relacionada con una partícula, un fotón, Yukawa sugirió que las fuerzas entre neutrones y protones también poseen un campo de alguna clase, y que cuando este campo se agita, se comporta como una partícula. Así podría haber algunas otras partículas en el universo además de protones y neutrones y él pudo deducir las propiedades de estas partículas a partir de las características ya conocidas de las fuerzas nucleares. Por ejemplo, él predijo que deberían tener una masa 200 o 300 veces la de un electrón; ¡y he ahí, en los *rayos cósmicos* se descubrió una partícula de la masa correcta! Pero más tarde resultó ser la partícula equivocada. Se la llamó muon.

Sin embargo, un poco más tarde, en 1947 o 1948 se encontró otra partícula, el mesón π , o pion, que satisfacía el criterio de Yukawa. Entonces, además del protón y del neutrón, debemos agregar el pion para obtener las fuerzas nucleares. Ahora ustedes dirán: “¡Qué grandioso!, con esta teoría hacemos la dinámica cuántica nuclear, usando los piones como quería hacerlo Yukawa, vemos si funciona y todo estará explicado”. Mala suerte. Resulta que los cálculos implicados en esta teoría son tan difíciles, que nadie ha podido descifrar cuáles son las consecuencias de la teoría o comprobarla con el experimento, ¡y esto ha seguido así hasta ahora, durante casi 20 años!

Estamos así atascados con una teoría y no sabemos si está correcta o incorrecta, pero sí sabemos que está un *poco* equivocada, o por lo menos incompleta. Mientras nosotros hemos estado divagando teóricamente, tratando de calcular las consecuencias de esta teoría, los experimentadores han encontrado algunas cosas. Por ejemplo, ya habían encontrado este muon y todavía no sabemos dónde encaja. También en los rayos cósmicos se había encontrado un gran número de otras partículas “extra”. Resulta que hoy día tenemos aproximadamente 30 partículas y es muy difícil comprender las relaciones entre todas estas partículas y para qué la naturaleza las quiere, o cuáles son las conexiones entre una y otra. No entendemos hoy estas varias partículas como aspectos diferentes de la misma cosa, y el hecho de que tengamos tantas partículas desconectadas es una representación del resultado de tener tanta información inconexa sin una buena teoría. Tras los grandes éxitos de la electrodinámica cuántica existe un cierto conocimiento de la física nuclear, que es un conocimiento crudo, una especie de mitad experiencia y mitad teoría, al suponer un tipo de fuerza entre protones y neutrones y viendo qué sucede, pero sin comprender realmente de dónde provienen las fuerzas. Aparte de esto, hemos hecho muy poco progreso. Hemos juntado un número enorme de elementos químicos. En el caso de la química, ha aparecido súbitamente

una relación inesperada entre estos elementos que está incorporada en la tabla periódica de Mendeléyev. Por ejemplo, el sodio y el potasio son casi iguales en sus propiedades químicas y se encuentran en la misma columna de la tabla de Mendeléyev. Hemos estado buscando una tabla tipo Mendeléyev para las nuevas partículas. Una tabla así para las partículas nuevas fue confeccionada independientemente por Gell-Mann en los Estados Unidos y Nishijima en el Japón. La base de su clasificación es un número nuevo, como la carga eléctrica, que puede ser asignado a cada partícula, llamado su “extrañeza”, S . Este número se conserva, como la carga eléctrica, en reacciones que tienen lugar debido a fuerzas nucleares.

En la tabla 2-2 se han indicado todas las partículas. No podemos discutir las mucho en esta etapa, pero por lo menos la tabla les muestra lo mucho que aún no conocemos. Debajo de cada partícula se da su masa en una cierta unidad, llamada MeV. Un MeV es igual a 1.783×10^{-27} gramos. La razón por la cual se escogió esta unidad es histórica y no entraremos en esto ahora. Las partículas más pesadas se colocan más arriba en el cuadro; vemos que un neutrón y un protón tienen casi misma masa. En las 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 indican con una línea continua y las “resonancias” con una a trazos. Varias partículas se han omitido en la tabla. Éstas incluyen las importantes partículas de masa cero y carga cero, el fotón y el gravitón, que no caen en el esquema de clasificación de bariones-mesones-leptones y también algunas de las resonancias más nuevas (K^* , ϕ , η). Las antipartículas de los mesones están indicadas en la tabla, pero las antipartículas de los leptones y bariones deberían indicarse en otra tabla, que sería exactamente igual a ésta reflejada en la columna cero. A pesar de que todas las partículas, excepto el electrón, el neutrino, el fotón, el gravitón y el protón son inestables, los productos de desintegración se han indicado sólo para las resonancias. Asignaciones de extrañeza no son aplicables para leptones, dado que éstos no interactúan fuertemente con los núcleos.

Todas las partículas que están junto con los neutrones y protones se llaman *bariones*, y existen las siguientes: hay una “lambda”, con una masa de 1115 MeV, y otras tres llamadas sigmas (menos, cero y más), con diversas masas casi iguales. Hay grupos de multipletes con casi la misma masa dentro del uno o dos por ciento. Cada partícula de un multiplete tiene la misma extrañeza. El primer multiplete es el doblete protón-neutrón y enseguida hay un singlete (la lambda), después el triplete sigma y finalmente el doblete xi. Muy recientemente, en 1961, se han encontrado algunas partículas más. Pero, ¿son realmente partículas? Viven un tiempo tan corto, se desintegran casi instantáneamente tan pronto como se han formado, que no sabemos si se pueden considerar como nuevas partículas o cierta especie de interacción de “resonancia” de una cierta energía definida entre los productos Λ y π en los cuales ellas se desintegran.

Además de los bariones, las otras partículas que intervienen en la interacción nuclear se llaman *mesones*. Hay primero los piones, que se presentan en tres variedades, positivo, negativo y neutro; forman otro multiplete. Hemos encontrado también algunas cosas nuevas, llamadas mesones K, y se presentan como un doblete, K^+ y K^0 . También, cada partícula tiene su antipartícula, salvo que una partícula sea su propia antipartícula. Por ejemplo, el π^- y el π^+ son antipartículas, pero el π^0 es su propia antipartícula. Son antipartículas el K^- y el K^+ , y el K^0 y el \bar{K}^0 . Además, en 1961 encontramos también algunos mesones más, o quizá mesones que se desintegran casi inmediatamente. Una cosa llamada ω , que se transforma en tres piones, tiene una masa de 780 en esta escala y algo menos seguro es un objeto que se desintegra en dos piones. Estas partículas, llamadas mesones y bariones, y las antipartículas de los mesones están en el mismo cuadro, pero las antipartículas de los bariones deben colocarse en otro cuadro, “reflejado” en la columna de carga cero.

