

James Kakalios

# LA FÍSICA DE LOS SUPERHÉROES

Título original: *The Physics of Superheroes*

James Kakalios, 2005

Traducción: Pedro Crespo

Prólogo: Lawrence M. Krauss

En este libro el reconocido profesor universitario James Kakalios demuestra, con tan sólo recurrir a las nociones más elementales del álgebra, que con más frecuencia de lo que creemos, los héroes y los villanos de los cómics se comportan de acuerdo con las leyes de la física. Acudiendo a conocidas proezas de las aventuras de los superhéroes, el autor proporciona una diáfana a la vez que entretenida introducción a todo el panorama de la física, sin desdeñar aspectos de vanguardia de la misma, como son la física cuántica y la física del estado sólido.

¿Sabía que partiendo de la altura que era capaz de saltar Superman en sus primeros tiempos se puede deducir la intensidad de la gravedad en su planeta de origen, Krypton? ¿Y que, a la vez que aprendemos nociones de física estelar y planetaria, es posible estimar la estructura de dicho mítico planeta, lo que de paso proporciona una explicación de la causa que provoca su cataclismo final?

Éste es el libro que necesita leer si alguna vez se ha preguntado cómo la Mujer Invisible de los Cuatro Fantásticos puede ver cuando se vuelve transparente, si Atom podría viajar sobre un electrón a través de la línea telefónica o si la teoría electromagnética puede explicar por qué el Profesor X es capaz de leer la mente.

Divertido y provocativo, *La física de los superhéroes* hará que tanto los físicos como los aficionados a los cómics exclamen: ¡genial!

# CONTENIDO

La física de los superhéroes

Prólogo

Prefacio

Introducción: Los orígenes secretos: Cómo la ciencia rescató los cómics

Sección I. Mecánica

1. ¡Arriba, arriba y fuera!: Fuerzas y movimiento
2. Analizando Krypton: Ley de Newton de la gravitación
3. El día en que murió Gwen Stacy: Impulso y momento
4. ¿Puede nuestro héroe columpiarse de una hebra?: Aceleración centrípeta
5. Hazañas de Flash: Rozamiento, arrastre y sonido
6. Como un relámpago: Relatividad especial
7. Si ésta fuera mi densidad...: Propiedades de la materia
8. ¿Pueden escapar Ant-Man de una bolsa de papel?: Momento de torsión y rotación
9. ¿Es Ant-Man sordo, mudo y ciego?: Momento armónico simple
10. ¿El tamaño importa?: La ley del cubo-cuadrado

Sección II. Energía calor y luz

11. El plan dietético de Central City: Conservación de la energía
12. El caso del trabajo perdido: Las tres leyes de la termodinámica
13. Meteorología mutante: Conducción y convección
14. Cómo la monstruosa amenaza del misterioso Melter prepara una comida en un instante:  
Transiciones de fase

15. Las adherencias de Electro: Electroestática
16. Superman enseña a Spiderman: Corrientes eléctricas
17. Cómo Electro se convierte en Magneto cuando corre: La ley de Ampère
18. Cómo Magneto se convierte en Electro cuando corre: El magnetismo y la ley de Faraday
19. Electro y Magneto ondulan: Electromagnetismo y luz

### Sección III. Física moderna

20. Viaje al microuniverso: Física atómica
21. ¡No es un sueño, no es una broma, no es un cuento imaginario!: Mecánica cuántica
22. Atravesando una pared sin esfuerzo: Fenómenos de efecto túnel
23. Golpeando a Shellhead: Física del estado sólido

### Sección IV. ¿Qué hemos aprendido?

24. ¡Bizarro y yo!: Las meteduras de pata de los superhéroes

Epílogo: ¡Lo, tendrá que haber un final!

Pregunta al Dr. K

Lecturas recomendadas

Ecuaciones clave

Agradecimientos

Notas

## PRÓLOGO

Aunque Wile E. Coyote no puede considerarse un superhéroe ni aun haciendo un esfuerzo de imaginación, tengo que admitir que fue este infeliz villano —que escapaba a una muerte casi cierta episodio tras episodio mientras continuaba un día sí y otro también su infructuosa caza del Correcaminos con una vehemencia digna de Sísifo— el que por vez primera me hizo pensar en la física de los personajes ilustrados. A pesar de ser un muchacho relativamente joven enganchado a la televisión, imaginaba que había algo sospechoso siempre que veía a Wile correr más allá de un precipicio y sobrevolarlo indefinidamente hasta el instante en que se daba cuenta de que no había suelo sólido bajo sus pies. De algún modo me parecía ya entonces que la gravedad debiera de seguir con su trabajo tanto si uno era o no consciente de ella.

He traído este ejemplo a colación, a despecho del detalle de que no tiene que ver con los superhéroes y de que, de hecho, está relacionado con una serie de dibujos animados en lugar de con un personaje de cómic, porque ilustra un punto que se ha convertido en un referente para lo que pienso acerca de la enseñanza de la física: pocas cosas son más dignas de recuerdo que el resultado de confrontar nuestras propias interpretaciones erróneas. En efecto, algunos de los que nos ocupamos profesionalmente de la enseñanza de la física sugerimos que sólo cabe esperar que los estudiantes interioricen realmente lo que se les enseña si se les alienta para que se enfrenten a sus propios errores conceptuales. No sé si esto es o no cierto, pero sé que si usted quiere llegar a comprender los malentendidos comunes, entonces una buena forma de empezar es sacar partido del origen de nuestras perspectivas culturales. Y si esto significa obtenerlos de *Superman* o de *Star Trek*, estoy de acuerdo con ello.

Tampoco quisiera que usted piense que pongo a los cómics y los errores comunes en el mismo saco porque deseo denigrar a los primeros. Lejos de ello. Más bien ocurre que los cómics están a veces en lo cierto y, tal como James Kakalios describe en su introducción a este viaje de largo alcance desde la gravedad de Krypton hasta la mecánica cuántica de la Patrulla X (X-Men), al parecer los estudiantes protestan con frecuencia acerca de cómo los ejemplos estándar de sus clases de física preliminar no tienen nada que ver con el mundo real que encontrarán después de graduarse y, sin embargo, cuando se les introduce en lugar de ello en la física de los superhéroes, nunca surge esta queja.

Uno podría preguntarse inicialmente si Superman parecería más real a los estudiantes que las poleas, las cuerdas y los planos inclinados. Pero la razón real por la que los estudiantes no se quejan es indudablemente porque los ejemplos de los cómics son *divertidos*, mientras que los planos inclinados no lo son. Y ésa es quizás una de las razones más útiles para pensar en la física de los superhéroes. No solamente puede usted imaginar y se le pueden presentar muchas nociones de física interesantes, desde fenómenos de la vida diaria hasta temas esotéricos modernos, sino que es realmente entretenido pensar en ellas. Es más, aunque temas como la mecánica cuántica pudieran parecer intimidatorios, ¿a quién le intimida la encantadora Kitty Pride?

Algunos de los que recuerdan los cómics que los embelesaron cuando eran jóvenes podrían también experimentar un sentimiento de melancolía al reflexionar acerca de que nuestro propio mundo podría alguna vez captar el entusiasmo y el dramatismo de los mundos de los cómics de superhéroes. A decir verdad, sin embargo, el nuestro es mucho más interesante y emocionante; basta sólo con que abramos nuestras mentes a las maravillas ocultas de la naturaleza que la ciencia nos ha revelado a lo largo de los últimos cuatrocientos años. La realidad es bastante más extraordinaria que la ficción, incluso que la ficción de los *comic books*. Y descubrir por qué es parte de la diversión.

LAWRENCE M. KRAUSS

Cleveland, Ohio, abril de 2005

## PREFACIO

De muchacho era un aficionado de los cómics pero, como muchos de los que me precedieron y de los que vinieron después, abandoné el pasatiempo cuando descubrí a las chicas en el instituto. Mi madre, siguiendo el guión estándar, aprovechó esta oportunidad para tirar mi colección. Años más tarde renové mi hábito de lector de cómics en la universidad, como medio de aliviar la fatiga de trabajar en mi tesis. Ahora, ya adulto, he reconstruido gran parte de mi colección de cómics (o, como mi esposa los llama, «la amenaza de incendio») pero por motivos de seguridad mi madre tiene prohibido acercarse a ellos.

En 1998 la Universidad de Minnesota, en la que soy profesor de física, puso en práctica un nuevo tipo de curso llamado «seminarios para principiantes». Se trata de clases pequeñas de tipo seminario ofrecidas a los estudiantes que comienzan, y aunque sirven para obtener créditos de la carrera, no están ligadas a ningún currículum específico. A los profesores se les anima a desarrollar clases sobre temas no convencionales, y los seminarios para principiantes sobre *Bioética y el genoma humano*, *El color rojo* (una clase de química) o *El comercio y la economía global y los sistemas complejos: desde Sandpiles a Wall Street* están entre las muchas clases ofertadas. En el año 2001 introduje una clase titulada inicialmente *Todo lo que sé acerca de la ciencia lo aprendí leyendo cómics*. Se trataba de una clase de física real que trata de la mayoría de los temas tradicionalmente cubiertos, pero en lugar de emplear ilustraciones de masas sobre resortes o bloques que se deslizan por planos inclinados, todos los ejemplos provenían de las aventuras en cuatricomía de superhéroes disfrazados, y estaban enfocados en particular a aquellas situaciones en las que los cómics interpretan correctamente la física.

El presente libro, aunque inspirado por este curso, no es en sí mismo un libro de texto. Está escrito para el no especialista interesado en un modo, relativamente libre de esfuerzo, de aprender los conceptos básicos de la física que subyacen en nuestro moderno estilo de vida tecnológico. Se tratan temas tales como las fuerzas y el movimiento, la conservación de la energía, la termodinámica, la electricidad y el magnetismo, la mecánica cuántica y la física del estado sólido, así como se explican también aplicaciones a la vida real tales como los *airbags* del automóvil, los transistores y los hornos microondas. Espero que esté tan ocupado gozando de este helado bañado de caramelo de superhéroe que no se dé cuenta de que estoy haciendo furtivamente que se coma sus espinacas al mismo tiempo.

Este libro está dirigido tanto a los aficionados de siempre a los cómics como a aquellos que no pueden distinguir a Batman de Man-Bat. He descrito, por consiguiente, la historia y el trasfondo de los héroes de cómic de los que se trata aquí. Para explicar la física relacionada con ciertos superhéroes o narraciones, he tenido que resumir algunos puntos clave de la trama de varios cómics. Por lo tanto, para aquellos que no hayan leído todavía esos clásicos, las siguientes palabras valdrán para todo el libro: «Alerta: fastidian el guión».

Los lectores interesados en la consulta del material original aquí considerado encontrarán citas de los cómics tratados en el texto al final del libro. He indicado la información del cómic original y,



siempre que ha sido posible, indico dónde se puede hallar el ejemplar en un volumen de reimpresión reciente en librerías y tiendas de cómics. La fecha indicada para un determinado cómic, impresa en su cubierta, no se corresponde con la de su primera aparición en los quioscos. Para ampliar la vida en los estantes, la fecha indica cuándo debe ser devuelto el cómic al editor para su abono, y no cuándo está disponible para la compra. En un esfuerzo para atraer nuevos lectores que quieran los primeros ejemplares para coleccionistas, los cómics vuelven a comenzar ocasionalmente su numeración, aunque mantienen sin cambios el mismo nombre. Si no se advierte otra cosa, los números de los ejemplares se refieren al primer volumen de un cómic. En las notas finales he indicado, cuando los conozco, el guionista y el artista de cada cómic enumerado. Mi omisión de los «entintadores»<sup>[1]</sup> no debería interpretarse como una infravaloración de su contribución al cómic acabado (no creo en absoluto que ese trabajo equivalga al mero trazado de líneas), sino a un reflejo del hecho de que el artista junto con el guionista tiene en general la responsabilidad principal en cuanto a la física contenida en una determinada escena de cómic.

Cualquier discusión sobre la física en los cómics invita naturalmente al escrutinio por parte de los físicos así como de los aficionados a los superhéroes, conocidos tanto los unos como los otros por... prestar atención a los detalles. Cada uno de los episodios que he seleccionado tiene que ver con un determinado principio de la física. A veces el siguiente número podría contener una escena que contradijese la manifestación físicamente plausible de un superpoder descrito aquí. Al tener en cuenta los personajes que han protagonizado múltiples cómics durante medio siglo, puedo apostar a que siempre podrán hallarse contraejemplos para cualquier afirmación que hago. Por lo tanto, aunque el examen de la física asociada con los poderes de un superhéroe proporcionará en muchos casos una mejor apreciación de sus talentos, mis camaradas aficionados quedan advertidos de que este libro no trata de proporcionar explicaciones definitivas del poder o de las aventuras de ninguno de los personajes. De modo semejante, mis colegas físicos quedan también alertados de que este libro es para un público no experto. He intentado hacer las cosas sencillas, aun reconociendo las asperezas y complicaciones del mundo real. Una discusión completa de muchos de los temas considerados aquí podría ampliarse fácilmente hasta llenar varios volúmenes y proporcionaría una ilustración concreta de las últimas palabras del Dr. Manhattan al final de *Watchmen* de Alan Moore y Dave Gibbons: «Nada termina, Adrian. Nada termina nunca».

El lenguaje que describe el mundo físico es matemático por naturaleza. Por qué es así es una cuestión filosófica profunda (a la que el físico Eugene Wigner se refiere como «la irrazonable eficacia de las matemáticas» por su capacidad para dar cuenta de las propiedades de la naturaleza) que ha desconcertado y conmovido a todos los que la han estudiado. Es tentador, en un libro que trata de superhéroes de cómics, evitar el más ligero soplo de matemáticas. Sin embargo, eso sería hacer trampas, algo peor que omitir las reproducciones del trabajo artístico en un libro sobre Picasso o no incluir un CD de grabaciones musicales en un libro acerca de la historia del jazz, puesto que las matemáticas son necesarias en cualquier debate cabal de física.

El lector pudiera alegar que no sabe matemáticas, o que no puede pensar matemáticamente. Pero para este libro todo lo que hace falta es que reconozca que  $1/2 + 1/2 = 1$ , o sea que dos mitades forman un todo. Si se siente cómodo con  $1/2 + 1/2 = 1$ , entonces escribir esto en la forma  $2 \times (1/2) = 2/2$

$= 1$  (es decir, dos multiplicado por un medio) no debería preocuparle, porque obviamente dos mitades son igual a la unidad. Parece tan sencillo que podría sorprenderse al descubrir que ya hemos estado haciendo álgebra (¡y usted que pensaba que no la necesitaría más después del instituto!).

Como muchos estudiantes han sospechado siempre, hay un truco en álgebra que es el siguiente: si uno tiene una ecuación que describe una aseveración verdadera, tal como  $1 = 1$ , entonces se puede añadir, sustraer, multiplicar o dividir (excepto dividir por cero) la ecuación por cualquier número que queramos, y en tanto lo apliquemos a ambos lados de la ecuación la corrección de la misma no se altera. Así pues, si añadimos 2 a ambos lados de  $1 = 1$ , obtenemos  $1 + 2 = 1 + 2$  o  $3 = 3$ , que sigue siendo una afirmación cierta. Dividiendo ambos lados de  $1 = 1$  por 2 tendremos  $1/2 = 1/2$ . Puesto que  $1 = 1$  entonces  $1/2 + 1/2 = 1$ , lo que a su vez se puede escribir como  $2/2 = 1$ . Haré un trato con usted: no utilizaré matemáticas más complicadas que las descritas en este párrafo, si usted se abstiene de asustarse cuando aparezca una ecuación matemática. Siempre puede pasar por alto la parte matemática y su comprensión no sufrirá por ello. Pero si tiene la intención de calcular una velocidad o una fuerza para una situación distinta de las que aquí se consideran, dispondrá de las herramientas para hacerlo. En cualquier caso, le prometo que no hay ningún examen al final del libro.

## INTRODUCCIÓN

### LOS ORÍGENES SECRETOS: CÓMO LA CIENCIA RESCATÓ LOS CÓMICS DE SUPERHÉROES

Si alguna vez me cuestioné si mis alumnos pensaban que el estudio de la física era una pérdida de tiempo, todas las dudas se disiparon hace varios años. Volví de almorzar en el edificio de Física de mi universidad cuando escuché por azar a dos estudiantes que también salían de allí. Por sus expresiones y el retazo que pude captar de su conversación parecía que se les acababa de devolver un examen. Citaré aquí lo que escuché aunque, por decoro, me tomaré ciertas licencias:

El estudiante más alto se quejaba a su amigo: «Voy a flipar comprando por poco y vendiendo por mucho. No necesito saber nada zumbando bolas lanzadas desde precipicios nada flipantes».

Hay dos cosas que podemos aprender de esta frase *a)* el secreto para el éxito financiero y *b)* que los ejemplos empleados en las clases tradicionales de física están muy alejados de las preocupaciones diarias de muchos estudiantes.

El mundo real es un lugar complicado. Con el fin de proporcionar ilustraciones en una lección de física para resaltar solamente un único concepto, tal como la segunda ley de Newton del movimiento o el principio de la conservación de la energía, los profesores de física han desarrollado durante décadas un arsenal de escenarios estilizados en exceso que comportan el movimiento de proyectiles, pesos colgando de poleas o masas oscilando unidas a resortes. Estas situaciones parecen tan artificiales que inevitablemente los estudiantes se lamentan pensando ¿cuándo voy a usar estas cosas en mi vida real?

Un ardid que he encontrado casualmente al enseñar física tiene que ver con el uso de ejemplos sacados de *comic books* que ilustran correctamente diversas aplicaciones de principios físicos. Resulta bastante interesante comprobar que, siempre que cito ejemplos de los cómics de superhéroes en una clase, mis estudiantes nunca se preguntan cuándo van a emplear esa información en «la vida real». Se diría que todos tienen planes para después de la graduación relacionados con trajes de fibras elásticas y con proteger la ciudad de todo tipo de amenazas. Como ciudadano que cumple las leyes, esto me proporciona una gran sensación de seguridad puesto que yo también sé cuántos de mis colegas científicos podrían caritativamente recibir el calificativo de «chalados».

Establecí por vez primera la conexión entre los cómics y la educación universitaria ya en 1965, cuando por la princípesca suma de doce centavos compré el número 333 de *Action Comics*, que presentaba las aventuras de Superman. Aunque en aquella época yo no era un encendido aficionado del hombre de acero, fui seducido por la cubierta del cómic (ver figura 1), que prometía una ojeada a los interiores del funcionamiento de nuestras instituciones de aprendizaje de alto nivel. Como muchacho sentía una profunda curiosidad acerca de cómo sería la vida universitaria. Ahora que soy

un profesor de universidad me doy cuenta de que eso era una premonición de que una vez que ingresara en la universidad nunca volvería a salir de ella, y de que mi matriculación se convertiría en una especie de sentencia vital.

Una historia del número 333 de *Action*, titulada «Los superabucheos de Superman» presentaba una escena en la cual en «homenaje a lo que había hecho por la humanidad», se otorgaba a Superman «el doctorado *honoris causa* en Superciencia» por la Universidad de Ingeniería de Metrópolis (debería destacar que tal honor no se ofrecía cuando ingresé en la escuela de postgraduado).

En la cubierta de este número, Superman se hallaba en un gran auditorio en el campus de la universidad, grabando su nombre en una placa de honor de bronce mediante su visión calorífica. Los ancianos profesores que asistían al acto vistiendo trajes de gala estaban sobrecogidos, no por el hecho de que de los ojos de Superman emanasen rayos de energía sino más bien debido a que lo que los profesores veían en lugar de nuestro héroe era un dragón que escupía fuego sobre la estancia, debido a una alucinación inducida por el archienemigo Lex Luthor, quien pugnaba por frustrar constantemente las expectativas de Superman para confundirlo e impedirle que atajase sus diabólicos planes<sup>[2]</sup>.

A pesar de ser un muchacho de escuela elemental me di cuenta de que esta descripción de la vida universitaria no era probablemente muy realista. Sin embargo la cubierta me proporcionó dos visiones que a lo largo del tiempo han resultado ser bastante precisas. La primera es que todos los profesores de universidad de todos los tiempos siempre visten birretes y togas. La segunda es que todos los profesores de universidad son hombres de raza blanca de ochocientos años.

Aunque esto pueda haber sido la primera señal que tuve de que los *comic books* y la universidad podían coexistir, no sería la última. A lo largo de los años he seguido disfrutando leyendo y coleccionando cómics. No se trata de un «placer culpable» por mi parte, simplemente debido a que no creo en los placeres «culpables». El esnobismo es justamente la cara pública de la inseguridad. A uno le gusta lo que le gusta, y no debiera sentirse culpable en relación con sus intereses o pasatiempos (a menos, por supuesto, de que se trate del golf). Y en mis lecturas he advertido que los escritores y los artistas creadores de historias de cómics de superhéroes consiguen que su ciencia resulte correcta más veces de lo que cabría esperar. Aquellos que no están familiarizados con los cómics de superhéroes quedarían sorprendidos al saber que *todo* en los cómics podría ser científicamente correcto y que uno puede aprender mucha ciencia leyéndolos.



Fig. 1. Cubierta de *Action Comics* n.º 333, una escena de la desafortunada visita de Superman a la Universidad de Ingeniería de Metrópolis. © 1965 National Periodical Publications Inc. (DC)



**Fig. 2.** *World's Finest*, n.º 93. En una escena un malvado cuya inteligencia ha sido potenciada artificialmente describe su plan para valerse de las ondas de choque subterráneas que permita determinar la localización oculta de la Batcueva.

© 1958 National Periodical Publications Inc. (DC)

Un ejemplo típico se muestra en la figura 2, que presenta una escena del número 93 de abril de 1958 de *World's Finest* (*Lo mejor del mundo*). Las grandes estrellas de National Comics (que entonces se convirtió en Detective Comics y hoy en día se conoce como DC Comics) son Superman, Batman y Robin, y cada ejemplar de *World Finest* contenía una aventura del hombre de acero y del Dúo Dinámico formando equipo. En esta historia, un malvado, Victor Danning, incrementó de manera accidental su inteligencia hasta el nivel de genio durante un intento chapucero de robar una máquina de «amplificación mental». Utilizando esos poderes mentales acrecentados, empieza a cometer una serie de supercrímenes, requiriendo la atención de Batman, Robin y Superman. Después de que varios de sus planes hayan sido frustrados de inmediato por nuestros héroes, Danning decide adoptar una estrategia preventiva e intenta descubrir el cuartel general secreto de Batman y Robin, la Batcueva. (No queda del todo explicado cómo derrotaría a Batman y Robin, y se da por supuesto que cualquier malhechor desearía conocer el paradero de la Batcueva). Danning instruye a su sicario para colocar barras de dinamita a lo largo del perímetro de Gotham City. Monitorizando las ondas de choque resultantes en su «radar sismográfico», Danning explica que las ondas que pasan a través de una gruta tendrán diferentes velocidades que las que discurren a través de la roca sólida, y de este modo puede discernirse la situación de la Batcueva. En este ejemplo el diabólico genio Victor Danning se apoya en

terreno científico sólido, puesto que es cierto que la velocidad del sonido o de una onda de choque depende de la densidad del material a través del cual se propaga. De hecho, los geólogos hacen uso de esta variación de la velocidad de las ondas de sonido para localizar bolsas subterráneas de petróleo o de gas natural.



Fig. 3. Otra escena del número 93 de *World's Finest*, en la que el «ex científico delincuente» Victor Donning se entera por primera vez del aparato «amplificador mental», así como de sus inconvenientes.

© 1958 National Periodical Publications Inc. (DC)

La descripción en los cómics de científicos reales y del modo como trabajan, por otra parte, deja con frecuencia mucho que desear. En el mismo ejemplar de *World's Finest*, se presenta un retrato menos realista de los científicos, como se aprecia en la figura 3. Aquí el inventor del «amplificador mental», el Dr. John Carr, describe su último experimento ante una reunión de expertos. Hace ostentación de que su dispositivo «incrementará cien veces la potencia mental de cualquier persona». Por desgracia, Carr anuncia que existe una complicación, pues «hay un componente que todavía falta [antes de que funcione su máquina], y todavía no he hallado de qué se trata». Esto es equivalente a inventar una máquina que convierte el plomo en oro o el agua en gasolina, pero que necesita un elemento clave, que no se sabe ni siquiera si existe, para funcionar. Raramente se asiste a presentaciones en congresos de física de trabajos en un estado tan inacabado (al menos no intencionadamente). Victor Danning asiste a esta presentación (es aquí donde se inspira para robar el amplificador mental a pesar de su fallo intrínseco de diseño), y se le etiqueta en la leyenda de la viñeta como un «ex científico delincuente». Esta parte suena a cierta, pues hablando no como físico sino en nombre de todos los científicos, una vez que usted se convierte en un «delincuente» le sacamos a patadas del club y le despojamos de su título de «científico».

La incorporación de principios científicos en las aventuras de los superhéroes se halla tan sólo

ocasionalmente en las historietas a partir de la década de 1940 (llamada por los aficionados «la Edad de Oro» de los cómics), pero es mucho más común en los cómics a partir de finales de los años cincuenta y sesenta (época conocida como «la Edad de Plata»). Entre esas dos épocas se halla la «Edad Oscura» de los cómics, cuando las ventas descendieron y el propio concepto de los superhéroes cayó bajo el ataque de psiquiatras, educadores y congresistas. Esas circunstancias que condujeron a que se produjeran dos «edades» en los *comic books* de superhéroes son también responsables, puede argumentarse, del tono «científico» de los cómics de la Edad de Plata publicados en la era posterior al *Sputnik*. Puesto que nos apoyaremos en superhéroes para ilustrar conceptos científicos en el resto de este libro, es útil dedicar un momento a considerar las raíces tempranas de esos personajes misteriosos.

### Breve historia de los cómics de superhéroes

Antes de que aparecieran los cuadernillos existían las tiras de cómics<sup>[3]</sup>. Hojas semanales de gran tamaño en la Inglaterra victoriana apodadas «horrores de a penique» que mostraban relatos de humor, de algún modo en la tradición del teatro de variedades. Su popularidad entre los trabajadores pobres ofendía la sensibilidad de la clase media.

Una rivalidad feroz en la prensa en la década de 1890 entre Joseph Pulitzer y William Randolph Hearst espoleó la creación de las tiras de cómic de los periódicos, las cuales demostraron ser extremadamente populares entre los inmigrantes recién llegados que conocían el inglés solamente a medias. Esas tiras se convirtieron en armas muy efectivas en las guerras de divulgación informativa de la época, y la innovación de imprimir una tira de cómic en color (un cambio radical, a pesar de que se empleaba solamente el color amarillo) catapultó los periódicos de Hearst por delante de los de sus competidores. De hecho, tan estrechamente asociados quedarían los periódicos de Hearst con la tira de cómic tan popular y visualmente llamativa, *The Yellow Kid* (*El chico amarillo*) de Richard F. Outcault, que la crítica denigraría todos los periódicos sensacionalistas de Hearst con el mote de «prensa amarilla».

A pesar de incursiones ocasionales presentando las tiras de cómic en formato de revista impresa (tal como un cómic de *Buster Brown* publicado en 1903, *Little Nemo*, en 1906, y *Mutt y Jeff*, en 1910), los cuadernos (o *comic books*) no llegaron a establecerse firmemente hasta 1933. En la época los quioscos de periódicos se llenaron de revistas baratas enormemente populares, que contenían una novela original completa por solamente diez centavos. Los costes se mantuvieron bajos, en parte por estar impresos en papel de pobre calidad, que es lo que dio su nombre a dichas publicaciones<sup>[4]</sup>. Hubo títulos populares dedicados a historias de misterio, tales como *Detective Fiction Weekly* (*Semanario de historias de detectives*) y *Black Mask* (*Máscara Negra*), que fueron publicadas por primera vez por Dashiell Hammett y Raymond Chandler; de ciencia ficción, tales como *Amazing Stories* (*Historias extraordinarias*) y *Astounding Stories* (*Historias asombrosas*), que comenzaron Theodore Sturgeon, Isaac Asimov y Ray Bradbury; de horror y fantasía, tales como *Unknown and Weird Tales* (*Cuentos de lo desconocido y sobrenatural*), territorio de H. P. Lovecraft, Robert E. Howard e incluso del dramaturgo Tennessee Williams; y finalmente títulos de acción y aventuras como *The Shadow* (*La sombra*), *The Spider* (*La araña*), *G-8 and His Battle Aces* (*G-8 y sus*



ases de combate), *The Mysterious Wu-Fang* (El misterioso Wu-Fang), y *Doc Savage*. En la cima de su popularidad algunos títulos de novela barata<sup>[5]</sup> vendieron varios cientos de miles de ejemplares al mes, lo cual representaba mucho dinero durante la época de la Depresión, a pesar de venderse a diez centavos cada uno. Es este entorno altamente competitivo, George Janosik, George Delacorte, Harry Wildenberg y Maxwell C. Gaines (profesor de escuela antes de convertirse en editor de cómics) decidieron probar suerte y volver a imprimir las tiras de cómic de periódico en color de los suplementos dominicales en forma de hojas de tamaño de noticiero ilustrado de papel de periódico, plegadas en hojas de 16,83 cm × 25,71 cm<sup>[6]</sup>, estableciendo en adelante el formato estándar para los *comic books*, que ha permanecido sin cambio hasta hoy. El cómic *Funnies on Parade* (*Desfile de historias divertidas*) fue distribuido con cupones de productos de Procter & Gamble y otras ofertas semejantes de promoción, y la popularidad de la primera tirada de 10.000 ejemplares sirvió de inspiración para pegar una etiqueta con el precio de diez centavos en otra edición y venderlos en los quioscos de revistas. La rapidez con la que se vendieron estos cómics de quiosco, a pesar del hecho de que solamente contenían reimpresiones de un material que había estado disponible previamente en dominicales de periódicos, convenció a Gaines de que había futuro en esos «libros divertidos».

Las tiras de cómic de los periódicos se cedían a periódicos regionales a través de «sindicatos de distribución» que controlaban los derechos de reimpresión para dichas tiras. Con el fin de satisfacer la demanda de los editores de *comic books* que no podían obtener (o que no querían pagar por ellos) derechos de reimpresión por las tiras de periódicos, Major Malcolm Wheeler-Nicholson contrató a un grupo de jóvenes artistas y guionistas ansiosos de trabajar y les encargó material original de cómics. Esas historietas de nuevo cuño, que ya no eran reimpresiones de tiras convencionales de periódicos, se publicaron con el nombre de *New Fun Comics* (*Nuevos cómics divertidos*) por la National Allied Publications. Las páginas de cómic dibujadas, escritas y rotuladas que salieron del estudio de Wheeler-Nicholson permitieron a los editores soslayar las altas tarifas que exigían los entonces poderosos sindicatos de impresores. Pronto las historias que habían ocupado las revistas de novelas baratas se narraron mediante imágenes, y los cómics que presentaban historias policíacas y de detectives, de horror, de animales cómicos y de chistes directos, de héroes de aventuras, agentes secretos y luchadores contra el crimen con poderes sobrenaturales llenaron los quioscos de prensa. A esa serie se incorporó en 1938 un visitante extraño venido de otro planeta con poderes y capacidades que superaban con mucho los de las personas mortales.

Superman era la criatura salida de las mentes de Jerry Siegel y Joseph Shuster, dos adolescentes de Cleveland que soñaban con grandes ganancias a través de la creación de una tira de aventuras popular para periódico. Combinando los atributos de dos de los personajes de Edgar Rice Burroughs, Tarzán y John Carter de Marte, Siegel y Shuster revolucionaron con sus personajes la historia de aventuras convencional de la ciencia ficción. En lugar de un habitante de la Tierra viajando a un extraño y nuevo planeta (como en las historias protagonizadas por Flash Gordon o por Buck Rogers), un ciudadano de un mundo distante con poderes extraordinarios llegó a nuestro planeta. Esta innovación, junto con el uniforme lleno de colorido que vestía el héroe (inspirado, quizá, por la vestimenta de los forzudos que actuaban en los circos en la época), y la entonces relativamente novedosa introducción de una identidad secreta para el heroico aventurero, hicieron su tira tan insólita por lo original que fue

rápida­mente rechazada por cada sindicato de distribución de periódicos con los que entraron en contacto. Tras cuatro años de rechazos constantes, Siegel y Shuster estaban lo bastante desesperados como para intentar vender su concepto de Superman al mercado decididamente inferior de *comic books*. Obtuvieron finalmente una entrevista con Sheldon Mayer, un joven editor que supo ver potencialidad en las toscas y primitivas tiras de Siegel y Schuster. Mayer convenció a Vin Sullivan de que este novedoso personaje era lo que se necesitaba para un nuevo título de revista de cómic que había que imprimir pero para la cual faltaba una historia de cabecera. Sin tiempo para cambiar la tira con el fin de encajarla en el formato del *comic book*, se cortaron y pegaron a la carrera en una historieta de trece páginas las viñetas de la muestra para los periódicos correspondientes a dos semanas. Con una cubierta adaptada de una de las viñetas de las tiras que mostraba a Superman levantando por encima de su cabeza un automóvil sedan mientras los malhechores escapaban despavoridos, apareció en los quioscos en junio de 1938 el primer número de *Action Comics*, con un precio en la cubierta de diez centavos. El resto, según la conocida frase, es historia.

La biología evolutiva nos enseña que las mutaciones al azar pueden conducir a la creación de nuevas especies. Cuando tales especies presentan una adaptación superior a un entorno cambiante, pueden dominar rápidamente un nicho ecológico. De modo parecido, el cómic percutió una cuerda resonante en los lectores de la era de la Depresión, y el éxito fue inmediato. Pronto los quioscos se llenaron de cómics de superhéroes, exhibiendo personajes poseedores de una serie deslumbrante de poderes y capacidades.

Todos esos nuevos personajes compartían el atributo de diferir lo bastante de Superman, para evitar asemejarse a la publicación de Fawcett, Captain Marvel (Capitán Marvel o Capitán Maravillas), y así eludir una demanda por infringir los derechos de copia de National Publications, propietaria de los derechos legales de la creación de Siegel y Shuster. Muchos de esos héroes recién nacidos tenían un único superpoder, tal como la supervelocidad (Flash, Johnny Quick), la capacidad de volar (Hawkman, Black Condor), la superfuerza (Hour-man, Capitán América), u otra distinta (Batman). Algunos de ellos obtuvieron sus superpoderes a través de «medios científicos». El Flash de la década de 1940, por ejemplo, se volvió súper rápido tras un accidente en un laboratorio químico en el cual inhaló «agua pesada»<sup>[7]</sup>. El químico Rex Tyler elaboró una píldora que proporcionaba fuerza y velocidad aumentadas durante sesenta minutos, permitiéndole luchar contra la delincuencia con el nombre de Hour-man (el Hombre-hora). La armada 4F se opuso a que Steve Rogers se convirtiera en el superhéroe Capitán América mediante una serie de inyecciones con un suero de «supersoldado» (actualmente eso sería descrito como «esteroides»). Mucho más corriente, sin embargo, era el origen místico o sobrenatural de las capacidades de los protagonistas, debidas a la adquisición de objetos mágicos de algún rincón escondido del mundo, o a la exposición a los mismos. De esta manera, como sucedería a lo largo de su existencia, los cómics reflejaban meramente el espíritu de los tiempos<sup>[8]</sup> de la cultura popular. Así, por ejemplo, en los años cuarenta Linterna Verde (Green Lantern) era un héroe que se había apropiado de un farol misterioso originario de la antigua China, con el cual podía modelar un anillo que dotaba al que lo usaba de una amplia variedad de poderes, pero que era ineficaz frente a la madera. Vista en el contexto cultural de la época, el mundo era un lugar más grande en los años cuarenta. Para la imaginación adolescente el Lejano Oriente y el Congo eran todavía vastos depósitos de poderosos

secretos y artefactos misteriosos. Cuando el personaje de Linterna Verde fue reinventado en 1989 se le proporcionó un nuevo origen y una nueva vestimenta, y el nuevo farol y el anillo pasaron a ser artefactos extraterrestres. La vulnerabilidad del anillo a objetos de color amarillo se atribuía ahora a una impureza química en su composición, que no se podía eliminar sin que perdiera su eficacia<sup>91</sup>. De modo parecido Hawkman, colega de Linterna Verde, era en 1940 un príncipe egipcio reencarnado en el presente, mientras que en la versión del mismo héroe de la década de 1960 era un policía intergaláctico del planeta Thanagar. Esta transición del origen continúa hoy en día. En 1962, Peter Parker obtuvo los poderes de Spiderman al ser mordido por una araña que se había vuelto accidentalmente radiactiva en una demostración de laboratorio de física, mientras que en la reinterpretación del año 2000 del mismo personaje (así como en la versión para el cine del año 2002), la mordedura fatídica fue debida a una superaraña modificada mediante ingeniería genética que escapó durante una demostración de laboratorio de biología molecular. Así pues, la constante parece ser que la creación del superhéroe es un modo de vincular la ansiedad cultural del momento, sea la del «otro extraño» en los cuarenta, la radiactividad en los sesenta o la manipulación genética del presente.

Las encarnaciones originales de diversos superhéroes a finales de los años treinta y en la década de los cuarenta eran producto de su tiempo y reflejaban la vida durante la Gran Depresión y la Segunda Guerra Mundial.

Después de la guerra, los soldados que habían adquirido el hábito de leer cómics en el extranjero siguieron comprándolos a su regreso a Estados Unidos, y ciertos editores respondieron a esta vieja clientela con historias para adultos en las que se exhibía más violencia gráfica. Algunos de los jóvenes escritores y artistas de cómics habían sido reclutados también para el servicio en el ejército, y sus experiencias de guerra dieron lugar a un tono más serio, y en ocasiones más tenebroso, a su trabajo posterior a la guerra. Desde su inicio, los *comic books* intentaron atraer a lectores más jóvenes. En 1945 Maxwell Gaines finalizó su asociación con National Comics y comenzó una nueva firma de publicaciones llamada Educational Comics (cómics educativos), imprimiendo títulos tales como *Picture Stories from Science (Historias gráficas de la Ciencia)*, *Picture Stories from American History (Historias gráficas de la Historia de América)* y *Picture Stories from the Bible (Historias gráficas de la Biblia)*.

Después de su intempestivo fallecimiento en 1947, su hijo William Gaines cambió el nombre de la empresa por Entertaining Comics (EC) y desplazó su catálogo a cómics como *Tales from the Crypt (Cuentos desde la cripta)*, *Crime Suspense Stories (Historias de delitos e intriga)*, *Weird Science-Fantasy (Fantaciencia insólita)*, y *The Vault of Horror (La cámara del horror)*. Estos cómics nunca fueron adecuados ni tampoco diseñados para el mismo público que el Capitán Marvel. Fue solamente cuestión de tiempo el que alguien se diera cuenta y se quejara de ello.

