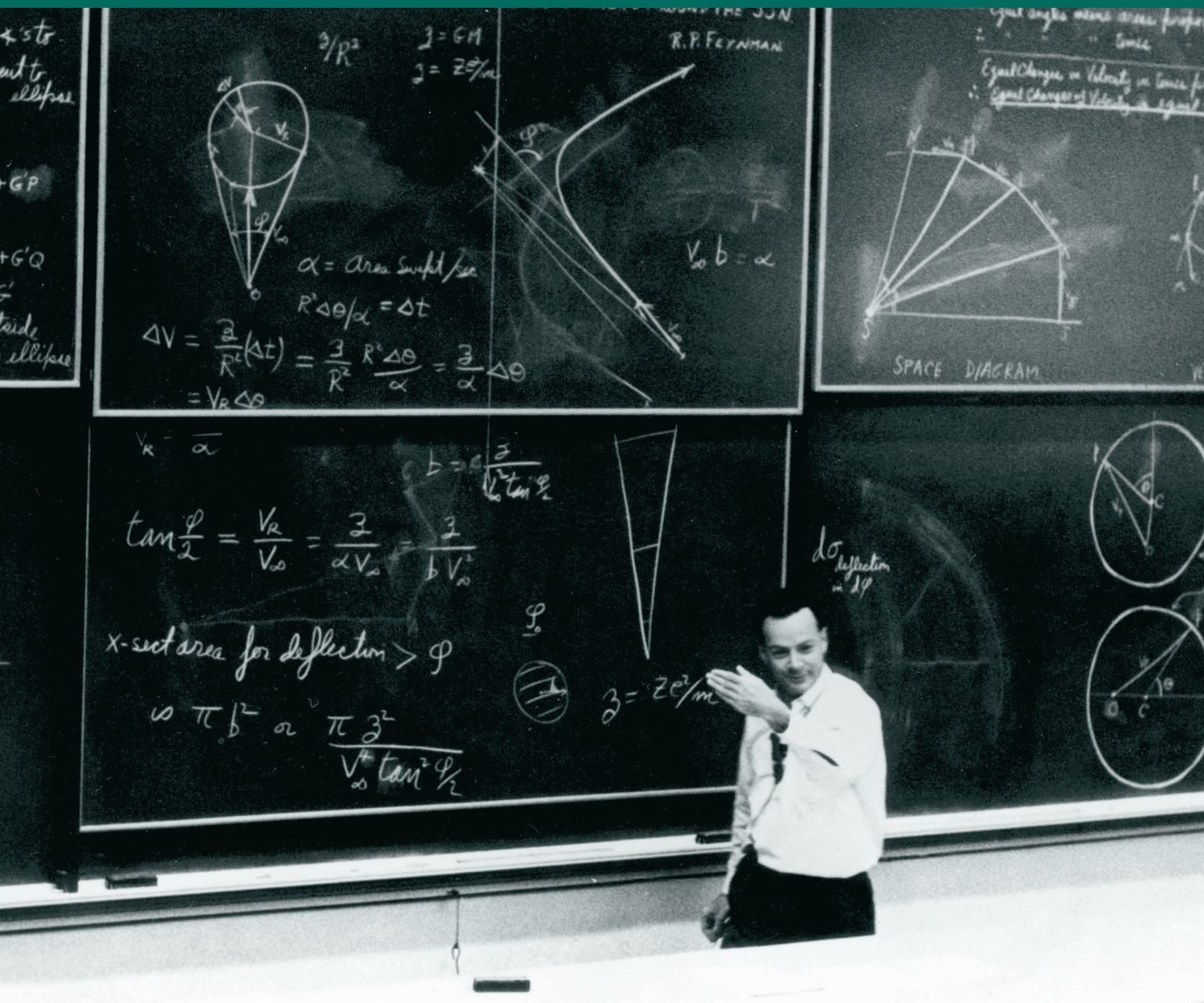


Lecciones de física de Feynman, Mecánica, radiación y calor

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. ; ilus. ; 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 reimpression 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

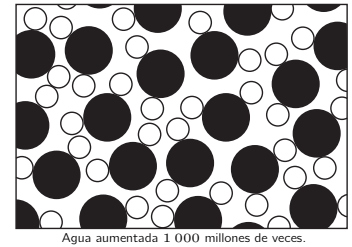
para allá. Muy interesante. Éstos son paramecios. Pueden detenerse en este punto y ponerse tan curiosos acerca de los paramecios con sus vibrantes cilios y cuerpos en contorsión, que no van a ir más allá, excepto tal vez para aumentar el tamaño del paramecio aún más y ver su interior. Esto, desde luego, 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 $1 \text{ o } 2 \times 10^{-8} \text{ cm}$. 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—.

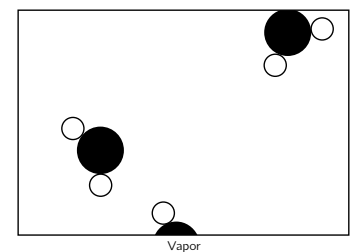
En la figura 1-2 tenemos una representación del vapor. Esta representación del vapor falla en un aspecto: a presión atmosférica ordinaria ciertamente no habría más de tres moléculas de agua en esta figura. La mayoría de los cuadrados de este tamaño no contendrán ninguna, pero nosotros tenemos accidentalmente 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