Tabla 2-2. Partículas elementales

Masa en MeV	-e	Carga 0	+e	Agrupamiento y extrañeza
1400	$\underline{Y_1^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-}$	$\underline{Y_1^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0}$	$\underline{Y_1^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+}$	$S=-2$
1300	$\underline{\Xi^-}$ 1319	$\underline{\Xi^0}$ 1311		$S=-2$
1200	$\underline{\Sigma^-}$ 1196	$\underline{\Sigma^0}$ 1191	$\underline{\Sigma^+}$ 1189	$S=-1$
1100		$\underline{\Lambda^0}$ 1115		$S=-1$
900		\underline{n} 939	\underline{p} 938	$S=0$
800		$\underline{\omega^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-}$		$S=0$
700	$\underline{\rho^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-}$	$\underline{\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-}$	$\underline{\rho^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0}$	$S=0$
500	$\underline{K^-}$ 494	$\underline{K^0 \bar{K}^0}$ 498	$\underline{K^+}$ 494	$S=\pm 1$
100	$\underline{\pi^-}$ 139.6 105.6	$\underline{\pi^0}$ 135.0	$\underline{\pi^+}$ 139.6	$S=0$
0	$\underline{e^-}$ 0.51	$\underline{\nu^0}$ 0		

Del mismo modo que la tabla de Mendeléyev era muy buena, excepto por el hecho de que existía un número de elementos, llamados tierras raras, que quedaban colgando sueltos fuera de ella; aquí tenemos una cantidad de cosas que cuelgan sueltas fuera de esta tabla —partículas que no interactúan fuertemente en los núcleos, no tienen nada que ver con una interacción nuclear y no tienen una interacción fuerte (me refiero al poderoso tipo de interacción de energía nuclear)—. Se llaman leptones y son los siguientes: está el electrón que tiene una masa muy pequeña en esta escala, sólo 0.510 MeV. Está después este otro, el muon que tiene una masa mucho mayor, 206 veces más pesado que un electrón. Hasta donde podemos decir, de acuerdo con todos los experimentos hechos hasta ahora, la diferencia entre el electrón y el muon no es más que la masa. Todo se verifica exactamente igual para el muon que para el electrón, excepto que uno es más pesado que el otro. ¿Por qué existe otro más pesado? ¿Para qué sirve? No lo sabemos. Además existe un leptón que es neutro, llamado neutrino, y esta partícula tiene masa cero. En realidad, se sabe ahora que hay *dos* tipos diferentes de neutrinos, uno relacionado con los electrones y el otro relacionado con los muones.

Finalmente, tenemos otras dos partículas que no interactúan fuertemente con las nucleares: una es el fotón, y quizá, si el campo gravitacional también tiene un análogo cuántico (hasta ahora no se ha elaborado una teoría cuántica de la gravitación), entonces existiría una partícula, un gravitón, que tendría masa cero.

¿Qué es esta “masa cero”? Las masas dadas aquí son las masas de las partículas *en reposo*. El hecho de que una partícula tenga masa cero significa, de cierto modo, que no puede *estar en reposo*. Un fotón nunca está en reposo, siempre se mueve a 300 000 kilómetros por segundo. Entenderemos más lo que significa masa, cuando comprendamos la teoría de la relatividad, que será introducida a su debido tiempo.

Estamos así frente a un gran número de partículas que parecen ser en conjunto los constituyentes fundamentales de la materia. Afortunadamente estas partículas no son *todas* diferentes en sus *interacciones* mutuas. En realidad parece haber precisamente *cuatro tipos* de interacción entre partículas, las cuales en orden de intensidad decreciente son la fuerza nuclear, las interacciones eléctricas, la interacción de desintegración beta y la gravedad. El fotón está acoplado a todas las partículas cargadas y la intensidad de la interacción está medida por un cierto número, que es 1/137. La ley detallada de este acoplamiento se conoce, constituye la electrodinámica cuántica. La gravedad está acoplada a toda la *energía*, pero su acoplamiento es extremadamente débil, mucho más débil que el de la electricidad. Esta ley también se conoce. Después están las así llamadas desintegraciones débiles —la desintegración beta, que hace que un neutrón se desintegre en forma relativamente lenta en protón, electrón y neutrino—. Esta ley se conoce sólo parcialmente. La así llamada interacción fuerte, la interacción mesón-barión, tiene una intensidad 1 en esta escala y la ley se desconoce completamente, a pesar de que hay muchas reglas conocidas, como la de que el número de bariones no cambia en ninguna reacción.

Ésta es entonces la horrible condición de nuestra física actual. Para resumirla, yo diría esto: fuera del núcleo parece que sabemos todo: dentro de él, es válida la

Tabla 2-3. Interacciones elementales

Acoplamiento	Intensidad*	Ley
Fotón a partículas cargadas	$\sim 10^{-2}$	Ley conocida
Gravedad a toda energía	$\sim 10^{-40}$	Ley conocida
Desintegraciones débiles	$\sim 10^{-5}$	Ley parcialmente conocida
Mesones a bariones	~ 1	Ley desconocida (algunas reglas conocidas)

* La “intensidad” es una medida dimensional de la constante de acoplamiento que interviene en toda interacción (\sim significa “del orden”).

mecánica cuántica —no se ha encontrado que fallen los principios de la mecánica cuántica—. El escenario donde ponemos todo nuestro conocimiento, diríamos que es el espacio-tiempo relativístico; quizá la gravedad esté contenida en el espacio-tiempo. No sabemos cómo se inició el universo y nunca hemos hecho experimentos que comprueben precisamente nuestras ideas del espacio y del tiempo por debajo de una distancia muy pequeña, por lo que así *sabemos* solamente que nuestras ideas funcionan por encima de esta distancia. Deberíamos también agregar que las reglas del juego son los principios de la mecánica cuántica y esos principios se aplican, hasta donde podemos decir, tanto a las partículas nuevas como a las antiguas. El origen de las fuerzas en los núcleos nos conduce a nuevas partículas, pero desgraciadamente aparecen en gran profusión y nos falta una comprensión completa de sus interrelaciones, a pesar de que ya sabemos que existen algunas relaciones muy sorprendentes entre ellas. Parece que estuviéramos tanteando gradualmente hacia una comprensión del mundo de las partículas subatómicas, pero en realidad no sabemos hasta dónde debemos ir todavía en esta faena.

La relación de la física con otras ciencias

3-1 Introducción

La física es la más fundamental y general de las ciencias, y ha tenido un profundo efecto en todo el desarrollo científico. En realidad, la física es el equivalente actual de lo que solía llamarse *filosofía natural*, de la cual provienen la mayoría de nuestras ciencias modernas. Estudiantes de muchas disciplinas se encuentran estudiando física a causa del rol básico que ésta juega en todos los fenómenos. En este capítulo trataremos de explicar cuáles son los problemas fundamentales en las otras ciencias, pero, por supuesto, es imposible realmente tratar en un espacio tan reducido las materias complejas, sutiles y hermosas de esos otros campos. La falta de espacio también impide que discutamos la relación entre la física y la ingeniería, la industria, la sociedad y la guerra, o aun la más notable relación entre la matemática y la física. (La matemática no es una ciencia desde nuestro punto de vista, en el sentido que no es una ciencia *natural*. El experimento no es una prueba de su validez). Debemos, incidentalmente, dejar en claro desde un comienzo que si una cosa no es una ciencia, no es necesariamente mala. Por ejemplo, el amor no es una ciencia. De modo que, si se dice que algo no es una ciencia, no significa que haya algo malo en esto; significa simplemente que no es una ciencia.

3-2 Química

La ciencia que es quizás la más profundamente afectada por la física es la química. Históricamente, en su comienzo, la química trataba casi enteramente de lo que ahora llamamos química inorgánica, la química de las sustancias que no están asociadas con los objetos vivientes. Se necesitó de un análisis considerable para descubrir la existencia de muchos elementos y sus relaciones —cómo forman los numerosos compuestos relativamente simples que se encuentran en las rocas, la tierra, etc.—. Esta química primitiva fue muy importante para la física. La interacción entre las dos ciencias era muy grande porque la teoría de los átomos fue comprobada en gran parte con experimentos de química. La teoría de la química, es decir, de las reacciones mismas, fue resumida ampliamente en la tabla periódica de Mendeléyev, la cual establece numerosas relaciones extrañas entre los diversos elementos, y fue la colección de reglas sobre qué sustancia se combina con cuál otra y cómo, lo que constituyó la química inorgánica. Todas estas reglas fueron últimamente explicadas en principio por la mecánica cuántica, de manera que la química teórica es en realidad física. Por otro lado, debe ponerse énfasis en que esta explicación es *en principio*. Ya hemos discutido la diferencia entre saber las reglas del juego de ajedrez y ser capaz de jugar. De manera que podemos conocer las reglas, pero no podemos jugar muy bien. Resulta así muy difícil predecir precisamente qué sucederá en una reacción química dada; sin embargo, la parte más profunda de la química teórica debe terminar en la mecánica cuántica.