El libro más vendido de 1953, *Seduction of the Innocent (Seducción del inocente)*, del Dr. Fredric Wertham, argumentaba enérgicamente que tales espeluznantes historias corrompían las mentes de los jóvenes, empujándolos directamente a la delincuencia juvenil. En un ciclo que parece que se repite en cada generación, se produjo una creciente preocupación entre los padres y las autoridades en la era posterior a la Segunda Guerra Mundial acerca de los efectos vulgarizantes de la cultura popular en las actitudes y modales de los adolescentes. El Subcomité del Senado de Estados Unidos sobre la

delincuencia juvenil, encabezado por el ambicioso senador Estes Kefauver, presentó evidencias acerca de la conexión entre los *comic books* y los delitos de adolescentes. Inicialmente el comité intentó enfocar la atención solamente en los cómics de crimen y de horror, pero Wertham, uno de los consejeros del subcomité, presentó cómics de superhéroes a la atención del senador. Tratando de evitar la imposición de controles y reglas federales, los principales editores de *comic books* crearon una agencia autorreguladora llamada Comics Code Authority (CCA). Los editores desarrollaron una serie de reglas para normalizar el contenido aceptable de los cómics, con instrucciones explícitas de que cualquier libro que llevara en su cubierta el sello de aprobación de la Comics Code Authority tendría prohibida la exhibición de escenas de sangre, lujuria, consumo de drogas, zombis y vampiros. Muchas de las normas creadas por la CCA parecían diseñadas exclusivamente para asegurar la casi completa destrucción de la línea de cómics de EC (el único superviviente fue una revista satírica relativamente nueva llamada *Mad*). Todas las historias de cómics tenían que ser sometidas a la CCA (cuya plana mayor estaba fundada por los editores) para su aprobación antes de ser publicadas, de modo parecido al actual Rating Board que veta la películas.

Aunque representó un papel importante durante los años cincuenta y sesenta convenciendo a los padres de que los *comic books* podían contemplarse como entretenimiento «sano» para los niños, la influencia de la Comics Code Authority se ha desvanecido con el tiempo, a medida que ha aumentado la edad media del lector estándar de cómic. Esto queda reflejado en el tamaño decreciente del sello de la CCA en las cubiertas de las revistas de cómic. En 1964, tenía un tamaño similar al de un sello de correos, de unos dos centímetros cuadrados (por ser una prominente herramienta de marketing para convencer a los padres de que la historieta contenida en su interior era aceptable para sus hijos), mientras que un 1984 medía algo más de un centímetro cuadrado y en el 2004 ya era una marca apenas perceptible de seis décimas de centímetro cuadrado (para DC Comics; Marvel Comics abandonó su participación en la CCA en el 2001 y emplea un sistema de etiquetado propio más o menos parecido a las categorías PG, PG-13 y R utilizadas por las películas).

El descenso de la ventas debido a la pérdida de una gran red de distribución y a la competencia por parte de la televisión llevaron casi al colapso a la industria del cómic, y desde 1953 hasta 1956 solamente continuó publicándose una media docena de cómics de superhéroes, una reducción impresionante frente a los 130 títulos diferentes disponibles en los quioscos en el cenit de la Edad Dorada. Cómics con historias divertidas de animales, aventuras de vaqueros y romances juveniles fueron alternativas más seguras para las pocas empresas que perseveraron en la publicación de cómics durante este período.

En 1956 National Comics decidió probar el terreno de superhéroes con la reintroducción de Flash en el número 4 de *Showcase*. Las cifras de ventas de cada ejemplar de *Showcase* que presentaba a Flash indicaron que el mercado de los superhéroes había retornado, y durante los siguientes pocos años National volvió a comprar nuevas versiones de Linterna Verde, Atom, Hawkman y otros. Había comenzado la Edad de Plata de los *comic books* de superhéroes, y desde entonces los superhéroes se han mantenido como uno de los motivos principales de los cómics.

Desde sus mismos comienzos en *Showcase* número 4, en estas historias aparecieron ejemplos de

principios de física correctamente aplicados. Con el lanzamiento del satélite soviético *Sputnik* en 1957 en el apogeo de la guerra fría, hubo una considerable preocupación con respecto a la calidad de la educación científica que estaban recibiendo los escolares americanos. El sello de la Comics Code Authority en sus cubiertas garantizaba que las historias de los cómics no eran dañinas para los lectores jóvenes, y la inclusión de los conceptos científicos es posible que convencieran a algunos de que había un beneficio neto positivo en esas aventuras en cuatricromía.

Además de valerse de referencias científicas, a partir de la Edad de Plata los cómics llevaban con frecuencia insertos en sus historias fragmentos de otras disciplinas cultas. Así, por ejemplo, el argumento de «The Adventure of the Cancelled Birthday» («La aventura del cumpleaños cancelado»), del número 21 de *The Atom* (escrito por Gardner Fox, que era a la vez abogado y escritor de revistas baratas de ciencia ficción), giraba en torno al oscuro hecho de que en 1752, cuando Gran Bretaña adoptó el calendario gregoriano para reemplazar al Juliano, se omitieron once días durante la transición. Es decir, el 2 de septiembre de 1752 fue seguido al día siguiente por el 14 de septiembre, con el fin de armonizar el calendario británico con el de otras partes de Europa. (Los británicos, disgustados con su gobierno y creyendo que se les engañaba, se amotinaron bajo el grito «Devolvednos nuestros once días».)

A los lectores jóvenes se les presentó de ese modo a través de sus cómics de superhéroes los hechos y los personajes históricos que no se recogían normalmente en sus clases de historia. Dos publicaciones más tarde la columna de cartas de *The Atom* imprimió una queja de uno de dichos aficionados que argumentaba acerca de la pobre elección de los personajes históricos, tales como el oscuro juez Fielding. El editor de los cómics *Atom*, Julius Schwartz, responsable de la reintroducción de Flash en 1956, defendió la historia en la columna de cartas, destacando que ya era hora de que el lector se familiarizara, como lo había hecho *Atom*, con Henry Fielding, el autor de *Tom Jones*.

Aunque no estuvieran tejidos en la trama, ocasionalmente se mostraban en los cómics retazos de conocimientos históricos o científicos a través de la presencia de rectángulos con una leyenda que trataba de un hecho que no tenía que ver directamente con la historia. Así, por ejemplo, en el número 28 de *Brave and the Bold (El listo y el atrevido)*, que presentaba la primera aparición de la alianza de los superhéroes de National Comics formando la Liga de América por la justicia, Aquaman nada cerca de un pez globo que tiene una breve conversación con él utilizando su «telepatía de pez». El pez globo refiere cierta información valiosa recogida mientras flotaba en la superficie del océano. Una leyenda en esta viñeta nos informa de que «inhalando aire en un saco especial detrás de su garganta, el pez globo se infla como un balón de fútbol, con lo cual sube hasta la superficie y flota del revés». ¿Por qué perder tiempo incluyendo tales leyendas educativas? Puede que fuera como consecuencia de las costumbres de los anteriores escritores de novela barata escribiendo tales relatos. Antes de la edición de los *comic books* en National, Mort Weisinger y Julie Schwartz, aficionados a la ciencia ficción de toda la vida, habían sido agentes literarios de escritores de ciencia ficción y de fantasía científica. Como tales habían recorrido bibliotecas en busca de oscuros conocimientos históricos y naturales. Alfred Bester, ganador del premio Hugo (un premio para escritores de ciencia ficción) y autor de los clásicos de ciencia ficción *The Demolished Man (El hombre demolido)* y *The Stars, My Destination (Las estrellas, mi destino)*, escribió también guiones de cómics durante la década de 1940 —una de sus aportaciones fue el libro original

de Linterna Verde—. En un ensayo autobiográfico, Bester habla de haber dedicado horas buscando a través de libros de consulta en la Biblioteca Pública de Nueva York, a la caza de temas históricos con los cuales pudiera construir una historia. Conocer muchas cosas banales podía ayudar al balance financiero final de esos escritores de novelas baratas, ya que sus autores eran pagados por el número de palabras, por lo que pavimentaban su trabajo con toda suerte de asuntos tangenciales apenas relevantes, tal como refleja este chiste:

**Pregunta:** ¿Cuántos escritores de novela barata hacen falta para cambiar una bombilla?

**Respuesta:** La historia de la bombilla de luz es una narración extensa e interesante, que comienza en 1879 en el tranquilo pueblo de Menlo Park, en New Jersey, y sigue hasta el día de hoy...

Aunque los escritores de cómics de la Edad de Plata tuvieran un incentivo en lo que respecta a su verborrea, es probable asimismo que estuvieran motivados por consideraciones de supervivencia para incluir en sus historias elementos educativos. Como mencioné antes, la introducción de hechos y principios de ciencia en esas historias podía haber procedido de un deseo genuino por parte de los escritores y editores para educar, o quizás por un instinto de conservación para evitar alguna llamada de atención por parte del Congreso.

### **Un físico lee un cómic**

Leyendo ahora *comic books* clásicos y contemporáneos de superhéroes, con la ventaja de un doctorado en Físicas, he encontrado muchos ejemplos correctos de descripción y aplicación de conceptos físicos en los cómics de superhéroes. Naturalmente, casi sin excepción, el uso de superpoderes en sí mismo implica violaciones directas de las leyes conocidas de la física, requiriendo que se ponga en suspenso la actitud crítica de forma deliberada y voluntaria. No obstante, muchos cómics necesitaban solamente una única «excepción milagrosa» —algo que se tiene que aceptar como cierto para hacer plausible al personaje— y el resto de lo que sigue como la lucha entre el héroe y el villano debería ser consistente con los principios de la ciencia. Aunque el interés de estas historias ha estado principalmente en el entretenimiento, si al mismo tiempo el lector es educado también, ya sea accidental o deliberadamente, eso es un beneficio extra.

Son esos felices beneficios, tales como el ilustrado en la figura 2, los que me gustaría considerar aquí. En este libro presentaré una visión de conjunto de ciertos principios científicos, utilizando ejemplos de su aplicación correcta tal como se hallan en los cómics. Describiré personajes y situaciones que iluminarán diversos conceptos físicos, en lugar de considerar sistemáticamente la física que subyace bajo una serie de superhéroes. (En consecuencia es concebible que su superhéroe favorito no se tome en cuenta. Sepa que varios de mis favoritos tampoco se clasificaron). Al final de este libro el lector habrá quedado expuesto a los conceptos clave de una clase de introducción a la física, con un poco de mecánica cuántica de alto nivel y de física del estado sólido añadidos con el fin de distraer. Examinando los principios físicos que subyacen en ciertas aventuras de cómics, habremos ganado a la vez una comprensión de los mecanismos que hay tras muchas aplicaciones prácticas del mundo real, desde la televisión hasta los teléfonos, pasando por la nucleosíntesis estelar de los elementos.

Me centraré principalmente aunque no de forma exclusiva en el período de la Edad de Plata de las historias de los cómics, desde la reintroducción de Flash en el número 4 de *Showcase* en 1956 hasta la muerte de Gwen Stacy en el número 121 de *The Amazing Spider-Man* en 1973, porque los escritores de este período se esforzaron más que los de la Edad de Oro para incorporar principios científicos en sus historias. Además, los personajes de la Edad de Plata han demostrado una popularidad duradera, y sus estatus icónicos harán más fácil referirse a sus proezas sin obligar al lector a consultar constantemente las arcas de publicaciones anteriores de su tienda local de cómics para descubrir su historia anterior. Es muy fácil hallar defectos y errores en la ciencia referenciada en las historias de cómics, y ésta no es la intención de este libro. Además de ser poco elegante y falto de compasión (como debería ser obvio, esas historias nunca han intentado funcionar como manuales científicos, a pesar de los ocasionales intentos de estudiantes de sustituirlos subrepticamente), es más difícil aclarar un asunto cuando los únicos ejemplos ilustrativos son negativos. A pesar de ello, a veces hallaremos que algunas escenas de los cómics son simplemente no plausibles físicamente, incluso si se las considera una «excepción milagrosa».

Antes de empezar me gustaría decir algunas palabras acerca de una mala interpretación relativa a la física. A pesar de la impresión recibida a través de películas populares, para ser físico no es preciso un conocimiento enciclopédico de ecuaciones y constantes fundamentales, unido a la capacidad para realizar mentalmente complejos cálculos aritméticos con precisión y velocidad robóticas. La física no tiene que ver con la memorización de todas las respuestas, sino más bien con saber formular las cuestiones correctas. Pues cuando se plantea la pregunta correcta acerca de un fenómeno, o bien la respuesta es clara o al menos se manifiesta la manera de cómo se ha de proceder para obtenerla.

Para ilustrar que la formulación de una cuestión correcta puede ser más importante que un saco lleno de respuestas correctas, consideremos el sencillo experimento físico de lanzar una pelota. Hay muchas cuestiones que podemos plantear, tales como ¿qué altura alcanza la pelota?, ¿cuán lejos se desplaza?, ¿cuánto tiempo permanece en el aire?, ¿a qué velocidad se mueve?, ¿cuál es la forma geométrica de su trayectoria? Sin embargo, sostendré la opinión de que hay una pregunta sencilla que implica a todas las anteriores y que va directamente al centro de las cuestiones relativas al movimiento de la pelota. Esa sencilla pregunta es la siguiente: ¿tiene la pelota alguna alternativa? Si la pelota no tiene ninguna elección en su movimiento, si carece de libre albedrío, entonces su trayectoria está completamente determinada por fuerzas externas a ella. Una vez que determinemos la naturaleza de tales fuerzas y de cómo influyen en el movimiento de la pelota, podremos calcular su trayectoria para una velocidad inicial dada por el lanzador. Esta trayectoria calculada contendrá entonces toda la información que deseemos relativa a la altura a la que se eleva la pelota, lo lejos que alcanza, su tiempo de vuelo, cuál es su velocidad, etcétera. Si repetimos a continuación el lanzamiento exactamente con la misma posición y velocidad iniciales, entonces la pelota deberá trazar exacta y fielmente la trayectoria calculada, puesto que no tiene ninguna elección en este asunto.

En esto consiste la belleza y la atracción de la física, al menos para aquellos de nosotros que somos lo bastante afortunados como para ganarnos la vida con su estudio. La promesa es que, si podemos determinar las fuerzas que actúan sobre un objeto y cómo influyen en el movimiento del mismo, seremos capaces de predecir el desarrollo de sucesos futuros. Realizando cuidadosos

experimentos, tales predicciones pueden ponerse a prueba empíricamente y, si son correctas, confirmar nuestra comprensión de cómo opera la naturaleza. Por otra parte, si el experimento contradice nuestro modelo (un resultado bastante distinto), modificaremos nuestras ecuaciones y lo intentaremos de nuevo utilizando la prueba fallida como una clave importante acerca de lo que hemos dejado de tener en cuenta en el cálculo inicial<sup>[10]</sup>. De esta manera progresa nuestra comprensión de la naturaleza hasta que obtenemos un modelo válido que se designa como una teoría. Para descartar cualquier idea de que a través de este análisis exhaustivo se obtiene «una simple teoría», diremos que una afirmación de ese tipo es equivalente a describir el diamante Hope<sup>[11]</sup> como «un simple cristal».

El conocimiento científico solamente se adquiere al precio de una duda acentuada: cuanto más aprendemos, más claramente vemos todo lo que permanece como incierto. La duda está imbricada en la ciencia, puesto que las únicas respuestas que podemos creer son las que sobreviven al crisol de las preguntas y de las pruebas experimentales. Espero compartir con usted en este libro el verdadero placer de ver cómo plantear algunas cuestiones clave puede conducir a un caudal de respuestas acerca del mundo en que vivimos.

Comienzo, como hacen todos los libros de texto de física para principiantes, con las leyes fundamentales del movimiento tal como fueron descritas por Isaac Newton. Ajustándose a una contribución tan original y profunda al pensamiento moderno, nuestro primer ejemplo de cómic comporta también una contribución igualmente fundamental para la civilización occidental. Me refiero, naturalmente, al primer cómic del superhéroe más rápido que una bala disparada, más potente que una locomotora y, lo más relevante para nuestra próxima discusión, capaz de saltar por encima de los edificios más altos de un solo brinco.



## 1. ¡Arriba, arriba y fuera!

**FUERZAS Y MOVIMIENTO.** La concepción original de Superman por parte de Jerry Siegel y Joseph Shuster era la de un héroe con una generosa dosis de ciencia ficción añadida para prestar un aire de plausibilidad a la gran fuerza de su personaje. Tal como se describe en el número 1 de *Superman*, Jor-El, un científico del lejano planeta Krypton, descubre que su mundo está próximo a estallar y que toda su población morirá. Poseyendo solamente un pequeño prototipo de cohete espacial, él y su mujer deciden salvar a su bebé, Kal-El, enviándolo a la Tierra y librándolo así de compartir su destino<sup>[12]</sup>. Después de viajar grandes distancias a través de la vastedad del espacio, el cohete cae en la Tierra con su único pasajero en buenas condiciones. Descubierta por unos granjeros sin hijos de Kansas, los Kent, Kal-El es llevado inmediatamente a un orfanato. Más tarde, impulsados por un sentimiento de culpa, los Kent regresaron al orfanato (donde el superbebé estaba haciendo estragos), lo adoptaron, le pusieron por nombre Clark y lo educaron como a su propio hijo humano. A medida que Kal-Clark Kent crecía hasta hacerse adulto, desarrollaba unas capacidades extraordinarias con las cuales mantuvo su lucha sin fin por la verdad, la justicia y el estilo de vida americano.

La causa de los poderes de Superman en la Tierra fue atribuida inicialmente a su proveniencia de Krypton, específicamente al hecho de que su planeta de origen tenía una gravedad mucho más fuerte que la de la Tierra. Así, por ejemplo, el tamaño mucho menor de la Luna en comparación con la Tierra, da como resultado un campo gravitatorio mucho menor, de modo que los objetos en la Luna pesan menos que en la Tierra. Como consecuencia de ello, un terrícola cuyos músculos y huesos están adaptados a la gravedad terrestre es capaz de saltar distancias mayores y levantar objetos mucho más masivos sobre la superficie lunar. De modo parecido, la gran fuerza de Superman («más potente que una locomotora») y su piel más resistente (para atravesarla hacía falta «más que el disparo de un cañón») eran el resultado de su cambio de situación en un planeta con una gravedad mucho más débil que la de Krypton. Aunque Superman fue enviado a la Tierra cuando niño, probablemente su ADN kriptoniano estaba codificado para el desarrollo de músculos y huesos apropiados a un campo gravitatorio más intenso.

A finales de la década de 1940, Superman habría obtenido el poder de volar y era capaz de elegir y alterar su trayectoria después de abandonar el suelo. En este punto puede considerarse que Superman había alcanzado el libre albedrío en relación con las leyes de la física. Con el tiempo adquirió un conjunto de otras capacidades que pudieran no estar razonablemente justificadas por la gravedad más

intensa de su planeta de procedencia. Esos poderes incluían diversos modos de visión (calor, rayos X y otros), superoído, superrespiración (exhalación o soplido), e incluso superhipnotismo<sup>[13]</sup>.

El origen de los poderes de Superman fue revisado posteriormente, en el número 262 de *Action Comics*, para aducir que las fantásticas capacidades de nuestro héroe provenían del hecho de que la Tierra orbitaba en derredor de un sol amarillo, a diferencia del sol rojo de Krypton. El color de un sol es una función tanto de la temperatura de su superficie como de la atmósfera a través de la cual se ve. La parte azul del espectro solar es dispersada en gran proporción por la atmósfera, lo cual es la razón por la cual el cielo se ve azul. Visto de frente nuestro sol se ve amarillo porque la atmósfera es también más absorbente en la parte azul del espectro, excepto durante el alba o el ocaso, cuando la posición del sol está baja en el horizonte y su luz debe viajar una gran distancia a través de la atmósfera. Casi todas las longitudes de onda se absorben en ese caso excepto las de la luz roja, de menor energía, que es lo que proporciona a las puestas de sol su tono característico (el mayor número de partículas en el aire al final del día comparado con el comienzo del mismo también contribuye a la diferencia de matices entre el ocaso y el amanecer).

Esas características espectrales son en su mayor parte independientes de la composición química de los gases que forman la atmósfera terrestre. No hay ningún mecanismo físico por el cual un desplazamiento en la longitud de onda principal de la luz del sol desde el amarillo (una longitud de onda de unos 570 nanómetros, o 570 mil millonésimas de metro) a la luz roja (650 nanómetros) pueda dotar a alguien con la capacidad de doblar el acero con sus propias manos. Por lo tanto en esa etapa de su historia, Superman dejó de ser una tira de ciencia ficción y se convirtió en un cómic protagonizado por un héroe fantástico. El cambio del origen de un superhéroe con el fin de acomodarlo a nuevos poderes o circunstancias ocurre tan frecuentemente en los cómics que los aficionados han acuñado un término, *retconning*, para referirse a esta continuidad de reparación retroactiva<sup>[14]</sup>.

Curiosamente, los adversarios de Superman pasaron por una evolución parecida más o menos al mismo tiempo. En los primeros años de los cómics de *Action* y *Superman*, Siegel y Shuster se hicieron eco de las fantasías de revancha de sus jóvenes y económicamente desfavorecidos lectores de la era de la Depresión. Superman utilizó primero sus poderes para luchar contra corruptos propietarios de casas, dueños de minas de carbón, fabricantes de armas e intrigantes de Washington. En estas primeras historias, nuestro héroe atormentó psicológicamente a un conspirador sujetándolo mientras caían ambos desde un edificio alto. En esta primera etapa de su carrera, el argumento dejaba ver que solamente muy pocos sabían de la existencia de Superman, y el político intrigante creía que la caída sería fatal. Así divulgaba voluntariamente la información en pos de la cual estaba Superman, antes de arriesgarse a sufrir otra caída semejante. Hacia los años cincuenta, además de vender millones de ejemplares mensualmente, Superman se había convertido en una estrella de seriales de radio, de cortometrajes (tanto animados como con actores de carne y hueso), y de un popular programa de televisión. Por esa época sus adversarios se transformaron en expertos criminales con cuerpos y vestidos coloristas, tales como Toyman, Prankster y Lex Luthor, cuyos planes para grandes robos o para el dominio del mundo (o, en el caso de Brainiac, de la galaxia) fue capaz de frustrar Superman a la vez que conseguía mantener a salvo de perturbaciones la estructura de los poderes corporativos. Para estar a la altura de las capacidades en aumento de los villanos a los que se oponía, Superman entró

en una especie de carrera de armamento de superpoderes, llegando a ser tan poderoso andando el tiempo que resultó difícil para los escritores el urdir amenazas creíbles para desafiar sus capacidades casi divinas. Los fragmentos radiactivos de su planeta de origen, conocidos como kriptonita, llegaron a ser un recurso frecuente para ampliar cualquier historia más allá de la primera página del cómic<sup>[15]</sup>.

El Superman más simple y original de la Edad Dorada, el último hijo de Krypton, es el que deseo considerar aquí.

### La física del salto y demás movimientos

En los primeros años de esta historia del cómic, Superman era incapaz de volar, aunque podía simplemente «saltar por encima de edificios altos de un solo brinco», gracias a la más débil gravedad de la Tierra.

Bien, ¿cuán alto podía saltar? De acuerdo con su historia original en el número 1 de *Superman*, el rango estaba en torno a unos 200 metros. Suponiendo que pudiera saltar esta altura en línea recta, esto equivale aproximadamente a la altura de un edificio de unos treinta o cuarenta pisos, lo cual en 1938 se consideraba bastante alto. Así pues nuestra cuestión se puede formular de la siguiente manera: ¿qué velocidad inicial necesitaría Superman, saltando desde la acera, para elevarse verticalmente 200 metros?

Tanto si describimos la trayectoria del hombre de acero que salta o de la pelota lanzada de nuestro ejemplo anterior, debemos empezar con las tres leyes del movimiento tal como fueron descritas por primera vez por Isaac Newton a mediados del siglo XVII. Esas leyes se expresan frecuentemente en la forma: *a)* un objeto permanece en reposo, o si se mueve lo hace siguiendo una línea recta, si no existen fuerzas externas actuando sobre el mismo; *b)* si se aplica una fuerza externa, el movimiento del objeto cambia en cierta magnitud y dirección, y la proporción del cambio del movimiento (su aceleración) multiplicada por la masa del objeto es igual a la fuerza aplicada; y *c)* por cada fuerza aplicada a un objeto existe otra igual y opuesta ejercida por el propio objeto. Las dos primeras leyes se pueden expresar sucintamente a través de una sencilla ecuación matemática:

Fuerza = masa × aceleración      Es decir, la fuerza **F** aplicada a un objeto es igual a la resultante de multiplicar el cambio en la velocidad del objeto (su aceleración) por la masa del mismo **m**, o sea **F = m a**.

La aceleración es una medida de la proporción del cambio de la velocidad de un objeto. Un coche que arranque desde el reposo (velocidad = 0) y acelere hasta 96 km/h tendrá un cambio de velocidad de 96 km/h - 0 km/h = 96 km/h. La aceleración se calcula, pues, dividiendo el cambio en la velocidad por el tiempo necesario para efectuar dicho cambio. Cuanto mayor sea el tiempo, menor será la aceleración necesaria para un cambio determinado de velocidad. Un automóvil que pase de 0 a 96 km/h en seis segundos tendrá una aceleración mucho más grande que si hace lo mismo en seis horas o en seis días. La velocidad final será la misma en los tres casos, a saber 96 km/h, pero la aceleración será radicalmente distinta debido a los distintos tiempos necesarios para producir ese cambio en la

velocidad. Según la fórmula de Newton  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$ , la fuerza necesaria para crear la aceleración mayor (la primera) es obviamente mayor que la requerida para la última (la menor).

Cuando la aceleración es cero, no hay cambio en el movimiento. En tal caso un objeto en movimiento se mantiene siguiendo una línea recta o bien, si está quieto, permanece en reposo. A partir de la expresión  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$ , cuando  $\mathbf{a} = \mathbf{0}$ , la fuerza es  $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ , que viene a ser la primera ley de Newton del movimiento.

Aunque pueda ser directo desde un punto de vista matemático, desde la perspectiva del sentido común esto es nada menos que revolucionario. Newton afirma (correctamente) que si un objeto está en movimiento y no actúa sobre él ninguna fuerza externa, entonces el objeto seguirá moviéndose en línea recta. Sin embargo, usted y yo, e Isaac Newton por lo que a esto respecta, ¡nunca hemos visto que esto ocurra! Nuestra experiencia diaria nos dice que para conseguir que algo siga moviéndose debemos siempre seguir empujándolo bien directamente o a través de una fuerza externa. Un coche en movimiento no sigue moviéndose a menos que mantengamos apretado el pedal del acelerador, lo que en último término proporciona una fuerza. Naturalmente, la razón de que objetos en movimiento disminuyan su velocidad y terminen parándose cuando dejamos de empujarlos o de tirar de ellos es que hay fuerzas de fricción y la resistencia del aire que se oponen al movimiento del objeto. El hecho de que dejemos de empujar o de tirar no significa, en el mundo real, que dejen de existir fuerzas actuando sobre el objeto. No hay nada equivocado en las leyes de Newton —basta con que nos aseguremos de tener en cuenta el rozamiento y la resistencia del aire al aplicarlas—. Son estas inadvertidas «fuerzas de rozamiento» las que debemos vencer para mantener el movimiento uniforme. Una vez que nuestro empuje o tracción equilibra el rozamiento o la fricción del aire, la fuerza neta sobre el objeto es cero, y éste continuará moviéndose en línea recta. El aumento de la tracción o del empuje producirá una fuerza *neta* distinta de cero en la dirección de nuestra tracción o empuje. En este caso habrá una aceleración proporcional a la fuerza neta. La constante de proporcionalidad que relaciona la fuerza con la aceleración es la masa  $m$ , que refleja la resistencia que opone el objeto al cambio de su movimiento. Vale la pena indicar aquí que la masa no es lo mismo que el peso. El «peso» es otra forma de llamar a la «fuerza ejercida sobre un objeto por la gravedad». La masa, por otra parte, es una medida de cuánta materia («átomos» para los especialistas) contiene un objeto. La masa de los átomos contenidos en un objeto es lo que le proporciona su «inercia», término elegante para describir su resistencia al cambio cuando se aplica una fuerza. Incluso en el espacio exterior, la masa de un objeto es la misma que en la superficie de la Tierra, debido a que el número y el tipo de átomos que contiene no cambia. Un objeto en el espacio exterior podría carecer de peso, en el caso de que esté sujeto a una fuerza atractiva insignificante por parte de planetas de su entorno, pero seguirá resistiendo a los cambios en su movimiento, debido a su masa. Un astronauta que viaje por el espacio no puede sujetar y lanzar lejos de sí una estación espacial (suponiendo que tenga una plataforma en la que apoyarse), a pesar de que tanto la estación como los que están en su interior carecen de peso. La masa de la estación espacial es tan grande que la fuerza que pueden aplicar los músculos del astronauta solamente producirá una aceleración irrelevante.

En el caso de objetos en la superficie de la Tierra (o de cualquier otro planeta, por lo que a esta consideración se refiere) la aceleración debida a la gravedad se representa mediante la letra  $g$

(trataremos de ello enseguida). La fuerza que la gravedad ejerce sobre el objeto de masa  $m$  se designará en lo que sigue como su Peso. Es decir, **Peso = (masa) × (aceleración debida a la gravedad)**, o bien  $P = m g$ , que es precisamente otro modo de indicar  $F = m a$  cuando  $a = g$ . La masa es una propiedad intrínseca de cualquier objeto, y se mide en kilogramos en el sistema métrico, mientras que Peso representa la fuerza ejercida sobre el objeto debido a la gravedad, y se mide en libras en Estados Unidos. En Europa, el peso se expresa generalmente en kilogramos, lo cual no es estrictamente correcto<sup>[16]</sup>, pero es más fácil de decir que «kg m/s<sup>2</sup>», la unidad de fuerza en el sistema métrico, también conocida como «Newton». Cuando algo que pesa un Newton en el sistema métrico se compara con un objeto que pesa una libra en Estados Unidos, la conversión establece la *equivalencia de 2,2 libras por kilogramo*. Digo «equivalente» y no «igual» porque una libra es una unidad de fuerza, mientras que el kilogramo mide la masa. Un objeto pesará menos de 1 kilopondio en la Luna y más de 1 kilopondio en Júpiter, pero su masa será siempre de 1 kilogramo. Al calcular fuerzas en el sistema métrico nos referiremos a los kg m/s<sup>2</sup> en lugar de a Newtons, para tener presente que cualquier fuerza se puede describir siempre mediante  $F = m a$ .

En resumen, la masa de Superman en un momento dado es una constante, debido a que refleja cuántos átomos hay en su cuerpo. Su peso, sin embargo, es una función de la atracción gravitatoria entre él y cualquiera que sea la masa grande sobre la que está situado. Superman tiene un peso más grande en la superficie de Júpiter, o un peso menor sobre la Luna, comparado con su peso en la Tierra, pero su masa permanece inalterada. La atracción gravitatoria de un planeta o satélite decrece a medida que uno se aleja del astro, aunque nunca es exactamente cero a menos que uno esté infinitamente alejado del astro. Es tentador igualar la masa con el peso, y es fácil hacerlo cuando se trata solamente de objetos sobre la Tierra, ya que la aceleración debida a la gravedad es siempre la misma. Como pronto compararemos el peso de Superman en Krypton con el que tiene en la Tierra, resistiremos esta tentación.

Por último, la tercera ley del movimiento simplemente explícita la noción de sentido común de que cuando uno hace fuerza sobre algo, eso lo empuja a uno en sentido contrario. Esto se expresa a veces diciendo que «para cada acción existe siempre una reacción igual y opuesta». Usted solamente se puede sostener reclinado sobre la pared si la pared lo soporta a usted, es decir si lo empuja con una fuerza igual y opuesta. Si la fuerza no fuera exactamente igual en el sentido opuesto, entonces habría una fuerza no nula, lo que conduciría a una aceleración que haría que se golpee contra la pared. Cuando el astronauta antes mencionado empuja la estación orbital en el espacio, la fuerza ejercida por sus músculos proporciona una aceleración pequeña a la estación, pero la estación lo empuja a él hacia atrás, y su aceleración es mucho mayor, dado que su masa es mucho menor.

Imagine que Superman y Hulk están sujetando el uno contra el otro unas básculas de baño (que son simplemente aparatos para medir una fuerza, es decir su peso debido a la gravedad). Cuando empujan contra la báscula del otro, no importa lo fuerte que Superman empuje por la izquierda, si permanece quieto, entonces la báscula de Hulk a la derecha indicará exactamente la misma fuerza. Es más, con independencia de lo fuerte que Superman esté empujando, su báscula medirá cero libras de fuerza si Hulk no ofrece resistencia y desplaza su báscula del trayecto y se aparta de él<sup>[17]</sup>. *Las fuerzas siempre van por pares*, y usted no puede empujar o tirar de algo a menos que ello le empuje o tire en sentido contrario. Cuando usted está en la acera, sus pies ejercen una fuerza sobre el suelo debido a

que la gravedad está tirando de usted hacia el centro de la Tierra. La gente del lado opuesto del planeta no cae debido a que la gravedad tira de cada uno hacia el centro del planeta, con independencia de dónde estén situados. Usted no acelera mientras permanece de pie; el suelo proporciona una fuerza opuesta y exactamente igual a su peso. Durante el breve momento en que Superman salta, sus piernas ejercen una fuerza mayor que su peso normal. Debido a que las fuerzas van por pares, su empuje sobre el pavimento provoca que el pavimento lo empuje a su vez a él. Así experimenta una fuerza ascendente que lo eleva arriba y fuera.

Y así es: todas las leyes del movimiento de Newton pueden resumirse en dos ideas sencillas: que cualquier cambio en el movimiento puede resultar solamente de una fuerza externa ( $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$ ), y que las fuerzas van por pares. Esto será todo lo que necesitamos para describir todos los movimientos, desde el más sencillo al más complejo, desde una pelota lanzada hasta las órbitas de los planetas. De hecho, ya tenemos suficiente física como para calcular la velocidad inicial que necesita Superman para saltar por encima de un edificio alto.

### De un solo salto

Superman comienza con una gran velocidad inicial (fig. 4). En la cima de su salto (una altura  $h = 200$  metros por encima del terreno), su velocidad final debe ser cero, o bien éste no sería el punto más alto de su salto, y seguiría subiendo. La razón por la que Superman se va frenando es que una fuerza externa, es decir la gravedad, actúa sobre él. Esta fuerza actúa en sentido descendente, hacia la superficie de la Tierra, y se opone a su elevación. Por consiguiente la aceleración en este caso es realmente una deceleración que lo frena, hasta los 200 metros, en que queda quieto. Imagine que está patinando sobre hielo con un viento fuerte y constante. Inicialmente usted empuja sobre el hielo y se empieza a mover rápidamente en contra del viento. Pero el viento ejerce una fuerza continua que se opone a su movimiento. Si usted no sigue empujando de nuevo, entonces este viento constante lo irá frenando hasta que ya no se mueva más y quede quieto. Pero el viento lo sigue empujando todavía, de modo que seguirá teniendo una aceleración y ahora empezará a deslizarse hacia atrás por el camino de donde procedía. En el instante en que alcance su posición de salida, se estará moviendo tan deprisa como cuando empezó, solamente que ahora lo hará en sentido opuesto. Este viento constante en la dirección horizontal le afecta como patinador del mismo modo que la gravedad actúa sobre Superman cuando salta. La fuerza de la gravedad es la misma al comienzo, en medio y en el punto más alto de su salto. Puesto que  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$ , su aceleración es igualmente la misma en todo momento. Con el fin de determinar qué velocidad inicial necesita Superman para saltar 200 metros, debemos comprender cómo cambia su velocidad en presencia de una aceleración constante  $\mathbf{g}$  en sentido descendente.



**Fig. 4.** Viñeta del n.º 1 de *Superman* (junio de 1939) que muestra a Superman en el proceso de lanzarse de un salto... Bueno, ya se sabe. © 1938 National Periodical Publications Inc. (DC)

Como indicaría el sentido común, cuanto más alto desea saltar uno, mayor ha de ser la velocidad de despegue. ¿Cómo están relacionadas exactamente la velocidad inicial y la altura final? Bien, cuando uno viaja, la distancia recorrida es justamente el producto de su velocidad media por la duración en el tiempo de su viaje. Después de conducir durante una hora con una velocidad media de 96 km/h, se encuentra a 96 kilómetros de su punto de inicio. Debido a que no sabemos cuánto dura el salto de Superman, sino solamente su altura final ( $h = 200$  metros), realizamos cierta manipulación algebraica de acuerdo con la definición de que la aceleración es el cambio de la velocidad con respecto al tiempo y que la velocidad es el cambio de la distancia en relación con el tiempo. Cuando todo queda despejado hallamos que la relación entre la velocidad inicial de Superman y la altura final  $h$  de su salto es  $v \cdot v = v^2 = 2 g h$ . Es decir, la altura que Superman es capaz de saltar depende del cuadrado de su velocidad de arranque, de modo que si su velocidad de salida se duplica, se eleva a una altura cuatro veces mayor.

¿Por qué depende la altura que Superman puede saltar del cuadrado de su velocidad inicial? Porque la altura de su salto viene dada por su velocidad multiplicada por el tiempo durante el cual está subiendo en el aire, y el tiempo que pasa subiendo también depende a su vez de su velocidad inicial. Cuando usted aprieta con fuerza los frenos de su coche, cuanto más rápido está conduciendo, más tiempo tarda en frenar del todo. De manera análoga, cuanto más rápido va Superman al comienzo de su salto, más tiempo emplea la gravedad en frenarlo hasta reducir la velocidad a cero (que corresponde a la parte más alta de su salto). Valiéndonos del hecho de que la aceleración (medida experimentalmente) debida a la gravedad  $g$  es de 10 metros por segundo al cuadrado (es decir, un

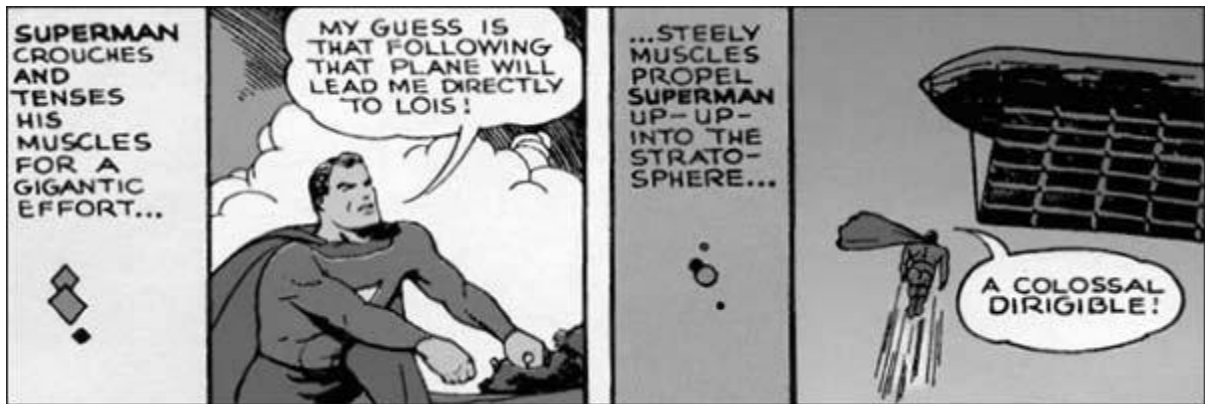
objeto dejado caer con velocidad inicial nula tiene una velocidad de 10 m/s al cabo del primer segundo, 20 m/s al final del siguiente segundo, y así sucesivamente) la expresión  $v^2 = 2 g h$  nos indica que la velocidad inicial de Superman debe ser de 62,5 m/s para saltar una altura de 200 metros. ¡Esto equivale a 225 km/h! Podemos ver de inmediato por qué nosotros, endebles criaturas humanas, somos incapaces de saltar sobre los rascacielos, y por qué me contento con saltar por encima de una papelera de un solo brinco.

En la discusión anterior hemos utilizado la velocidad media de Superman, que es simplemente la suma de su velocidad inicial ( $v$ ) y su velocidad final (cero) dividida por dos. En este caso su velocidad media es  $v/2$ , que es de donde procede el factor 2 antes de la  $g$  en  $v^2 = 2 g h$ . En realidad, tanto la velocidad como la posición de Superman decrecen y aumentan sin cesar, respectivamente, a medida que se eleva.

Para tratar con cantidades que cambian de modo continuo se debería emplear el cálculo (no se preocupe, no lo haré), mientras que hasta ahora solamente he utilizado el álgebra. Para aplicar las leyes del movimiento descritas por él, Isaac Newton tuvo que inventar primero el cálculo antes de poder llevar a cabo sus estimaciones, lo que indudablemente coloca en cierta perspectiva nuestras dificultades con las matemáticas. Por suerte para nosotros, en esta situación, la expresión formalmente correcta y rigurosa hallada mediante el cálculo resulta ser exactamente la obtenida empleando razonamientos relativamente más sencillos, a saber,  $v^2 = 2 g h$ .

¿Cómo puede conseguir Superman su velocidad inicial de más de 60 m/s? Como se ilustra en la fig. 5, lo hace a través de un proceso mecánico que los físicos llaman «salto». Superman se agacha y aplica una gran fuerza sobre el suelo, haciendo que el suelo lo empuje en sentido contrario (dado que las fuerzas van por pares, conforme con la tercera ley de Newton). Como cabe esperar, hace falta una gran fuerza para saltar con una velocidad inicial de 225 km/h. Para hallar exactamente cuánta fuerza se necesita, utilizamos la segunda ley de Newton del movimiento,  $F = m a$ , es decir, Fuerza igual a masa multiplicada por aceleración. Si Superman pesa 100 kilopondios sobre la Tierra, tendrá una masa de 100 kilogramos. Así pues, para hallar la fuerza, tenemos que calcular la fuerza cuando pasa de estar parado hasta el momento en que está saltando con una velocidad de 225 km/h. Recuerde que la aceleración describe el cambio en la velocidad dividido por el tiempo durante el cual cambia dicha velocidad. Si el tiempo que Superman emplea empujando sobre el suelo utilizando los músculos de sus piernas es de 1/4 de segundo, entonces su aceleración será el cambio en la velocidad de 60 m/s dividido por el tiempo de 1/4 de segundo, o sea  $240 \text{ m/s}^2$ . Esta aceleración correspondería a un automóvil que pasara desde 0 a 96 km/h en una décima de segundo. La aceleración de Superman resulta de la fuerza aplicada por sus músculos de las piernas para elevarlo por el aire. La idea tras  $F = m a$  es que para cualquier cambio en el movimiento debe existir una fuerza aplicada, y que cuanto mayor es el cambio mayor ha de ser la fuerza. Si Superman tiene una masa de 100 kilogramos, entonces la fuerza necesaria para permitirle saltar verticalmente 200 metros es  $F = m a = (100 \text{ kg}) \times (240 \text{ m/s}^2) = 24.000 \text{ kg m/s}^2$ .





**Fig. 5.** Viñeta del n.º 23 de *Action comics*, en la que se describe con cierto detalle el proceso por el cual Superman es capaz de alcanzar las altas velocidades iniciales necesarias para sus poderosos saltos.

© 1940 National Periodical Publications Inc. (DC)

¿Es razonable que los músculos de Superman puedan proporcionar una fuerza de 2.400 kilopondios? ¿Por qué no, si la gravedad de Krypton es mayor que la de la Tierra, y los músculos de sus piernas son capaces de soportar su peso sobre Krypton? Calculamos que al efectuar su salto más grande, las piernas de Superman deben ejercer una fuerza de 1.636 kilos. Suponga que esto es un 70% más de lo que la fuerza de sus piernas suministra mientras está simplemente quieto de pie soportando su peso en Krypton (siendo generosos, pues cuando la mayor parte de la gente salta solamente puede aplicar una fuerza aproximadamente igual a su peso). En este caso, Superman en su planeta de origen pesaría 1.500 kilos. Su peso en Krypton está determinado por su masa y la aceleración debida a la gravedad en Krypton. Suponemos que la masa de Superman es de 100 kilogramos, y ésta es su masa con independencia de en qué planeta se halle. Si Superman pesa 100 kilos en la Tierra y casi 1.500 kilos en Krypton, entonces la aceleración de la gravedad en Krypton deber haber sido 15 veces mayor que la de la Tierra.

Así pues, sabiendo que  $F = m a$ , haciendo uso de las definiciones «distancia = velocidad  $\times$  tiempo» y «la aceleración es el cambio de la velocidad con respecto al tiempo», y la observación experimental de que Superman puede «saltar sobre un edificio alto de un solo brinco», hemos calculado que la gravedad en Krypton debe de haber sido 15 veces mayor que sobre la Tierra.

Enhorabuena. ¡Acaba de realizar un cálculo de física!

**LEY DE NEWTON DE LA GRAVITACIÓN.** Ahora que hemos determinado que para que Superman pueda saltar por encima de un edificio debe provenir de un planeta en el cual la gravedad haya sido 15 veces más intensa que la de la Tierra, la siguiente pregunta es: ¿qué podemos hacer para construir un planeta semejante? Para contestar a ello debemos comprender la naturaleza de la atracción gravitatoria de un planeta, y aquí volvemos a apoyarnos en el genio de Newton. Lo que sigue implica más matemáticas, pero tenga paciencia conmigo durante un momento. Hay una bella recompensa en unas cuantas páginas que explican la relación entre la manzana de Newton y la gravedad.

Como si la descripción de las leyes del movimiento anteriormente discutidas y la invención del cálculo no fuera suficiente, Isaac Newton elucidó también la naturaleza de la fuerza que dos objetos ejercen entre sí debido a su atracción gravitatoria. Para dar cuenta de las órbitas de los planetas, Newton concluyó que la fuerza debida a la gravedad entre dos masas (llamémoslas **Masa 1** y **Masa 2**) separadas por una distancia **d** está dada por:

$$\text{FUERZA DEBIDA A LA GRAVEDAD} = (G) \times [(MASA 1) \times (MASA 2)](DISTANCIA)^2$$

donde **G** es la constante universal de gravitación. Esta expresión describe la atracción gravitatoria entre dos masas *cualesquiera*, bien sea entre el Sol y la Tierra, entre la Tierra y la Luna o entre la Tierra y Superman. Si una masa es la Tierra y la otra es Superman, entonces la distancia entre ellos es el radio de la Tierra (la distancia entre el centro de la Tierra y su superficie, sobre la cual está de pie el Hombre de Acero).

Para una distribución de masa de simetría esférica, tal como un planeta, la fuerza atractiva se comporta como si toda la masa del mismo estuviera concentrada en un único punto en su centro. Por esta razón podemos utilizar en la ecuación de Newton el radio de la Tierra como la distancia que separa las dos masas (la Tierra y Superman). La fuerza es justamente el tirón gravitatorio que experimenta Superman (como cualquier otra persona). Utilizando la masa de Superman (100 kg) la masa de la Tierra y la distancia entre Superman y el centro de la Tierra (el radio terrestre), junto con el valor medido de la constante gravitatoria en la ecuación anterior, obtenemos que la fuerza **F** entre Superman y la Tierra es igual a **F** = 100 kilopondios. Pero éste es precisamente el peso de Superman en la Tierra, que es el que mide cuando se sube a una báscula de baño en la Tierra. Lo bueno es que esas dos expresiones para la fuerza gravitatoria sobre Superman son ¡la misma cosa! Comparando las dos expresiones **peso de Superman** = **(Masa 1) × g** y **fuerza de la gravedad** = **(Masa 1) × [(G × Masa 2)/(distancia)<sup>2</sup>]**, y dado que las fuerzas son la misma y también es la misma la masa de Superman, **Masa 1** = 100 kg, entonces las cantidades que multiplican a Masa 1 deben ser la misma, es decir, que la aceleración debida a la gravedad **g** es igual a **(G × Masa 2)/d<sup>2</sup>**. Sustituyendo en esta expresión **Masa 2** por la masa de la Tierra y **d** por el radio de la Tierra, obtenemos **g** = 10 m/s<sup>2</sup>.

La belleza de la fórmula de Newton para la gravedad es que nos dice por qué la aceleración

debida a la gravedad tiene el valor que medimos. Para un mismo objeto sobre la superficie de la Luna, que tiene una masa y un radio menores, la aceleración debida a la gravedad resulta ser según los cálculos solamente de 160 cm/seg<sup>2</sup>, alrededor de un sexto de su valor sobre la Tierra.

Éste es el verdadero significado de la historia de Isaac Newton y de la manzana. No es cierto que se diera el caso de que en 1665 Newton viese caer una manzana de un árbol y se diera cuenta de inmediato de la existencia de la gravedad, ni tampoco que viese caer una manzana y escribiera enseguida  $F = G (m_1 m_2)/(d)^2$ . En lugar de ello, la brillante deducción de Newton en el siglo XVII fue que exactamente la misma fuerza que tiraba de la manzana hacia la Tierra tiraba también de la Luna hacia la Tierra, conectando de ese modo lo terrestre con lo celeste. Para que la Luna permanezca en una órbita circular alrededor de la Tierra, una fuerza debe tirar de ella para hacer que cambie constantemente su dirección, manteniéndola en una órbita cerrada.

Recuerde que la segunda ley de Newton se expresa  $F = m a$ : si no hay fuerza, no hay cambio en el movimiento. Cuando usted ata un cordel a un cubo y lo hace girar en un círculo horizontal, debe tirar continuamente de la cuerda. Si la tensión en la cuerda no cambia, entonces el cubo permanece en movimiento circular uniforme. La tensión en la cuerda no actúa en la dirección en la que se mueve el cubo; por lo tanto solamente puede cambiar su dirección pero no su velocidad. En el momento en que usted suelte la cuerda, el cubo se alejará de usted.

Volvamos al caso de la Luna. Si no hubiera gravedad, no actuaría ninguna fuerza sobre ella, y entonces la Luna viajaría en línea recta alejándose de la Tierra. Si existiera gravedad pero la Luna permaneciera estacionaria, entonces sería arrastrada hacia abajo y se estrellaría contra nuestro planeta. La distancia de la Luna a la Tierra y su velocidad son tales que equilibran exactamente el tirón gravitatorio, de forma que sigue en una órbita circular estable. La Luna no se escapa de nosotros debido a que está sujeta por la gravedad terrestre, haciendo que «caiga» hacia la Tierra, mientras que su velocidad es lo bastante grande como para evitar que la Luna sea arrastrada hacia nosotros. La misma fuerza que hace que la Luna «caiga» en una órbita circular alrededor de la Tierra y que provoca que esta última lo haga en una órbita elíptica alrededor del Sol es la que causa que la manzana caiga hacia el suelo desde el árbol. Y esa misma fuerza gravitatoria hace que Superman se frene en su ascenso una vez ha saltado, hasta que alcanza el techo de un alto rascacielos. Una vez que sabemos que para llevar a cabo un salto tan poderoso su cuerpo tenía que haber estado adaptado a un entorno en donde la aceleración debida a la gravedad es 15 veces mayor que la de la Tierra, esa misma fuerza gravitatoria nos informa acerca de la geología de Krypton.

Una consecuencia de la ley de la gravitación de Newton, que afirma que a medida que aumenta la distancia entre dos objetos la fuerza gravitatoria entre ellos se vuelve más débil en razón al cuadrado de su separación, es la de que todos los planetas son redondos. Una esfera tiene un volumen que crece con el cubo de su radio, mientras que el área de su superficie crece con el cuadrado del radio. Esta combinación del cuadrado del radio para el área de la superficie con el inverso del cuadrado de la fuerza gravitatoria conduce a que la forma esférica es la única forma estable que puede adoptar una masa gravitatoria grande. De hecho, para despejar la cuestión de la astrofísica acerca de lo que distingue un asteroide muy grande de un pequeño planeta, se puede atender a su forma. Una roca

pequeña, de un tamaño tal que la pueda sostener en su mano, puede tener una forma irregular, ya que su propio empuje de cohesión gravitatoria no es lo bastante grande como para deformarla hasta convertirla en una esfera. Sin embargo, si la roca tuviera el tamaño de Plutón, la gravedad dominaría y sería imposible estructurar el planetóide para que tuviera un perfil que no fuera esférico. Por consiguiente, los planetas cúbicos tales como el mundo de Bizarro han de ser muy pequeños. De hecho, la distancia promedio desde el centro del planeta Bizarro a una de sus caras no puede ser mayor de 480 kilómetros, para evitar que se deforme convirtiéndose en una esfera. No obstante, un planeta cúbico tan pequeño no tendría suficiente gravedad para mantener una atmósfera en su superficie y sería una roca sin aire. Puesto que hemos visto con frecuencia que el cielo del mundo Bizarro es azul como el nuestro (¿y no debería ser de cualquier otro color si quiere responder al concepto bizarro?), realmente debe haber aire en este planeta cúbico. Debemos concluir, por lo tanto, que un planeta Bizarro no es físicamente posible, independientemente de cuántas veces podamos notar en el curso de un día que hemos sido transportados instantáneamente de algún modo a un mundo tal.

Volvamos a los planetas esféricos normales como Krypton. Si la aceleración debida a la gravedad en Krypton  $g_K$  es 15 veces mayor que la aceleración debida a la gravedad en la Tierra  $g_T$ , entonces la razón entre estas aceleraciones es  $g_K/g_T = 15$ . Acabamos de mostrar que la aceleración debida a la gravedad de un planeta es  $g = GM/d^2$ . La distancia  $d$  que utilizaremos es el radio  $R$  del planeta. La masa de un planeta (o de cualquier cosa en lo que a esto se refiere) se puede escribir como el producto de su densidad (para representar la densidad se utiliza tradicionalmente la letra griega  $\rho$ ) por su volumen, que en este caso es el volumen de una esfera (ya que los planetas son redondos). Dado que la constante gravitatoria  $G$  debe ser la misma en Krypton que en la Tierra, la razón  $g_K/g_T$  vendrá dada por la siguiente expresión sencilla:

$$g_K/g_T = [\rho_K R_K]/[\rho_T R_T] = 15$$

en la que  $\rho_K$  y  $R_K$  representan la densidad y el radio de Krypton y  $\rho_T$  y  $R_T$  son la densidad y el radio de la Tierra, respectivamente. Al comparar la aceleración debida a la gravedad en Krypton con la de la Tierra, todo lo que necesitamos saber es el producto de la densidad por el radio de cada planeta. Si Krypton tuviera el mismo tamaño que la Tierra debería ser 15 veces más denso; si, por el contrario, tiene la misma densidad, entonces sería 15 veces más grande.

Ahora, si tal como dijimos al comienzo de este libro, la esencia de la física consiste en hacer las preguntas correctas, entonces es tan cierto en la física como en la vida que cada respuesta que uno obtiene le conduce a más cuestiones. Hemos determinado que con el fin explicar la capacidad de Superman para saltar 200 metros (la altura de un rascacielos) de un solo salto sobre la Tierra, el producto de la densidad por el radio de Krypton, su mundo de origen, debe de haber sido 15 veces mayor que el que corresponde a la Tierra. Nos preguntamos a continuación si es posible que el tamaño de Krypton sea igual al de la Tierra ( $R_K = R_T$ ) de modo que todo el exceso de gravedad de Krypton pueda atribuirse al hecho de ser más denso que la Tierra ( $\rho_K/\rho_T = 15$  veces más denso, para ser precisos). Resulta que si suponemos que las leyes de la física son las mismas en Krypton que en la Tierra (si no estamos de acuerdo con eso, el juego habría terminado antes de empezar y podríamos dejarlo aquí), en tal caso es extremadamente improbable que Krypton sea 15 veces más denso que la Tierra.

Acabamos de hacer uso del hecho de que la masa es igual a la densidad multiplicada por el volumen, lo cual es justamente otro modo de decir que la densidad de un objeto es la masa por unidad de volumen del mismo. Ahora, para entender lo que limita esta densidad, y por qué no podemos hacer fácilmente la densidad de Krypton 15 veces mayor que la de la Tierra, hemos de dar un paseo rápido hacia el nivel atómico. Tanto la masa total de un objeto como el volumen que adopta resultan estar gobernados por sus átomos. La masa de un objeto es una función de la cantidad de átomos que contiene. Los átomos están compuestos de protones y neutrones dentro de un pequeño núcleo, rodeado por electrones más ligeros. El número de protones cargados positivamente en un átomo está compensado por un número igual de electrones cargados negativamente. Los electrones son muy ligeros comparados con los protones o los neutrones, que son partículas sin carga eléctrica que pesan ligeramente más que los protones y residen en el núcleo (en el capítulo 15 trataremos de lo que hacen los neutrones en el núcleo). Aproximadamente toda la masa de un átomo está determinada por los protones y neutrones de su núcleo, debido a que los electrones son casi 2.000 veces más ligeros que los protones.

El tamaño de un átomo, por otra parte, está determinado por los electrones o, más específicamente, por sus órbitas cuánticas. El tamaño de un núcleo es aproximadamente la trillonésima parte de un centímetro, mientras que el radio de un átomo se calcula por la distancia al núcleo a la que es probable hallar un electrón, que es de unas diez mil veces mayor que el núcleo. Si el núcleo de un átomo fuera del tamaño de una canica (1 cm de diámetro) y se colocara en la zona del final de un campo de fútbol, el radio de la órbita del electrón se extendería hasta el final de la zona opuesta, unos 90 metros más lejos. El espacio entre los átomos de un sólido está gobernado esencialmente por el tamaño de los propios átomos, por lo que no se les puede empaquetar más cerca que el límite que impone su propio tamaño.

En consecuencia, si la mecánica cuántica es la misma en Krypton que en la Tierra, el espacio ocupado por un determinado número de átomos en una roca, por ejemplo, no depende significativamente del planeta en el cual reside la roca. La roca pesará más en un planeta con una gravedad mayor, pero el número de átomos que contiene (así como el espacio entre sus átomos, con su densidad determinada por ambas cosas) será independiente del planeta en el que se encuentre la roca. Debido a que el número de átomos determina también la masa de la roca, se sigue de aquí que la densidad de un objeto dado será la misma, con independencia del planeta de origen. La mayoría de los objetos sólidos tiene a grandes rasgos la misma densidad, al menos dentro de un factor de diez. La densidad del agua, por ejemplo, es de  $1 \text{ g/cm}^3$ , mientras que la densidad del plomo es de  $11 \text{ g/cm}^3$  (un gramo es la milésima parte de un kilogramo). En otras palabras, un cubo que mida 1 cm de lado tendrá una masa de 1 g si está compuesto de agua y de 11 g si está compuesto de plomo. Esta mayor densidad del plomo es debida casi por completo al hecho de que un átomo de plomo posee una masa diez veces mayor que una molécula de agua. Aunque hay mucha agua en la superficie de la Tierra, hay mucha más roca sólida en el interior del planeta, y así la densidad media de la Tierra es de  $5 \text{ g/cm}^3$ . De hecho, la Tierra es el planeta más denso de nuestro sistema solar y Mercurio y Venus la siguen de cerca. Incluso si Krypton fuera de uranio sólido, tendría una densidad media de  $19 \text{ g/cm}^3$ , que es menos de cuatro veces mayor que la de la Tierra. Para que Krypton tuviese una gravedad 15 veces mayor que la Tierra

debido solamente a la densidad, ésta debería ser de  $75 \text{ g/cm}^3$ , y ninguna materia normal es tan densa.

Si la densidad del planeta Krypton fuera la misma que la de la Tierra, entonces, con el fin de dar cuenta de la gravedad mayor de Krypton, su radio debería ser 15 veces mayor que el de la Tierra. Sin embargo, resulta que esto no es más fácil de cumplir que el ajustar la densidad. Mientras que los planetas de nuestro propio sistema solar son de todos los tamaños —desde Plutón con un radio de un quinto del terrestre, haciéndolo poco más grande que algunas lunas, hasta Júpiter con un radio de más de once veces el de la Tierra— la geología del planeta es una función delicada en relación con su tamaño. Los planetas mayores que Urano con un radio cuatro veces mayor que el de la Tierra incluyen Neptuno, Saturno y Júpiter. Estos planetas son gigantes gaseosos, faltos de un manto sólido sobre el cual se puedan construir edificios y ciudades, incapaces de soportar siquiera la vida de tipo humano. De hecho, si Júpiter fuera diez veces mayor, sería del tamaño de nuestro propio Sol. En este caso la presión gravitatoria en el núcleo de Júpiter iniciaría una fusión nuclear, el proceso que hace que el Sol brille. Así pues, si Júpiter fuera solamente un poco mayor, no sería un planeta gigante sino más bien una estrella pequeña. Los planetas grandes son gaseosos porque si usted tiene que construir un planeta muy grande necesitará muchísimos átomos, y casi toda la materia prima disponible es hidrógeno o helio gaseosos. Para ser precisos, el 73% de la masa elemental del universo es hidrógeno y el 25% es helio. Todo lo demás que podría utilizar para fabricar un planeta sólido —carbono, silicio, cobre, nitrógeno, etc.— comprende solamente el 2% de la masa elemental del universo conocido. Planetas tan grandes son casi siempre gigantes gaseosos, con órbitas alejadas de una estrella, donde la radiación solar más débil no puede evaporar las superficies gaseosas acumuladas. La concentración de elementos más pesados con los cuales se pueden formar planetas sólidos es mucho menor, de modo que tenderán a ser más pequeños y más cercanos a una estrella. Si esos planetas sólidos interiores fuesen muy grandes, las fuerzas gravitatorias de marea provocadas por su sol pronto los romperían en pedazos. La civilización avanzada de Krypton, con científicos capaces de construir un cohete espacial apenas lo bastante grande como para albergar a un único bebé, no podrían haber surgido en un gigante gaseoso con un radio de 15 veces el de la Tierra.

Así pues, ¿es eso? ¿Es la historia de Superman y Krypton, con una superficie del tipo de la de la Tierra y una gravedad 15 veces la de ella, totalmente falsa? No necesariamente. Recuerde que antes se subrayó que ningún material *normal* podría ser 15 veces más denso que la materia que hay sobre la Tierra. No obstante, los astrónomos han descubierto materia *exótica* con densidades excepcionalmente altas, que es el remanente de explosiones de supernovas. Como se mencionó, cuando el tamaño de un planeta gaseoso excede de un cierto umbral, la compresión gravitatoria en su centro es tan grande que los núcleos de átomos diversos se funden literalmente entre sí, creando núcleos mayores y liberando el exceso de energía en el proceso. La fuente de esta energía está expresada por la famosa ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ . Dicho de otro modo: la Energía  $E$  es equivalente a la masa  $m$  multiplicada por la velocidad de la luz  $c$  al cuadrado. La masa de los núcleos producto de la fusión es realmente una parte ínfima de la de los dos núcleos inicialmente separados. La pequeña diferencia de masa, cuando se multiplica por la velocidad de la luz al cuadrado (un número ciertamente muy grande) da como resultado una gran cantidad de energía. Esta energía se irradia hacia el exterior del centro de la estrella, produciendo un flujo hacia afuera que equilibra la fuerza atractiva dirigida hacia el interior,

manteniendo estable el radio de la estrella. Cuando todo el hidrógeno del núcleo se haya fundido en forma de núcleos de helio, parte de, estos núcleos se fundirán a su vez en núcleos de carbono, algunos de los cuales se comprimen igualmente para formar nitrógeno, oxígeno y todos los elementos más pesados hasta llegar al hierro. El proceso de fusión se acelera a medida que la estrella genera núcleos más y más pesados, de forma que todo su hierro y su níquel se crea durante la última semana de la vida de la estrella. A medida que se combinan núcleos más y más pesados, el proceso se vuelve cada vez menos eficaz, de modo que la energía liberada cuando se funden los núcleos de hierro es insuficiente para contrarrestar de forma estable la presión gravitatoria hacia el interior. Llegados a este punto la gravedad vence claramente, comprimiendo rápidamente el material en un volumen mucho menor. En este breve momento la presión en el centro de la estrella es tan enorme que tiene lugar un último aliento de fusión, y se generan elementos más pesados en el rango que alcanza hasta el uranio, con una tremenda liberación de energía concomitante. Esta última etapa en la vida de las estrellas más grandes se conoce como la fase «supernova». Con esta explosión final de energía, los elementos que habían sido sintetizados en el interior de la estrella son despedidos al espacio, en donde la gravedad podría eventualmente agruparlos en aglomerados que pueden formar planetas u otras estrellas. Cada átomo único de su cuerpo, de la silla en la que está sentado o del papel y tinta del número 1 de *Action Comics* fue sintetizado dentro de una estrella que murió y expulsó seguidamente su contenido. Así pues, todos estamos compuestos de polvo de estrellas o, si se siente un poco más cínico, excremento solar.

Para estrellas realmente grandes la presión gravitatoria en el centro es tan enorme que incluso después de la fase supernova queda un gran núcleo remanente cuya gravedad comprime a los protones y electrones formando neutrones, que están estrujados hasta tocarse entre sí, y se convierte en un sólido compuesto de materia nuclear. Los remanentes de tales estrellas masivas se llaman «estrellas de neutrones» y su densidad es sobrepasada solamente por la de los agujeros negros (remanentes de la muerte de estrellas todavía mayores, cuya atracción gravitatoria es tan alta que ni siquiera la luz puede escapar a su empuje). Comparado con la densidad del plomo ( $11 \text{ g/cm}^3$ ), la densidad del material de una estrella de neutrones es de cien billones de gramos por centímetro cúbico. Es decir, sobre la Tierra una cucharadita de té de la materia de una estrella de neutrones pesaría más de 100 millones de toneladas. Ésta es precisamente la materia necesaria para aumentar la gravedad de Krypton.

Si un planeta del tamaño de la Tierra tuviera un pequeño volumen de materia de estrella de neutrones en el interior de su núcleo, la masa adicional aumentaría espectacularmente la gravedad en la superficie del planeta. De hecho, solamente haría falta una esfera de materia de estrella de neutrones con un radio de 600 m (aproximadamente la longitud de seis campos de fútbol) en el centro de un planeta del tamaño de la Tierra para crear una aceleración de la gravedad en su superficie de  $150 \text{ m/s}^2$ , mientras que la gravedad debida a la Tierra es de  $10 \text{ m/s}^2$ . Así, para que la gravedad de Krypton haya sido 15 veces mayor que la de la Tierra, debe haber tenido un núcleo de materia de estrella de neutrones en su centro.

¡Y así vemos por qué explotó Krypton! Un núcleo tan denso produciría esfuerzos enormes sobre la superficie del planeta, haciendo que la distribución estable de materia fuese a lo sumo algo tenue. En cierto momento de la historia del planeta, la actividad volcánica y la tectónica de placas dio como resultado convulsiones masivas. Tales terremotos previos al desastre habrían puesto en guardia a los

científicos, quienes llegaron a la conclusión de que había llegado el momento de colocar a su niño en un cohete y enviarlo a algún otro planeta distante, preferiblemente a uno que no tuviera el núcleo de una estrella de neutrones.

Hagamos una pausa para admirar la perspicacia científica de Jerry Siegel y Joe Shuster. Esos adolescentes de Cleveland, Ohio, o bien tenían una comprensión de la astrofísica y de la mecánica cuántica que excedía la de muchos profesores de física de 1938, o bien eran unos adivinos muy afortunados. Solamente cinco años antes los astrónomos Walter Baade y Fritz Zwicky habían propuesto la existencia de las estrellas de neutrones, cuya evidencia definitiva no sería encontrada hasta la década de 1960. Quizás si Sheldon Mayer, de National Publications, no se hubiera arriesgado con sus tiras de Superman, Siegel y Shuster podrían haber considerado su publicación en una revista científica como *Physical Review*, y la historia tanto de la ciencia como de los cómics sería muy distinta en la actualidad.



**IMPULSO Y MOMENTO.** Si una audiencia del subcomité del senado señaló el comienzo del fin de la Edad de Oro de los cómics, la muerte de la Edad de Plata fue autoinfligida. Vista desde la perspectiva actual, los cómics de la Edad de Plata (finales de los cincuenta y década de los sesenta) parecían insuflados de unas expectativas optimistas y de una brillante disposición rayana en las características de la euforia. Los personajes de la Edad de Oro reinventados por Julius Schwartz y sus colegas en los cómics de DC a finales de los cincuenta y comienzos de los sesenta, tales como Flash,Linterna Verde o Green Arrow (una amalgama de Batman y Robin Hood, con un carcaj lleno de flechas con artilugios tales como una «flecha de guante de boxeo» o una «flecha de esposas», cuya exitosa aplicación violaba varios principios fundamentales de la aerodinámica) eran portadores de pronósticos positivos y de las virtudes morales de sus antecedentes de la Edad de Oro, y las tramas de sus doce o veintidós páginas no dejaban mucho espacio para el desarrollo del personaje. Un héroe típico de la Edad de Plata en un cómic de DC obtenía superpoderes a través de algún mecanismo poco creíble y a continuación decidía, como cosa natural, utilizar esos poderes para combatir el crimen y en beneficio de la humanidad (después de colocarse antes, por supuesto, unas mallas de colores), no cuestionándose nunca esa elección.

La situación fue muy distinta con los superhéroes que poblaban el principal competidor de cómics de DC, Marvel Comics, cuyos personajes tales como Hulk y la Patrulla X se quejaban de que, realmente, ellos no habían tenido mala suerte; de hecho no habían tenido suerte en absoluto. En 1961, Marvel Comics (Timely al principio) Company estaba a punto de abandonar el negocio. Desde el momento culminante de la Edad de Oro, cuando había publicado los cómics de la Antorcha Humana, Namor y Capitán América, había caído hasta el punto en que apenas se sostenía con cómics de monstruos, del oeste, de historias de animales divertidos y novelas románticas para jóvenes. Todo ello cambió con una partida de golf entre Jack Liebowitz, director de DC Comics, y Martin Goodman, el editor de Marvel Comics. Liebowitz presumió del éxito que DC estaba teniendo con un título en particular, *La Liga de la Justicia (Justice League of America)*, que presentaba un equipo de superhéroes que incluía a la Mujer Maravilla (Wonder Woman), Flash, Linterna Verde, Aquaman, Detective Marciano y otros, reunidos para luchar juntos contra el supervillano del mes. Tras su vuelta al despacho, Goodman dio instrucciones a su editor (y sobrino político, el último empleado a tiempo completo) Stan Lee para crear un cómic que presentara a un equipo de superhéroes. Marvel no publicaba cómics de superhéroes en esa época; por consiguiente, Lee no pudo crear un cómic a base de incorporar personajes de otras colecciones, como había hecho DC. En lugar de ello creó un equipo de superhéroes de nuevo cuño. El título resultante, *Los Cuatro Fantásticos (Fantastic Four)*, escrito por Lee y dibujado por Jack Kirby, se convirtió en un éxito de ventas y supuso el cambio de fortuna de Marvel Comics<sup>[18]</sup>.

La única contribución de Lee y Kirby fue añadir personalidades peculiares y profundidad psicológica a los personajes de sus historias. Para distinguirse de los héroes de DC, los superhéroes de Marvel no ven sus superpoderes como una bendición, sino frecuentemente deploran su destino. Cuando la radiación cósmica convirtió a Ben Grimm en la Cosa, enorme, anaranjada y de complejión

rocosa en el número 1 de *Fantastic Four*, él no se deleitó en su fuerza sobrehumana recién hallada, sino que maldijo el hecho de haberse convertido en una pared de ladrillo andante, y no deseaba otra cosa que retornar a su forma humana. Pero ningún personaje del universo Marvel se lamentó más acerca de su destino en la vida que Spiderman.

En el número 15 de *Amazing Fantasy*, escrito por Lee y dibujado por Steve Ditko en 1962, el joven Peter Parker era un huérfano que vivía con sus sobreprotectores y ancianos familiares, tía May y tío Ben. Teniendo prohibido reunirse con los estudiantes populares en una actividad extraescolar, Peter satisfizo su interés por la ciencia asistiendo a una demostración sobre radiactividad en el laboratorio de física. Tal como sucedía con una frecuencia alarmante en los cómics de Marvel de la Edad de Plata, un accidente con la radiactividad produjo como resultado la obtención de superpoderes. En este caso, una araña fue irradiada inadvertidamente durante la demostración y picó a Peter Parker antes de expirar, dejándolo con sangre radiactiva de araña.

Parker descubrió que, a causa de esa picadura, había adquirido diversos atributos arácnidos, incluyendo una agilidad extraordinaria y la capacidad para adherirse a las paredes. Debido a que una araña puede levantar varias veces el peso de su propio cuerpo, Peter podía hacer lo mismo, algo que se describe en los cómics como un aumento «proporcional» de fuerza. Peter adquirió también un «sexto sentido» que le avisaba de peligros potenciales, una especie de *sentido arácnido*, si así lo prefieren. Uno solamente puede adivinar que Stan Lee, al no poder matar arañas reales en su cuarto de baño, llegó a la conclusión de que éstas utilizaban una percepción extrasensorial para evitar ser liquidadas. Probablemente debemos dar las gracias a la protectora Comics Code Authority por el hecho de que Peter no ganara también la capacidad de araña para expeler red orgánica de telaraña por su ano, y que en lugar de ello utilizara su conocimiento de química y de mecánica para adaptar a sus muñecas lanzadores de red sintética<sup>[19]</sup>.

Después de una vida de burlas y humillaciones a manos de sus compañeros, Peter percibió estos nuevos poderes como la llegada de la fama y la fortuna. Luego de haber comprobado sus capacidades en la lucha profesional, creó un traje vistoso azul y rojo y una máscara con el fin de adentrarse en el mundo del espectáculo. Sintiendo autorizado en la víspera de su debut en televisión, rehusó arrogantemente ayudar a un guardia de seguridad a detener a un ladrón en fuga, aunque le hubiera resultado fácil hacerlo. Sin embargo, a su regreso a casa, se enteró de que el afable tío Ben había sido asesinado por un intruso. Al capturar al asesino mediante sus nuevos poderes, Peter descubrió para horror suyo que era el mismo ladrón que pudo haber detenido antes ese día. Se dio cuenta demasiado tarde de que, como su tío le había avisado de manera profética, «un gran poder comporta también una gran responsabilidad». Peter Parker se dedicó en adelante a combatir el crimen bajo la máscara del asombroso Spiderman.

De todos modos no dejó de lamentarse acerca de su vida al menos tres veces en cada número. Una de las innovaciones que Lee y Ditko introdujeron en el cómic de Spiderman fue una multitud de preocupaciones y dificultades de la vida real que acosaban al protagonista casi tanto como su colorista galería de delincuentes y supervillanos. Peter Parker se las tendría que ver con romances ardientes y celos en la universidad, problemas de dinero, desvelos por la salud de su anciana tía, ataques de alergia

e incluso un brazo dislocado (se pasó con su brazo en cabestrillo los ejemplares que van del 44 al 46 de *Amazing Spiderman*), todo ello mientras intentaba mantener en aprietos al Buitre, a Sandman, al Doctor Octopus y al Duende Verde original. Pero la intrusión más grande de la realidad, que señalaría el final de la inocente Edad de Plata, tendría lugar en 1973 en el número 121 de *Spiderman*, con la muerte de la chica de Peter Parker, Gwen Stacy. Una muerte exigida, como mostraremos ahora, no por los escritores y editores o por los lectores, sino más bien por las leyes de Newton del movimiento.

El personaje del Duende Verde había hecho su aparición por primera vez en el número 14 de *Amazing Spider-Man* como un misterioso jefe supremo del crimen y se llegó a convertir en uno de los enemigos más peligrosos de Spidey. Además de una fuerza colosal y una panoplia de armas de alta tecnología, tales como un deslizador propulsado por cohete y bombas en forma de calabaza, el Duende Verde se las arregló para desenmascarar a Spiderman y descubrió su identidad secreta en el clásico número 39 de la serie. Saber que Peter Parker era realmente Spiderman le proporciono al Duende una clara ventaja en sus combates.



Fig. 6. La caída fatal de Gwen Stacy desde lo alto del Puente George Washington, tal como se relata en el n.º 121 de *Amazing Spider-Man*. Observe el «SNAP» (onomatopeya de un crujido) cerca de su cuello en la penúltima viñeta,

© 1973 Marvel Comics



Fig. 7. Continuación de la escena de la muerte de Gwen Stacy, donde Spiderman recibe una dura lección de física, y el genio científico del Duende verde queda en entredicho © 1973 Marvel Comics

En el número 121 de la serie, el Duende secuestra a la novia de Parker, Gwen Stacy, y la lleva a lo alto del Puente George Washington, utilizándola como cebo para atraer a Spiderman. En un momento de la lucha, el Duende empuja a Gwen desde lo alto de la estructura, haciéndola precipitarse hacia su ostensible fatalidad (ver figuras 6 y 7).