Hay también una rama de la física y la química que ambas ciencias desarrollaron conjuntamente y que es extremadamente importante. Éste es el método estadístico aplicado a una situación en que hay leyes mecánicas, que se llama, propiamente, *mecánica estadística*. En cualquier situación química está implicado un gran número de átomos y hemos visto que los átomos se agitan todos en una forma complicada y casual. Si pudiéramos analizar cada colisión y fuéramos capaces de seguir en detalle el movimiento de cada molécula, esperaríamos poder deducir lo que sucede, pero los muchos números que se necesitan para seguir la

3-1 Introducción

3-2 Química

3-3 Biología

3-4 Astronomía

3-5 Geología

3-6 Psicología

3-7 ¿Cómo se llegó a eso?

trayectoria de todas esas moléculas exceden tan enormemente la capacidad de cualquier computador, y ciertamente la capacidad de la mente, que fue necesario desarrollar un método para tratar con tales situaciones complicadas. La mecánica estadística es entonces la ciencia de los fenómenos del calor, o la termodinámica. La química inorgánica es una ciencia, ahora reducida esencialmente a lo que se llaman la físico-química y la química cuántica; la físico-química para estudiar las velocidades con que ocurren las reacciones y qué es lo que está sucediendo en detalle (¿cómo chocan las moléculas? ¿Cuáles partes saltan primero?, etcétera), y la química cuántica para ayudarnos a comprender 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 las cosas vivientes. Por un tiempo se creyó que las sustancias que están asociadas con las cosas vivas eran tan maravillosas que no podían ser hechas a mano a partir de materiales inorgánicos. Esto no es absolutamente cierto; son exactamente lo mismo que las sustancias hechas en química inorgánica, pero comprenden disposiciones más complicadas de los átomos. Evidentemente, la química orgánica tiene una relación muy estrecha con la biología que suministra sus sustancias y con la industria; más aún, puede aplicarse mucha físico-química y mecánica cuántica tanto a los compuestos orgánicos como a los inorgánicos. Sin embargo, los principales problemas de la química orgánica no están en esos aspectos, sino más bien en el análisis y síntesis de las sustancias que se forman en los sistemas biológicos, en las cosas vivas. Esto conduce imperceptiblemente, a pasos, hacia la bioquímica y luego a la biología misma, o biología molecular.

3-3 Biología

Así llegamos a la ciencia de la *biología*, que es el estudio de las cosas vivas. En los primeros días de la biología, los biólogos tenían que tratar con problemas puramente descriptivos de buscar *qué* cosas vivas había, y así ellos tenían sólo que contar cosas como los pelos de los miembros de las pulgas. Después que estos asuntos fueron resueltos con gran interés, los biólogos se fueron hacia la *maquinaria* interior de los cuerpos vivos, primero desde un punto de vista global, naturalmente, porque se requiere algún esfuerzo para entrar en los detalles más finos.

Había una interesante relación primaria entre la física y la biología en la cual la biología ayudaba a la física en el descubrimiento de la *conservación de la energía*, lo cual fue primeramente demostrado por Mayer en conexión con la cantidad de calor que recibe y cede una criatura viva.

Si miramos más de cerca a los procesos biológicos de los animales vivos, vemos *muchos* fenómenos físicos: la circulación de la sangre, bombas, presión, etc. Hay nervios: sabemos qué es lo que pasa cuando nos paramos sobre una piedra puntiaguda, y de cierta manera u otra la información va desde la pierna hacia arriba. Es interesante cómo sucede. En sus estudios sobre los nervios, los biólogos han llegado a la conclusión que los nervios son tubos muy finos con una compleja pared, que es muy delgada; a través de esta pared la célula bombea iones; así que hay iones positivos en el exterior y negativos en el interior, como en un condensador eléctrico. Ahora bien, esta membrana tiene una propiedad interesante; si se “descarga” en un lugar, es decir, si algunos iones son capaces de atravesar en algún lugar de manera que allí se reduce el voltaje eléctrico, dicha influencia eléctrica se hace sentir sobre los iones vecinos y afecta la membrana de tal manera, que deja pasar también los iones en los puntos vecinos. Esto a su vez la afecta más allá, etc., y así hay una onda de “penetrabilidad” de la membrana que recorre la fibra cuando está “excitada” en un extremo al pararse sobre una piedra puntiaguda. Esta onda es algo análogo a una larga secuencia de fichas de dominó verticales; si se empuja la del extremo, ésta empuja a la próxima, etc. Por cierto, esto transmitirá solamente un mensaje, a no ser que las fichas de dominó se paren de nuevo; y análogamente en una célula nerviosa hay procesos que bombean lentamente de nuevo los iones hacia afuera para que el nervio quede

listo para el próximo impulso. Así es como sabemos lo que estamos haciendo (o por lo menos dónde estamos). Por supuesto, los efectos eléctricos asociados con este impulso nervioso pueden ser captados con instrumentos eléctricos y, debido a que *son* efectos eléctricos, evidentemente la física de los efectos eléctricos ha tenido mucha influencia en la comprensión del fenómeno.

El efecto opuesto es que, desde algún lugar del cerebro, se envía hacia afuera un mensaje a lo largo de un nervio. ¿Qué sucede en el extremo del nervio? Allí el nervio se ramifica en cositas finas, conectadas a una estructura cerca de un músculo, llamada placa terminal. Por razones que no son exactamente comprendidas, cuando un impulso llega al término del nervio, se eyectan pequeños paquetes (5 a 10 moléculas de una vez) de un compuesto químico llamado acetilcolina y ellos afectan la fibra muscular y la hacen contraerse —¡cuán simple! ¿Qué hace que se contraiga un músculo? Un músculo es un número muy grande de fibras muy cerca unas de otras, que contiene dos sustancias diferentes, miosina y actomiosina, pero el mecanismo mediante el cual la reacción química inducida por la acetilcolina puede modificar las dimensiones del músculo es aún desconocido—. Así, los procesos fundamentales en el músculo que producen los movimientos mecánicos no son conocidos.

La biología es un campo tan enormemente vasto que hay montones de otros problemas que ni siquiera podemos mencionar —problemas de cómo funciona la visión (qué produce la luz en el ojo), cómo funciona el oído, etc.—. (La forma en que funciona el *pensamiento* la discutiremos más tarde bajo la psicología). Bien, esas cosas concernientes a la biología que hemos discutido aquí no son, desde un punto de vista biológico, realmente fundamentales en el fondo de la vida, en el sentido de que incluso si las entendiéramos todavía no comprenderíamos la vida misma. Para dar un ejemplo: los hombres que estudian los nervios estiman que su trabajo es muy importante porque, después de todo, usted no puede tener animales sin nervios. Pero se *puede* tener *vida* sin nervios. Las plantas no tienen ni nervios ni músculos, pero están funcionando, están igualmente vivas. Así, para los problemas fundamentales de la biología debemos observar más profundamente; cuando así hacemos, descubrimos que todos los seres vivientes tienen un gran número de características en común. El rasgo más común es que están hechos de *células*, dentro de cada una de las cuales hay un mecanismo complejo para hacer cosas químicamente. En las células de las plantas, por ejemplo, hay un mecanismo para recoger luz y generar glucosa, la que es consumida en la oscuridad para mantener la planta viva. Cuando la planta es ingerida, la glucosa genera en el animal una serie de reacciones químicas muy estrechamente relacionadas con la fotosíntesis (y su efecto opuesto en la oscuridad) en las plantas.