En el último instante posible, Spiderman consigue atrapar a Gwen en su red, evitando por escaso margen que se precipitara en el río. Y no obstante, al traerla nuevamente a lo alto del puente, Spiderman quedó traumatizado al descubrir que Gwen había muerto, a pesar de su rescate en el último segundo. «Estaba muerta antes de que tu red la alcanzara», se burla provocativamente el Duende. «¡Una caída desde esa altura mataría a cualquiera antes de golpear el suelo!» Aparentemente, el Duende Verde, creador de avances tecnológicos tales como el aerodeslizador y las bombas en forma de calabaza, no parece comprender el principio de conservación del momento.

Desde luego, de ser cierto que fue «la caída» lo que mató a la pobre Gwen, las consecuencias para el destino de todos los paracaidistas militares y los que practican la caída libre sugeriría una masiva conspiración de silencio por parte de la industria de la aviación. Sin embargo, los aficionados a los cómics han discutido mucho sobre si fue realmente la caída o bien la red lo que mató a Gwen Stacy. Esta cuestión figuraba en la lista como una de las grandes controversias de los cómics (comparable a si Hulk es más fuerte que Superman) en el ejemplar de enero de 2000 de la revista *Wizard*. Regresemos ahora a la física para resolver definitivamente la cuestión de la verdadera causa de la muerte de Gwen Stacy.

La pregunta principal que proponemos aquí es: ¿qué magnitud tiene la fuerza ejercida por la red de Spiderman al detener la caída de Gwen Stacy?

### **La física y el destino final de Gwen Stacy**

Para determinar las fuerzas que actuaron sobre Gwen Stacy necesitamos conocer antes lo rápido que estaba cayendo cuando la red la detuvo. En nuestra anterior discusión sobre la velocidad que necesitaba Superman para saltar por encima de un edificio elevado de un solo brinco, calculamos que la velocidad inicial necesaria  $v$  estaba relacionada con la altura final  $h$  (en donde su velocidad es cero) mediante la expresión  $v^2 = 2 g h$ , donde  $g$  es la aceleración debida a la gravedad. El proceso de caída desde una altura  $h$  con velocidad inicial  $v = 0$ , acelerando debido a la constante atracción de la fuerza de la gravedad, es la imagen especular del proceso de salto que le llevó previamente hasta la altura  $h$ .

Ésta es la razón por la que la mayoría de las ciudades declaran ilegal disparar al aire armas de fuego, aunque sea como parte de la celebración de la víspera del Año Nuevo. Una bala que tiene una velocidad de 450 m/s se frena debido a la gravedad, y a continuación se acelera a medida que cae, hasta que choca contra el suelo. La velocidad final es menor que la inicial, debido a cierta pérdida de energía a causa de la resistencia del aire (dicho sea de paso, esta pérdida de energía por rozamiento con el aire disminuye ligeramente la altura final alcanzada por la bala). Pero lo que sube debe bajar, y alcanzará el suelo con velocidad mortal, aun teniendo en cuenta la resistencia del aire.

La conclusión es que podemos emplear la expresión  $v^2 = 2 g h$  para calcular la velocidad de Gwen Stacy justo antes de ser atrapada por la red de Spiderman. Suponiendo que la red de Spidey la sujeta después de que haya caído aproximadamente 90 metros, la velocidad de Gwen resulta ser de unos 150 km/h. De nuevo, la resistencia del aire la habrá frenado algo, pero como se indica en la figura 6, está cayendo en una posición bastante aerodinámica. Como vamos a argumentar, el peligro para Gwen no es la velocidad sino la brusca parada que causaría el río.

Para cambiar el movimiento de Gwen Stacy de 150 a 0 km/h, se necesita una fuerza externa, proporcionada por la red de Spiderman. Cuanto mayor sea la fuerza, mayor será el cambio de la velocidad de Stacy, o más bien, su deceleración. Para calcular lo intensa que debe ser la fuerza para detener a Gwen antes de que se estrelle contra las aguas, volvemos de nuevo a la segunda ley de Newton,  $F = m a$ . Recuerde que la aceleración es el cambio de la velocidad dividido por el tiempo durante el cual se produce dicho cambio. Multiplicando ambos lados de la expresión  $F = m a$  por el tiempo durante el cual disminuye la velocidad, podemos escribir de nuevo la segunda ley de Newton en la forma:

$$\text{(FUERZA)} \times \text{(TIEMPO)} = \text{(MASA)} \times \text{(CAMBIO DE VELOCIDAD)}$$

El momento de un objeto se define como el producto de su masa por su velocidad (el lado derecho de la ecuación anterior). El producto de (Fuerza)  $\times$  (tiempo) de la parte izquierda de esta ecuación se conoce como **Impulso**. La ecuación anterior, por consiguiente, nos dice que con el fin de cambiar el momento de un objeto en movimiento se debe aplicar una fuerza externa  $F$  durante un cierto tiempo. Cuanto mayor sea el intervalo de tiempo, menor es la fuerza necesaria para conseguir el mismo cambio en el momento.

Éste es el principio en que se basa el airbag de su automóvil. Cuando su coche viaja por la autopista a una velocidad de, digamos, 96 km/h, usted como conductor se está moviendo obviamente a esa misma velocidad. Cuando su coche se estrella con un obstáculo y se detiene, usted sigue moviéndose hacia adelante a 96 km/h, puesto que un objeto en movimiento permanece en el mismo a menos que sobre él actúe una fuerza externa (que llega enseguida). En los días anteriores al cinturón de seguridad y al airbag, la columna del volante proporcionaba generalmente esta fuerza externa. El tiempo durante el cual su cabeza estaba en contacto con el volante era breve, así que en consecuencia la fuerza necesaria para detener su cabeza era muy grande. Al inflar rápidamente un airbag, que está diseñado para deformarse bajo presión, el tiempo durante el cual su cabeza permanece en contacto con el airbag inflado aumenta, comparado con el caso del volante, de forma que la fuerza necesaria para que su cabeza vuelva al reposo disminuye. El distribuir la fuerza sobre la mayor área superficial del airbag ayuda también a reducir las heridas de una parada repentina. Esta fuerza es todavía lo bastante grande como para dejar inconsciente al conductor, pero lo importante es que ya no es letal. El producto de la fuerza por el tiempo debe ser siempre el mismo, y el resultado neto es el mismo —es decir, la velocidad inicial de 96 km/h cambia a la velocidad final de cero—. Ésta es igualmente la justificación física de que un boxeador gire al recibir un puñetazo, aumentando así el tiempo de contacto entre su cara y el puño de su contrincante, de modo que la fuerza que su cara debe ejercer para detener el puño disminuya.

Ahora bien, la red de Spiderman tiene una cualidad elástica, lo cual es bueno para Gwen Stacy, pero el tiempo disponible para detener su descenso es corto, lo cual es algo horrible. Cuanto menor sea el tiempo, mayor debe ser la fuerza necesaria para conseguir un dado cambio en su momento. Para Gwen, su cambio de velocidad es de 150 km/h - 0 km/h = 150 km/h, y suponiendo que pese 50 kg, su masa en el sistema métrico es de 50 kg. Si la red la detiene en solamente unos 0,5 segundos, entonces la fuerza aplicada por la red para detener su caída es de 440 kilos. Así pues, la red aplica una fuerza casi diez veces mayor que el peso de Gwen de 50 kilos. Recordando que el peso de un objeto es simplemente  $P = m g$ , donde  $g$  es la aceleración debida a la gravedad, podemos decir que la red aplica una fuerza equivalente a 10  $g$  en un lapso de tiempo de 0,5 segundos. Como se indica en la figura 6, cuando la red detiene a Gwen, un simple efecto de sonido indicado cerca de su cuello (el *snap*<sup>[20]</sup> percibido en todo el mundo del cómic) indica el probable resultado de una fuerza tan elevada aplicada durante un período tan corto de tiempo. En contraste, los que saltan desde puentes dejan una distancia suficiente para permitir que la cuerda extensible se alargue durante más segundos, con el fin de mantener la fuerza de frenado por debajo de un umbral que resultaría fatal.

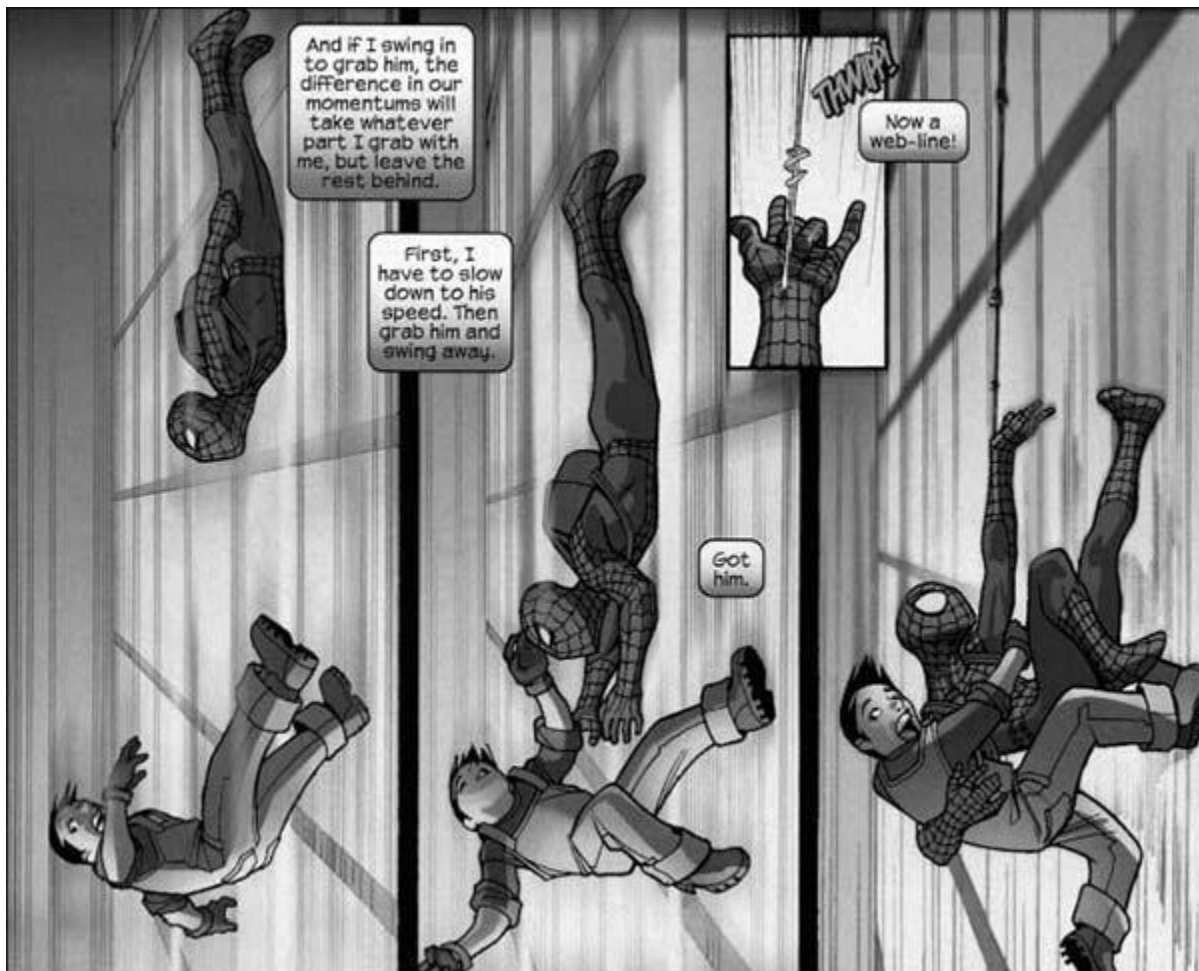
Viajando a tal velocidad y deteniéndose en un intervalo de tiempo tan corto, no existe diferencia entre tropezar con la red o con el agua. Sin embargo, se han registrado casos de personas que han sobrevivido a fuerzas mayores que la experimentada por Gwen Tracy. El coronel John Stapp condujo un cohete trineo en 1954 y estuvo sujeto a una fuerza de 40  $g$  durante la deceleración, a pesar de lo cual vivió para describir la experiencia comparable a la «extracción de una muela sin anestesia». Naturalmente, el coronel Stapp estaba fajado de modo seguro en el interior y sujeto al trineo en una cabina reforzada. Normalmente las víctimas de suicidios que saltan desde puentes no se mueren por ahogamiento sino por rotura del cuello. Chocar contra el agua a gran velocidad tiene el mismo efecto que chocar contra el suelo sólido, puesto que la resistencia del fluido al desplazamiento crece con la rapidez con la cual se mueve uno a través del mismo (trataremos de esto más adelante en el capítulo 5 al hablar de Flash). Por desgracia para Gwen Stacy y para Spiderman, éste es otro ejemplo de física correcta en los cómics, y a los lectores no se nos pidió que suspendiéramos la actitud crítica, sin importar cuánto lo hubiéramos podido desear.

Parece que Spiderman haya aprendido su lección de física en relación con el impulso y el cambio del momento. En una historia del número 2 de *Spider-Man Unlimited*, titulada con bastante propiedad «Tests», se encuentra el trepamuros pegado a la cima de un rascacielos cuando un desafortunado limpiador de ventanas pasa a su lado cayendo en picado. Lanzándose en pos del trabajador, Spiderman debe resolver un problema de física del mundo real bajo condiciones de mayor presión que en un típico examen final. A medida que se reduce la distancia al trabajador (debido al hecho de que Spiderman se lanza desde el edificio con una velocidad inicial mayor que la del limpiador de ventanas) nuestro héroe considera: «vale, tengo que hacerlo bien. No puedo atraparlo con un cable de la red, o el latigazo lo golpeará». Como se muestra en la figura 8, Spiderman reconoce que su mejor solución es acoplar su velocidad a la del trabajador y entonces agarrarlo fuertemente cuando se están moviendo apenas el uno con respecto al otro. (No estoy seguro de cómo Spiderman se frena a sí mismo hasta que su velocidad coincida con la del trabajador ¿quizás arrastrando sus pies contra la pared del edificio?) A continuación Spidey lanza un cordón de red cuando su brazo, dotado de la fuerza de araña, es capaz



de soportar el fuerte impulso asociado con su próximo cambio de momento.

Esta solución fue empleada también en la película *Spider-Man* de 2002. Cuando el Duende Verde deja caer a Mary Jane Watson desde una torre del Puente de Queensboro, en un claro homenaje al argumento del número 121 de *Amazing Spider-Man*, Spiderman no detiene esta vez su rápido descenso con su red. En lugar de ello se lanza tras ella, y solamente después de alcanzarla emplea su red para mecerla hasta una seguridad relativa, empleando el mismo procedimiento que el de la figura 8. Uno de los rasgos de un héroe, al parecer, es su capacidad para aprender de la experiencia.



**Fig. 8.** Escena de la historia «Tests» del n.º 2 de *Spider-Man Unlimited* (mayo de 2004), en el cual los textos de los bocadillos revelan el proceso de pensamiento de Spiderman a medida que hace frente a una aplicación práctica de la segunda ley de Newton del movimiento.

© 2004 Marvel Comics

Aunque ciertamente no fuera un héroe, los razonamientos anteriores también hicieron mella en el Duende Verde. Como se mencionó antes, el número de enero de 2000 de la revista *Wizard* describió la controversia que rodeaba la muerte de Gwen Stacy como una clásica cuestión abierta en el reino de

los aficionados de los cómics. Esto motivó mi carta al editor de *Wizard*, publicada unos pocos meses más tarde, que resumía el razonamiento físico anteriormente expuesto. Dos años más tarde, el ejemplar de agosto de 2002 del número 45 de *Peter Parker: Spider-Man* (escrito por Paul Jenkins y dibujado por Humberto Ramos) presentaba una trama en la cual el Duende Verde demostraba que él también había aprendido finalmente su lección de física. En este ejemplar el Duende había enviado una cinta de vídeo de la muerte de Gwen Stacy a los medios de difusión con el fin de atormentar psicológicamente a Spiderman. Presentándose a sí mismo como el renuente héroe de esta tragedia, el Duende narra en su cinta:

Al darme cuenta de que la chica había caído, corregí el rumbo de mi deslizador en un intento para salvarla. Empecé un descenso inmediato. Pero antes de que tuviera la posibilidad de alcanzarla, Spiderman hizo algo increíblemente estúpido: a pesar de la velocidad de su caída, decidió atraparla en esa red de goma suya. En el instante siguiente su cuello crujió como una rama carcomida. Puede que le hubiera supuesto casi treinta años al Duende, pero aparentemente había comprendido por fin que no fue «la caída» lo que mató a Gwen Stacy, sino la parada súbita. Si un retorcido y demonio maniaco como el Duende Verde puede aprender su física, entonces existe una esperanza para todos nosotros.

#### 4. ¿Puede nuestro héroe columpiarse de una hebra?

**ACELERACIÓN CENTRÍPETA.** Quisiera hacer otra consideración más acerca de las fuerzas, en particular en lo que se refiere a las capacidades de Spidey para colgarse de la red. Prácticamente cada ejemplar de *Amazing Spider-Man* presenta escenas de nuestro héroe utilizando su red para saltar de edificio a edificio a través de las calles de Nueva York. Pero ¿es esto realista? En concreto, ¿es la red de Spiderman lo bastante resistente como para soportar su propio peso, así como el de cualquier facineroso, víctima o inocente en su caída, que contempla cómo lo atrapan a mitad del vuelo mientras nuestro héroe se columpia en su trayectoria parabólica? Cuando Spiderman se cimbrea siguiendo un arco, se produce una fuerza extra además de su peso que la red debe compensar. Consideremos ahora el detalle.

Recuerde que la segunda ley de Newton del movimiento,  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ , nos decía que para cambiar el movimiento de un objeto se necesita una fuerza. Un cambio en el movimiento, o aceleración, se refiere o bien a un cambio en la magnitud (ya sea acelerando o frenando) o bien a un cambio en la dirección. Si sobre el objeto no actúa ninguna fuerza, entonces persistirá en «movimiento uniforme», lo que significa un movimiento constante en línea recta. Cualquier cambio en el movimiento, tanto en magnitud como en dirección, solamente puede ocurrir si sobre el objeto actúa una fuerza. Cuando un automóvil da media vuelta, una fuerza externa (la fricción entre los neumáticos y la carretera) cambia la dirección del mismo, aunque la velocidad se mantenga constante en valor.

Para cambiar la dirección del movimiento hace falta una fuerza, y el corolario de esto es que una fuerza solamente puede producir una aceleración (un cambio en el movimiento) en la dirección en la cual actúa. La gravedad, por ejemplo, empuja a un objeto hacia el suelo, independientemente de su velocidad inicial. Y, lo que es más importante, la gravedad *solamente puede empujar* a un objeto en dirección al suelo, puesto que ésa es la única dirección en la que actúa. Si el Superman de la Edad de Oro, antes de ser capaz de volar, salta desde el borde de un precipicio con una velocidad horizontal constante, comenzará a caer debido a la gravedad. Puesto que la gravedad no actúa en la dirección horizontal, su velocidad horizontal no cambiará mientras cae. Sin fuerza no hay cambio, en definitiva. Su velocidad vertical aumenta, volviéndose mayor a medida que cae, como en el caso de Gwen Stacy considerado hace poco, porque existe una fuerza que actúa sobre él en la dirección vertical. El efecto neto de su velocidad horizontal constante más una velocidad vertical siempre creciente es una trayectoria parabólica que se vuelve más pronunciada a medida que cae en picado. Para dar otro ejemplo, una pelota de béisbol lanzada a 145 km/h sin girar y perfectamente paralela al suelo, cae hacia éste exactamente con la misma rapidez que otra que se deja caer a la vez de la mano del lanzador. Ambas pelotas golpearán el suelo en el mismo instante (si han partido de una misma altura), porque la única fuerza que cambia su movimiento en la dirección vertical es la gravedad. Cualquier cambio, sea en la dirección o en la magnitud, del movimiento de un objeto sólo puede originarse a causa de una fuerza externa actuando en la dirección del cambio.

Cuando Spiderman se balancea de edificio en edificio, su trayectoria es un arco semicircular en

lugar de una línea recta. En consecuencia, incluso si la magnitud de su velocidad no cambia durante su oscilación, la dirección de su movimiento está variando continuamente, lo cual solamente puede suceder debido a una fuerza externa. Debería resultar obvio que esta fuerza proviene de la tensión en la red. La red por lo tanto tiene que hacer una doble tarea y proporcionar *dos* fuerzas: *a*) soportar el peso de Spiderman, lo que también tendría que hacer aunque colgara simplemente en línea vertical, y *b*) una segunda fuerza para desviarlo en una trayectoria circular. Si el hilo de la red se rompiera a mitad de un balanceo, entonces la única fuerza externa que actuaría sobre Spiderman sería la gravedad, y su movimiento en ese instante no diferiría en absoluto del de una pelota lanzada con la misma velocidad que él poseía en el instante de la rotura de la red. La aceleración que esta fuerza adicional proporcionada por la red mientras Spidey se balancea en un arco circular es análoga a la aceleración que experimenta la Luna al describir su órbita circular en torno a la Tierra. En un caso la fuerza proviene de la tensión en la red, mientras que en el otro se trata de la fuerza de atracción gravitatoria de Newton, pero en ambos casos el movimiento en línea recta se convierte en otro circular. La gravedad es la «red» en el caso de la Luna, que provoca el cambio de su dirección. Si la tensión en la red o la gravedad desaparecieran súbitamente, tanto Spidey como la Luna se desviarían de sus trayectorias circulares y continuarían moviéndose con la velocidad que tenían en el momento en que se eliminaron las fuerzas externas. Con un poco de geometría o de cálculo se puede mostrar que la aceleración de un objeto que está constantemente desviado según una órbita circular con una velocidad  $\mathbf{v}$  es  $\mathbf{a} = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})/\mathbf{R} = v^2/\mathbf{R}$ , siendo  $\mathbf{R}$  el radio del círculo.

La red de Spiderman tiene que suministrar una fuerza  $\mathbf{mg}$  con el fin de soportar su peso y una fuerza adicional  $\mathbf{mv}^2/\mathbf{R}$  para cambiar su dirección al balancearse. Cuanto más rápido se balancee (más grande su velocidad  $\mathbf{v}$ ) o cuanto más ceñido sea su arco (es decir, menor sea el radio  $\mathbf{R}$ ), mayor será su aceleración centrípeta  $\mathbf{v}^2/\mathbf{R}$ . Cuando Spidey se columpia de una hebra de la red de 60 m de longitud, a una velocidad de 80 km/h, la aceleración centrípeta es de 8 m/s<sup>2</sup>, además de la aceleración debida a la gravedad de 10 m/s<sup>2</sup>. Si la masa de Spiderman en el sistema métrico es aproximadamente de 73 kg, entonces su peso  $\mathbf{mg}$  es de 73 kg, y la fuerza adicional que debe proporcionar la red para cambiar su trayectoria de la línea recta a un arco circular es más o menos de 60 kg. La tensión total en la red es cercana a los 136 kg, y será mayor si Spidey está llevando a alguien durante su balanceo.

Ciento treinta kilos o más de tensión pudieran parecer demasiado para lo que una delgada hebra de fibra puede soportar, pero si la red de Spiderman es algo semejante al material de una araña real, no tiene por qué preocuparse. La seda de soporte de una telaraña, que las arañas utilizan para sus redes y con las que escapan rápidamente de pájaros predadores, es realmente cinco veces más fuerte por kilo que el cable de acero y más elástica que el nylon. Las propiedades de la red de telaraña son el resultado de miles de filamentos rígidos de solamente unas pocas milmillonésimas de metro de ancho (proporcionando una gran redundancia de modo tal que ningún filamento es crucial para la integridad de la red), entremezclados con canales llenos de fluido que distribuyen la fuerza de tensión a lo largo de la red. Spiderman es capaz de alterar las propiedades del material de su red ajustando su composición química a medida que la eyecta desde sus lanzadores de red. De forma parecida, las arañas reales pueden controlar la fuerza de la tensión de sus redes variando la concentración relativa de proteínas que cristalizan y de otras que no lo hacen.

Existe un interés considerable en aplicaciones comerciales de las redes de tipo telaraña, que requerirían una gran cantidad de seda de araña. Dado que no es práctico recoger arañas para ello (son demasiado territoriales como para que se las pueda criar en granjas de modo convencional), recientes experimentos de ingeniería genética han insertado genes responsables de la fabricación de la red de araña en cabras, de modo que la leche de cabra contenga telaraña que se pueda tamizar y obtener más fácilmente.

Aunque el desarrollo de cabras productoras de urdimbre ha experimentado ciertas trabas, otros científicos han informado acerca de éxitos preliminares infectando células de araña en el laboratorio con un virus genéticamente manipulado que induce a la célula a fabricar directamente las proteínas que se hallan en las telarañas. Los genes de araña productores de su seda se han introducido también con éxito en el *E. coli*<sup>[21]</sup> y células de plantas. Tal investigación podría tener aplicaciones prácticas de largo alcance. Como discurre Jim Robbins en su artículo «Second Nature» en el número de julio de 2002 de la revista *Smithsonian*: «En teoría, una cuerda tejida con seda de araña del diámetro igual al de un lápiz podría detener a un caza a reacción aterrizando en la plataforma de un portaviones. La combinación de fuerza y de elasticidad le permite resistir un impacto cinco veces más potente que el que soporta el Kevlar, la fibra sintética utilizada en los chalecos a prueba de balas».

La elevada fuerza de tensión de la seda de una araña real le permite soportar un peso de más de 9.000 kilos por centímetro cuadrado. Es decir, si la sección transversal de la fibra fuera un círculo de 1 cm de diámetro, entonces la red podría resistir un peso de 8 toneladas antes de romperse. Incluso una fibra de telaraña de un diámetro de solamente algo más de medio centímetro podría soportar más de 2.700 kilos de modo seguro, bastante más que los 136 kilos de peso y de la fuerza centrípeta antes calculada. A menos que Spiderman intente arrastrar simultáneamente a Hulk y a Blob, su red debería ser más que capaz de cumplir con su trabajo.

En consecuencia, de acuerdo con las leyes de Newton del movimiento, es del todo plausible que Spiderman pueda balancearse de edificio en edificio, detener un tren elevado que ha perdido el control (como en la película *Spider-Man 2*, del año 2004), o tejer una coraza a prueba de balas con estrechas fibras de red. Así pues, la respuesta a la pregunta propuesta en el título de este capítulo es: simplemente, mire arriba.

**ROZAMIENTO, ARRASTRE Y SONIDO.** Era una oscura y tormentosa noche en Central City cuando el policía científico Barry Allen cerró para pasar la noche. Al detenerse junto a la tienda de química se maravilló ante la gran colección de productos que poseía el CCPD. A pesar de su experiencia, Allen permaneció de pie cerca de una ventana abierta durante la tormenta que se avecinaba y sufrió la descarga de un rayo que entró en la habitación. La descarga hizo añicos los recipientes químicos, empapándolo con ellos a la vez que la corriente eléctrica pasaba a través de su cuerpo.

Pero la exposición simultánea a los voltajes letales y a los peligrosos agentes químicos solamente consiguió ofuscarlo y hacerlo caer. Algo después esa misma tarde se sorprendió al descubrir que podía dar alcance fácilmente a un taxi a la carrera y atrapar y restablecer en un abrir y cerrar de ojos la comida vertida de un plato durante una cena. Al darse cuenta de que el accidente de laboratorio le había de algún modo dotado con supervelocidad, adoptó un sencillo aunque elegante traje de color rojo y amarillo, y utilizó sus poderes recién hallados para luchar contra la delincuencia bajo el nombre de Flash<sup>[22]</sup>.

Hay un amplio rango de fenómenos físicos asociados con la velocidad, y John Broome, Robert Kanigher, y Gardner Fox, los principales escritores de comienzos de los cómics de *Flash* de la Edad de Plata, se refirieron a muchos de ellos. Gracias a su habilidad para correr a gran velocidad, Flash era bosquejado con frecuencia subiendo por las paredes de edificios o corriendo a través de la superficie del océano; era capaz de atrapar las balas disparadas en su contra, y arrastrar a la gente tras él a su paso. ¿Son algunos de estos hechos consistentes con las leyes de la física? Resulta que todos ellos lo son, si en primer lugar se concede por supuesto la «excepción milagrosa» de la supervelocidad de Flash.

En esta aparición de principios de la Edad de Plata, «The Mystery of the Human Thunderbolt» («El misterio del rayo humano») en la presentación número 4, Flash trepa rápidamente por la pared de un edificio de oficinas, porque «gracias a su gran velocidad es capaz de superar la gravedad». Antes hemos explorado la sencilla relación entre la velocidad inicial de alguien y la altura final que puede saltar. A medida que la persona se eleva, se frena debido a la gravedad, hasta llegar a una altura en la cual la velocidad es cero. Calculamos en el capítulo 1 que para que Superman pueda saltar una altura de 200 m, equivalente a un edificio de treinta a cuarenta pisos, su velocidad inicial de despegue necesita ser al menos de 225 km/h. Pero Flash puede correr muchísimo más rápido, y debería por lo tanto ser capaz de alcanzar la cima de un edificio de cuarenta pisos con velocidad sobrante. Así, a medida que se aproxima a la pared de un edificio, y teniendo una velocidad mayor que el mínimo  $v^2 = (2gh)$ , habría de ser capaz de saltar la pared sin violar ninguna de las leyes de la física (aparte del hecho de que está corriendo a varios cientos de kilómetros por hora, claro). En cambio, lo más rápido que puede correr un humano no dotado de superpoderes es el orden de 24 km/h (aunque son posibles carreras cortas más rápidas), lo cual le permitiría correr por la pared de un pequeño cobertizo de herramientas.

La cuestión no es si Flash es capaz de moverse lo bastante rápido como para superar una altura

vertical h, sino si puede mantener la tracción como para trepar realmente por la pared vertical de un edificio. Bajo el simple acto de caminar residen ciertos detalles interesantes de física, relacionados con la tercera ley de Newton, que afirma que las fuerzas van por pares. Cuando usted corre o camina aplica una fuerza horizontal sobre el suelo bajo sus pies, opuesta a la dirección en la que desea moverse. El suelo ejerce una fuerza igual y opuesta sobre sus pies, paralela a la superficie del suelo, que se opone a la fuerza dirigida hacia atrás ejercida por sus zapatos. El origen de esta fuerza paralela es el rozamiento o fricción. Imagínese intentando andar a través de un piso cubierto con una capa uniforme de aceite de motor, y se dará cuenta de la gran importancia del rozamiento en un proceso tan sencillo como el acto de caminar.

Sin rozamiento entre sus botas y el suelo Flash nunca sería capaz de correr a ninguna parte. El Capitán Cold, uno de los primeros y más persistentes supervillanos contra los que Flash combatiría regularmente, poseía una pistola de «rayo congelador» que podía helar cualquier superficie. Una vez tras otra, el Capitán Cold (que, por cierto, no era realmente capitán) utilizaba el sencillo acto de crear una capa de hielo directamente frente al velocista escarlata<sup>[23]</sup> para inmovilizarlo, impidiéndole la fuerza motriz y convirtiendo en baldía su supervelocidad.

Debido sin duda a su ubicuidad y a su papel fundamental en la vida ordinaria, el fenómeno del rozamiento se da generalmente por sentado, a despecho de su complejidad. ¿Qué es exactamente lo que hace que un objeto oponga resistencia al arrastre a lo largo de una superficie? Aunque las propiedades básicas de la fricción fueron establecidas científicamente por Leonardo Da Vinci a comienzos del siglo XVI y por Amontons a mediados del XVII, una verdadera comprensión de la causa profunda de este fenómeno no llegaría hasta que se resolvió apropiadamente la naturaleza atómica de la materia en la década de 1920.

Existen dos maneras principales según las cuales se organizan los átomos para formar un objeto macroscópico: *a)* en una estructura cristalina, uniforme y periódica o *b)* al azar, en una aglomeración amorfa. Naturalmente, la mayor parte de la materia está situada entre estos dos extremos, y generalmente se tendrán regiones de ordenación cristalina conectadas de forma aleatoria, separadas a veces por secciones amorfas. El resultado neto es que incluso la superficie macroscópica más lisa no se verá realmente plana cuando se observa a escala atómica. De hecho, no es necesario llegar a tales extremos: incluso en escalas de longitud de una milésima de milímetro —muchísimo más grande que un átomo individual— la superficie de un objeto se parecerá más bien a una escarpada cadena montañosa que no a la calmada superficie de un lago. Por consiguiente, cuando dos objetos se frotan entre sí, sin que importe el aparente pulido de su acabado, en la escala atómica no es muy distinto que tomar la cadena montañosa de las Rocosas, ponerlas boca abajo sobre el Himalaya, y seguidamente arrastrarlas con velocidad constante a lo largo de las cimas de los montes del Himalaya. Uno esperaría naturalmente enormes conmociones geológicas y distorsiones de gran escala de esta forma extrema de tectónica de placas, y los resultados no son menos catastróficos en el nivel atómico. Con cada paso se rompen enlaces entre átomos, se forman otros nuevos y se producen avalanchas y terremotos en la escala atómica (por no decir del Armagedón<sup>[24]</sup> atómico que resulta del claqué). Todo ello requiere una gran dosis de fuerza para mantener el deslizamiento mutuo de esas cadenas montañosas de escala atómica. La resistencia de tales reajustes atómicos se denomina *rozamiento* y sin ella Flash solamente

correría sin desplazarse.

La magnitud de la fricción que se opone al movimiento de un objeto a lo largo de una superficie horizontal es proporcional al peso del objeto que presiona sobre la superficie. Cuanto mayor sea el peso de un objeto, más profundamente se interpenetran las «cadenas montañosas» atómicas y mayor es la fuerza de rozamiento que hay que superar para mover el objeto. Incluso aplicando una fuerza bastante grande es más difícil conseguir que se empiece a mover un bloque grande y pesado que uno pequeño y ligero. Se conocen soluciones de ingeniería para levantar objetos pesados desde el tiempo de los antiguos egipcios, quienes desarrollaron diversos esquemas ingeniosos para desplazar gigantescos bloques de caliza para la construcción de las pirámides.

Un truco obvio es el uso de una rampa. Sobre una superficie plana horizontal todo el peso del bloque presiona perpendicularmente hacia abajo sobre la superficie. En una superficie inclinada, por otra parte, el peso sigue estando dirigido hacia abajo, directamente hacia el centro de la Tierra (piense en una plomada sostenida sobre la rampa). Solamente parte del peso es perpendicular a la superficie de la rampa inclinada, y el resto está dirigido hacia la parte inferior de la rampa. Cuanto menor es la fuerza que presiona las cadenas montañosas atómicas entre sí, menos se interpenetrarán, y más fácil será moverlas entre sí. Así pues la fuerza de rozamiento, que es proporcional solamente a la componente del peso perpendicular a la superficie, es menor en el caso de un bloque sobre una superficie inclinada comparado con el caso de una superficie horizontal. No importa lo rugosa que sea la superficie, si la rampa está dispuesta con un ángulo muy pronunciado la fuerza de rozamiento que mantiene al bloque en su sitio será insuficiente para oponerse al empuje del peso hacia la parte inferior de la rampa, y el bloque deslizará descendiendo por la rampa. Sin embargo, cuando Flash sube corriendo por la pared vertical de un edificio, no hay ninguna componente de su peso perpendicular a la superficie sobre la cual está corriendo, es decir, la pared exterior del edificio. En principio, por lo tanto, no debería existir rozamiento entre sus botas y la pared, y sin rozamiento no puede correr en absoluto.

Entonces, ¿puede de hecho subir corriendo la pared de un edificio? Técnicamente, no. Al menos no «corriendo», tal como entendemos el término. Puede, mientras salta por un lado del edificio, mover sus pies adelante y atrás contra la pared, lo que dará la apariencia de estar corriendo. En esencia está recorriendo una distancia equivalente a la altura del edificio en el tiempo entre pasos. Normalmente mientras Flash corre su pie empuja hacia abajo sobre el suelo con un cierto ángulo respecto de la superficie de la calle, de modo que la fuerza que la calle ejerce en sentido contrario sobre él (gracias a la tercera ley de Newton) forma también un ángulo con la superficie. El efecto neto es que nuestro héroe acelera tanto en la dirección vertical como en la horizontal. La velocidad vertical le proporciona un rebote separándolo del suelo hacia arriba, y la componente horizontal lo impulsa en la dirección en que corre. Cuanto mayor es la velocidad vertical mayor es el brinco, mientras que cuanto mayor es la velocidad horizontal más lejos avanzará antes de que la gravedad supere a la pequeña velocidad vertical y retorne de nuevo sus pies al suelo, listos para otro paso. Corredores muy rápidos, entre los cuales se incluye ciertamente Flash, pueden tener ambos pies alejados del suelo entre pasos. Cuanto más deprisa corren mayor es el tiempo «en el aire» entre pasos. Si Flash salta verticalmente unos 2 cm con cada paso, entonces está en el aire durante un octavo de segundo antes de que la gravedad lo



empuje hacia abajo para otro paso. Pero un octavo de segundo es un tiempo grande para el velocista escarlata. Su velocidad horizontal es de 1.600 m/s o 6.760 km/h, luego la distancia que recorre entre pasos es más de 200 metros. Esto es aproximadamente un quinto de kilómetro, que utilizamos como cota de referencia para el edificio alto que saltaba Superman en el capítulo 1. En la medida en que Flash mantiene al menos esta velocidad mínima, no tiene que preocuparse por perder pie en el camino, simplemente porque escalará la altura del edificio entre sus pasos.

Antes de que pueda escalar un rascacielos, Flash tiene que cambiar radicalmente su dirección del sentido horizontal al vertical. Como se remarcó en el capítulo anterior, cualquier cambio en la dirección del movimiento, tanto si es el balanceo de Spiderman en su red o si está cambiando su recorrido hacia arriba por el costado de un edificio, está caracterizado por una aceleración que necesita una fuerza correspondiente. El hecho de girar su trayectoria noventa grados para apoyarse en la pared del edificio entraña una gran fuerza, proporcionada por la fricción entre las botas del cometa carmesí<sup>[25]</sup> y el suelo. Además de la supervelocidad, la «excepción milagrosa» de Flash debe por lo tanto ampliarse también a su capacidad para generar y tolerar aceleraciones que pocos superhéroes no nacidos en Krypton podrían soportar.