En las células de los sistemas vivos hay muchas reacciones químicas complicadas en las cuales un compuesto se transforma en otro y otro. Para dar una idea del enorme esfuerzo que se ha hecho en el estudio de la química, la figura 3-1 resume nuestro conocimiento actualizado sobre justamente una pequeña parte de las muchas series de reacciones que ocurren en las células, quizá un pequeño porcentaje o algo así de ellas.

Aquí vemos una serie entera de moléculas que cambian de una a otra en una secuencia o ciclo de pasos más bien pequeños. Se le llama el ciclo de Krebs, el ciclo respiratorio. Cada uno de los compuestos químicos y cada uno de los pasos es bastante simple, en función de qué cambios se hacen en la molécula, pero —y esto es un descubrimiento central importante en bioquímica— estos cambios son *relativamente difíciles de llevar a cabo en un laboratorio*. Si tenemos una sustancia y otra muy similar, la primera no se convierte simplemente en la otra porque las dos formas están corrientemente separadas por una barrera o “loma” de energía. Consideren esta analogía: si queremos trasladar un objeto de un lugar a otro que está en el mismo nivel pero en el otro lado de una loma, podemos empujarlo por encima de la cumbre; pero hacerlo así requiere que se le agregue alguna energía. Así la mayoría de las reacciones químicas no ocurren, porque hay lo que se llama una *energía de activación* de por medio. Para agregar un átomo extra a nuestro compuesto químico se necesita que lo *acerquemos* lo suficiente para que pueda ocurrir un reordenamiento; entonces se pegará. Pero si no podemos darle

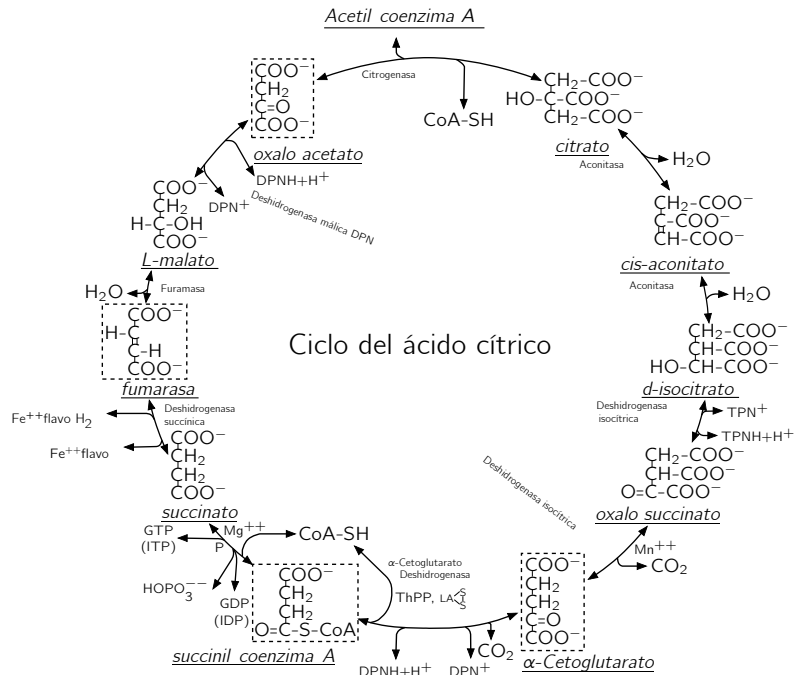


Figura 3-1. El ciclo de Krebs.

suficiente energía para acercarlo suficientemente, no completará el propósito, realizará parte del camino hacia arriba de la loma y volverá hacia abajo de nuevo. Sin embargo, si pudiéramos literalmente tomar las moléculas en nuestras manos y empujar y tirar los átomos alrededor de tal manera que se abriera un hueco para permitir la entrada de un nuevo átomo, y luego dejarlos volver, habríamos encontrado otro camino *alrededor* de la loma, el cual no necesitaría de energía extra, y la reacción procedería fácilmente. Ahora, realmente *hay* en las células moléculas *muy* grandes, mucho más grandes que aquellas cuyos cambios hemos estado describiendo, que en alguna forma complicada sujetan a las moléculas pequeñas en forma adecuada para que la reacción pueda realizarse fácilmente. Esas cosas muy grandes y complicadas se llaman *enzimas*. (Primeramente se llamaron fermentos porque se descubrieron originalmente en la fermentación del azúcar. En realidad, algunas de las primeras reacciones en el ciclo fueron descubiertas allí). La reacción procederá en presencia de una enzima.

Una enzima está hecha de otra sustancia llamada *proteína*. Las enzimas son muy complicadas y cada una es diferente, estando cada una construida para controlar cierta reacción especial. Los nombres de las enzimas están escritos en la figura 3-1 en cada reacción. (Algunas veces la misma enzima puede controlar dos reacciones.) Ponemos énfasis en que las enzimas mismas no intervienen directamente en la reacción. Ellas no cambian; solamente dejan pasar un átomo de un lugar a otro. Habiendo hecho esto, la enzima está lista para hacerlo con la próxima molécula, como la máquina de una fábrica. Por cierto, debe haber un suministro de ciertos átomos y una forma de disponer de otros átomos. Tómese el hidrógeno, por ejemplo: hay enzimas que sobre ellas tienen unidades especiales que transportan el hidrógeno para todas las reacciones químicas. Por ejemplo, hay tres o cuatro enzimas hidrógeno-reductoras que se usan en diferentes lugares sobre todo nuestro ciclo. Es interesante que el mecanismo que libera algún hidrógeno en un sector tomará aquel hidrógeno y lo empleará en algún otro lugar.

La característica más importante del ciclo de la figura 3-1 es la transformación de GDP en GTP (guanosín difosfato en guanosín trifosfato) porque una sustancia contiene mucha más energía que la otra. Justamente, así como hay una "caja" en ciertas enzimas para transportar átomos de hidrógeno, hay ciertas "cajas" transportadoras de *energía* que implican al grupo trifosfato. Entonces, la GTP tiene más energía que la GDP y si el ciclo se desplaza en un sentido, estamos produciendo moléculas que tienen una energía extra que puede movilizar otro ciclo que *requiere* energía, por ejemplo la contracción de un músculo. El músculo

no se contraerá a no ser que haya GTP. Podemos tomar fibra muscular, ponerla en agua y agregar GTP, y las fibras se contraerán transformando GTP en GDP si está presente la enzima correcta. Así, el sistema real está en la transformación GDP-GTP; en la oscuridad la GTP, que se ha estado almacenando durante el día, se usa para producir el ciclo completo en la otra dirección. Una enzima, observen, no se preocupa en qué dirección procede la reacción pues, si lo hiciera, violaría una de las leyes de la física.

La física es de gran importancia en la biología y otras ciencias por otra razón que tiene que ver con *técnicas experimentales*. En realidad, si no fuera por el gran desarrollo de la física experimental, estos cuadros bioquímicos no se conocerían hoy. La razón es que la herramienta más útil de todas para el análisis de este sistema fantásticamente complejo es *marcar* los átomos que se usan en las reacciones. Así, si pudiéramos introducir en el ciclo algún dióxido de carbono que tiene una “marca verde”, y luego medir después de tres segundos donde está la marca verde, y de nuevo medir después de 10 segundos, etc., podríamos seguir el curso de las reacciones. ¿Qué son las “marcas verdes”? Son *isótopos* diferentes. Recordemos que las propiedades químicas de los átomos están determinadas por el número de *electrones*, no por la masa del núcleo. Pero puede haber, en el carbono por ejemplo, seis o siete neutrones junto con 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 eso son distinguibles. Usando estos isótopos de pesos diferentes, o aun isótopos radioactivos como el C^{14} , lo que da un medio más sensible para seguir cantidades muy pequeñas, es posible seguir las reacciones.

Ahora volvemos a la descripción de enzimas y proteínas. No todas las proteínas son enzimas, pero todas las enzimas son proteínas. Hay muchas proteínas, como las proteínas de los músculos, las proteínas estructurales que están, por ejemplo, en los cartílagos, pelo, piel, etc., que no son enzimas en sí mismas. Sin embargo, las proteínas son una sustancia muy característica de la vida: en primer lugar forman todas las enzimas, y en segundo forman gran parte del resto de la materia viviente. Las proteínas tienen una estructura muy interesante y simple. Son una serie, o cadena, de diferentes *aminoácidos*. Hay 20 aminoácidos diferentes, y todos ellos pueden combinarse entre sí para formar cadenas cuya espina dorsal es CO-NH, etc. Las proteínas no son otra cosa que cadenas de varios de estos 20 aminoácidos. Cada uno de los aminoácidos sirve probablemente para algún propósito especial. Algunos, por ejemplo, tienen un átomo de azufre en cierto lugar; cuando dos átomos de azufre están en la misma proteína, forman un enlace, esto es, unen la cadena en dos puntos y forman un anillo. Otro tiene átomos de oxígeno extra que lo hace una sustancia ácida, otro tiene una característica básica. Algunos tienen grandes grupos colgando hacia afuera por un lado, de modo que ocupan mucho espacio. Uno de los aminoácidos llamado prolina no es realmente un aminoácido, sino un aminoácido. Hay una pequeña diferencia: cuando la prolina está en la cadena hay un retorcimiento en ésta. Si quisiéramos producir una proteína en particular, daríamos estas instrucciones: ponga uno de esos ganchos de azufre aquí; luego agregue algo que ocupe lugar; ahora prenda algo para poner una enroscadura en la cadena. En esta forma obtendremos una cadena de aspecto complicado, enganchada a sí misma y teniendo una estructura compleja; presumiblemente ésta es justamente la manera en que se forman todas las variedades de enzimas. Uno de los grandes triunfos en los tiempos recientes (desde 1960) fue descubrir por fin la disposición atómica espacial exacta de ciertas proteínas, las que envuelven unos 56 a 60 aminoácidos en hilera. Más de un millar de átomos (más cercano a 2000, 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 tristes de este descubrimiento es que no podemos ver cosa alguna de esta estructura; no comprendemos cómo funciona y la forma en que lo hace. Por cierto, ése es el próximo problema por atacar.

Otro problema es: ¿cómo saben las enzimas qué cosa son? Una mosca de ojos rojos forma una mosca de ojos rojos, y así la información de la estructura entera de enzimas para hacer un pigmento rojo debe pasar de una mosca a la siguiente.

Esto es hecho por una sustancia en el núcleo de la célula, no una proteína, llamada *adn's* (abreviación de ácido desoxirribonucleico). Ésta es la sustancia clave que pasa de una célula a otra (por ejemplo, las células de semen consisten principalmente en ADN) y lleva la información de cómo hacer las enzimas. El ADN es el “programa”. ¿Qué aspecto tiene el programa y cómo funciona? Primero, el programa debe ser capaz de reproducirse a sí mismo. Segundo, debe ser capaz de instruir a las proteínas. Respecto a la reproducción, podemos pensar que procede como en la reproducción celular. Las células simplemente agrandan su tamaño y luego se dividen por la mitad. ¿Deberá ser así con las moléculas de ADN, entonces, de modo que ellas también aumentan de tamaño y se dividen por la mitad? ¡Cada *átomo* por cierto no aumenta de tamaño y se divide por la mitad! No, es imposible reproducir una molécula excepto de un modo algo más inteligente.

La estructura de la sustancia del ADN fue estudiada por un largo tiempo, primero químicamente para encontrar la composición, y luego con rayos X para encontrar la estructura en el espacio. El resultado fue el siguiente descubrimiento notable: la molécula de ADN es un par de cadenas enrolladas una sobre la otra. La espina dorsal de cada una de estas cadenas, que son análogas a las cadenas de las proteínas pero químicamente bastante diferentes, es una serie de grupos azúcar y fosfato, como se muestra en la figura 3-2. Ahora vemos cómo la cadena puede contener instrucciones, pues si pudiéramos dividir esta cadena por la mitad, tendríamos una serie *BAADC...* y cada cosa viviente podría tener una serie diferente. En consecuencia, tal vez, de alguna manera, las *instrucciones* específicas para la manufactura de proteínas están contenidas en la *serie* específica del ADN.

Unidos a cada azúcar a lo largo de la línea y ligando las dos cadenas entre sí hay ciertos pares de uniones cruzadas. Sin embargo, no son todas de la misma naturaleza; hay cuatro tipos, llamados adenina, timina, citosina y guanina, pero llamémoslas *A*, *B*, *C* y *D*. La cosa interesante es que sólo ciertos pares pueden situarse uno opuesto al otro, por ejemplo *A* con *B* y *C* con *D*. Estos pares están puestos en ambas cadenas de tal manera que “encajan entre sí” y tienen una fuerte energía de interacción. Sin embargo, *C* no encajará con *A*, y *B* no encajará con *C*; sólo encajarán en pares, *A* contra *B*, y *C* contra *D*. Por lo tanto, si uno es *C*, el otro debe ser *D*, etc. Cualesquiera que sean las letras en una cadena, cada una debe tener una letra complementaria específica en la otra cadena.

¿Qué pasa entonces con la reproducción? Supóngase que separamos esta cadena en dos. ¿Cómo podemos hacer otra justamente como ésta? Si en las sustancias de las células hay un departamento productor que entrega fosfato, azúcar y unidades de *A*, *B*, *C*, *D* que no están conectadas en cadena, los únicos que se unirán a nuestra cadena separada serán los correctos, los complementos de *BAADC...*, es decir, *ABBCD...* Así, lo que sucede es que la cadena se divide por la mitad durante la división celular, una mitad que terminará por ir con una célula y la otra mitad que terminará en la otra célula; cuando se separan, se forma una nueva cadena complementaria de cada mitad de cadena.