Las leyes de Newton del movimiento pueden también explicar cómo es capaz Flash de correr a lo largo de la superficie del océano o de cualquier masa de agua. Al igual que Gwen Stacy tenía que preocuparse cuando estaba a punto de estrellarse contra el agua moviéndose a su gran velocidad final, la enorme velocidad de las zancadas de Flash le hacen capaz de correr a través de su superficie. Cuando uno se mueve a través de cualquier fluido, sea aire, agua o aceite de motor, el fluido tiene que retirarse de su camino. Cuanto más denso es el medio, más difícil es conseguir eso rápidamente. Requiere más esfuerzo caminar a través de una piscina, retirando el agua de su trayecto, que caminar a través de una piscina vacía (es decir, una llena solamente con aire) y todavía resulta más difícil si la piscina está llena de melaza. La resistencia de un fluido al desplazamiento se llama *viscosidad*, que normalmente aumenta cuanto mayor es el medio y más deprisa se mueve uno a través del fluido.

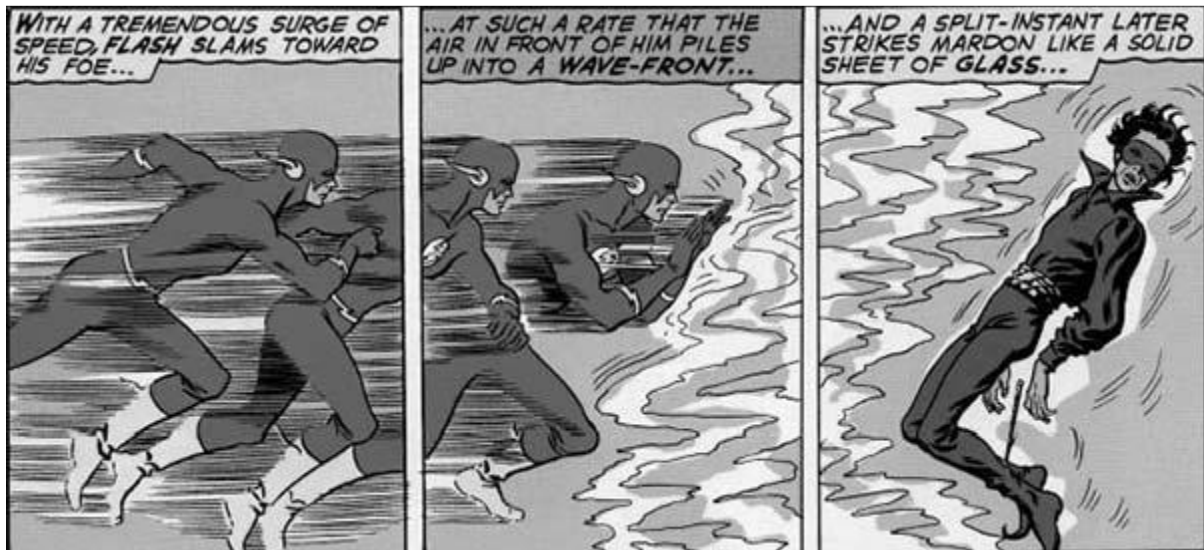
Para un medio poco concentrado como el aire, hay mucho espacio entre moléculas vecinas. A temperatura y presión ambiental, por ejemplo, la distancia entre moléculas adyacentes de aire es aproximadamente diez veces mayor que el diámetro de una molécula de oxígeno o de nitrógeno. Es más, cada molécula de aire a temperatura ambiente se mueve sin cesar con una velocidad media de aproximadamente 335 m/s o 1.200 km/h (que es la velocidad del sonido en el aire). Cuando corremos a través del aire, no formamos una región de gran densidad frente a nosotros, puesto que nuestra velocidad es mucho menor que la velocidad media de las moléculas del aire. Piense en una manada de ganado: si las vacas están corriendo cuando usted trata de empujar una de ellas para reunir la con la manada, las otras se estarán alejando. Si están caminando lentamente y usted empuja de igual modo que en el caso anterior, las otras no tienen tiempo de separarse del camino, y se apilarán en manada. Uno puede, naturalmente, moverse más rápido que la velocidad del sonido (proeza llevada a cabo por vez primera por el coronel Chuck Yeager en 1947), pero el esfuerzo rendido es grande. Cuando se trata de desplazar un volumen de aire más deprisa de lo que se mueven las moléculas del mismo, se forma delante de uno una región de alta densidad (es decir un frente de choque).

De hecho, en «The Challenge of the Weather Wizard» («El desafío del mago del tiempo») Flash utiliza precisamente tal frente de choque para poner fuera de combate al Mago del Tiempo. Mark Mardon es un bandido insignificante que roba la «varilla del tiempo» de su fallecido hermano científico, un dispositivo que le permite el control sobre el tiempo. Como cualquier otro villano de cómic que se respete, una vez en posesión de un arma que le proporcionaba el gobierno de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, adoptó inmediatamente un traje colorista, se nombró a sí mismo Weather Wizard (Mago del Tiempo) y se dispuso a robar bancos y a destrozar comisarías. El final de la historia, como se muestra en la figura 9, ocurre cuando, «con un tremendo arranque de velocidad, Flash se dirige ruidosamente hacia su enemigo tan deprisa que el aire frente a él se colapsa en un frente de choque y un instante después golpea a Mardon como un panel sólido de cristal». Ésta es ciertamente una consecuencia físicamente exacta de la velocidad supersónica de Flash, y es el origen de la «barrera del sonido» que atormentaba a los pilotos de guerra durante los años cuarenta y cincuenta.

La densidad del agua es mucho mayor que la del aire —las moléculas de agua están en contacto entre sí, mientras que hay grandes espacios vacíos entre las moléculas de aire—. En consecuencia es bastante más difícil moverse a través del agua cuando se viaja a grandes velocidades. Pero para Flash, cuando corre sobre la superficie del agua, esto es algo positivo. Al igual que alguien es capaz de hacer esquí acuático si es remolcado a gran velocidad, Flash es capaz de correr más rápidamente que el tiempo de respuesta de las moléculas de agua. Cuando su pie golpea la superficie del agua a velocidades mayores que 150 km/h, el agua no es capaz de desplazarse bajo sus botas con la rapidez suficiente y en lugar de ello forma un frente de choque, semejante al que se forma delante de un avión supersónico. A esas altas velocidades, el agua actúa de modo más parecido a un sólido que a un líquido bajo los pies de Flash (para comprobarlo, trate de dar una rápida palmada a un estanque de agua) y por lo tanto su capacidad para correr a través de masas de agua es realmente consistente con las leyes de la física. De hecho, a las velocidades con las que se mueve normalmente, es prácticamente imposible no correr sobre la superficie del agua. Sin embargo, para adquirir más momento, Flash debe empujar hacia atrás contra el agua. Ahora bien, incluso aunque el agua se comporte como un sólido bajo la rápida compresión bajo sus pies, ¿podrá obtener Flash tracción para correr? Una manera para conseguir esto es generando bajo sus pies vórtices que se propaguen hacia atrás, ganando como resultado de ello un empuje hacia adelante, de acuerdo con la tercera ley de Newton. Este mecanismo ha sido propuesto recientemente como el método por el cual los pequeños insectos patinadores que se ven en la superficie de algunas charcas se propulsan por dicha superficie. Aquí vemos nuevamente cómo los cómics se adelantan a los conocimientos. Las dotes de Flash para correr por encima de una masa de agua fueron comparadas a un objeto que pasa rozando sobre el agua en el número 117 de Flash, más de treinta años antes de que los científicos comprendieran el método de locomoción de los insectos patinadores de agua<sup>[26]</sup>.

Cuando Flash ha desplazado el aire que hay delante de él en su camino, deja una región de menor densidad de aire en su trayecto. Comparado con la densidad normal del aire en el entorno, este rastro de menor densidad detrás de Flash puede considerarse un vacío parcial. El aire se precipita para llenar cualquier vacío, y todas las cosas que están en el camino de esta comente de aire que va detrás de Flash serán empujadas hacia la región del rastro. Cuanto más deprisa corra, mayor será la diferencia

de presión entre el aire tras él y el aire del entorno, y mayor será la fuerza que tratará de corregir este desequilibrio.



**Fig. 9.** Viñetas de «The Challenge of the Weather Wizard» («La amenaza del Mago del Tiempo»), en el n.º 110 de *Flash*, que demuestra que, cuanto más rápidamente se mueve uno, más difícil resulta que el aire se aparte del trayecto.

© 1959 National Periodical Publications Inc. (DC)

Este efecto es perceptible incluso en el caso de objetos que se desplazan no tan rápidamente, tal como cuando un tren de metro entra en un túnel. La geometría enclaustrada del túnel acentúa el arrastre tras el tren que marcha, empujando periódicos sueltos y basura tras su rastro. A falta de un espacio confinado, Flash puede generar una región de baja presión que puede frenar el descenso en la caída de personas, coches o bombas gigantes, o bien, como se ve en la figura 10, ayudar a detener y mantener suspendido a un bribón mediante un vórtice creado corriendo en círculo.

Volviendo al asunto de la velocidad del sonido en el aire, siempre que Flash corra más rápido que 335 m/s (o 1.200 km/h), su comunicación con los demás solamente puede ser visual. Cualquiera que esté tras él o incluso en uno de sus costados no será capaz de hablarle, puesto que Flash sobrepasará sus ondas de sonido que intentan alcanzarlo. Flash genera ondas de presión que crean un «boom sonoro» a esas velocidades (esto se tratará con más detalle en el próximo capítulo). Con un choque sonoro de este tipo se anunció la primera aparición de Flash en el número 4 de *Showcase*. Naturalmente, para cualquiera que permanezca frente a él, el hecho de que Flash sobrepase las ondas de sonido no sería un problema, aunque seguiría siendo una barrera para la comunicación. Las ondas de sonido necesitan un medio en el cual propagarse. Lo que llamamos «ondas de sonido» son realmente variaciones de la densidad del medio, alternando regiones de expansión y de compresión. En un medio diluido, tal como el aire, hay grandes espacios entre las moléculas, lo que hace más difícil la propagación de las variaciones de densidad, en comparación con el agua, el acero o las delgadas paredes de un apartamento. Hablando a grandes rasgos, cuanto más denso es el medio, más

rápidamente viaja el sonido, lo que explica por qué en las antiguas películas del oeste un personaje aplicaba su oído a la vía para determinar si se aproximaba un tren demasiado distante para ser visto. Podía escuchar las vibraciones del tren a través del raíl de acero mucho antes que si esperara a que el mismo ruido le llegara a través del aire. Llevado al extremo, el sonido no se transmite en absoluto en el vacío extremadamente diluido del espacio exterior, que tiene una densidad de un átomo por centímetro cúbico, comparado con el aire con una densidad de veinte trillones de átomos por centímetro cúbico al nivel del mar en la Tierra. Si pudiéramos escuchar a alguien que le hablara, su voz tendría un matiz alto y metálico para Flash. La distancia entre zonas adyacentes comprimidas (o expandidas) del medio en una onda de sonido se llama *longitud* de la onda de sonido, lo cual está relacionado con el tono que escuchamos. La altura o frecuencia mide el número de ciclos de onda completos que pasan por un determinado punto por segundo, las longitudes de onda largas tienen tonos bajos (piense en los tonos graves de un contrabajo, donde la longitud de las cuerdas está relacionada con la longitud de onda de los sonidos que puede producir), mientras que longitudes de onda más cortas se escuchan como tonos elevados. Cuando Flash corre, incluso aunque no sobrepase la onda de sonido, su movimiento de alta velocidad afecta al tono que escucha. Supongamos que corra hacia alguien que le avisa gritando. Las ondas de sonido tienen cierta longitud de onda, que marcan la distancia media entre zonas adyacentes comprimidas o dilatadas. Si Flash permaneciera quieto cuando esas zonas alternadas le alcanzan, el tono que oiría estaría determinado por la longitud de onda que origina el hablante. Pero cuando Flash corre, una región de aire comprimido lo alcanza, y si está corriendo hacia el hablante, la siguiente región de aire comprimido alcanza su tímpano más pronto de lo que lo haría si permaneciera quieto. Flash escucha así una longitud de onda menor y por lo tanto una frecuencia mayor debido al hecho de que está corriendo hacia el origen del sonido. Cuanto más rápidamente corra, mayor será este desplazamiento de la longitud de onda y la frecuencia del sonido detectado.



**Fig. 10.** Cuando Flash corre a alta velocidad en círculo, deja una región de baja presión en su rastro, lo que hace que sea fácil llevar a Toughy Boraz (sí, éste es realmente su nombre) junto con su botín a la comisaría. (En *Flash*, n.º 117).

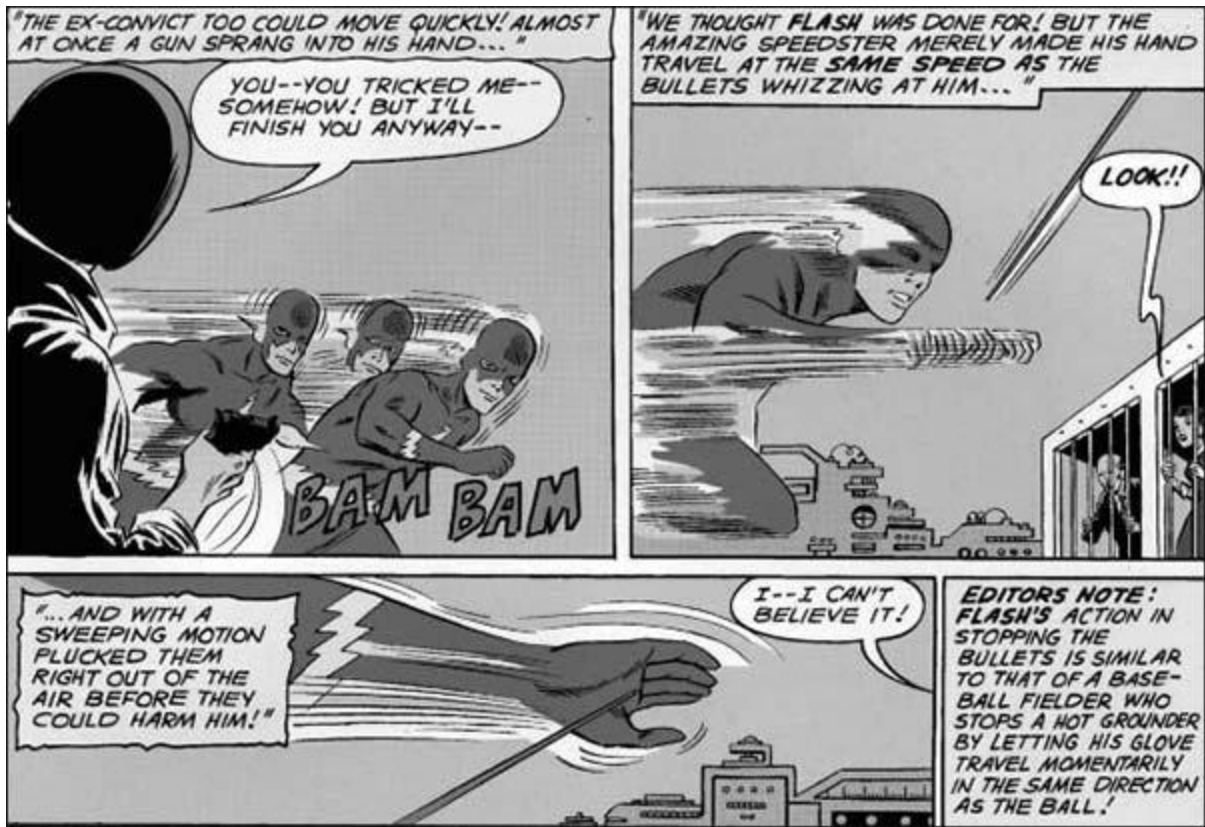
© 1960 National Periodical Publications Inc. (DC)

Este fenómeno se conoce como *efecto Doppler*, y si uno conoce la longitud de onda de un emisor de ondas estacionario y mide la longitud de onda de las ondas detectadas con un detector en

movimiento, puede determinar la velocidad del detector. Alternativamente, si uno envía una onda de una longitud de onda conocida, y ésta rebota en un blanco estacionario, la onda reflejada tendrá una longitud de onda más corta, mientras que si el blanco se mueve alejándose del emisor la longitud de onda detectada será mayor. El radar Doppler, como se discute con frecuencia en el Weather Channel<sup>[27]</sup>, implica la detección de este desplazamiento en la longitud de onda, lo que permite a los meteorólogos calcular la velocidad del viento en el caso de un frente tormentoso que se aproxima.

Ésta es también la premisa básica que se encierra tras los detectores de radar<sup>[28]</sup>, que utilizan ondas de radio de una longitud de onda conocida. Por el desplazamiento en la longitud de onda de la onda reflejada en relación con la transmitida, pueden determinar la velocidad del objeto (tal como una pelota de béisbol lanzada o un automóvil en movimiento) que reflejó las ondas. Naturalmente, para que esto funcione, las ondas que chocan con el objeto deben reflejarse de modo nítido, como la luz en un espejo, y dirigirse de nuevo en línea recta hacia el origen (y detector). Si usted arrugara su coche como si fuera hojalata estrujada, las ondas de radio se esparcirían en muchas direcciones, haciendo muy difícil la determinación precisa de la velocidad con un radar (lo que explica la dificultad que tienen los representantes de la ley para llevar a la justicia a Spud Man y a su Baked Potato-Mobile [coche Patata-asada]).

Cuanto más rápido se mueve el blanco, mayor es el desplazamiento de la longitud de onda y más alto el tono de la onda detectada. Si Flash corriera a 800 km/h hacia cualquiera que tuviera una voz normal con un tono de unos 100 ciclos por segundo, las ondas de sonido que llegan a los oídos del Virrey de la velocidad estarían desplazadas a 166 ciclos por segundo. Para que el tono del sonido que alcanza a Flash fuera mayor de 20.000 ciclos/segundo, el umbral más alto del oído humano, Flash debería correr hacia el hablante con una velocidad mayor que 240.000 km/h (es decir, 0,02% de la velocidad de la luz).



**Fig. 11.** Flash demuestra que los principios del impulso y del momento siguen siendo importantes incluso en el caso en que se desplace tan rápidamente como una bala disparada. (De *Flash*, n.º 124).

© 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

La técnica preferida por Flash para detener las balas también es consistente con las leyes de Newton del movimiento. No se necesita estar hecho a prueba de balas cuando se puede correr más deprisa que ellas. Pero ¿qué pasa con los inocentes espectadores que están en la línea de fuego? La figura 11 muestra un empleo físicamente acertado de la supervelocidad en esta situación. Como lo cuenta una de tales víctimas potenciales en el número 124 de *Flash*, «el asombroso corredor simplemente hizo que su mano corriera a la misma velocidad a la que las balas pasaban zumbando, y con un movimiento de barrido las fue recogiendo en el aire antes de que pudieran herirnos.» Es decir, Flash hacía coincidir primero su velocidad con la de las balas, de modo que la velocidad relativa entre él y la bala fuera cero. Del mismo modo que uno puede recoger un libro o una copa en un aeroplano en vuelo si no se está moviendo en relación con nosotros, Flash es capaz de recoger la bala en el aire, puesto que también se está moviendo a unos 457 m/s o a más de 1.600 km/h en la misma dirección que la bala. Una «nota del editor» en el número 124 de *Flash* señala correctamente: «la acción de Flash al detener las balas es semejante a la de un recogedor de béisbol que detiene un lanzamiento rápido dejando que su guante se mueva momentáneamente en la misma dirección que la pelota».

Como se razonó en el capítulo 3, el problema con las velocidades elevadas no es la velocidad en sí misma sino la deceleración. Para Gwen Stacy, el tiempo de frenado fue muy corto, de modo que la fuerza de parada fue muy grande. El boxeador que recibe un puñetazo, como ya se indicó, aumenta deliberadamente el tiempo de contacto, con el fin de minimizar la fuerza de parada. Flash, como destaca correctamente la nota del editor, aplica el mismo principio en esta situación. Además de ser capaz de correr a velocidades asombrosas, Barry Allen había adquirido también aparentemente la capacidad de resistir aceleraciones aplastantes cada vez que acelera o frena. Así, cuando Flash se detiene, la bala que sostiene se detiene también, y eso le permite dejar seguidamente los trozos de metal a los pies del pistolero en un golpe de efecto teatral.

**RELATIVIDAD ESPECIAL.** En el capítulo anterior mencioné el estampido sónico que crea Flash al correr más rápidamente que la velocidad del sonido. ¿Por qué se produce un «estampido» cuando un objeto se mueve a una velocidad igual o superior a la del sonido? ¿Y cómo puede esto ayudar a entender la teoría de la relatividad especial de Einstein? Consideremos en primer lugar el estampido y luego pasaremos a Einstein. Imagine que se halla de pie en el campo y que Flash está corriendo en dirección a usted a la velocidad del sonido —es decir, a un tercio de kilómetro por segundo—. Si comienza a quince kilómetros de distancia, dice «Flash» y cuando está a sólo ocho kilómetros frente a usted dice «Manda». ¿Qué es lo que usted escucha? Si Flash fuera corriendo más despacio que la velocidad del sonido, entonces el «Flash» que pronunció alcanzará la marca de ocho kilómetros antes que él, y luego pronuncia «Manda» cuando el «Flash» estuviera próximo a alcanzar sus oídos. Usted escucharía claramente «Flash Manda», seguido poco después por el sonido del velocista escarlata al pasar junto a usted.

Si en lugar de ello Flash hubiera corrido más rápidamente que el sonido, entonces hubiera llegado al punto de los ocho kilómetros antes que el sonido que emitió en la señal de partida de los quince kilómetros. Entonces diría «Manda» y seguiría hacia usted. Puesto que «Manda» tiene que recorrer menos distancia, le alcanzará antes que «Flash», de modo que usted escuchará las palabras en el orden inverso según el cual fueron dichas —es decir, para usted sonaría como si hubiera dicho «Manda Flash»—. Esta frase al revés no le alcanzará hasta que el propio Flash le haya sobrepasado. Al correr más deprisa que la velocidad del sonido, puede cubrir el trecho desde la distancia de ocho kilómetros en un tiempo menor que el que emplean las ondas de sonido.

Si hubiera corrido exactamente a la misma velocidad que el sonido, entonces cuando gritó «Flash» en el punto de los quince kilómetros, el sonido hubiera alcanzado la marca de los ocho kilómetros en el mismo instante exacto que lo hace el propio virrey de la velocidad. Cuando dice «Manda» esto llega desde el punto de los ocho kilómetros a la vez que lo hace «Flash», de modo que ambas palabras alcanzan sus tímpanos en el mismo instante, veinticinco segundos después. Usted no escucha «Flash Manda» ni «Manda Flash» sino que las dos palabras se superponen en el mismo instante. El sonido es una onda de presión, de modo que las ondas de las dos palabras se suman y crean una vibración mayor que si se oyeran separadamente. Flash no tendría que hablar o hacer ruido a medida que avanza hacia usted, pero el simple disturbio al desplazar el aire fuera de su trayecto creará una onda de presión que usted oirá como un atronador estruendo (o un «estampido sónico») en el mismo instante en que el sultán de la velocidad cruza a su lado. Si Flash corre más rápido que la velocidad del sonido, esta alteración seguirá creándose. En este caso pasaría junto a usted en relativo silencio, y a continuación el estampido sónico, viajando a la velocidad del sonido, le alcanzará eventualmente, con consecuencias explosivas. (El «Manda Flash» que pronunció en el párrafo anterior se perderá confundido en el choque sónico). El «crac» del disparo de una pistola, o el zurriagazo de Catwoman son mini estallidos sónicos creados por la bala o el extremo del látigo moviéndose más deprisa que la velocidad del sonido en el aire.



El peligro planteado por la creación indiscriminada de ondas de choque sónicas por Flash está reconocido por los escritores de cómics actuales. En *DC: The New Frontier*, una revisión de los héroes de la Edad de Plata de DC Comics, situada a finales de los cincuenta, que fue cuando históricamente hicieron su primera aparición, el escritor Darwin Cooke describe una escena en la que Flash corre desde Central City (situada brumosamente en el medio oeste americano) hasta Las Vegas, en Nevada. En las leyendas que describen los pensamientos de Flash mientras corre campo a través, nos dice: «Espero a estar fuera de los límites de la ciudad antes de traspasar la barrera del sonido. Es algo que comprendí tras unas cuantas experiencias traumáticas. Los cristales volantes y los peatones no se mezclan». Ciertamente ellos no, como quedó gráficamente demostrado en el número 202 de *Flash* (vol. 2). En esta historia nuestro héroe ha perdido su memoria y, en traje de paisano, no es consciente de que posee supervelocidad. Actuando instintivamente al ser asaltado por una pandilla callejera, sus movimientos de alta velocidad hacen estallar todas las ventanas de la manzana de casas y provocan daños estructurales masivos en los edificios de los alrededores.

Con independencia del orden en el cual oye lo que dice Flash, tanto si es «Flash Manda» como si es «Manda Flash», si usted tiene una vista aguda y puede leer los labios puede estar seguro del orden en el cual Flash ha dicho realmente esas palabras. Este acuerdo es debido al hecho de que la luz reflejada por Flash viaja mucho más rápidamente que el sonido (300.000 km/s, comparada con un tercio de kilómetro por segundo). Así es como podemos determinar la distancia a la que cae un rayo comparando el tiempo que transcurre entre el relámpago y el trueno<sup>[29]</sup>.

Pero ¿qué ocurriría si Flash corriera a una velocidad cercana a la de la luz? En el caso de objetos que se mueven a velocidades próximas a la de la luz suceden todo tipo de cosas extrañas que tienen que ver con la longitud, el tiempo y la masa, tal como lo explicó Albert Einstein en 1905 en su teoría especial de la relatividad (se llama «especial» porque ignora la gravedad, mientras que la teoría «general» de la relatividad, desarrollada en 1905, sí la tiene en cuenta). No es éste el momento ni el lugar para entrar en una consideración completa de la relatividad. Un tratamiento aceptable del asunto sobrepasaría el presente libro. Pero mencionaré un punto fundamental en relación con viajar a una velocidad cercana a la de la luz, que no nos llevará mucho tiempo, y que seguiremos desarrollando cuando consideremos la conexión entre la electricidad y el magnetismo en el capítulo 17.

La teoría especial de la relatividad puede resumirse en dos afirmaciones que parecen sencillas, pero que contienen una abundancia de penetración física. Son: *a*) nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz (perdón, Superman y Flash), que es la misma para todos, sin que importe lo rápido que se estén moviendo, y *b*) las leyes de la física son las mismas para todos, con independencia de su estado de movimiento. El primer punto es realmente extraño. Si Flash corre tan rápido como una bala disparada, para nosotros la bala está moviéndose a 1.500 km/h, mientras que para Flash, que corre en la misma dirección y a la misma velocidad, la bala parece estacionaria (que es por lo que es capaz «con un movimiento de barrido» de recogerlas en el aire tan fácilmente). Pero la velocidad de la luz es de 300.000 km/s lo mismo para usted que está quieto como para Flash, no importa lo rápido que se mueva. Incluso si está corriendo a la mitad de la velocidad de la luz —a 150.000 km/s— la velocidad de la luz relativa al mismo *no es* de 150.000 km/s, sino que sigue siendo de 300.000 km/s, la misma que para usted que permanece quieto en la esquina de la calle. ¿Cómo es posible?

Cuando Flash avanza hacia usted, desde el punto de vista de Flash es como si él estuviera quieto y usted estuviera corriendo hacia él. La teoría especial de la relatividad afirma que ambos han de estar de acuerdo en que la velocidad de la luz es de 300.000 km/s. Para que esto sea cierto, Einstein razona que desde el punto de vista de usted, Flash parecerá más delgado (es decir, su longitud en la dirección del movimiento aparecerá comprimida) y el tiempo parecerá transcurrir más despacio para él que para usted. Desde el punto de vista de Flash, la vara de medir que sostiene seguirá teniendo la longitud de un metro, y su reloj marcará el tiempo como siempre, pero para él es usted el que se mueve, y hará las mismas determinaciones acerca de usted (su longitud estará acortada y su tiempo transcurrirá más lentamente para usted, según lo aprecia Flash). Esto se debe a que, a fin de medir la longitud de la vara que sostiene Flash, por ejemplo, usted tiene que considerar los extremos delantero y trasero de la misma, y cronometrar el tiempo en que pasan por un punto determinado. Para dos personas que se mueven relativamente entre sí (es decir, un Flash que se mueve y un observador estacionario) resulta imposible ponerse de acuerdo acerca de si dos cosas suceden a la vez en el caso de que estén separadas en el espacio y en el tiempo.

La información no puede viajar más deprisa que la luz, así que siempre existirá una discrepancia en el orden en que ocurren los sucesos. Para equilibrar las cosas de modo que todos estén de acuerdo en el valor de la velocidad de la luz, parecerá que las longitudes se encogen con el movimiento y que el tiempo discurre más lentamente. Los *comic books* le sacan partido a esto frecuentemente cuando tratan con personajes que pueden viajar a la velocidad de la luz (como el Negative Man de la Patrulla Condenada [Doom Patrol] y el Capitán Marvel, aunque no el chico Shazam, ni el oficial de la milicia Kree de finales de los sesenta y principio de los setenta, pero sí una heroína afroamericana de los Vengadores de finales de los ochenta, que podía transformar su cuerpo en fotones de luz coherente). Los otros personajes de la historieta no deberían ser capaces de ver a dichos héroes, al no haber modo de que la luz se refleje en ellos si se mueven más deprisa que la misma. Como mucho deberían mostrarse como una chispa de relámpago desde una gran distancia, pero serían invisibles en la cercanía.

La velocidad más grande que permite el universo es la de la luz. Cuando Flash corre más y más rápido, uno podría pensar que debería ser capaz de traspasar ese límite, pero eso no puede suceder. Para explicar este comportamiento desde el punto de vista de un observador estacionario, debe ocurrir que cuanto más rápido va, más difícil le resulte seguir acelerando. Según la segunda ley de Newton (fuerza es igual a masa por aceleración) sabemos que si la fuerza que aplican sus zapatos cuando están en movimiento permanece constante pero no hay una correspondiente aceleración, debe ser porque su masa ha aumentado. Así, además de que el tiempo parece ir más lento y las longitudes acortarse, la masa de Flash a la carrera parecerá (para los lentos estacionarios) crecer cuanto más rápido corra. Esto se indica ocasionalmente en los cómics. En el número 89 de *Justice League of America*, Flash tiene que trasladar a toda la población de 512.00 hombres, mujeres y niños de Chongjin, en Corea del Norte, para apartarla de la inminente detonación de una bomba atómica en una fracción de segundo. Para cumplir con esta hazaña debe moverse a velocidades muy cercanas a la de la luz. Las consecuencias relativistas de estas altas velocidades son aludidas una vez que ha salvado al pueblo y cae de rodillas en lo alto de una colina. Como se describe en una leyenda, «cuando su cuerpo se libera de los estridentes efectos posteriores a viajar a una velocidad cercana a la de la luz, ojos de una masa casi infinita se vuelven

hacia el resplandor que engulle a Chongjin». Naturalmente, para Flash, él se halla estacionario y es el resto del mundo lo que se mueve y gana masa. Por cierto, fue el darse cuenta de que un aumento en la energía cinética de un objeto está directamente relacionado con un aumento de su masa lo que condujo a la más famosa ecuación de Einstein  $E = m c^2$ .

Además de ser capaz de correr a velocidades asombrosas, se dice que Flash posee un control total sobre cada uno de los movimientos de sus moléculas. Este control vibratorio se utilizó en el número 116 de *Flash*, y muchas veces desde entonces. Haciendo coincidir las vibraciones de su cuerpo con la frecuencia vibratoria de los átomos de una pared, los guionistas de Flash justifican que pudiera atravesar una pared sólida, sin que entrañe ningún daño para él ni para el muro. No obstante, no es cierto que la única razón por la que no podemos pasar a través de paredes sólidas sea el que vibramos a distinta frecuencia que los átomos de las mismas. De hecho, como trataremos en adelante, la frecuencia promedio según la cual vibran nuestros átomos es simplemente un reflejo de nuestra temperatura. Nuestros cuerpos están normalmente en torno más o menos de un 40% de la temperatura de una pared, así que la frecuencia vibratoria de nuestros átomos está ya casi en coincidencia con los de la pared.

Sin embargo, hay un fenómeno de la mecánica cuántica llamado *efecto túnel* que permite que un objeto pase a través de una barrera sólida sin perturbar a la barrera o a sí mismo. Una discusión de este efecto cuántico es prematura, dado que estamos ocupándonos de las tres leyes de Newton del movimiento y de física clásica. Por consiguiente, dejaremos para más adelante la consideración de esta proeza de Flash.

**PROPIEDADES DE LA MATERIA.** Antes de que el Dr. Henry Pym empezara a trasnochar, a combatir a los malvados y a capturar espías comunistas bajo el nombre de Ant-Man, era un bioquímico bastante normal. En su primera aparición en «The Man in the Ant Hill» («El hombre en el hormiguero»), Pym era presentado debatiéndose con el flagelo de la vida de un científico moderno: ¡la financiación! Como aprendimos en una escena retrospectiva, en un reciente congreso científico un grupo de expertos fue más allá del mero rechazo de la petición de Pym de apoyo financiero a su investigación en busca de un brebaje para la disminución de tamaño, y adoptaron la cruel decisión añadida de mofarse personalmente de él. «¡Bah! Pierde su tiempo con sus ridículas teorías —le reconvenía un profesor—, ¡no funcionarán nunca!» Otro aconsejaba: «¡Debería aplicarse a proyectos prácticos!», a lo cual replicaba Pym: «¡No, solamente trabajaré en aquello que estimule mi imaginación... como mi último invento!». Debería destacar que dos aspectos de este pugilato son especialmente ciertos, a saber: *a)* hasta el presente continúa la tensión entre las universidades y los laboratorios de investigación, entre la investigación motivada por la búsqueda de aplicaciones prácticas y la que está impulsada por la curiosidad, y *b)* a diferencia del público en general, los científicos utilizan de forma rutinaria la expresión «¡bah!» en las conversaciones diarias.

La primera exposición accidental de Pym (y usted no estará muy equivocado si concluye que casi todos los superhéroes son proclives a los accidentes, al menos cuando resulta que con ellos obtienen sus poderes) a su poción para encoger le condujo a una pavorosa aventura en el interior de un hormiguero, lo cual recuerda la historia de ciencia ficción de 1954 *El increíble hombre menguante*. Al final de esta historia, Pym recobra su altura original mediante la aplicación de la poción de crecimiento y, una vez vuelto a su tamaño normal, vierte ambos preparados por el fregadero. Al darse cuenta de que los brebajes son «demasiado peligrosos para que los use de nuevo ningún ser humano», promete: «¡De ahora en adelante me dedicaré a proyectos prácticos!». Lo que Pym considera más práctico que desarrollar un proceso reversible de miniaturización se deja a la imaginación del lector.



**Fig. 12.** Página inicial de «The Return of the Ant-Man» [«El regreso del Hombre-Hormiga»], en el n.º 35 de *Tales to Astonish*, en la que vemos por primera vez al alter ego del doctor Henry Pym. © 1962 Marvel Comics

El voto del Dr. Pym no fue roto hasta que llegaron las cifras de ventas del número 27 de *Tales to Astonish*. Como se ve en la figura 12, hacia el número 35 de *Tales to Astonish* el buen doctor dio marcha atrás en «El regreso del Hombre-Hormiga» (aunque en la historia anterior del número 27 de *Tales to Astonish* nunca se había referido a sí mismo con ese título) habiendo replicado su poción para encoger y diseñado un esplendoroso mono rojo y negro y un casco «cibernético» que le permitía comunicarse electrónicamente con las hormigas. Dado que las hormigas se comunican realmente entre sí a través de

rastros de feromonas químicas que excretan, no nos preocuparemos demasiado por el modo como podría realmente funcionar el casco de Pym. Así vestido, el científico Henry Pym combatió a delincuentes comunes, a espías comunistas (estábamos a comienzos de la década de los sesenta, al fin y al cabo), a invasores alienígenas, y a extraños supervillanos tales como Porcupine («Erizo») y Egghead («Cabeza de huevo»), todo ello bajo la apariencia del asombroso Ant-Man. Parecía que ningún malhechor pudiera ganarle en una confrontación directa (no tan literal, dada la diferencia de tamaño) con un luchador contra el crimen cuyo superpoder consistía en que medía solamente seis centímetros de altura.

Las aventuras en las que intervienen personajes reducidos al tamaño de insectos han sido un artículo básico de las películas y de los cómics de ciencia ficción durante al menos cincuenta años. Pero ahora estamos en el siglo XXI, y todavía no hemos obtenido este modo de reducir peso. ¿Cuál es el impedimento?

Después de todo, de vez en cuando aparece una noticia confirmando la ecuación: *realidad científica igual a ciencia ficción más tiempo*. Los robots ensamblan automóviles o limpian con aspiradora nuestro apartamento, un computador ha derrotado al campeón del mundo en un torneo de ajedrez y la clonación terapéutica promete aliviar muchas enfermedades devastadoras y otros problemas médicos. El hombre ha llegado a la Luna, paseado sobre su superficie y regresado sano y salvo a la Tierra, y no una vez sino varias, y viajar a otros planetas, al menos en nuestro sistema solar, ya se ha realizado, aunque hasta ahora solamente por medio de vehículos no tripulados. En prestigiosas revistas de física se han publicado artículos científicos que tratan de la construcción de «máquinas del tiempo», cuya operación implica el concepto de «energía negativa». (Esta «energía negativa» impediría el colapso de los agujeros de gusano —un concepto desarrollado en la teoría general de la relatividad—, la cual ha sido postulada como capaz de proporcionar un mecanismo teórico para velocidades de distorsión: es decir viajes más rápidos que la luz.)<sup>[30]</sup>

Sobre el fin tecnológico de proyecciones futuristas, los comunicadores de mano que aparecen en *Star Trek* son hoy en día artículos corrientes, y de hecho algunos modelos de teléfonos móviles, con almacenamiento y transmisión de imágenes digitales y acceso a Internet, exceden la imaginación de los guionistas de *Star Trek* de los años sesenta (los comunicadores de televisión de muñeca de las tiras de cómic de Dick Tracy no están tan distantes). Los «tricorders» de *Star Trek* —dispositivos manuales del tamaño de una cubierta de libro que permiten análisis químicos y biológicos— podrían estar pronto disponibles en el mercado: los PDA<sup>[31]</sup> son ya comunes, y la tecnología para llevar a cabo un «análisis de ADN en un chip» y otras funciones se hallan en desarrollo. Con dispositivos que van desde pantallas planas de televisión a hornos de microondas y a la imagen por resonancia magnética que proporciona vistas en tres dimensiones del interior del cuerpo humano, estamos viviendo realmente en el Mundo del Mañana, aunque nos falten todavía mochilas-cohete que nos permitan volar y mayordomos robot.