A continuación viene la pregunta, precisamente, ¿cómo determina el orden de las unidades *A*, *B*, *C*, *D* la disposición de los aminoácidos en la proteína? Éste es el problema central no resuelto actualmente en biología. Las primeras claves o partes de información, sin embargo, son éstas: hay en la célula pequeñas partículas llamadas ribosomas, y se sabe ahora que éste es el lugar donde se fabrican las proteínas. Pero los ribosomas no están en el núcleo, donde están el ADN y sus instrucciones. Algo parece que sucede. Sin embargo, también se sabe que pequeñas piezas moleculares se desprenden del ADN —no tan largas como la gran molécula de ADN que transporta toda la información en sí misma, pero como una pequeña sección de ella—. Ésta se llama ARN, pero esto no es esencial. Es una especie de copia del ADN, una copia resumida. El ARN, que en cierta forma lleva un mensaje acerca de qué proteína debe fabricar, va hacia el ribosoma. Eso es conocido. Tan pronto llega allí, la proteína es sintetizada en el ribosoma. Esto también es conocido. Sin embargo, los detalles de cómo los aminoácidos entran y se disponen de acuerdo con el código que está contenido

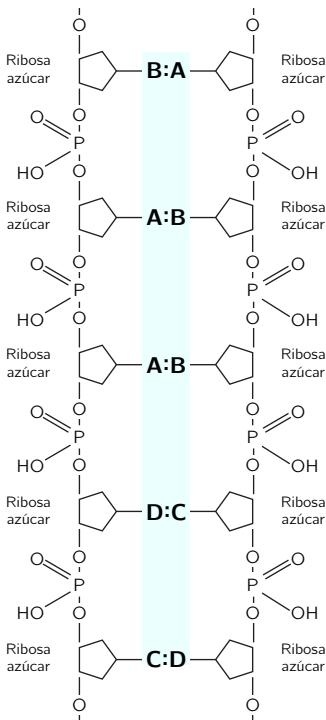


Figura 3-2. Diagrama esquemático del ADN.

en el ARN son, por de pronto, aún desconocidos. No sabemos cómo leerlo. Si conociéramos, por ejemplo, la “alineación” A, B, C, C, A , no podríamos decirle a usted qué proteína será producida.

Ciertamente ninguna otra materia o campo está haciendo más progresos en tantos nuevos frentes en el momento presente que la biología, y si tuviéramos que nombrar la suposición más poderosa de todas que conducen a uno más y más a un intento de comprender la vida, es aquella en que *todas las cosas están hechas de átomos*, y en que todo lo que las cosas vivas hacen puede ser comprendido en términos de las agitaciones y movimientos de los átomos.

3-4 Astronomía

En esta explicación fugaz del mundo entero, debemos ahora pasar a la astronomía. La astronomía es más antigua que la física. En realidad, dio origen a la física al mostrar la hermosa simplicidad del movimiento de las estrellas y planetas, cuya comprensión fue el *comienzo* de la física. Pero el descubrimiento más notable de toda la astronomía es que *las estrellas están hechas de átomos de la misma naturaleza que los que se encuentran en la Tierra*.* ¿Cómo se hizo esto? Los átomos liberan luz que tiene frecuencias definidas, algo así como el timbre de un instrumento musical que tiene tonos definidos o frecuencias de sonido. Cada vez que estamos escuchando varios tonos diferentes podemos distinguirlos, pero cuando miramos con nuestros ojos una mezcla de colores no podemos distinguir las partes de que está hecha, porque el ojo no es ni cercanamente tan discernidor como el oído a este respecto. Sin embargo, con un espectroscopio *podemos* analizar las frecuencias de las ondas luminosas y de esa manera podemos ver los tonos de los átomos que hay en las diferentes estrellas. De hecho, dos elementos químicos se descubrieron en una estrella antes 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, por supuesto, nos permite progresar en el entendimiento de las estrellas, porque ellas están hechas de los mismos tipos de átomos que existen en la Tierra. Ahora sabemos mucho acerca de los átomos, especialmente en cuanto a su comportamiento bajo condiciones de alta temperatura, pero no de alta densidad; así podemos analizar con la mecánica estadística el comportamiento de la sustancia estelar. Aun cuando no podemos reproducir las condiciones en la Tierra usando leyes básicas de la física, podemos a menudo decir precisamente, o muy aproximadamente, qué sucederá. Así es como la física ayuda a la astronomía. Por extraño que parezca, comprendemos la distribución de materia en el interior del Sol mucho mejor que lo que comprendemos el interior de la Tierra. Lo que sucede en el *interior* de una estrella se comprende mejor que lo que pudiera adivinarse de la dificultad de tener que mirar un pequeño punto luminoso a través de un telescopio, porque podemos *calcular* qué deben hacer 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 las hace continuar quemándose. Uno de los hombres que descubrió esto había salido con su amiga la noche siguiente de haberse dado cuenta de que en las estrellas se debían estar produciendo *reacciones nucleares*

* ¡Qué manera de precipitarme a través de esto! ¡Cuánto contenido tiene cada frase de esta breve historia! “Las estrellas están hechas de los mismos átomos que los de la Tierra.” Corrientemente yo tomo un pequeño tópico como éste para dictar una clase. Los poetas dicen que la ciencia elimina la belleza de las estrellas —meros globos de átomos de gas—. Nada es “mero”. Yo también puedo ver las estrellas en una noche despejada y sentirlas. ¿Pero veo yo más o menos? La vastedad de los cielos ensancha mi imaginación —clavado en este carrusel, mi pequeño ojo puede coger luz de un millón de años de edad—. Una vasta estructura de la cual yo soy una parte —quizá mi material fue arrojado de alguna estrella olvidada, como el que está arrojando una allí—. O verlas con el ojo más grande de Palomar, apartándose desde un punto común de partida donde quizás estuvieron todas juntas. ¿Cuál es la estructura, o el significado, o el *porqué*? No le hace daño al misterio conocer un poco de él. ¡Porque mucho más maravillosa es la verdad que la que cualquier artista en el pasado imaginó! ¿Por qué los poetas del presente no hablan de ella? ¿Qué hombres son los poetas que pueden hablar de Júpiter como si fuera un hombre, pero si es una inmensa esfera rotante de metano y amoníaco deben permanecer mudos?

para que brillaran. Ella dijo: “¡Mira qué bonito brillan las estrellas!” Él respondió: “Sí, y justamente ahora yo soy el único hombre en el mundo que sabe *por qué* brillan”. Ella simplemente se rió de él. Ella no estaba impresionada de haber salido con el único hombre del mundo que, en ese momento, sabía por qué brillan las estrellas. Bueno, es triste estar solo, pero así son las cosas en este mundo.

Es la “combustión” nuclear del hidrógeno la que suministra la energía del Sol; el hidrógeno se convierte en helio. Además, en última instancia, la producción de los diversos elementos químicos se verifica en los centros de las estrellas a partir del hidrógeno. El material del que estamos hechos *nosotros* fue “cocinado” una vez en una estrella y escupido hacia afuera. ¿Cómo lo sabemos? Porque hay una clave. La proporción de los diferentes isótopos (cuánto C¹², cuánto C¹³, etc.) es algo que nunca cambia en las reacciones *químicas*, porque las reacciones químicas son tan idénticas para las dos. Las proporciones son puramente el resultado de reacciones *nucleares*. Observando las proporciones de los isótopos en el rescoldo frío y apagado en que estamos, podemos descubrir cómo fue el *horno* donde se formaron los materiales de que estamos hechos. Aquel horno fue como las estrellas, y así es muy probable que nuestros elementos fueron “hechos” en las estrellas y escupidos en las explosiones que llamamos novae y supernovas. La astronomía está tan cerca de la física que estudiaremos muchas cosas astronómicas a medida que prosigamos.

3-5 Geología

Ahora pasemos a lo que se llama *ciencias de la Tierra*, o *geología*. Primero la meteorología y el tiempo. Por cierto, los *instrumentos* de meteorología son instrumentos físicos, y el desarrollo de la física experimental hizo posible estos, como se explicó anteriormente. Sin embargo, la teoría de la meteorología nunca ha sido investigada satisfactoriamente por los físicos. “Bien”, dirán ustedes “no hay otra cosa que aire, y conocemos las ecuaciones de los movimientos del aire”. Sí, es cierto. “Así, si sabemos las condiciones del aire de hoy, ¿por qué no podemos calcular las condiciones del aire de mañana?” Primero, no sabemos *realmente* cuál es la condición de hoy, porque el aire está arremolinándose y dando vueltas por todas partes. Resulta ser muy susceptible y aun inestable. Si han visto alguna vez correr suavemente el agua sobre una represa y luego convertirse en un gran número de burbujas y gotas cuando cae, comprenderán lo que quiero decir con inestable. Ustedes conocen la condición del agua antes que traspase el vertedero; es perfectamente tranquila; pero en el momento que comienza a caer, ¿dónde empiezan las gotas? ¿Qué determina lo grande que van a ser los trozos y dónde estarán? Esto no se sabe, porque el agua es inestable. Aun una masa de aire moviéndose suavemente, al traspasar una montaña se convierte en complejos remolinos y torbellinos. En muchos campos encontramos esta situación de *flujo turbulento* que no podemos analizar actualmente. ¡Dejemos rápidamente el asunto del tiempo y discutamos sobre geología!

El asunto básico para la geología es: ¿qué hace que la Tierra sea lo que es? Los procesos más obvios están al frente de nuestros ojos, los procesos de erosión de los ríos, los vientos, etc. Es muy fácil comprenderlos, pero por cada poco de erosión hay algo más que está sucediendo. Las montañas no son más bajas hoy en promedio de lo que fueron en el pasado. Debe haber procesos *formadores* de montañas. Encontrarán, si estudian geología, que *hay* procedimientos formadores de montañas y volcanismos, los que nadie comprende pero que son la mitad de la geología. El fenómeno de los volcanes no se comprende realmente. Lo que produce un terremoto, a la postre, no se comprende. Se comprende que si hay algo empujando a otra cosa, cede repentinamente y se desliza, eso está bien. Pero ¿qué es lo que empuja y por qué? La teoría es que hay corrientes en el interior de la Tierra —corrientes circulantes, debido a la diferencia de temperatura interior y exterior—, las cuales en su movimiento empujan ligeramente la superficie. Así, si hay dos circulaciones opuestas vecinas, la materia se acumula en la región donde se juntan y forman cadenas de montañas que están en condiciones desafortunadas de tensión y así producen volcanes y terremotos.

¿Qué pasa en el interior de la Tierra? Mucho se sabe acerca de la velocidad de las ondas sísmicas a través de la Tierra y la distribución de densidades de la Tierra. Sin embargo, los físicos han sido incapaces de obtener una buena teoría sobre lo denso que deberá ser una sustancia a las presiones que se esperaría en el centro de la Tierra. En otras palabras, no podemos calcular las propiedades de la materia muy bien en dichas circunstancias. Lo hacemos mucho menos bien con la tierra que lo hacemos con las condiciones de la materia en las estrellas. La matemática implicada parece ser un poco difícil, hasta ahora, pero quizá no pasará mucho tiempo antes de que alguien se dé cuenta de que es un problema importante y que realmente lo solucione. El otro aspecto, por cierto, es que aun si supiéramos la densidad, no podríamos calcular las corrientes de circulación. Tampoco podemos realmente deducir las propiedades de las rocas a elevadas presiones. No podemos decir con qué rapidez las rocas “cederán”; todo eso debe ser resuelto por el experimento.

3-6 Psicología

Consideremos a continuación la ciencia de la *psicología*. Incidentalmente, el psicoanálisis no es una ciencia: en el mejor de los casos es un proceso médico, o quizá aún brujería. Tiene una teoría acerca de qué produce la enfermedad —muchos “espíritus” diferentes, etc.—. El hechicero tiene la teoría de que una enfermedad como la malaria está causada por un espíritu que viene del aire; no se sana agitando una culebra sobre él; en cambio, la quinina sí ayuda la malaria. Así, si están enfermos, yo les aconsejaría que vayan al hechicero, porque es el hombre en la tribu que sabe más acerca de enfermedades; por otro lado, su conocimiento no es ciencia. El psicoanálisis no ha sido cuidadosamente comprobado por el experimento, y no hay manera de encontrar una lista del número de casos en los cuales resulta, el número de casos en que no resulta, etcétera.

Las otras ramas de la psicología, que implican cosas como la fisiología de las sensaciones —qué sucede en el ojo, y qué sucede en el cerebro— son, si quieren, menos interesantes. Pero cierto progreso pequeño, pero real, se ha hecho al estudiarlas. Uno de los progresos técnicos más interesantes puede ser o no llamado psicología. El problema central de la mente, si quieren, o del sistema nervioso es éste: cuando un animal aprende algo, puede hacer algo diferente de lo que podía hacer antes y sus células cerebrales deben haber cambiado también, si es que está hecho de átomos. *¿En qué sentido es diferente?* No sabemos dónde mirar, o qué buscar, cuando algo se memoriza. No sabemos qué significa o qué cambio hay en el sistema nervioso cuando se aprende una realidad. Éste es un problema muy importante que no ha sido resuelto en absoluto. Suponiendo, sin embargo, que existe algo como la memoria, el cerebro es una masa tan enorme de alambres y nervios interconectados que probablemente no puede ser analizado en una forma directa. Hay una analogía de esto con las máquinas computadoras y los elementos de computación, en que también tienen muchas líneas, y que tienen algún tipo de elemento análogo, quizá, a la sinapsis o conexión de un nervio con otro. Esto es una materia muy interesante que no tenemos tiempo de discutir más allá —las relaciones entre el pensamiento y las máquinas computadoras—. Debe apreciarse, por cierto, que esta materia nos dirá muy poco acerca de las complejidades reales del comportamiento humano ordinario. Todos los seres humanos son tan diferentes. Pasará mucho tiempo antes que lleguemos ahí. Debemos empezar mucho más atrás. Si pudiéramos siquiera deducir cómo funciona un *perro*, habríamos avanzado bastante. Los perros son más fáciles de comprender, pero nadie sabe aún cómo funcionan estos animales.

3-7 ¿Cómo se llegó a eso?

Para que la física sea útil a las otras ciencias en una forma *teórica*, que no sea la invención de instrumentos, la ciencia en cuestión debe suministrar al físico una descripción del tema en el lenguaje del físico. Ellos pueden decir: “¿por qué salta una rana?”, y el físico no puede contestar. Si ellos le dicen lo que es una

rana; que hay tantas moléculas; que hay un nervio aquí, etc., eso es diferente. Si ellos nos dijeran, más o menos, a qué se parecen la Tierra y las estrellas, entonces podemos resolverlo. Para que la teoría física sea de alguna utilidad, debemos saber exactamente dónde están colocados los átomos. Para comprender la química, debemos saber exactamente qué átomos están presentes, pues de lo contrario no podemos analizarla. Ésta es solamente la primera limitación, por supuesto.