A pesar de todo, y a despecho de todas las maravillas y conceptos fantásticos que ya están aquí o parecen a nuestro alcance, todavía no podemos encogernos o agrandarnos a voluntad. Comparado con la miniaturización, los viajes por deformación del espacio y los viajes en el tiempo se hallan a la vuelta de la esquina. No obstante, en los años sesenta, nuestros cómics y películas nos prometían rayos

reductores, que aparecerían en breve de un laboratorio científico militar bajo tierra no lejos de usted.

La película de ciencia ficción de 1966 *Fantastic Voyage (Viaje Alucinante)* describía las aventuras de un equipo quirúrgico y un mini submarino que son miniaturizados hasta el tamaño de una bacteria e inyectados en el torrente sanguíneo de un científico, con el fin de eliminar un coágulo de sangre en su cerebro, inoperable desde el exterior. Antes del comienzo de la película se podía leer la siguiente cabecera: «ESTA PELÍCULA LO LLEVARÁ ADONDE NADIE HA ESTADO ANTES. NINGÚN TESTIGO OCULAR HA VISTO REALMENTE LO QUE USTED ESTÁ A PUNTO DE VER. PERO EN NUESTRO MUNDO, DONDE IR A LA LUNA PRONTO TENDRÁ LUGAR Y DONDE LAS COSAS MÁS INCREÍBLES ESTÁN SUCEDIENDO A NUESTRO ALREDEDOR, ALGÚN DÍA, QUIZÁS MAÑANA, LOS ACONTECIMIENTOS FANTÁSTICOS QUE VA A VER PUEDEN Y PODRÁN OCURRIR». Tres años más tarde el hombre caminó realmente sobre la Luna, y es cierto que comparado con treinta años atrás, las cosas más increíbles están sucediendo a nuestro alrededor. Sin embargo tendremos que esperar mucho antes de que un equipo de doctores pueda anunciar esta fundamental noticia médica. ¿Cuál es la barrera insuperable que impide que un ambicioso Dr. Henry Pym cambie radicalmente de tamaño?

La razón por la que la miniaturización es físicamente imposible, por lo que sabemos, es que la materia está formada por átomos, y el tamaño de un átomo es una escala de longitud fundamental de la naturaleza, no abierta a ajustes continuos. Como se discute en la versión novelada de Isaac Asimov de *Viaje alucinante*, para que algo disminuya de tamaño se requiere: *a)* hacer que los propios átomos sean más pequeños, o *b)* retirar una fracción (grande) de estos átomos, o *c)* agrupar los átomos más apretadamente.

Consideremos primero el tamaño de los átomos. En representaciones caricaturescas de átomos, en carteles de aviso del tipo ¡PELIGRO! ¡RADIOACTIVIDAD! por ejemplo, las órbitas de los electrones en torno al núcleo se representan como trayectorias elípticas, como las de los planetas alrededor del Sol. Indicaríamos el «tamaño» de nuestro sistema solar como la distancia desde el centro del Sol hasta los confines exteriores de las órbitas planetarias, y de modo semejante el «diámetro» de un átomo se determinará por el rango en el cual los electrones giran alrededor del núcleo. El tamaño típico de un átomo es de aproximadamente un tercio de un nanómetro, siendo un nanómetro la milmillonésima parte del metro. Esto parece pequeño, y lo es: a lo largo de una sección transversal de un cabello humano hay unos 300.000 átomos.

Cada átomo tiene un núcleo que consiste en cierto número de protones cargados positivamente y un número comparable de neutrones sin carga. Además de los protones cargados positivamente, el átomo contiene un número igual de electrones cargados negativamente. Si objetos con cargas opuestas se atraen entre sí, entonces ¿por qué los protones (cargados positivamente) no atraen hacia ellos a los electrones (con carga negativa), hasta el punto de que los electrones se posen en el núcleo? Bien, lo harían si los electrones permanecieran quietos. A fin de cuentas, como se trató en el capítulo 2, la Tierra y la Luna se atraen entre sí debido a su mutua atracción gravitatoria, y la órbita de la Luna es tal que su distancia a la Tierra y su velocidad equilibran exactamente el tirón gravitatorio hacia el interior. De modo parecido, los electrones residen en «órbitas» alrededor del núcleo que ocupa el centro del átomo.

Curiosamente, todos los átomos tienen más o menos el mismo tamaño, dentro de un factor de tres. El número de protones en el núcleo se compensa con un número igual de electrones «orbitales». Los átomos más pesados tienen más protones que empujan a los electrones hacia el núcleo con más fuerza, pero más electrones resulta en una mayor repulsión entre ellos, que intentarán apartarse entre sí. Este equilibrio da como resultado un «tamaño» del átomo que es más o menos de veinte o treinta mil millonésimas de centímetro.

Debo observar, por razones en las que entraremos en la sección 3, que este esbozo de los electrones barriendo precisas órbitas elípticas en un átomo no es correcta. En lugar de ello, la mecánica cuántica no nos dice dónde están los electrones, aunque proporciona un mecanismo para calcular la probabilidad de hallar un electrón a cierta distancia del núcleo. Es la mayor distancia para la cual es apreciable la probabilidad de hallar un electrón (la amplitud de la «nube de probabilidad») la que cuenta como «radio» del átomo, y está relacionada con su tamaño. La expresión del radio más probable del átomo depende solamente de términos tales como la masa del electrón, su carga eléctrica, el número de cargas positivas del núcleo, y de una constante fundamental del universo  $h$ , conocida como constante de Planck (cuyo valor determina la magnitud de todo fenómeno cuántico). Trataremos de  $h$  con más detalle en la sección 3, pero por ahora todo de lo que necesitamos preocuparnos es de que  $h$  es un número fijo, y de que la masa de un electrón o la magnitud de su carga eléctrica intervienen en la expresión del radio atómico. Una vez que está establecido el número de cargas positivas del núcleo (la cantidad que determina cuál es el elemento de que nos ocupamos) no hay nada que cambiar. El tamaño de un átomo está determinado por un conjunto de constantes fundamentales y no tolera ajustes.

En la continuación de Isaac Asimov a su versión novelada de *Viaje alucinante*, titulada *Viaje alucinante II. Destino: el cerebro (Fantastic Voyage II: Destination Brain)* el mecanismo propuesto para permitir la miniaturización implicaba la creación de un «campo local de distorsión» que de algún modo permite cambiar el valor de la constante de Planck. Si  $h$  se transforma en un parámetro ajustable, la reducción de su valor en un factor de diez disminuiría el tamaño de un átomo a una centésima parte de su tamaño actual. Ni que decir tiene que no tenemos idea de cómo se consigue esto en el mundo real, lo cual tiene que ver, después de todo, con que  $h$  se considere una constante invariable. Nuestras vidas serían profundamente diferentes si descubriéramos alguna vez una manera de cambiar las constantes fundamentales de la naturaleza, de modo que la velocidad de la luz o la carga de un electrón queden dispuestas a ajustes por nuestra parte. Hasta que llegue ese día, esas constantes son las que son, y debido a que el radio de un átomo está descrito por las constantes referidas, no puede cambiarse. No podemos por lo tanto hacer que los átomos sean más pequeños, al menos no sin cambiar también el tipo de universo en el cual vivimos.

¿Qué hay de la segunda sugerencia para la reducción de tamaño, es decir, retirar una parte de los átomos de un objeto? Todo está formado por átomos; en consecuencia retirar algunos de ellos haría que un objeto se haga más pequeño. Ciertamente la reducción en el tamaño de los dispositivos electrónicos (el «crimen de laboratorio en un chip» antes aludido) sugiere que algunos objetos se pueden hacer con menos material y seguir reteniendo su funcionalidad. Surgen problemas, sin embargo, con objetos complejos o con seres vivos, para los cuales la supresión de un número significativo de átomos podría tener serias consecuencias. Pasar de una altura de un metro ochenta a



quince centímetros es una reducción en altura de un factor de doce. Naturalmente, la gente es tridimensional, y también se produciría una reducción de un factor de doce en anchura y profundidad. Para conseguir esto retirando átomos (suponiendo que uno pudiera hacerlo, disponer de un lugar seguro en el que almacenarlos, y los pudiera reemplazar más tarde cuando usted quiera volver a su altura original) significa que usted ha de conservar solamente un átomo por cada 1.728 átomos retirados. Incluso suponiendo que esta supresión se lleve a cabo de un modo uniforme tal que se retire la misma fracción de átomos de todas sus células, la funcionalidad biológica se perdería o al menos se vería gravemente comprometida.

Considere las neuronas de su cerebro. Es falso que el ser humano utilice solamente el 10% de la capacidad cerebral presente; la teoría de la evolución contradice tal derroche monumental de recursos disponibles. Si las neuronas pudieran ser más pequeñas y seguir cumpliendo su función en el cerebro, entonces habría una gran ventaja competitiva para cualquier mutación en esa dirección. No solamente requeriría menos átomos construir a una persona (de modo que la demanda de materia prima mediante los alimentos se reduciría mucho) sino que uno podría tener muchas más neuronas y por lo tanto conexiones sinápticas si nuestros cerebros siguieran teniendo el tamaño actual. La neurona típica tiene una amplitud de aproximadamente una milésima de centímetro, y esto es cierto tanto si uno considera la neurona de una hormiga como la de un humano. Generalmente, las personas son más inteligentes que las hormigas —estoy seguro de que podemos pensar en un contraejemplo sacado de nuestra experiencia personal— debido a que poseemos aproximadamente cuatrocientas mil veces más neuronas y un número correspondientemente mayor de conexiones sinápticas, y no porque nuestras neuronas sean mil veces mayores. Retire el 99% de los átomos y podrá hacer las células de su cuerpo un 99% menores, pero no funcionarán como se pretende.

Finalmente, ¿qué hay acerca de la tercera posibilidad: disminuir a una persona haciéndola más densa a base de apretujar entre sí sus átomos? Desgraciadamente ésta no es tampoco una estrategia de éxito para la miniaturización, por las mismas razones que Krypton no podía ser sencillamente un planeta 15 veces más denso que la Tierra. Los átomos de la mayoría de los sólidos están ya empaquetados estrechamente. Además, gracias a la repulsión de las nubes de probabilidad de electrones cargados alrededor de cada átomo, son objetos bastante rígidos y resisten el que se les comprima en conjunto, como lo haría un conjunto de canicas en una caja. Cuando se llena un volumen con canicas, casi todo el espacio disponible del contenedor está ocupado por las canicas. Con pocas excepciones, cada canica está en contacto físico con varias de sus vecinas. Es cierto que existen espacios vacíos entre las canicas, pero esos espacios no son lo bastante grandes como para que podamos añadir más que posiblemente un pequeño porcentaje de canicas. Si las canicas son esferas duras y no comprimibles, entonces apretar las paredes de la caja no conducirá a una reducción significativa de su volumen. El hecho de reducir el tamaño del contenedor por un factor de diez requeriría presiones que harían romperse a las canicas. Intentar empequeñecer a una persona aplicando presiones similares daría como resultado una historieta de cómic que sería a la vez corta y confusa y casi con seguridad no obtendría la aprobación del Comics Code Authority.

Ahora bien, si la miniaturización es tan difícil, ¿cómo lo consigue Henry Pym, también conocido como Ant-Man? Como se relata en el número 27 de *Tales to Astonish*, el bioquímico Dr. Henry Pym

había dedicado años a descubrir una poción que disminuyera el tamaño de cualquier objeto y cuyo proceso pudiera revertirse con un antídoto de suero de crecimiento. Más tarde, Pym convertiría su brebaje de miniaturización en una píldora fácil de tragar. Cuando resultaba eventualmente necesario explicar cómo era capaz de achicar otros objetos, tales como su traje, casco y las armas que portaba, se dio a conocer que había desarrollado un pequeño generador de «partículas Pym», capaces de aumentar o disminuir el tamaño de un objeto.

Nunca se dio ninguna explicación más de cómo funcionaban realmente estos preparados o las partículas Pym, y su base física debe pasar a la «excepción milagrosa» que invocamos frecuentemente cuando consideramos el origen de los superpoderes de un héroe.

**MOMENTO DE TORSIÓN Y ROTACIÓN.** Cada héroe de cómic tiene algún talón de Aquiles, y el de Ant-Man era solamente de un milímetro de tamaño. Hay ciertas desventajas obvias para un héroe que tiene el tamaño de una hormiga. Por ejemplo, así como Superman es susceptible a la kriptonita, Ant-Man tiene que estar siempre alerta ante el más común peligro de ser pisado. Además, al ser su paso de sólo unos cuantos milímetros, necesita miles de pasos para cubrir la misma distancia que podría recorrer en un solo paso cuando tiene la altura normal. El tiempo requerido para avanzar un metro aumentará en consecuencia de modo correspondiente. Esto era sin duda su motivación para desplazarse con frecuencia a lomos de hormigas carpinteras<sup>[32]</sup>. El hecho de que pueda cabalgar subido a una hormiga sin aplastarla indica que la masa de Ant-Man decrece de acuerdo con su tamaño, lo que implica que su densidad permanece constante cuando se encoge. (Recuerde que la densidad es la masa de un objeto dividida por su volumen; si el volumen disminuye por un factor de mil, y la masa se reduce por un factor idéntico, su relación y en consecuencia la densidad del objeto no cambia). Pym hizo buen uso de su masa reducida y construyó una catapulta accionada por un muelle que podía lanzarlo a través de la ciudad. Naturalmente, como hemos discutido ampliamente en el capítulo 3, no es el viaje sino la parada lo que resulta problemático. Con el fin de evitar un final desastroso a su trayectoria, Pym acudía a su relación especial con las hormigas y utilizaba su casco cibernético para ordenar a cientos de ellas que formaran un colchón de aire viviente que amortiguara su aterrizaje. La energía cinética de Ant-Man se distribuiría entre muchísimas hormigas de forma que ningún insecto sufriera en exceso a causa de su participación al frenar su caída.

Si A-M tiene un peso tan ligero que puede ser lanzado a través de varias manzanas de casas de la ciudad por un resorte arrollado y no dañar a las hormigas que detienen su movimiento, nos preguntamos cómo es capaz de neutralizar a tales adversarios como el Protector o el Hijacker, o enfrentarse a «The Challenge of Comrade X» («El desafío del camarada X»). En particular ¿cómo es capaz de abrirse camino perforando la bolsa de limpieza de aspirador que aparece en la figura 13, tal como se ve en el emocionante dibujo en el número 37 de *Tales to Astonish*, o columpiarse sobre la cabeza de un malhechor utilizando un lazo de nylon? Como se explica en el número 38 de *Tales to Astonish*, Henry Pym conservaba «toda la fuerza de un humano normal» incluso con el tamaño de una hormiga. No es por criticar, pero un ser humano normal de una estatura media, por no mencionar al bioquímico medio, se hallaría en dificultades para voltear a un hombre por encima de su cabeza, incluso utilizando un lazo de nylon «prácticamente irrompible». Pero dejando aparte esa cuestión, ¿qué significa la afirmación de que Ant-Man tiene la fuerza de una persona de estatura media, de forma que puede romper una bolsa de aspirador, pero solamente la masa de una hormiga, de modo que puede ser succionado por éste? Quizás la cuestión más básica es: ¿por qué tiene usted la fuerza que tiene, de forma que puede levantar con facilidad un objeto de 10 kilos, pero ha de esforzarse con otro que pese 100 kilos y no le resulta posible elevar 1.000 kilos? Nuestra fuerza proviene de nuestros músculos y de la estructura del esqueleto, que forman una serie de palancas interconectadas. Resulta que tales palancas no están tan bien preparadas para elevar cosas.

Estipulemos que, entre sus muchas definiciones, por «fuerza» entendemos la capacidad para elevar un objeto. El ingenio humano ha conducido al desarrollo de un amplio rango de máquinas que realizan tareas tales como elevar grandes pesos. Una de nuestras invenciones más antiguas creadas para izar objetos es el sencillo dispositivo mecánico de la palanca. Muchos de nosotros lo conocimos siendo niños, en forma de columpio o balancín de patio de recreo, consistente en un tablero horizontal soportado por un fulcro situado debajo del punto medio del mismo. Cuando se sentaba en un extremo del columpio, era capaz de elevar a un compañero de juegos a cierta altura, gracias a la ventaja mecánica de la palanca. Con el fulcro colocado en el punto medio exacto del tablero, usted puede levantar solamente una masa aproximadamente igual a la suya. Sin embargo, si el fulcro está colocado mucho más cerca de uno de los extremos, entonces un muchacho pequeño puede elevar a un adulto, siempre que el adulto se siente en el extremo del columpio más cercano al fulcro. Esto es debido a que los balancines y las palancas en general no equilibran fuerzas sino «momentos de torsión».



**Fig. 13.** Una escena de «Trapped by the Protector» («Atrapado por Protector») del n.º 37 de *Tales to Astonish*, en la cual se demuestra que Ant-Man es a la vez tan ligero como una hormiga (y por lo tanto es fácilmente succionado por un aspirador) y tan fuerte como un hombre de estatura normal (y por lo tanto capaz de abrir de un puñetazo la bolsa de papel del aspirador).

Si una fuerza es capaz de empujar o atraer un objeto en línea recta, un momento de fuerza es una medida de la capacidad para hacer rotar un objeto. Un momento de fuerza se define matemáticamente como el producto de la fuerza aplicada por la distancia entre la fuerza y el punto alrededor del cual gira el objeto. Mientras que «momento de torsión» y «trabajo» están definidos matemáticamente como el producto de una fuerza por una distancia, en el caso del trabajo la distancia es el desplazamiento del objeto, es decir, la distancia a lo largo de la cual la fuerza empuja o atrae al objeto (más sobre el trabajo en el capítulo 11). La fuerza debe actuar en la misma dirección que esta distancia con el fin de cambiar la energía del objeto. En contraste con ello, en el caso de un momento de torsión la fuerza forma un ángulo recto con la separación entre la fuerza aplicada y el punto alrededor del cual se opera la rotación. Esta distancia se conoce a veces como el «brazo de momento» del momento de torsión. Para una fuerza aplicada determinada, cuanto mayor es la distancia de la fuerza al punto de rotación, mayor es el momento de torsión.

Por esta razón los pomos de las puertas están colocados en el lado más alejado de las bisagras. Intente cerrar una puerta empujándola por el extremo inmediatamente adyacente a las bisagras, y luego aplique la misma fuerza en el otro lado, donde está situado el pomo. Se utiliza la misma fuerza, pero al aumentar el brazo del momento aumentando la distancia entre el punto de empuje y las bisagras, se amplía el momento de torsión, y esto facilita el cierre de la puerta. Una llave mecánica es otra máquina simple, que amplifica una fuerza aplicada en un extremo para producir una rotación en el otro. Cuando se intenta aflojar una tuerca particularmente testaruda, uno hace uso a veces de un cabo auxiliar, que es básicamente un brazo de extensión para la llave mecánica mediante el cual se puede aumentar el brazo de momento y en consecuencia el momento de torsión aplicado, cuando la fuerza disponible que se puede aplicar está ya en su máximo. Volviendo al ejemplo del balancín, un niño pequeño es capaz de elevar a un adulto crecido solamente cuando el fulcro del balancín está situado cerca del extremo donde se halla el adulto (en un columpio de patio de recreo el adulto se sienta usualmente más cerca del fulcro central). En este caso el brazo de momento que corresponde al niño queda aumentado y el momento de fuerza que aplica es lo bastante grande como para alzar al adulto hacia arriba en el aire, lo que el niño no podría conseguir sin la ventaja mecánica proporcionada por la palanca.

Las palancas también representan un papel en la determinación de la fuerza del pequeño puñetazo de Ant-Man. Nuestros brazos son capaces de elevar y de lanzar haciendo uso del principio de las palancas. Un objeto, digamos una roca, se coloca en cada uno de los extremos de la palanca, al que llamaremos «mano». Se ejerce una fuerza por la compresión de un músculo bíceps, haciendo que el otro extremo de la palanca (el antebrazo) se mueva hacia abajo, lo que a su vez eleva el extremo alejado de la palanca, es decir la mano que soporta la roca. El bíceps empuja la mano hacia arriba, mientras que cuando necesitamos bajar la roca, el tríceps se contrae y al hacerlo empuja la mano de nuevo hacia abajo. Los músculos solamente pueden contraerse y tirar, no pueden empujar. En consecuencia, para permitir un amplio rango de movimientos, han evolucionado en una serie ingeniosa de palancas consistentes en músculos sujetos a diversos puntos de la estructura de nuestro esqueleto. El fulcro de la palanca que es su antebrazo está localizado en el codo. Podría parecer raro tener ambas

fuerzas aplicadas sobre el mismo lado del fulcro, pero este tipo de palanca es esencialmente lo mismo que una caña de pescar, en donde la fuerza aplicada en un extremo —muy cerca del fulcro situado cerca del carrete— provoca una rotación y la consiguiente elevación de un pez en el otro extremo de la caña. Su bíceps aplica una fuerza de atracción aproximadamente cinco centímetros más adelante de su codo, mientras que el antebrazo de la mayoría de las personas es de 35 centímetros de largo. La relación de los brazos de momento es así de 1 a 7, lo que significa que la fuerza aplicada por su bíceps está reducida por un factor de siete en la posición de su mano. Es correcto, *reducida*... para elevar una piedra que pesa 10 kilos, su bíceps tiene que proporcionar una fuerza de elevación de 70 kilos.

Una respuesta razonable a estas noticias sería: ¿cuál es la cuestión en eso? ¿Por qué tener una palanca construida en su brazo que aumenta la fuerza necesaria para elevar un objeto? No parecería que hubiera ninguna, y eso sería la prueba A en el caso contra la evolución, si la función primaria de nuestros brazos fuera la de elevar piedras. Puesto que el bíceps está conectado mucho más cerca del punto de fulcro (el codo en lugar de su mano), el bíceps contrae 5 centímetros y la mano se levanta 35 cm, debido a la misma relación de 1 a 7 en los brazos de momento. Esta relación se mantiene también cuando queremos deshacernos de la piedra antes mencionada que estamos sosteniendo. En este caso una contracción muscular de menos de cinco centímetros produce un desplazamiento de la mano de más o menos treinta centímetros. Esto requiere solamente 0,1 segundos para producirse, y la mano que sujeta la piedra puede desembarazarse de ella con una velocidad de 30 centímetros en 0,1 segundos, es decir, 11 km/h. Ésta es una estimación a la baja; una persona normal puede proporcionar una velocidad de liberación mucho mayor utilizando otras palancas que conectan su brazo superior a su hombro. Un conjunto en extremo pequeño de la población general puede lanzar objetos del tamaño de una pelota de béisbol a velocidades de hasta 160 km/h. Y por eso las palancas inversas de nuestros brazos no están diseñadas para elevar grandes piedras, sino para permitirnos lanzar piedras más pequeñas a velocidades elevadas. Entre nuestros antepasados, quienes mejor tiraban piedras o lanzas fueron, en términos generales, los mejores cazadores. Ser un buen cazador aumentaba las posibilidades de obtener comida y a su vez incrementaba las ventajas para conseguir pareja. De esta forma ciertos cazadores fueron capaces de transmitir esos genes de «buenos brazos lanzadores» a su progenie.

Pero no... no me he olvidado de Ant-Man atrapado en la bolsa del aspirador. Para el diminuto luchador contra la delincuencia, todas las escalas grandes están obviamente reducidas, pero la relación de los brazos de momento de 1 a 7 de sus brazos se mantiene todavía para Henry Pym, con independencia de si tiene un tamaño de una hormiga o el normal. Dar puñetazos involucra los mismos músculos y parecidos movimientos que lanzar cosas, sólo que en lugar de una piedra uno está lanzando un puño. La fuerza proporcionada por sus músculos no depende de su longitud, sino del área de su sección transversal. Si Ant-Man tiene 0,01 veces su altura normal, entonces la fuerza que sus músculos pueden ejercer está reducida por un factor de  $(0,01)^2 = 0,0001$ . Si Pym puede dar un puñetazo con una fuerza de 100 kilos con su tamaño normal, su puñetazo en la escala pequeña asesta un golpe repentino de una centésima de kilo. Con este tamaño diminuto, su puño es mucho más pequeño y tiene un área transversal de 0,003 cm<sup>2</sup> (suponiendo que su mano tiene exactamente la anchura de un milímetro). La presión que suministra su puñetazo se define como «la fuerza por unidad de área», que es de 0,01 kilos dividida por 0,003 cm<sup>2</sup> —o sea, 20 kilos por cm<sup>2</sup>—. Esto hay que compararlo con la fuerza en su tamaño

normal de 100 kilos dividido por el área transversal de su puño en tamaño normal de 30 cm<sup>2</sup>, para una presión de 3 kilos por cm<sup>2</sup>. Henry Pym golpea la bolsa con la misma presión cuando tiene el tamaño de una hormiga que con su tamaño normal. Parece que Ant-Man puede realmente salir de la bolsa de papel. De este modo actúa como un buen ejemplo y sirve de inspiración para los aficionados a los cómics.

### **Por qué la mordedura de una araña radiactiva no causa el colapso que debiera**

Aunque nos estamos ocupando del asunto de la fuerza de uno cuando se tiene el tamaño de un insecto, me gustaría dedicar un momento para disipar un mito relacionado con Spiderman. Tal como acabamos de razonar, si Henry Pym se encoge con una densidad constante, entonces aunque la fuerza de su puñetazo no es tan grande como cuando tiene el tamaño normal, la presión que su puño es capaz de proporcionar contra una inocente bolsa de aspirador no cambia. Una mala interpretación común es que este escalado funciona en ambas direcciones, de forma que si alguien es mordido por una araña radiactiva, por tomar un ejemplo al azar, entonces obtendría la capacidad de brincar propia de una araña. Es decir, si una araña o una pulga pueden saltar la altura de un metro —lo cual equivale aproximadamente a 500 veces la altura de su cuerpo— entonces si un humano tiene una capacidad de salto comparable, debería ser capaz de saltar una altura de unas 500 veces la de su cuerpo. Si tiene un metro y ochenta centímetros de alto, esto supone un salto de ¡900 metros! Si fuera este realmente el caso, entonces Spiderman habría batido sobradamente al Superman de la edad de Oro (antes de los superpoderes de vuelo y los derivados del sol amarillo). Sin embargo, no es éste el caso en absoluto. Si Peter Parker hubiera ganado la capacidad de una araña, hubiera sido capaz de saltar la misma distancia que una araña, es decir un metro. Por suerte para las excitantes y encantadoras historias de los cómics, es una buena cosa que Stan Lee y Steve Ditko no comprendieran este problema de escala. Veamos dónde se equivocaron.

¿Qué determina lo alto que usted puede saltar? Dos cosas solamente: su masa y la fuerza que los músculos de su pierna pueden ejercer sobre el suelo. Esos dos factores determinan cuánta aceleración puede alcanzar cuando despega del suelo. Una vez que ya no está en contacto con el pavimento, la única fuerza que actúa sobre usted es la gravedad, que lo frena a medida que asciende. De modo que existen dos aceleraciones de las que tenemos que ocuparnos: el impulso del brinco que lo lanza al aire y la siempre presente deceleración de la gravedad que en su momento detendrá su ascenso. Una vez que se está moviendo con cierta velocidad  $v$ , la altura  $h$  que podrá alcanzar está dada por la familiar fórmula de antes  $v^2 = 2gh$ , en la cual  $g$  representa una vez más la deceleración debida a la gravedad.

Hay un sorprendente aspecto de esta ecuación que no hemos destacado todavía, y es que la altura final que alcanza el saltador no parece depender de su masa. Grande o pequeño, si usted comienza con una velocidad  $v$  y solamente la gravedad lo empuja de vuelta al suelo, entonces la altura alcanzada depende nada más que de la deceleración  $g$  debida a la gravedad y de su velocidad inicial  $v$ . Hay una segunda aceleración que interviene en el salto —la suministrada por los músculos de su pierna en el inicio del salto—. Y esta aceleración depende de la masa del saltador. Utilizando la segunda ley de Newton del movimiento, que dice que **la fuerza es igual a la masa por la aceleración**, o  $F = m a$ ,

está claro que para una fuerza dada  $F$ , cuanto más grande es la persona (es decir cuanto mayor es su masa  $m$ ), menor será su aceleración  $a$  y menor será la velocidad inicial que consigue. Una velocidad inicial menor significa una altura  $h$  menor que se es capaz de saltar.

No es que las arañas sean buenas saltadoras lo que hace que puedan saltar treinta veces la longitud de su cuerpo. Más bien los insectos pequeños tienen músculos diminutos (que proporcionan una fuerza pequeña), pero tienen que elevar solamente una masa minúscula para saltar un metro, lo que resulta ser muchas veces más grande que su tamaño. Los humanos tienen músculos mucho mayores que las arañas y pueden ejercer fuerzas mucho mayores, pero tienen que elevar masas mucho mayores, de modo que el efecto neto es que la altura que pueden saltar es también del orden de un metro. Por supuesto, algunos humanos tales como los saltadores de altura olímpicos pueden saltar mucho más alto, mientras que la mayoría de nosotros, más pesados, solamente podemos saltar apenas más que un tercio de metro (es decir, un paso). De hecho, para que una pulga salte 200 veces la longitud de su cuerpo necesita de una gran trampa por parte de la naturaleza: además de ser particularmente estilizada para minimizar la resistencia del aire, la pulga se empuja con sus dos patas más largas para maximizar el brazo de palanca. Son sus patas traseras, así que de hecho las pulgas saltan hacia atrás cuando se elevan.

Es un error natural cuando se escalan las capacidades de los insectos y del mundo animal a las dimensiones humanas suponer que lo que importa son las proporciones, en lugar de las magnitudes absolutas. En el siglo XIX muchos entomólogos distinguidos cometieron el mismo error. Como indica sucintamente una nota a pie de página en el clásico *On Growth and Form (Sobre el crecimiento y la forma)* de D'Arcy Thompson: «Es una fácil consecuencia del antropomorfismo, y por lo tanto una característica común a los cuentos de hadas, despreciar la dinámica y hacer hincapié en los aspectos geométricos de la similitud». Pero tales fallos de concepto hacen que sean mucho más interesantes los cuentos de hadas y las historias de cómics.



**MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE.** Hay varios superhéroes cuyo poder especial es la facultad para reducir su tamaño. Además de Ant-Man y de la Avispa del Universo Marvel, Atom, Elasti-Girl de la Patrulla Condenada, y Shrinking Violet de la Legión de Superhéroes de DC Comics comparten la capacidad de miniaturizarse a sí mismos. La «explicación» de sus poderes reductores varía, pero todos poseen una característica común: a todos les resulta muy difícil comunicarse. No me refiero a los problemas de comunicación entre Ant-Man y la Avispa que les llevaron a su divorcio, sino a las limitaciones físicas que conciernen a las conversaciones con los que no están en el mundo reducido.

Si usted tiene solamente unos pocos milímetros de altura, nadie le puede oír, ni su propio oído será lo bastante agudo, así que tendrá que depender de medios no verbales para comunicarse con la gente del mundo no encogido. Cuando Ant-Man se contrae, su voz adquiere un tono mucho más agudo, hasta que ha alcanzado el tamaño de una hormiga y su voz queda en el rango alto del oído de los humanos de tamaño normal. A la vez su umbral de audición se desplaza también hacia el extremo alto del registro, de modo que se perderá la mayor parte de lo que la gente le dice. Para empeorar las cosas, todo lo que nuestro diminuto héroe ve se hallará en una turbia nube desenfocada. Veamos por qué ser un «detective privado de un par de centímetros de altura», aunque lo hace marginarse por completo del mundo exterior, le comportará sin embargo un enjambre de problemas.

Primero, encararemos las cuestiones básicas. ¿Qué es lo que determina el rango en el que somos capaces de hablar y escuchar? Y la respuesta, manteniendo nuestro contexto de hacer cada problema de física tan sencillo como sea posible, está relacionada con el período de un péndulo. Un péndulo es simplemente una masa conectada a un cordel delgado (despreciaremos la masa del cordel) con el otro extremo sujeto a un punto pivotante sin rozamiento situado en el techo. La masa se supone en general que es alguna esfera densa, como una bola de billar o de bolera, aunque podría tratarse de una piedra o de Spiderman. Esta masa está levantada a cierta altura, tal que el cordel forme un ángulo pequeño con la dirección vertical y, una vez soltado, las fuerzas que actúan sobre él son: *a)* la gravedad, empujando siempre hacia abajo en la dirección vertical, y *b)* la tensión hacia arriba del cordel. La dirección de la tensión forma un ángulo con respecto a la vertical que cambia continuamente a medida que la masa oscila adelante y atrás. Parte del peso puede considerarse dirigido a lo largo de la línea del cordel, mientras que la componente que no está compensada por la tensión es la fuerza que cambia la velocidad de la masa, y es responsable de la aceleración que experimenta la masa en sus oscilaciones hacia uno y otro lado.

El tiempo que tarda un péndulo en moverse adelante y atrás, desde cierto punto alto inicial, completando un arco completo y volviendo a su posición original, se llama *período*, y este movimiento se llama *periódico*. Ya se trate de Spiderman balanceándose a uno y otro lado de su red, o de una bola de billar atada a un hilo de pesca, el tiempo para completar una oscilación total depende solamente de dos factores: la aceleración debida a la gravedad (lo que llamamos *g* en el capítulo 1) y la longitud del cordel. Sorprendentemente, una cosa de la que no depende el período (para ángulos de oscilación

pequeños) es de la altura inicial a partir de la cual comienza la masa su movimiento.

Galileo fue quizás no la primera persona en darse cuenta de que el período de un péndulo es una propiedad independiente de la altura del punto inicial desde el que se balancea la masa, pero se le concede con propiedad el crédito de haber determinado lo que controla la frecuencia de la oscilación. Por sorprendente y contrario a la intuición que pueda parecer, el tiempo necesario para que un columpio de patio de recreo vaya hacia atrás y vuelva a su punto inicial no depende de lo pesada o liviana que sea la persona que se sienta en el columpio, ni de lo atrás que comienza su movimiento, sino únicamente de la longitud de la cadena entre el asiento y el pivote del conjunto del columpio. Estamos suponiendo que el columpio no está empujado por un ayudante en reposo y que tampoco la persona sentada en el columpio se propulsa a medida que se mueve adelante y atrás. Es realmente cierto que cuanto más alta sea la posición inicial del columpio, más rápidamente se estará moviendo en el punto más bajo de su balanceo, puesto que la componente de la tensión de la cuerda que se desvía de la vertical (responsable de la aceleración durante el balanceo) es mayor cuanto mayor es el ángulo. ¿No significaría esto que debería tardar menos en completar una oscilación? No, debido a que cuando usted se puede mover más rápido debido a la mayor altura de la posición inicial, tiene que hacer un recorrido mayor hasta llegar al punto más bajo del arco. La combinación de la mayor velocidad con una distancia mayor a recorrer se compensa, de modo que el tiempo necesario para completar el arco sigue siendo el mismo, con independencia del punto de inicio. Ésta es la razón por la cual un péndulo o cualquier otro dispositivo que experimenta un movimiento armónico simple puede hacer las veces de un cronómetro. Dos relojes idénticos que utilicen un movimiento pendular, como en un reloj del abuelo o un resorte que se enrolla y desenrolla como en los relojes de bolsillo ya pasados de moda o en los metrónomos, marcarán idéntico tiempo, independientemente del empuje inicial que comenzó la oscilación. Un metrónomo es un péndulo invertido, y su frecuencia es independiente de cómo se pone en movimiento, pero se altera si se cambia la posición de la masa en el brazo oscilante.

Si el período de un péndulo no depende del punto de comienzo de la oscilación, ¿por qué depende de la gravedad y de la longitud del cordel? No es difícil ver que cuanto más débil es la aceleración debida a la gravedad, menor es la fuerza que tirará de la masa y más lento resultará su movimiento. En la Luna un péndulo tardará más en completar un ciclo de lo que lo hace sobre la Tierra, y en el espacio exterior, donde la aceleración  $g$  debida a la gravedad es cero, no se moverá nunca, y el tiempo para completar una oscilación (el período) será infinito. ¿Por qué interviene la longitud del cordel en el período del péndulo? Debido a la geometría. El área barrida por la masa oscilante se asemeja a una porción de pizza (cortada en forma de sector), donde el punto del pivote es el centro de la pizza y la trayectoria de la masa es la corteza del borde de la pizza. Para una pizza completa sin cortar, la distancia a lo largo de la corteza, llamada circunferencia, es  $2\pi \times R$ , donde  $R$  es el radio del círculo y la letra griega  $\pi$  es la constante 3,14159... Cuanto mayor sea el radio  $R$ , mayor será la circunferencia ( $2\pi \times R$ ) y mayor la longitud de la corteza de un trozo de pizza. Para el péndulo el papel del radio está representado por la longitud del cordel que enlaza el pivote con la masa. La distancia que debe recorrer la masa crece con la longitud del péndulo, aumentando en consecuencia el tiempo necesario para completar una oscilación.

La *frecuencia* del péndulo —el número de las oscilaciones que completa en un segundo— es

exactamente la inversa del período, que se define como el tiempo necesario para terminar un ciclo. Si un oscilador tiene un período de 0,5 segundos, de forma que completa un ciclo entero en sólo medio segundo, entonces en un segundo termina dos ciclos. Si el período es de una décima (0,1) entonces tendrá una frecuencia de 10 ciclos por segundo. Cuanto más corto sea el período, mayor será la frecuencia. El cuadrado del período, por su parte, es proporcional a la relación de la longitud del cordel del péndulo  $l$  y la aceleración debida a la gravedad  $g$ . Esto es,  $(\text{período})^2 = (2\pi)^2 \cdot (l/g)$ . Para explicar por qué aparece el cuadrado del período y no el período sin más, que depende de la relación entre  $l$  y  $g$ , y por qué interviene el factor  $(2\pi)^2$ , sería necesario que abandonemos nuestro compromiso de «sólo álgebra». Para nuestros propósitos el punto importante es que uno tiene que aumentar la longitud del cordel del péndulo por un factor de cuatro para duplicar el período. Inversamente, al acortar la longitud del cable (digamos que mediante las partículas Pym), disminuye el período y cuanto menor es el período menor es la frecuencia.