Hay otro *tipo* de problema en las ciencias hermanas, que no existe en la física; podemos llamarlo, a falta de un término mejor, el asunto histórico. ¿Cómo se llegó a eso? Si comprendemos todo acerca de la biología, quisiéramos saber cómo todas las cosas que hay en la Tierra fueron a dar en ella. Existe la teoría de la evolución, una parte importante de la biología. En geología, no sólo queremos saber cómo se están formando las montañas, sino cómo se formó la Tierra entera en el comienzo, el origen del sistema solar, etc. Esto, por supuesto, nos conduce a querer saber qué tipo de materia existía en el mundo. ¿Cómo evolucionan las estrellas? ¿Cuáles fueron las condiciones iniciales? Éste es el problema de la historia de la astronomía. Se ha descubierto mucho acerca de la formación de las estrellas, de la formación de los elementos de los cuales estamos hechos y hasta un poco acerca del origen del universo.

No hay problemas históricos que se estén estudiando en la física actualmente. No tenemos una pregunta: “Aquí están las leyes de la física, ¿cómo se llegó a ellas?” No nos imaginamos, por ahora, que las leyes de la física están en cierto modo cambiando con el tiempo, que en el pasado fueran diferentes de lo que son en el presente. Por supuesto que *pueden* ser, y en el momento en que encontremos que *son*, la pregunta histórica de la física estará ligada con el resto de la historia del universo y entonces los físicos estarán hablando de los mismos problemas que los astrónomos, los geólogos y los biólogos.

Finalmente, hay 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 quedó desde hace mucho tiempo atrás —más de 100 años—. Nadie en la física ha sido realmente capaz de analizarlo matemáticamente en forma satisfactoria a pesar de su importancia para las ciencias hermanas. Es el *análisis de fluidos circulantes o turbulentos*. Si observamos la evolución de una estrella, se llega a un punto donde podemos deducir que va a comenzar la convección, y a partir de esto ya no podemos deducir qué va a pasar. Unos pocos millones de años más tarde la estrella hace explosión, pero no podemos explicar la razón. No podemos analizar el tiempo. No conocemos los esquemas de los movimientos que debería haber en el interior de la tierra. La forma más simple del problema es tomar una cañería que es muy larga y empujar agua a través de ella a gran velocidad. Preguntamos: para empujar una cantidad dada de agua a través de esa cañería, ¿cuánta presión se necesita? Nadie puede analizarlo partiendo de principios primarios y de las propiedades del agua. Si el agua fluye muy lentamente, o si usamos algo espeso como la miel, entonces podemos hacerlo exactamente. Ustedes lo encontrarán en su texto. Lo que no podemos realmente hacer es tratar con agua real y fresca que corre a través de una cañería. Éste es el problema central que deberíamos resolver algún día y que no lo hemos hecho.

Decía una vez un poeta: “El universo entero está en un vaso de vino”. Probablemente nunca sabremos lo que quería decir, pues los poetas no escriben para ser comprendidos. Pero es cierto que si miramos un vaso de vino lo suficientemente cerca, vemos el universo entero. Ahí están las cosas de la física: el líquido que se arremolina y se evapora dependiendo del viento y del tiempo, las reflexiones en el vidrio, y nuestra imaginación agrega los átomos. El vidrio es un destilado de las rocas terrestres y en su composición vemos los secretos de la edad del universo y la evolución de las estrellas. ¿Qué extraño arreglo de elementos químicos hay en el vino? ¿Cómo llegaron a ser? Están los fermentos, las enzimas, los sustratos y los productos. Allí en el vino se encuentra la gran generalización: toda vida es fermentación. Nadie puede descubrir la química del vino sin descubrir, como lo hizo Louis Pasteur, la causa de muchas enfermedades. ¡Cuán vívido es el vino tinto que imprime su existencia dentro del conocimiento de

quien lo observa! ¡Si nuestras pequeñas mentes, por alguna conveniencia, dividen este vaso de vino, este universo, en partes —física, biología, geología, astronomía, psicología, etc.—, recuerden que la naturaleza no lo sabe! Así, reunamos todo de nuevo sin olvidar en última instancia para qué sirve. Dejemos que nos dé un placer final más: ¡bébanlo y olvídense de todo!

Conservación de la energía

4-1 ¿Qué es la energía?

Habiendo terminado ya nuestra descripción general empezamos en este capítulo un estudio más detallado de los diferentes aspectos de la física. Para ilustrar las ideas y la clase de razonamiento que se puede usar en física teórica, examinaremos una de las leyes más básicas de la física: la conservación de la energía.

Hay un hecho, o si prefiere, una *ley*, que gobierna todos los fenómenos naturales conocidos hasta la fecha. No se conoce excepción a esta ley —es exacta hasta donde sabemos—. La ley se llama *conservación de la energía*. Establece que hay cierta cantidad que llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que ocurren en la naturaleza. Ésta es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático; significa que hay una cantidad numérica que no cambia cuando algo ocurre. No es la descripción de un mecanismo, o de algo concreto; ciertamente es un hecho raro que podamos calcular cierto número y que cuando terminemos de observar que la naturaleza haga sus trucos y calculemos el número otra vez, éste será el mismo. (Algo así como el alfil en un cuadro negro, que después de cierto número de movimientos —cuyos detalles son desconocidos— queda en el mismo cuadro. Es una ley de esta naturaleza). Puesto que ésta es una idea abstracta, ilustraremos su significado mediante una analogía.

Imaginemos un niño, tal vez “Daniel el Travieso”, que tiene unos bloques que son absolutamente indestructibles, que no pueden dividirse en partes. Cada uno es igual al otro. Supongamos que tiene 28 bloques. Su madre lo coloca con los 28 bloques en una pieza al comenzar el día. Al *final* del día, por curiosidad, ella cuenta los bloques con mucho cuidado, y descubre una ley fenomenal —haga lo que haga con los bloques, ¡siempre quedan 28!—. Esto continúa por varios días, hasta que un día hay sólo 27 bloques, pero una pequeña investigación demuestra que hay uno bajo la alfombra —ella debe mirar por todas partes para estar segura de que el número de bloques no ha cambiado—. Un día, sin embargo, el número parece cambiar —hay sólo 26 bloques—. Una cuidadosa investigación indica que la ventana estaba abierta, y al mirar hacia afuera se encontraron los otros dos bloques. Otro día, una cuidadosa cuenta indica que ¡hay 30 bloques! Esto causa una gran consternación, hasta que se sabe que Bruce vino a visitarlo, trayendo sus bloques consigo y que dejó unos pocos en la casa de Daniel. Después de separar los bloques adicionales cierra la ventana, no deja entrar a Bruce, y entonces todo anda bien, hasta que una vez cuenta y encuentra sólo 25 bloques. Sin embargo, hay una caja en la pieza, una caja de juguetes, y la madre se dirige a abrir la caja de juguetes, pero el niño dice: “No, no abras mi caja de juguetes”, y chilla. A la madre no le estaba permitido abrir la caja de juguetes. Como es extremadamente curiosa, y algo ingeniosa, inventa un ardid. Sabe que un bloque pesa 100 gramos, además pesó la caja cuando los 28 bloques están a la vista y pesó 500 gramos. Después, pesa la caja de nuevo, resta 500 gramos y divide entre 100. Ella descubre lo siguiente:

$$\left(\begin{array}{c} \text{número de} \\ \text{bloques vistos} \end{array} \right) + \frac{(\text{peso de la caja}) - 500 \text{ gramos}}{100 \text{ gramos}} = \text{constante.} \quad (4.1)$$

Enseguida parece que hubiera algunas nuevas desviaciones, pero un estudio cuidadoso indica que el agua sucia de la bañera está cambiando de nivel. El niño está lanzando bloques al agua y ella no puede verlos porque está muy sucia, pero

4-1 ¿Qué es la energía?

4-2 Energía potencial gravitacional

4-3 Energía cinética

4-4 Otras formas de energía