Una cuerda vocal humana no es una masa balanceándose colgada de una cuerda, pero la belleza del péndulo como descripción de un movimiento armónico simple es lo que capta la física importante de cualquier sistema oscilatorio<sup>[33]</sup>. Cuando Henry Pym se reduce hasta el tamaño de una hormiga, reduce sus dimensiones en unas 300 veces. La frecuencia fundamental del oscilador es, en correspondencia, diecisiete veces mayor (es decir, por la raíz cuadrada de 300). La voz humana normal tiene lugar con un tono de más o menos 200 ciclos por segundo, pero para una persona del tamaño de una hormiga la frecuencia se desplaza por un factor de 17, hasta 3.400 ciclos por segundo. El rango de nuestro oído se extiende desde los 20 ciclos por segundo en el extremo inferior hasta los 20.000 ciclos por segundo, de forma que todavía deberíamos ser capaces de escuchar a Ant-Man, pero él tendrá una voz de un tono alto, dado que la cavidad de su pecho se encoge de modo semejante. A escuchar a un superhéroe de seis milímetros de altura ordenando a un supervillano que se rinda con una voz tan chirriante, sorprende que los adversarios de Ant-Man no sucumban a un ataque de risa en lugar de a su diminuto garfio.

No solamente cambiará su voz cuando se encoge, sino que el oído de Ant-Man resultará también afectado por su tamaño reducido. La frecuencia resonante de un tambor también aumenta cuando se reduce su diámetro. Un bombo grande tiene un tono bajo y profundo, mientras que un tambor pequeño emite un tono más agudo cuando se le golpea. Cuando los tímpanos del Dr. Pym se encogen bajo la exposición a las partículas Pym, las frecuencias que es capaz de detectar se desplazan de acuerdo con ello. (La física que subyace al rango del oído humano es realmente bastante complicada, pero para nuestros fines supondremos que está determinada por el tímpano.) La menor frecuencia que puede oír con su tamaño normal de un metro ochenta es de unos 20 ciclos por segundo que, una vez encogido, se convierte en 17 veces mayor, cercana a los 340 ciclos por segundo. La voz de una persona normal, con un tono de 200 ciclos por segundo, quedará por lo tanto por debajo del rango de detección de nuestro diminuto titán. Por esta razón, Ant-Man y sus colegas miniaturizados necesitarán ser astutos estudiantes del lenguaje humano al interactuar con el mundo ordinario.

Además del cambio en el umbral de frecuencia de sus tímpanos, cuando Henry Pym se encoge hasta el tamaño de una hormiga su sensibilidad auditiva quedará también afectada. Cuando las cuerdas vocales vibran provocan compresiones y dilataciones alternantes del aire que pasa a través de

ellas, forzado a pasar a través de la garganta por las contracciones del diafragma. Esta variación de la densidad es ligera —sólo una parte en diez mil distingue las regiones comprimidas de las rarificadas adyacentes—. Cuanto mayor es la variación de densidad, mayor es el volumen o sonoridad de la onda de sonido. Usted solamente tiene control sobre la variación inicial de la densidad cuando el sonido abandona su boca. La región comprimida de aire se expande y comprime la región que queda delante de ella, la cual a su vez se expande y comprime a la siguiente región de aire. Lo que usted oye es el conjunto de instrucciones de la onda de sonido, generadas por sus cuerdas vocales y transmitidas a sus oídos. El aire de su boca no viaja físicamente desde usted hasta el oyente. Si le digo que almorcé ajo, usted oye esta información antes de esté lo bastante cerca como para recibir una confirmación independiente de este hecho. Puesto que la información se propaga en todas las direcciones, a una gran distancia del hablante la variación de la densidad del aire —la onda de sonido— se atenúa en magnitud, y quedará por debajo del umbral de detección si uno está demasiado alejado.

Alternativamente, si uno está demasiado cerca del origen, el tímpano es incapaz de responder linealmente a las variaciones de densidad, y la capacidad para distinguir sonidos diferentes pierde calidad. Esto puede resultar útil, como descubre Atom, el héroe miniaturizado de DC Comics en «The Case of the Innocent Thief» («El caso del ladrón inocente») en el número 4 de *Atom*<sup>[34]</sup>. En esta historia, un malhechor llamado Elkins descubre un rayo hipnótico que obliga a cualquiera a obedecer cualesquiera mandatos orales que escuche. Mientras Atom tiene solamente unas pocas pulgadas de alto, el delincuente lo expone a su rayo y grita una orden prohibiendo a Atom que lo capture. Pero casi inmediatamente Atom pone fuera de combate a Elkins utilizando una goma de borrar rosa como trampolín para llegar hasta una distancia desde la que le puede asestar un puñetazo. Atom es capaz de resistir el mandato mesmérico porque, como explica al final de la historia, «en su excitación, Elkins me chilló su orden —lo cual ¡me sonó como un trueno!—. Y puesto que no pude entender ni una palabra de lo que me dijo, no tuve que obedecerlo». Es curioso, mis hijos me proponen el mismo argumento casi a diario, a pesar de que todavía no han conseguido la tecnología de la miniaturización y de que yo no grite.

Una dificultad adicional que acompaña la reducción al tamaño de una hormiga es que la visión de Ant-Man resultará borrosa. El espacio medio entre picos y valles de los campos eléctricos y magnéticos alternativos que forman una onda luminosa (lo que se denomina *longitud de onda*) determina el color de la luz. Digamos que una luz blanca promedio —que consiste en luz de todas las longitudes de onda desde el rojo [650 nanómetros] hasta el violeta [400 nanómetros] sumadas entre sí en magnitudes iguales— tiene una longitud de onda de 500 nanómetros (un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro). Para que la luz sea detectada debe incidir en los bastones y los conos del fondo de su ojo, y para llegar a esos fotorreceptores debe pasar antes por su pupila. Esta abertura en la parte delantera de su ojo, dependiendo de la luz con la que esté leyendo esto, es de unos 5 mm de diámetro. Un milímetro es igual a un millón de nanómetros, de modo que la abertura de su pupila es unas 10.000 veces mayor que la longitud de onda de la luz blanca visible. Desde el punto de vista de las ondas de luz, la pupila es un túnel muy grande a través del cual pueden pasar fácilmente. Cuando Ant-Man se encoge hasta el tamaño de un insecto, sin embargo, la abertura de su pupila será 300 veces menor que con su tamaño normal. El orificio de su ojo es ahora un factor de 30 veces mayor

que la longitud de onda de la luz visible, que es de 500 nanómetros. Las ondas de luz pueden pasar todavía por el «túnel», pero con dificultad.

Para comprender cuales son las consecuencias cuando el tamaño de la abertura es solamente unas pocas veces mayor que la longitud de onda de la luz, considere ondas de agua en la superficie de un gran lago. Se forma un canal entre dos embarcaderos que se mueven despacio sobre la superficie del agua. Cuando la separación entre los embarcaderos es muy grande, digamos cerca de medio kilómetro de distancia, comparado con el espacio entre los picos de las ondas de agua, las ondas pasan a través de esta región sin perturbación perceptible. Justo cerca del embarcadero, al romper las ondas, hay un cambio en el frente de onda que llega, pero en el espacio intermedio entre los embarcaderos las ondas no son afectadas por los embarcaderos. Ésta es la situación para Henry Pym en su altura normal, cuando su pupila es 10.000 veces mayor que la longitud de onda de la luz. Para el miniaturizado Ant-Man, es como si los dos embarcaderos se juntaran para formar un cuello de botella, de modo que la separación entre ellos fuera sólo unas pocas veces mayor que la separación entre picos de onda adyacentes. Las ondas seguirán moviéndose a través del estrangulamiento, pero cuando se esparcen tras cada embarcadero establecen un patrón de interferencia complicado en el otro lado de la obstrucción. Este efecto se llama *difracción* y es más apreciable cuando las dimensiones del objeto que dispersa una onda son comparables a la longitud de la onda. Si usted espera obtener información acerca de la causa de las ondulaciones del agua examinando los frentes de onda, obtendrá una imagen clara y bien definida cuando los embarcaderos están separados por miles de metros y una imagen distorsionada y confusa cuando están separados solamente por unos pocos metros.

El efecto para Ant-Man es que la imagen que observa a través de su empequeñecida pupila será borrosa y desenfocada. Es por esto que el ojo de un insecto, y en particular sus lentes, es radicalmente distinto de las lentes de los ojos de los humanos o de los animales de gran tamaño. Los insectos usan lentes compuestas que se ajustan a los efectos de difracción. Aun así, sería difícil para una mosca leer un periódico, incluso aunque le interesen los acontecimientos de la actualidad. El ojo de un insecto es muy bueno para detectar cambios en las fuentes de luz (tal como la sombra en movimiento creada por la amenaza de fatal destino de un periódico enrollado), pero es pobre para discernir el contraste entre bordes contrastados. En consecuencia se apoyan en otros sentidos, tales como el olfato y el tacto (filamentos pilosos detectan sutiles variaciones en las corrientes de aire) para desplazarse a través del ancho mundo. Por desgracia para Ant-Man, el único sentido que resulta menos afectado por la miniaturización, el olfato, es al que los humanos somos menos sensibles.

**LA LEY DEL CUBO-CUADRADO.** No son muchas las aventuras que puede vivir un personaje de unos seis milímetros antes de que la novedad de un superhéroe superpequeño se agote para el lector. Un indicio de que las flores podían haber abandonado el rosal de Ant-Man se puede hallar en el número 48 de *Tales to Astonish*, donde el supervillano Porcupine (Erizo) captura a Ant-Man e intenta endiabladamente eliminarlo colocándolo en una bañera parcialmente llena de agua, tal como se ve en la figura 14. Dado que nuestro héroe no puede escalar las resbaladizas paredes de porcelana, queda forzado a mantenerse sin cesar a flote hasta quedar exhausto, en cuyo momento se ahogará. Aunque el peligro para Ant-Man es real, es difícil emocionarse con una trampa mortal que consiste en una bañera parcialmente llena. Incluso el calibre de los villanos con los que se enfrentaba Ant-Man en esta etapa reflejaban la dificultad de conservar fresca esta emoción. Porcupine era Alex Gentry, un ingeniero que utiliza sus excelentes dotes tecnológicas para desarrollar un traje recubierto de espinas que oculta una multitud de armas ofensivas y defensivas —tales como gas lacrimógeno, dardos anestésicos, amoníaco (supuestamente para fugas limpias), «fuego líquido» (sospecho que significa un gas lanzallamas), detector de minas, cemento líquido y otros— con los cuales se embarca en una obligada ola de delitos. Debo decir ahora que, como profesor de física, he trabajado con muchos ingenieros en mi carrera académica, y mi experiencia me dice que pocos de ellos visten como erizos gigantes.



**Fig. 14.** La cubierta del n.º 48 de *Tales to Astonish*, en el cual Ant-Man se halla indefenso en la diabólica trampa mortal de una bañera parcialmente llena, a merced del ingeniero Alex Gentry, también conocido como Porcupine (a pesar del alarde de la cubierta, Porcupine fue realmente fácil de olvidar). © 1963 Marvel Comics

Si una de las funciones de los cómics es cumplir los anhelos de sus jóvenes lectores, entonces hay que reconocer que no muchos chicos fantasean acerca de lo estupendo que sería medir unos pocos

milímetros o vestir como un puercoespín. Ahora bien, poder crecer diez pies de alto, eso ya sería algo. Y así, en el siguiente ejemplar del número 49 de *Tales to Astonish*, remando hacia lo inevitable, Henry Pym descubrió una versión opuesta de su poción para reducir, que le permitía crecer mucho más que su altura normal de metro ochenta. Y así nació Giant-Man en el Universo Marvel. Con el tiempo Pym se convirtió de nuevo en un diminuto combatiente contra el delito, esta vez como el flamante Yellowjacket (Chaqueta Amarilla), pero durante gran parte de su carrera de superhéroe Pym luchó por la justicia, bien fuera como el descomunal Giant-Man o bien como Goliath (el mismo héroe y el mismo poder de supertamaño, sólo que con nombre y traje distintos).

Y sin embargo, resulta que ser más grande que lo normal arrastra consigo un conjunto distinto aunque no menos agobiante de desafíos físicos. Por una parte, como se indicó en el número 3 de *Ultimates* (una versión moderna de los Vengadores, que presenta a un nuevo Giant-Man), su ahora mucho más grandes (superdilatadas) pupilas permitirán que entre mucha más luz en sus ojos. En consecuencia necesitará usar siempre gafas especiales al aumentar de tamaño, para evitar sobrecargar sus nervios ópticos. Además, existe un límite fundamental para el tamaño al que uno puede crecer, suponiendo naturalmente en primer lugar que uno crezca bastante más que su altura normal, y que requiere aceptar la «excepción milagrosa» tanto como la miniaturización. Esta limitación está impuesta por la resistencia de materiales (particularmente los huesos) y la gravedad. La gravedad interviene en la situación debido a que su masa crece en proporción a su volumen si mantiene una densidad constante. La densidad es la masa dividida por el volumen, de modo que cuanto más grande sea usted (es decir, cuanto mayor sea su volumen), mayor será su masa si la relación entre los dos (la densidad) se mantiene sin cambio. Usted tendría una figura menos imponente si su crecimiento mantuviera la misma masa. En este caso, cuanto más alto se vuelva, menor sería su densidad.

A una situación así hubo de enfrentarse Reed Richards, de los Cuatro Fantásticos, cuando encontró al monstruoso invasor alienígena Gormun en el número 271 de *Fantastic Four*, en el que se relata una historia que tuvo lugar antes de que Richards y sus tres camaradas hubieran quedado expuestos a los rayos cósmicos que habrían de otorgarles sus superpoderes. Gormun era un guerrero invasor proveniente del planeta Kraalo, una criatura deforme y verde de seis metros de alto. Esta historia ofrecía una concesión nostálgica por parte del guionista y dibujante John Byrne a las historias del *Monster Invader from Space* (*Monstruo invasor procedente del espacio*) que dominaron los cómics de Marvel a finales de los años cincuenta hasta que llegaron los Cuatro Fantásticos para salvar al universo y a las fortunas financieras de Stan Lee y Jack Kirby. Las criaturas de estos cómics (*Tales to Astonish*, *Strange Tales*, *Journey into Mystery* y *Tales of Suspense*, antes del renacimiento de los superhéroes de la Edad de Plata) eran siempre al menos tan grandes como una casa y todos tenían nombres con dobles letras, tales como Orrgo (el Inconquistable), Bruttu, Googam (hijo de Goom), y Fin Fang Foom. La ventaja competitiva de Gormun en lo que se refiere a la conquista del mundo era que su tamaño crecía siempre que era alcanzado por alguna forma de «energía radiante». Richards, después de examinar una huella del pie de tres metros de largo y de varios centímetros de profundidad dejada por el ya enorme alienígena, se dio cuenta de que la única manera de detener esa amenaza era seguir atacándolo con más y más potencia de ondas de radio, pues cualquier criatura lo bastante grande como para dejar una huella de tres metros de largo debería dejar también una impresión de algunos metros de



profundidad si su masa creciera en la misma proporción que su volumen. Al descubrir que el crecimiento de Gormun mantenía una masa constante, en vez de una densidad constante, Richard cebó al extraterrestre con tanta energía que lo hizo crecer más que la Tierra y menos denso que el entorno del espacio, hasta que se convirtió en insustancial y decididamente en una inexistente amenaza para la historia de la edad atómica de nuestra nación. Teniendo en cuenta el aleccionador relato de Gorum, supongamos que Henry Pym, en su guisa de Giant-Man, se las arregla para mantener una densidad constante a medida que crece, de forma que su peso crece en proporción uniforme respecto de su volumen. Para tratar matemáticamente la situación de Giant-Man, debemos hacer un supuesto simplificador, y es que Henry Pym es una caja gigante.

Al tratar con las confusas complicaciones del mundo real, los físicos han de hacer a veces simplificaciones drásticas con el fin de efectuar algún progreso en la comprensión de la naturaleza. Esta tendencia a reducir un problema a sus componentes más básicos se refleja en el chiste de los granjeros de pollos y el físico teórico: Un grupo de granjeros de pollos habían comprado un surtido de gallinas premiadas en concurso en la Exposición Estatal. Cuando llevaron las aves de corral a su gallinero, descubrieron que había un problema: no ponían huevos. Los granjeros intentaron todo lo que pudieron imaginar para conseguir que las gallinas empezaran a poner huevos: música ambiental en el gallinero, alumbrado del suelo, alfombrado sensual, pero siempre con el mismo resultado: ningún huevo. En su desesperación llamaron a un físico teórico para que les diera algún consejo. Después de estudiar el problema durante una semana desde todos los puntos de vista, el científico convocó a los granjeros en una sala de conferencias y anunció triunfalmente que había resuelto el problema. Sin embargo, el ánimo de los granjeros se derrumbó cuando el físico comenzó su disertación dibujando un gran círculo en la pizarra diciendo: «Supongamos un pollo esférico...». Pero a veces este enfoque, comenzando con un pollo esférico por ejemplo, es el correcto. Visto de lejos, después de todo, los pollos parecen esféricos, al menos si usted entorna lo suficiente los ojos. Si el modelo esférico capta algún aspecto esencial del problema de los pollos, entonces uno puede más adelante añadir detalles para formar una descripción más precisa de esa ave de corral. Por otro lado, es posible que el modelo esférico inicial sea demasiado simplista y no capte los principios básicos que subyacen en el problema. La alternativa, sin embargo, es sumergirse en un mar de detalles técnicos, algunos cruciales y otros irrelevantes en cuanto al problema de que se trata. El saber decidir qué factores deben incluirse en el modelo esférico inicial y cuáles pueden diferirse hasta más tarde sin problemas es algo que normalmente sólo se da con la práctica.

Así pues, quizás me perdonarán si, al tratar de Giant-Man, supongo un Henry Pym cúbico. Para el razonamiento que trato de hacer la matemática es mucho más sencilla si Giant-Man se considera como una gran caja con lados de igual longitud. Por supuesto, quedaría descrito de modo más natural como un gran cilindro, pero quiero que las matemáticas sean lo más sencillas posible. Bien, si es una caja, entonces el volumen es el producto de su longitud, anchura y altura. Si cada lado del cubo tiene una longitud  $L$ , entonces su volumen es  $L \times L \times L$ . Una caja que tiene una longitud de tres metros, una anchura de tres metros y una altura de tres metros, tendrá un volumen de  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , o sea,  $27 \text{ m}^3$ . Esta unidad de volumen se llama *metro cúbico* o  $\text{m}^3$  y representa el hecho de que hemos multiplicado una longitud (metro) por una longitud por una longitud. Supongamos ahora que Giant-Man utiliza

sus partículas Pym para crecer dos veces en todas las direcciones. Su altura es ahora de 6 metros, y su anchura y longitud serán también de 6 metros cada una. En este caso su volumen es  $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$ , o sea,  $216\text{ m}^3$ . Así pues, duplicar su longitud en las tres direcciones aumenta su volumen por un factor de ocho. Si su longitud crece en las tres direcciones por un factor de diez, de forma que su largo, ancho y alto serán ahora de 30 metros en lugar de 3 metros, su volumen sería entonces de  $27.000\text{ m}^3$ , mil veces mayor que su volumen inicial de  $27\text{ m}^3$ .

Si Giant-Man ha de mantener una densidad constante al crecer, entonces su masa debe aumentar en la misma proporción que su volumen, no que su longitud. Al duplicar su altura (así como su anchura y su profundidad) es necesario que su peso crezca también por un factor de ocho para que la densidad se conserve igual. Así, Hank Pym se vuelve más pesado cuanto más grande se hace: Y entonces, ¿qué? El problema es que su peso crece mucho más deprisa que la capacidad de su esqueleto para soportarlo, de modo que, al llegar a una cierta altura, Giant-Man corre el riesgo de que se rompan sus piernas simplemente por el hecho de estar de pie. La fortaleza de un objeto, o su resistencia a doblarse o a ser desviado por un empujón o por un puñetazo, depende de su amplitud y no de su longitud. La manera técnica de decir esto es que la «resistencia de carga» de un objeto está determinada por el área de su sección transversal.

Piense en un hilo de pescar calculado para 10 kilos, es decir, para soportar un pez de 10 kilos de peso. Un pez más pesado podría romper el hilo cuando intentemos subirlo a la barca. Si queremos mantener suspendido un pez más pesado, cambiar la longitud del hilo de pescar no ayudará en absoluto. Para aumentar la resistencia de un hilo de pesca, no aumente su longitud sino su diámetro<sup>[35]</sup>. Cuanto más ancho sea el hilo de pesca, mayor será el área sobre la cual se distribuye la fuerza de elevación, y menor será la fuerza aplicada a lo largo de cualquier minúsculo elemento que mantiene unido al hilo. Cuando se rompe un hilo de pescar, o cualquier otra cosa, pues para el caso es lo mismo, los enlaces químicos que mantienen unido el material se rompen y se separan. Cuanto mayor es el área disponible para soportar una fuerza determinada, menor es el esfuerzo o la tensión aplicada a cada molécula en particular, y menos probable es que tenga lugar un fallo catastrófico. Cuando tiene lugar la rotura, generalmente se debe a que una imperfección molecular o algún defecto amplifica la fuerza aplicada localmente, haciendo que el material resulte más débil que si fuera uniforme y atómicamente perfecto. La dependencia de la resistencia material del área de su sección transversal limita los tamaños a los cuales se pueden agrandar Mr. Fantástico o los Cuatro Fantásticos. Después de haber sido bombardeado con rayos cósmicos durante el malhadado viaje inaugural del navío espacial que diseñó, Reed Richards obtuvo la capacidad de alargar o comprimir cualquier parte de su cuerpo. Pero como se explica en el número 1 de *Fantastic Four Annual*, no podía extender la longitud de su cuerpo más allá de 450 metros. Un tablero de madera de cinco por diez (que tiene una sección transversal rectangular de  $5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ) y de un metro de largo puede ser mantenido encima del suelo mediante un caballete en cada extremo y permanecer paralelo al suelo. Un tablero de dos metros de largo de la misma área de sección transversal se hundirá ligeramente en su zona media, si se sustenta por los extremos. Un tablero de veinte metros de largo se curvará considerablemente, mientras que un tablero de diez kilómetros de largo tocará el suelo en su centro aunque se ignore la curvatura de la Tierra. Como indica Reed en el número 1 de *Fantastic Four Annual*, «cuanto más se agranda mi cuerpo, más débiles se

vuelven mis músculos<sup>[36]</sup>, de forma que no puedo ejercer tanta fuerza al alargarme mucho en proporción a la que puedo hacer a menor tamaño». Reed Richards, cuya comprensión de la relación masa-volumen salvó la Tierra del terror de Gormun, es asimismo una ilustración andante de la ley cubo-cuadrado de la resistencia a la carga.

Cuando nuestro Henry Pym crece convirtiéndose en Giant-Man, su volumen aumenta más deprisa que el área de su sección transversal. La resistencia a la compresión de un objeto, tal como el fémur de su muslo o las vértebras de su espina dorsal, está determinada por el área de su sección transversal —es decir, el área de una de sus caras si fuera un sólido rectangular—. Cuando Giant-Man se hace más grande, sus huesos crecen proporcionalmente en tamaño como el resto de su cuerpo. La resistencia de su fémur o de sus vértebras crece con el cuadrado de su razón de expansión. Pero cuanto más grande se hace, más peso han de soportar sus huesos (a una densidad constante su peso crece según el cubo de su factor de crecimiento). Supongamos que con su altura normal el Dr. Pym tiene una altura de un metro ochenta y pesa 84 kilos. Su fémur con esta altura normal puede soportar un peso de 8.000 kilos, mientras que una única vértebra puede soportar 360 kilos, lo que indica que la naturaleza forja una redundancia considerable en algunos componentes estructurales que son críticos para soportar peso. El fémur de los elefantes y dinosaurios es más grueso y denso que el de los humanos, mientras que los ratones y los pájaros tienen huesos que son proporcionalmente más delgados y ligeros. Con una altura de dieciocho metros, el factor de expansión de Giant-Man es de diez. Su volumen crece en consecuencia por un factor de 1.000, mientras que el área de la sección transversal de sus huesos crece solamente por un factor de 100. Henry Pym pesaría ahora 84.000 kilos, mientras que sus vértebras solamente podrían soportar un peso de 40.000 kilos y su fémur podría aguantar 900.000 kilos. Con esta altura su esqueleto no es capaz de soportar uniformemente su peso.



**Fig. 15.** Una escena del n.º 2 de *Ultimates*, una actualización de los Vengadores del año 2002. Aquí Henry Pym y su mujer, Janet van Dyne (conocida también como la Avispa) se prepara para la primera prueba experimental del suero del Dr. Pym, quien está preocupado con razón de que, si sobrepasa la altura de dieciocho metros, sus huesos no podrán soportar el peso de su cuerpo.

Para permitir que Giant-Man crezca tanto como para que ningún villano, aunque se trate de uno dotado con superpoderes, pueda plantearle una amenaza creíble, Stan Lee argumentó en los años sesenta que el aumento de tamaño añadía una resistencia biológica a Henry-Pym. Su resistencia óptima tenía lugar con una altura de unos 3,60 metros, y si crecía más de 12 o 15 metros, sería tan alto como una casa pero tan frágil como un gatito. Años más tarde, la limitación metabólica fue reemplazada por otra física derivada de la ley del cubo-cuadrado. Como ilustra la figura 15, del número 2 de *Ultimates*, ahora se reconoce que incluso si se resuelven las consecuencias metabólicas involucradas mediante un suero de crecimiento, la gravedad y la física seguirán imponiendo límites estrictos a su tamaño definitivo (tal como hemos calculado, su espalda se rompería antes de que se partan los huesos de sus muslos).

El hecho de que el volumen crezca más deprisa que el área superficial es cierto aunque no se trate de objetos cúbicos. El volumen de una esfera viene dado por la expresión matemática de una constante ( $4\pi/3$ ) multiplicada por el radio de la esfera al cubo, es decir,  $(4\pi/3) r^3$ , mientras que el área de su superficie es  $4\pi$  veces el radio al cuadrado, o sea  $4\pi r^2$ . Un volumen tendrá siempre las unidades de una longitud al cubo, tal como metro-cúbico, mientras que toda área tiene las dimensiones de una longitud al cuadrado, de modo que las alfombras se miden en metros cuadrados. Por consiguiente, las burbujas ascendentes en un tanque de ácido en el que Batman y Robin han sido introducidos lentamente proporciona al Cruzado Enmascarado una ilustración de libro de texto del principio físico de la ley cubo-cuadrado.

Si ha pensado alguna vez que las burbujas de su vaso de champán o de cerveza ascienden más rápidamente cuanto más cercanas están de la parte superior de su acanalada copa, no es que el alcohol esté afectando a su discernimiento. La burbujeante bebida está supersaturada con dióxido de carbono (el mismo gas que proporciona a la gaseosa su efervescencia y a la cerveza su espuma), lo que significa que la presión del gas dióxido de carbono introducido en el líquido es mayor que la presión atmosférica. Cuando salta el tapón de la botella de champán, o cuando se saca el tapón de una botella de gaseosa o de cerveza (o, si a usted le gusta comprar barato, cuando se saca la tapa de su botella de champán) se produce un estallido o un siseo, debido a parte del exceso de gas bajo presión que sale rápidamente del recipiente. Todavía queda dióxido de carbono adicional en el líquido, que se reúne en forma de burbujas alrededor de pequeñas imperfecciones en el vidrio y luego, al ser más ligeras que el líquido circundante, suben hacia la parte superior.

La fuerza de flotación que eleva la burbuja está relacionada directamente con su volumen esférico, que depende del cubo del radio de la burbuja. La fuerza de resistencia al arrastre que frena a la burbuja depende del área de su superficie (cuanto mayor es el área, más líquido ha de ser apartado del trayecto de la burbuja ascendente) la que a su vez crece con el cuadrado del radio de la burbuja. A medida que la burbuja se mueve a través del champán, arrastra más moléculas de dióxido de carbono dispersas en el líquido, ganando tamaño en el proceso. Se crea así un exceso de fuerza neta que hace subir la burbuja. Si hay una fuerza, hay una aceleración (la segunda ley de Newton sigue valiendo incluso en el interior de una botella de champán) y la burbuja subirá cada vez más deprisa.

Si tuviera un vaso infinitamente alto, ¿aceleraría la burbuja hasta la velocidad de la luz? No; en

el capítulo 5 se vio cómo la resistencia al avance depende no solamente del área superficial sino también de la velocidad del objeto (comporta más esfuerzo desviar el fluido del trayecto de un objeto que se mueve rápidamente que de otro que avanza despacio). A medida que la burbuja se eleva y se mueve cada vez más deprisa, una fuerza de resistencia adicional equilibra eventualmente el empuje hacia arriba, y una vez que no se tiene fuerza neta, la burbuja sigue moviéndose con velocidad uniforme (primera ley de Newton) llamada *velocidad límite*.

Es un buen momento para detenernos con el fin de llevar a cabo algunos experimentos con champán, cerveza o soda para comprobar algunas de las cosas aprendidas, pero puramente en interés de la ciencia, por supuesto.

## 11. El plan dietético de Central City

**CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.** Flash puede ser capaz de correr a través de la superficie del océano y de capturar balas en el aire, pero nos inquieta una cuestión más importante: ¿con qué frecuencia necesita comer? La respuesta rápida es ¡mucho! Una pregunta más básica que podríamos formular es: ¿por qué necesita comer? ¿Qué es exactamente lo que contiene el alimento que lo hace esencial para cualquier actividad, ya sea correr, caminar o incluso permanecer sentado? ¿Y por qué obtenemos solamente esas cualidades de la materia orgánica y no de las rocas o del metal o del plástico?

Flash come por la misma razón que lo hacemos todos: para abastecerse de materia prima para el crecimiento y regeneración de las células y para obtener energía para el funcionamiento metabólico. Al nacer, su cuerpo contiene una cantidad de átomos que era insuficiente para acomodar todo el crecimiento que tuvo lugar durante lo que cuenta de vida. A medida que creció y maduró, necesitó más átomos, proporcionados normalmente en forma de moléculas complejas que su cuerpo ha tenido que descomponer y convertir en los elementos fundamentales necesarios para el reemplazo y el crecimiento celular. Tal como se dijo en nuestra discusión acerca de la explosión de Krypton, todos los átomos del universo —incluidos los de la comida que ingerimos— fueron sintetizados mediante reacciones nucleares en una estrella ahora ya muerta, en la cual los átomos de hidrógeno fueron aplastados entre sí para formar átomos de helio, el helio se fusionó para formar carbón, y así sucesivamente. Un producto adicional derivado de esas reacciones de fusión en nuestro Sol proporciona el segundo componente esencial de los alimentos que ingerimos. Matter-Eater Lad (el chico comedor de materia) de la Legión de Superhéroes puede ser capaz de subsistir consumiendo objetos inertes como metal o piedra, y la amenaza cósmica Galactus debe consumir la energía vital de los planetas. Sin embargo, para la mayoría el alimento que comemos debe haber estado vivo anteriormente. Sólo tales comestibles nos suministran un componente adicional, tan misterioso como mundano es su nombre: energía.

El uso de la palabra *energía* es tan corriente que resulta inquietante darse cuenta de lo difícil que es definirla sin utilizar las palabras *energía* o *trabajo* en su descripción. La definición no matemática más sencilla es que la «energía» es una medida de la capacidad para producir movimiento. Si un objeto ya se está moviendo, decimos que posee «energía cinética», y puede producir movimiento si tropieza con otro. Incluso si no se está moviendo, un objeto puede poseer energía, como en el caso en que está siendo empujado por una fuerza externa (la gravedad, por ejemplo) pero se le impide acelerarse, por ejemplo

si está sujeto a cierta altura sobre el suelo. Puesto que el objeto se moverá si se le deja libre, se dice que posee «energía potencial».

Toda la energía es o bien cinética o bien potencial, aunque dependiendo de las circunstancias una masa puede poseer ambas, tal como cuando Gwen Stacy cae desde lo alto del puente en el capítulo 3. Cuando se hallaba en lo alto del puente tenía una gran energía potencial, ya que la gravedad puede actuar a gran distancia. Pero su movimiento estaba impedido, puesto que el puente la sostenía. Cuando fue arrojada desde lo alto de la torre, se retiró el impedimento y la fuerza que actuaba sobre ella (la gravedad) le imprimió entonces su aceleración. A medida que se desplomaba disponía de una distancia cada vez más corta para seguir cayendo, de modo que su energía potencial decrecía. La energía potencial no desapareció, sino que en lugar de ello su gran energía potencial en lo alto del puente se convertía en una energía cinética que crecía sin cesar a medida que caía cada vez con más rapidez. En cualquier punto de su caída, la cantidad de energía cinética ganada era exactamente la energía potencial perdida (ignorando la energía gastada en vencer la resistencia del aire). Si hubiese golpeado el agua en la base del puente, su energía potencial hubiera sido la mínima (una vez en la base de la torre ya no hay posibilidad de seguir cayendo), mientras que la velocidad y, por consiguiente, la energía cinética hubieran sido la máxima. De hecho (ignorando de nuevo la fricción del aire) su energía cinética en la base hubiera sido exactamente igual a su gran energía potencial en lo alto del puente cuanto comenzó a caer. Esta energía cinética se hubiera transferido al agua, que proporcionaría una gran fuerza para cambiar su gran velocidad a cero, con el mismo resultado terrible que cuando fue recogida por la red de Spiderman como se describió en el capítulo 3.

También podemos imaginar a Spiderman columpiándose adelante y atrás en su red como si fuera un péndulo. En la parte más elevada de su arco no se mueve (debido a que se trata del punto más alto de su balanceo), pero está alejado del suelo y tiene una gran energía potencial. Su energía potencial en la parte más baja de su balanceo tiene un valor mínimo, y si hubiera comenzado en ese punto, no se hubiera movido. Al comenzar en un punto más alto, su energía potencial inicial se transforma en energía cinética, y en el punto más bajo de su arco su pérdida de energía potencial es exactamente igual a su ganancia de energía cinética. La única fuerza que actúa sobre él en este punto más bajo es la gravedad (que tira hacia abajo) y la tensión de la cuerda (que tira hacia arriba). Ninguna de las dos actúa en la dirección horizontal de su balanceo en este punto. Pero ya se encuentra en movimiento, y un objeto en movimiento permanece en él a menos que actúe una fuerza externa. Al llegar más allá de este punto más bajo y empezar a elevarse de nuevo, su energía cinética se transforma de nuevo en energía potencial. Si nadie le impulsa, nunca podrá tener más energía total que aquella con la que comenzó (¿de dónde iba a provenir?) y así el punto final de su balanceo no puede estar más alto que la altura inicial. De hecho, parte de su energía cinética se emplea en desplazar el aire de su trayectoria (resistencia del aire), de modo que se elevará a una altura algo menor que la del punto de comienzo.

Este recuento de cuánta energía es potencial y cuánta es cinética implica una de las ideas más profundas de toda la física: *la energía no se crea ni se destruye, sino que solamente puede cambiar de una forma a otra*. Este concepto se resume en el elegante título de **principio de la conservación de la energía**. Nunca hemos podido pillar a la Naturaleza en un caso en que la energía al comienzo de un proceso no sea exactamente igual a la energía al final del mismo. Nunca.

Cuando los físicos estudiaron la desintegración de los núcleos radiactivos en las décadas de 1920 y 1930, hallaron que las energías finales de los electrones emitidos y de los núcleos resultantes no igualaban a la energía inicial del núcleo de partida. Enfrentado con la posibilidad de que la energía no se conservara en las reacciones de desintegración, Wolfgang Pauli sugirió en lugar de ello que la energía que faltaba era transportada lejos por una misteriosa partícula fantasma invisible a los detectores. Se construyeron eventualmente dispositivos con el fin de observar dichas «partículas fantasma». No sólo resultaron ser reales, sino que de hecho los neutrinos (como fueron bautizadas dichas partículas, de un modo algo caprichoso, por Enrico Fermi, al describirlos en italiano como «pequeños entes neutros») se hallan entre las formas de materia más predominantes del universo.

Suponga que clavamos un clavo en un tablón de madera. La energía potencial del martillo, sujeto por encima de la cabeza del carpintero, se convierte en energía cinética cuando desciende. Cuando el martillo golpea al clavo, la energía cinética del mismo provoca el movimiento del clavo (profundamente en el tablero, esperamos) y, como un efecto secundario, motiva también que los átomos de la cabeza del clavo se agiten más violentamente, calentándolo. El reparto de la energía cinética incidente del martillo en vibraciones adicionales de los átomos de la cabeza del clavo, el movimiento hacia delante del propio clavo, y la rotura de enlaces moleculares en la madera (necesaria si el clavo ha de ocupar un espacio antes llenado por la madera) puede resumirse describiendo la «eficacia» del proceso de martilleo. Si uno añade cuidadosamente todas las cantidades pequeñas y grandes de energía cinética del clavo, la madera e incluso el aire (el «pum» que se escucha cuando se golpea el clavo resulta de una onda de presión —el sonido— inducida en la atmósfera circundante), el resultado neto debe resultar exactamente igual que la energía cinética inicial del martillo justo antes de golpear la cabeza del clavo. Sin embargo, el calentamiento del clavo y la creación de un efecto de sonido son «energías derrochadas» desde el punto de vista del carpintero, y cuentan contra la eficacia del proceso de martilleo.

A veces esta energía derrochada no es insignificante. Un automóvil que viaja a lo largo de una carretera plana tiene una energía cinética. Esta energía proviene de una reacción química durante la combustión del vapor de gasolina con el oxígeno, iniciada mediante la chispa eléctrica de la bujía. Los gases resultantes de esta pequeña reacción explosiva se mueven a grandes velocidades para que puedan desplazar un pistón. El movimiento arriba y abajo del pistón se traslada mediante un ingenioso sistema a la rotación de las ruedas del automóvil. Naturalmente, no toda la energía de esta reacción química se aplica al desplazamiento de los pistones —gran parte de ella calienta el motor, lo cual es inútil desde el punto de vista de la locomoción—. Además, mientras el coche viaja a lo largo de la autopista, se necesita también energía para desplazar el aire de su camino. El rendimiento del automóvil se determina en gran parte por el esfuerzo de desplazar el aire del volumen inmediato que intenta ocupar ¡más de cinco toneladas de aire por cada kilómetro recorrido para un automóvil de tamaño medio! Cuanto mayor es el perfil del automóvil o del camión, mayor es el volumen de aire que debe ser desplazado, y más energía hay que dedicar a dicha tarea, además de impulsar al vehículo hacia delante. Este mismo principio explica también por qué es más fácil moverse bajo el agua en una piscina con las manos en los costados que si se las mantiene separadas del cuerpo. Cuanto menor es la superficie frontal, mayor es el rendimiento del combustible para vehículos de masa comparable. El



diseño aerodinámico de un coche deportivo, por consiguiente, no solamente intenta aumentar nuestro atractivo por parte del sexo opuesto, sino que también tiene una importancia relevante al determinar la frecuencia con la que debemos visitar una gasolinera.

El Duende Verde gastó energía transportando a Gwen Stacy a lo alto del puente George Washington. Este aumento de la energía potencial de la chica quedó almacenado al permanecer en lo alto de una de las torres. El aumento de su energía potencial provino de la energía química del combustible del deslizador del Duende. Llevado a su lógica conclusión, puesto que el principio de conservación de la energía afirma que si uno no puede crear nueva energía ni destruir la actual, sino únicamente convertirla de una forma en otra, entonces toda la energía y materia que existe actualmente en el universo estaba presente en el instante en que el Big Bang anunció la creación del mismo. En este instante primigenio, el universo entero estaba comprimido en un volumen inconcebiblemente pequeño. A medida que el universo se expandía, la cantidad total de energía y de contenido de materia permaneció sin cambio, aunque repartida ahora sobre un volumen siempre creciente.

La «densidad de energía» es la energía por volumen; por lo tanto, si la cantidad de energía es la misma pero el volumen aumenta, la densidad de energía disminuye. La energía y la materia pueden intercambiarse a través de un proceso representado por la famosa ecuación de Einstein  $E = mc^2$ . La importancia de  $E = mc^2$  se debe a que nos dice que la materia puede considerarse «energía decelerada». Normalmente, cuando los fotones chocan entre sí y forman materia, se crea una cantidad igual de materia y antimateria. A medida que el universo se expandía y se enfriaba, durante el primer segundo posterior al Big Bang, los protones y los neutrones comenzaron a formar un «plasma quark-gluon». A través de un proceso que sigue sin comprenderse bien, en el universo primitivo se formaron algunos protones y neutrones de más en relación con sus antipartículas. Esta formación de materia ocurrió solamente una vez, muy al comienzo de la historia del universo, cuando la densidad de energía era lo bastante grande como para permitir que la materia cobrara existencia, mientras que en tiempos posteriores (como en el presente) cuando la densidad de energía está por debajo del umbral  $E = mc^2$ , no hay suficiente fondo de energía en el espacio exterior para formar espontáneamente materia<sup>[37]</sup>. Los protones y electrones creados en los primeros eones del universo surgieron juntos debido a su atracción electrostática y formaron átomos de hidrógeno. La gravedad atrajo hasta reunirlos a algunos de esos átomos de hidrógeno para formar grandes aglomeraciones que se convirtieron en estrellas. En los centros de esas estrellas, mantenidas juntas por la energía gravitatoria potencial, una reacción nuclear transforma esos átomos de hidrógeno en elementos más pesados y en energía cinética.

Ahora bien, podemos decir que toda la energía (y, por consiguiente, toda la materia) que se halla en el universo actual estaba presente en el momento del Big Bang. Pero esto conduce a dos cuestiones más profundas acerca de la energía: ¿qué es realmente?, y ¿de dónde provino inicialmente? La ciencia proporciona la misma respuesta exacta a ambas cuestiones: nadie lo sabe.

## Comida rápida

Para calcular cuánto debe comer Flash para poder correr a supervelocidad, necesitamos calcular su energía cinética. Los físicos tratan siempre de ahorrar trabajo, así que reciclaremos las matemáticas del capítulo 1 para que no tengamos que esforzarnos más. Hablando de trabajo, con el fin de cambiar la energía cinética de un objeto, bien sea acelerándolo o frenándolo, uno debe hacer Trabajo. Escribimos *Trabajo* con mayúscula porque en física el término tiene un significado específico que es ligeramente distinto del corriente.

Cuando una fuerza actúa sobre un objeto a lo largo de una distancia determinada, decimos que la fuerza realiza **Trabajo** sobre el objeto y, dependiendo de la dirección de la fuerza, aumentará o disminuirá la energía cinética del objeto. De este modo Trabajo es justamente otro término para la energía, y tendrá las mismas unidades. Para una masa **m** que cae, la fuerza que actúa sobre ella es su peso debido a la gravedad  $F = mg$ , y la distancia sobre la que actúa la fuerza sobre el objeto es precisamente la altura **h** desde la que cae. Así pues, **Trabajo = (Fuerza) × (distancia) = (mg) × (h) = mgh**. Esto resulta ser la energía potencial que tenía el objeto a una altura **h**, de modo que en este ejemplo el Trabajo puede contemplarse como la energía necesaria para aumentar la energía potencial de un objeto.

Consideremos a Gwen Stacy cayendo (capítulo 3) o a Superman saltando (capítulo 1). En cada caso el Trabajo que efectúa la gravedad está dado por **Trabajo = mgh**. Para Gwen el Trabajo aumenta su energía cinética, y para Superman disminuye su energía cinética. La diferencia está en que en el caso de Gwen la fuerza la empuja hacia abajo en la dirección de su movimiento, mientras que en el del hombre de acero la fuerza sigue siendo hacia abajo, pero se opone a la dirección de su salto. Gwen comienza sin energía cinética, pero la fuerza gravitatoria que actúa a distancia (lo alto de la torre del puente) le proporciona una velocidad final grande antes de chocar contra el agua. La conexión entre su velocidad final **v** y la distancia de caída **h** venía dada por  $v^2 = 2gh$ , donde **g** es la aceleración debida a la gravedad. Ésta es una afirmación cierta y, de acuerdo con nuestra regla de álgebra (ver Prefacio), podemos multiplicar y dividir ambos lados de una expresión cierta por la misma cantidad, y seguirá siendo cierta. Así si dividimos por 2 ambos lados de  $v^2 = 2gh$ , el resultado es  $v^2/2 = gh$ . Si ahora multiplicamos los dos lados por la masa **m** de Gwen, obtenemos  $mv^2/2 = mgh$ . El lado derecho es el **Trabajo** que la gravedad efectúa sobre Gwen. El lado izquierdo debe por lo tanto describir su cambio en energía cinética, es decir su energía cinética final menos su energía cinética inicial. Puesto que comenzó sin energía cinética (sin movimiento no hay energía cinética, aunque tenía mucha energía potencial) su energía cinética final queda establecida como **Energía cinética = 1/2 mv<sup>2</sup>**. Enhorabuena, acaba de efectuar *otro* cálculo de física<sup>[38]</sup>.

Cuando Flash deja de correr se efectúa Trabajo al cambiar la energía cinética del velocista escarlata. De tanto en tanto, la aceleración que debe experimentar Flash está representada de una forma más o menos realista, y descritas las consecuencias de esas deceleraciones. En el número 106 de *Flash*, nuestro héroe tuvo que detenerse de repente para alcanzar un objeto que viajaba a 800 km/h. El cómic lo muestra formando surcos profundos en el suelo con sus pies mientras intenta detenerse rápidamente. Aquí las fuerzas, en particular la fricción, que acompañarían a su rápida deceleración están representadas fielmente. Al hacerlo pasar al reposo desde una velocidad de 800 km/h, el gran cambio

en la energía cinética requiere un gran **Trabajo** correspondiente. La viñeta del cómic (figura 16) muestra a Flash frenando en unos cinco metros, de modo que la distancia es corta, y puesto que **Trabajo = (Fuerza) × (distancia)**, la fuerza que ejercen sus pies sobre el suelo debe ser en correspondencia muy grande. De hecho, para cambiar su velocidad de 800 km/h en una distancia de cinco metros se necesita una fuerza de ¡más de 40.000 kilos!



**Fig. 16.** Un ejemplo inusual en el n.º 106 de *Flash* de los efectos realistas de la deceleración súbita. Cuanto más corta es la distancia de frenado, mayor es la fuerza que han de ejercer sus botas sobre el suelo al frenar. © 1959 National Periodical Publications Inc. (DC)

De modo parecido, en el volumen 2 de *Flash*, ejemplar número 25 de abril de 1989, Wally West<sup>[39]</sup> corre tan deprisa que, en su intento de parar repentinamente deja cortes profundos de una milla de longitud por toda Norteamérica. A partir de la longitud de las marcas del patinazo de frenado, los científicos que siguen la pista a Wally son capaces de determinar lo rápido que se movía y su punto probable de parada, utilizando las mismas técnicas que emplea la policía cuando reconstruye un accidente de automóvil a partir de la longitud de las marcas del patinazo de los neumáticos. Siendo realistas, uno debería saber siempre dónde ha estado Flash, basándose en los profundos surcos que excavan sus pies cada vez que empieza a correr o se detiene de repente. Por fortuna, para el Departamento de Carreteras y Transportes de Central City, esta exhibición físicamente exacta de los poderes de Flash tiene lugar sólo de vez en cuando.

Volviendo ahora a los hábitos de comida de Flash, si la energía cinética **EC** se escribe matemáticamente como  $EC = (1/2) mv^2$ , entonces las necesidades de ingesta calórica de Flash aumentan cuadráticamente cuanto más deprisa corre. Si corre dos veces más rápido, su energía cinética aumenta por un factor de cuatro, por lo que necesita comer cuatro veces más para alcanzar esta mayor velocidad. En la Edad de Plata (finales de los cincuenta y década de los sesenta), el artista Carmine Infantino dibujaría a Barry Allen medianamente esbelto y no como una masa voluminosa de músculos, dado que era, después de todo, un corredor (Flash, no Carmine). Si Flash pesaba 70 kg sobre la Tierra, entonces su masa sería de 70 kg. Cuando corría al 1% de la velocidad de la luz (lo que dista mucho de la velocidad tope de Flash), su velocidad sería  $v = 300$  millones de m/s. En este caso su energía cinética **EC** es  $(1/2) \times$

$(70 \text{ kg}) \times (300.000.000 \text{ m/s})^2 = 3,15 \text{ trillones de } \text{kgm}^2/\text{s}^2 = 0,75 \text{ trillones de calorías}$ . La energía se utiliza con tanta frecuencia en física que tiene su propia unidad de medida, una de las cuales se llama *caloría* y se define de forma que  $0,24 \text{ calorías} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$ . Es decir, 0,24 calorías es igual al Trabajo resultante de aplicar una fuerza de  $1 \text{ kg m/s}^2$  sobre la distancia de un metro.

La razón por la cual  $1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$  es igual a este extraño número de calorías (0,24 para ser exactos) es clave en cuanto al hecho de que a mediados del siglo XIX los físicos estaban desconcertados con respecto a la energía, situación que no mejoró mucho durante años. La caloría se definió originalmente como una unidad de calor, al creerse que el calor era una magnitud distinta del Trabajo y la energía. De aquí que se desarrollara un sistema de medidas para el calor, mientras que se empleaba una unidad diferente para medir la energía cinética y la potencial. El físico que reconoció que el calor era simplemente otra forma de energía, y que el trabajo mecánico podía transformarse directamente en calor, fue James Prescott Joule, en cuyo honor se ha bautizado una unidad estándar de energía, el julio<sup>[40]</sup> ( $1 \text{ julio} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$ ). Aunque los físicos emplean el julio al cuantificar la energía cinética o potencial, nosotros seguiremos ajustados a la más engorrosa  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$ , con el fin de destacar los distintos factores que intervienen en la determinación de la energía<sup>[41]</sup>.

Debemos observar que una caloría de un físico no es lo mismo que una caloría de un nutricionista. Para un físico una caloría se define como la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de un gramo de agua un grado Celsius. Es una forma perfectamente válida, aunque arbitraria, de definir la energía en una determinación de laboratorio. Pero esta definición conduce a la observación de que un único bizcocho de soda contiene bastante energía como para elevar la temperatura de 24.000 g de agua en un grado. Es decir, para un físico el contenido de energía de un mero bizcocho es de 24.000 calorías. Para evitar el tener que tratar siempre con estos números tan grandes, una caloría alimenticia se define igual a 1.000 «calorías de la física». Por consiguiente, las 24 calorías alimenticias de un simple bizcocho equivalen realmente a 24.000 calorías acordes con la definición de laboratorio del término. Es igualmente bastante malo pensar en las casi 500 calorías alimenticias de una hamburguesa de queso, pero si consideramos que contiene realmente 500.000 calorías físicas, nunca volveríamos a comer nada.

Para convertir la energía cinética de Flash de 75 billones de calorías en calorías alimenticias, deberíamos dividir su energía por 1.000. Esto ayuda, pero todavía gasta 75 mil millones de calorías alimenticias corriendo al 1% de la velocidad de la luz. Dicho de otro modo, necesitaría comer 150 millones de hamburguesas de queso para poder correr con esa velocidad suponiendo que el 100% de la energía del alimento se convierte en energía cinética<sup>[42]</sup>. Si se para, su energía cinética pasa a valer cero, y para volver a correr de nuevo tan deprisa necesita comer otros 150 millones de hamburguesas. En uno de los cómics de Flash, a mediados de los años ochenta, se reconoció brevemente que necesitaba comer casi constantemente (incluso masticando a supervelocidad) con el fin de sostener sus altas velocidades. En la Edad de Oro, la Edad de Plata y ahora en la Edad Moderna, la conservación de la energía se ignora cómodamente. Actualmente la energía cinética de Flash se atribuye a su capacidad de recurrir a un extracto de velocidad de la «Fuerza de velocidad», que es una manera elegante de decir: relájese, se trata sólo de un cómic.

## Hamburguesas de queso y bombas H

La siguiente pregunta que nos hacemos es: ¿por qué una hamburguesa de queso, o cualquier alimento, proporciona energía a Flash? Es fácil identificar la energía cinética cuando algo se mueve, y la energía potencial debida a la gravedad se comprende también muy sencillamente, pero hay muchas otras formas de energía que necesitan de cierta reflexión para determinar la categoría a la que pertenecen, potencial o cinética. La energía que Flash gana comiendo no es debida a la energía cinética de los átomos que se agitan en su comida (la comida caliente tiene el mismo número de calorías que la fría), sino a la energía potencial contenida en los enlaces químicos de su alimento. Dado que la energía no puede crearse ni destruirse, sino solamente transformarse de un estado a otro, sigamos la cadena hacia atrás para ver de dónde proviene la energía potencial de una hamburguesa de queso.

Para comprender la energía potencial almacenada en la comida hemos de considerar algo de química básica. Cuando dos átomos se acercan mucho entre sí, si las condiciones son adecuadas, formarán un enlace químico y se creará una nueva unidad, llamada *molécula*. Una molécula puede ser tan pequeña como dos átomos de oxígeno enlazados entre sí formando una molécula de oxígeno ( $O_2$ ), o puede ser tan grande y compleja como el ADN que se halla en el interior de cada una de las células de su cuerpo. La cuestión de si dos o más átomos formarán un enlace químico y la elucidación de las correspondientes condiciones es la base de toda la química. Todos los átomos tienen núcleos cargados positivamente en torno a los cuales ronda un enjambre de electrones. Las propiedades químicas de un elemento están determinadas por el número de electrones que posee y por el modo como pueden equilibrar su repulsión mutua (al estar negativamente cargados) con su atracción hacia los núcleos cargados positivamente. Cuando un átomo se acerca mucho a otro, las posiciones más probables de los electrones de los dos átomos se superponen y, dependiendo de su naturaleza detallada, se creará una fuerza atractiva o repulsiva entre ambos átomos. Si la fuerza es atractiva, los electrones crean un enlace químico y los átomos forman una molécula. Si la fuerza es repulsiva, decimos entonces que los dos átomos no reaccionan químicamente. Determinar si la fuerza es atractiva o no supone cálculos complicados de mecánica cuántica (tendremos mucho más que decir acerca de la mecánica cuántica en la sección 3). Si la fuerza es atractiva y se obliga a los átomos a mantenerse separados físicamente, entonces hay una energía potencial entre ellos, puesto que una vez que se libera esta restricción los dos forman una molécula. De este modo decimos que los dos átomos, una vez químicamente unidos, están en un estado de baja energía, tal como la energía potencial gravitatoria de un ladrillo es mínima cuando se coloca sobre el suelo. Se tiene que efectuar trabajo para elevar el ladrillo a una altura  $h$ , del mismo modo que se ha de suministrar energía a la molécula para separarla en sus átomos constituyentes.

Estamos *finalmente* (y casi puedo oír cómo dice «¡gracias a Dios!») en condiciones de contestar la pregunta de por qué necesita comer Flash. O mejor dicho, por qué la comida proporciona la energía que necesita para mantener su energía cinética. Cuando Flash corre, gasta energía en el nivel celular para expandir y contraer los músculos de sus piernas. Esta energía celular proviene a su vez del desayuno que toma Barry Allen. ¿Y de dónde viene la energía de la comida? De las plantas, bien sea consumida directamente o a través de un proceso intermedio (tal como la comida obtenida de los animales). Esta energía almacenada en la comida es sencillamente energía potencial a escala molecular. Las plantas toman diversos «bloques de construcción» moleculares más pequeños y los procesan,

almacenándolos en una «torre de bloques» subcelular. Esta torre molecular de azúcares complejos, una vez construida, es bastante estable. El proceso de elevar y organizar un grupo de bloques en forma de una torre alta eleva la energía potencial de los bloques (excepto para el bloque inferior).

De un modo análogo, las plantas efectúan Trabajo cuando construyen esos azúcares a partir de moléculas más simples, elevando la energía potencial de la molécula finalmente sintetizada. La energía potencial permanece retenida en el interior de los azúcares hasta que la mitocondria del interior de nuestras células construye la adenosina trifosfato o ATP, liberando la energía almacenada, tal como el Trabajo de construir un bloque de torres se conserva como energía potencial de los bloques más altos hasta que la torre se derrumba, convirtiendo la energía potencial en energía cinética. La cantidad de energía liberada por el ATP en las células de los músculos de las piernas de Flash es mayor que la energía necesaria para «derrumbar la compleja torre de azúcar», aunque la ganancia para Flash es mucho menor que el esfuerzo de la célula de la planta para elevar previamente la torre.

¿De dónde obtiene la célula de la planta esta energía? A través de un proceso llamado *fotosíntesis*, por medio del cual la energía solar es absorbida por la célula de la planta y se emplea en la construcción de azúcares complejos. La luz proviene del sol (no se impacienta, ya casi estamos llegando al final), donde es generada como un resultado adicional del proceso de fusión nuclear, en el cual los núcleos de hidrógeno se activan mediante la presión gravitatoria para crear núcleos de helio. En definitiva, toda la energía química de la comida es luz solar transformada, la cual a su vez es generada por el proceso de fusión nuclear que tiene lugar en la detonación de una bomba de hidrógeno. De este modo la mayor parte de la energía de la Tierra tiene como origen la energía solar, así como todos los átomos de la Tierra, desde las moléculas de ATP hasta el anillo en el que Flash guarda su vestimenta, pasando por su propio cuerpo, fueron creados en un crisol solar (aunque obviamente no el de nuestro propio sol).

En último término, toda la vida es posible porque la masa de un núcleo de helio (que contiene dos protones y dos electrones) es ligeramente menor que la de dos núcleos de deuterio (un núcleo de deuterio contiene un protón y un neutrón) combinados en el centro de una estrella. Y al decir ligeramente menor trato de decir que la masa de un núcleo de helio es el 99,3% de la de dos núcleos de deuterio. Esta pequeña diferencia de masa implica una gran emisión de energía, puesto que según  $E = mc^2$ , el cambio de la masa se multiplica por el cuadrado de la velocidad de la luz.

De modo que la vida en el universo es posible porque la masa del núcleo de helio resultante es exactamente el 99,3% de los elementos que intervienen en la reacción que lo produce. Si la diferencia de masa fuera del 99,4%, entonces no se formaría el núcleo de deuterio, y por lo tanto no proseguiría la fusión del helio. En este caso las estrellas brillarían demasiado débilmente como para sintetizar elementos, y no tendrían lugar explosiones de supernova que son las que generan los elementos pesados y las que los expelen al vacío en donde pueden formar planetas y personas. Por otra parte, si la diferencia de masa fuera del 99,2%, entonces se desprendería demasiada energía de la reacción de fusión. En este caso los protones se combinarían directamente para formar núcleos de helio en el universo temprano, y no habría combustible nuclear para formar las estrellas. El origen de esta asombrosa sintonía de las propiedades fundamentales de la naturaleza es actualmente objeto de

investigación.

## Ejercicios de respiración profunda

Para correr, Flash necesita la energía almacenada en la comida, que está retenida en moléculas complejas. Hemos descrito esta energía como semejante a la energía potencial de una torre de bloques, en cuya construcción han de emplear trabajo las plantas. Nosotros transformamos esta energía almacenada, luego de haber consumido las plantas, en energía cinética cuando derribamos la torre. Pero ¿cuál es el disparador que hace caer esta torre? ¿Cómo sabe la torre cuándo necesita la célula que se libere energía? Hay mucha bioquímica en el proceso de liberación de energía por la mitocondria en las células del cuerpo, pero el paso esencial implica una reacción química de incorporación de oxígeno y emisión de dióxido de carbono. Cuanto más rápido corre Flash, más energía cinética manifiesta y necesita liberar más energía potencial almacenada en sus células y respirar más oxígeno. Ya hemos discutido el hecho de que necesitaría comer una pasmosa cantidad de comida para dar cuenta de la energía cinética que exhibe rutinariamente. ¿Qué hay del oxígeno que inhala? ¿Tendrá que consumir toda la atmósfera terrestre cuando corre?

Para responder a esta pregunta necesitamos primero saber cuánto  $O_2$  utiliza Flash cuando recorre una milla. El volumen de oxígeno consumido por un corredor dependerá de su masa, y las mediciones indican unos  $70 \text{ cm}^3$  de  $O_2$  por kilogramo del corredor y por minuto, para atletas de élite a una marcha de seis minutos por milla. Suponiendo que la masa de Flash sea de 70 kg, utilizará casi 30 litros de  $O_2$  por cada kilómetro que recorre (un litro es igual a mil centímetros cúbicos). Supongamos que su razón de consumo de  $O_2$  es la misma incluso para grandes velocidades. Treinta litros de  $O_2$  contienen algo menos que un millón de trillones de moléculas de oxígeno, y a una velocidad de 16 km/s esto significa que Flash inhala alrededor de un millón de trillones de moléculas de  $O_2$  *cada segundo*. Esto suena a mucho, pero afortunadamente hay muchas más moléculas de  $O_2$  en nuestra atmósfera que eso. Muchísimas más. De hecho, grosso modo, la atmósfera de la Tierra contiene más de diez millones de trillones de trillones de moléculas de  $O_2$ . Así, incluso a una razón de consumo de un millón de trillones de moléculas por segundo, tendría que correr así de rápido (16 km/s) y respirar a este ritmo sin cesar durante más de 500 mil millones de años antes de agotar nuestra provisión de oxígeno. Cuanto más deprisa corre, más deprisa consumirá nuestro aire, pero incluso corriendo a casi la velocidad de la luz (de lo cual es capaz, aunque no lo haga con frecuencia) tardaría más de dos millones de años, corriendo sin parar y respirando a este ritmo, en agotar nuestra atmósfera. Así pues, al menos en lo que hace a este aspecto de su supervelocidad, podemos respirar tranquilos.

La atmósfera de la Tierra puede estar segura, pero naturalmente esto supone que Flash es capaz de respirar mientras corre. Es decir, corriendo a varios cientos de kilómetros por hora, ¿será capaz de llegar a respirar profundamente? Afortunadamente para el velocista escarlata, lleva una reserva de aire consigo mientras corre. En el número 167 de *Flash*, esta región de aire estacionario (con respecto a Flash) se describe como su «aura», mientras que en dinámica de fluidos recibe el nombre de «zona de no deslizamiento». De cualquier modo que se le llame, ésta es la razón por la que tienen abolladuras las pelotas de golf. Para comprenderlo, intentemos este sencillo experimento casero de física: abramos el grifo de agua fría del lavabo del cuarto de baño, solamente lo justo para que se abra la válvula. Para

conseguir los mejores resultados, quite primero el filtro de la boca del grifo. Cuando empieza a salir el agua, puede ver que se mueve muy suavemente desde el grifo, con la apariencia de un cilindro pulido, más ancho en la salida del grifo y adelgazándose ligeramente debido a la tensión superficial. Si se ignora el sonido del agua al caer en el lavabo resulta difícil distinguir si el agua se está moviendo y no es realmente una estructura rígida. Este tipo de flujo de agua, en el que todas las moléculas de agua se mueven suavemente en la misma dirección, se llama *flujo laminar*. En el extremo opuesto, abra la válvula del todo. El agua se agita y forma remolinos moviéndose en muchas direcciones con un amplio rango de velocidades. Este tipo de flujo de agua se denomina *turbulento*. Naturalmente, si quiere que el agua pase a través de una tubería del modo más eficaz posible, querrá que el flujo sea laminar, en donde todas las moléculas de agua se mueven en una misma dirección a lo largo de la tubería, en lugar de turbulento, en donde los vórtices y los remolinos implican necesariamente que algunas moléculas de agua se mueven contra la corriente.

Incluso en un flujo laminar a través de una tubería, todas las moléculas pueden moverse en la misma dirección pero sin que todas participen de la misma velocidad. Las moléculas de la parte exterior tropezarán con las paredes de la tubería, transfiriendo su energía cinética a la misma (que es rígida, de modo que la tubería se calentará un poco pero no se moverá) y se detendrán. Justo en la cercanía de las paredes de la tubería se forma una delgada capa de agua que no se mueve. El agua próxima a esta capa que no se mueve pierde algo de su energía cinética, aunque no toda, porque a diferencia de los átomos de la tubería, las moléculas de agua de la «zona de no deslizamiento» se pueden mover. En el siguiente anillo más cercano al centro de la tubería, el agua se mueve un poco más deprisa. Así pues, incluso en el flujo laminar uniforme, existe una serie continua de anillos concéntricos, cada uno de los cuales se mueve progresivamente más rápido que el adyacente. El agua del centro exacto de la tubería es la que se mueve con mayor velocidad. En el flujo laminar todos los anillos son uniformes, mientras que en el flujo turbulento hay un movimiento caótico a través de la sección de la tubería.

La situación es simétrica en el caso de una tubería en movimiento empujada a través de agua en reposo. El agua más cercana a las paredes de la tubería es arrastrada con ella, mientras que el agua próxima a este anillo se mueve algo más lentamente, y así en adelante. Pero en cada caso, tanto si es el agua la que se mueve a través de la tubería o es la tubería la que se mueve a través del agua, el agua cercana a la tubería está estacionaria relativamente a la tubería. En tanto el flujo sea laminar, cerca de un objeto que se mueve se produce una delgada capa de aire (los razonamientos hechos con relación al agua se aplican igualmente a un fluido como el aire) que no se mueve con respecto al objeto. Al igual que en el ejemplo del grifo de agua, esta zona laminar de no deslizamiento es más robusta cuanto más lento es el movimiento a través del fluido. A una velocidad muy alta la transferencia de energía a través de los anillos concéntricos se vuelve desordenada y se origina la turbulencia. Un objeto que se mueve a una velocidad determinada ha de gastar más energía al generar flujo turbulento que si el flujo es laminar.

Ésta es una razón de por qué tienen abolladuras las pelotas de golf. Los salientes de la pelota de golf disminuyen la sección transversal del torbellino que se forma tras la bola que se mueve a velocidades altas. Dicho burdamente, las abolladuras reducen la fricción de la bola, al perderse menos energía en el menor torbellino. Este efecto se descubrió por casualidad. A mediados del siglo XIX, las



pelotas de golf eran esferas lisas de goma de gutapercha. Los golfistas se dieron cuenta de que las pelotas viejas y magulladas, con rasguños y golpes alcanzaban distancias mayores en un determinado *swing* que las nuevas y lisas. El estudio experimental y una comprensión teórica de la mecánica de fluidos condujeron al diseño óptimo de las pelotas de golf con abolladuras.

Lo que es bueno para una pelota de golf es bueno para Flash. Cuando el velocista escarlata corre, la capa de aire que está en contacto con él permanece estacionaria relativamente a su cuerpo, de manera que dispone de una bolsa de aire que lleva consigo constantemente a su alrededor. Incluso en una capa de solamente unos pocos centímetros de grosor hay casi un millón de trillones de moléculas de O<sub>2</sub>. Esta «reserva» de aire debe refrescarse continuamente con aire nuevo del exterior de la capa límite, con el fin de que el velocista escarlata pueda correr durante más que unos pocos segundos cada vez.

En los cómics de Flash la zona de no deslizamiento o «aura» que rodea al velocista escarlata no solamente le permite respirar mientras corre sino que también lo libera de otras consecuencias molestas del rozamiento del aire. Si un meteorito se quema en la atmósfera, por ejemplo, debido a las extremadas fuerzas de fricción que experimenta al desplazar el aire de su trayecto mientras penetra en la atmósfera a gran velocidad<sup>[43]</sup>, entonces ¿por qué no se quema Flash cuando corre a grandes velocidades?

El número 167 de *Flash* daba una respuesta a esta cuestión, pero se trataba de una solución que pocos aficionados hallaron satisfactoria. De acuerdo con esta explicación, el «aura protectora» que Flash había adquirido junto con sus poderes de supervelocidad había sido proporcionada por un «duende inexperto de un mundo de diez dimensiones» llamado Mopee. En esta historia, utilizando sus capacidades mágicas, Mopee (con un parecido más que pasajero con Woody Allen) eliminó el «aura» de Flash pero no su supervelocidad. En consecuencia, Flash podía seguir corriendo a grandes velocidades, pero no podía impedir quemarse debido a la tremenda resistencia del aire que encontraba en su carrera.

Que Flash tuviera un duendecillo que le acosara no era tan sorprendente como el hecho de que el Flash de la Edad de Plata hubiera dejado transcurrir sesenta y dos números de su propio cómic antes de tropezarse con él. En los años cincuenta y sesenta, casi parecía que cada superhéroe publicado por DC Comics tenía su propio ser extradimensional dañino. El primero de tales personajes fue Mr. Mxyzptlk, un ser de un mundo de cinco dimensiones contra cuyos poderes mágicos los de Superman no tenían efecto. Mxyzptlk solamente podía ser obligado a volver a la quinta dimensión si se conseguía que dijera su nombre al revés, después de lo cual era incapaz de regresar a nuestro mundo tridimensional durante al menos tres meses (seguramente para que los lectores no acabaran aburriéndose con él y sus apariciones merecieran atención). Para no ser menos que el Hombre de acero, Batman tenía su propio duende mágico, llamado Bat-Mite, cuyos intentos para honrar a su ídolo, el inimitable Cruzado Enmascarado, tenían con frecuencia un efecto contraproducente y creaban caos y dificultades para Batman y Robin. J'onn J'onzz, o Detective Marciano, tenía un compañero alienígena llamado SOC, mientras Aquaman tenía un diablillo llamado Quisp. De los siete miembros fundadores de la Liga de la Justicia, solamente Linterna Verde y la Mujer Maravilla no han tenido nunca un espíritu sobrenatural o extradimensional propio.

No se debió al hecho de que Flash adquiriera finalmente su diablillo lo que disgustó a los aficionados a los cómics, sino más bien a que Mopee pretendió haber usado sus poderes mágicos para otorgar a Barry Allen sus poderes de supervelocidad. Los aspectos de ciencia ficción que introdujeron en la Edad de Plata con la creación del Flash los guionistas John Broome, Gardner Fox, Robert Kanigher y el editor Julie Schwartz parecían menoscabados por la pretensión de que los poderes de Flash tenían de hecho un origen mágico. Mopee no volvió a los cómics de *Flash* y, por lo que concierne a la mayor parte de los aficionados de la Edad de Plata, el número 167 de *Flash* nunca llegó a existir.

**LAS TRES LEVES DE LA TERMODINÁMICA.** A diferencia de Henry Pym, que descubrió que podía invertir la polaridad de las «partículas Pym» y aumentar de tamaño hasta convertirse en Giant-Man (Gigante), y de la actriz Rita Farr (Elasti-Girl, la Chica Elástica), de Doom Patrol (la Patrulla Condenada), quien después de haber inhalado unos vapores misteriosos de un respiradero volcánico hasta entonces no descubierto durante un rodaje de cine en África, fue capaz tanto de crecer hasta el tamaño de un edificio de cinco pisos como de empequeñecer hasta el tamaño de un insecto, el héroe Atom de DC Comics sólo podía cambiar su tamaño en una dirección: hacia lo pequeño.

Atom es uno de mis superhéroes de cómic favoritos, ya que en su identidad secreta es Ray Palmer, profesor de física. El *Showcase* número 34 nos presentó al profesor Palmer mientras estaba intentando infructuosamente desarrollar un rayo de contracción, motivado por los beneficios económicos de un dispositivo de ese tipo. Como registra en su grabadora de voz después de que fracasara el experimento número 145 (bueno, en realidad el experimento tuvo éxito al reducir una silla de cocina al tamaño de unos cuantos centímetros, pero la silla explotó a continuación, al igual que todos los otros objetos que habían sido reducidos), «la compresión de la materia [...] permitiría a los agricultores cultivar ¡miles de veces más sobre el mismo terreno! Un simple vagón de mercancías podría transportar lo mismo que 100 trenes de transporte». Naturalmente, las explosiones harían difícil el mantenimiento del inventario.

Palmer obtuvo la solución para sus problemas del rayo de contracción una noche cuando, durante un viaje nocturno, observó un trozo de una estrella enana blanca cayendo cerca de él. Este material extraterrestre resultaría ser el ingrediente crucial que faltaba y que permitió a Palmer miniaturizar objetos de modo seguro sin la subsiguiente explosión. Quizás debido a que este cadáver estelar llevaba la palabra *enana* en su nombre, posee las propiedades antes insospechadas por los físicos. Tenemos más que decir acerca del origen de Atom y del meteorito de la enana blanca en un capítulo posterior. Baste decir que el mecanismo mediante el cual Ray Palmer fue capaz de reducir su altura a 15 centímetros (su típico tamaño para acabar con el crimen) y más allá, siempre disminuyendo hasta llegar a ser más pequeño que un electrón, tiene mucho más sentido físico que la inhalación de extraños vapores del subsuelo o las partículas de Pym.

Lo que resulta significativo en relación con Atom es que, a diferencia de Ant-Man o Elasti-Girl, *no* estaba obligado a una reducción constante de densidad. Es decir, Atom podía controlar independientemente tanto su tamaño como su masa. Aparentemente, la gran densidad de la materia de la enana blanca proporciona dos «excepciones milagrosas» por el precio de una.

Con una altura normal Ray Palmer tenía un metro ochenta de altura y pesaba aproximadamente 80 kilos. Cuando se reducía a una altura de quince centímetros resultaba doce veces menor que lo normal. Su anchura y su profundidad han de reducirse también por un factor de doce —es decir, si quiere evitar parecerse a su imagen en un espejo de la casa de la risa—. Su volumen decrecerá por lo

tanto por un múltiplo de  $12 \times 12 \times 12$ , es decir por un factor de 1.728. Si tuviera que encogerse con una densidad constante su masa tendría que reducirse por este mismo factor de 1.728, haciendo que Atom tenga una masa de sólo 47 g. Esto es bastante ligero, y es difícil ver cómo un luchador contra el crimen tan insubsistente podría habérselas con los semejantes a Chronos The Time Thief (Ladrón del Tiempo) o el Doctor Light (Doctor Luz). Afortunadamente para aquellos de nosotros que estamos del lado de Dios, Atom podía mantener su diminuta estatura y aumentar el peso de su cuerpo hasta el de su tamaño normal de 80 kilos con tan sólo un clic de sus «controles de tamaño y peso» que guardaba en la hebilla del cinturón de su traje (más tarde añadió también controles en sus guantes). Como se aprecia en la figura 17, con su peso más ligero podía utilizar una goma de borrar rosa como trampolín, propulsándose a sí mismo hasta el rostro de un malhechor, y en el momento del impacto aumentar su peso hasta 80 kilos.



**Fig. 17.** Cubierta del n.º 4 de *Atom*, donde Mighty Mite demuestra el dominio sobre su tamaño y su masa. Al disminuir su densidad y ser lo bastante ligero para usar una goma de borrar como trampolín, consigue acercarse para golpear a un caco. En este momento aumenta teatralmente su masa de modo que su puñetazo deja fuera de combate al «inocente ladrón».© 1962 National Periodical Publications Inc. [DC]

El golpe de aterrizaje resultante sobre la mejilla del caco tendría la misma fuerza que cuando Tiny Titan (Titán Diminuto) tenía su altura normal<sup>[44]</sup>. Otra treta empleada por Atom consistía en que,

mientras medía solamente unos pocos centímetros de altura, se sujetaba colgando de la corbata de un delincuente y aumentaba entonces su peso hasta 80 kilos. La cabeza del malvado era sacudida violentamente hacia abajo hasta estrellarse contra el tablero de una mesa o cualquier otra superficie dura, dejándolo fuera de combate. Ésta es indudablemente una razón por la cual los delincuentes abandonaron su atuendo formal más tarde en la década de los sesenta y se colocaron a la vanguardia de la moda al adoptar un enfoque más «informal» para sus ropas al quebrantar la ley.



**Fig. 18.** Viñeta del n.º 2 de *Atom*, en la cual el Titán Diminuto utiliza su capacidad para reducir tanto su tamaño como su peso para cabalgar sobre las corrientes térmicas de aire de un edificio ardiendo. © 1962 National Periodical Publications Inc. (DC)

Al ser capaz de controlar su masa (pero solamente en su tamaño reducido), Atom podía cabalgar sobre corrientes de aire generadas por el viento o gradientes térmicos, para moverse de lugar en lugar. También haría uso del hecho de que se podía reducir hasta el tamaño de un electrón y «telefonearse» a sí mismo a lugares distantes (trataremos de la física que hay tras este truco en el capítulo 24).

Atom se mostraría con frecuencia, como en la figura 18, planeando garbosamente sobre corrientes de aire. En esta viñeta, del número 2 de *Atom*, nuestro héroe necesita llegar hasta el techo de un granero en llamas. Se contrae hasta un par de centímetros y ajusta su densidad hasta resultar «más ligero que una pluma», y a continuación es elevado por las «corrientes de aire caliente hasta el tejado». En realidad, debería sufrir un viaje mucho más confuso y penoso y, según experiencia de primera mano, verificar las interioridades de la mecánica estadística de la rama de la física llamada termodinámica.

### **La primera ley: no se puede ganar nunca**

Así como Isaac Newton articuló tres leyes del movimiento, existen tres leyes de la termodinámica, el estudio del flujo del calor. El campo de la termodinámica fue desarrollado empíricamente por científicos del siglo XIX, bastante antes de que comprendiera adecuadamente la naturaleza atómica de la materia. Así fue como llegaron a obtener poco a poco dichas leyes, batallando con problemas tales como la relación entre el trabajo útil y el calor, con el concepto cuantitativo de la

temperatura, con la naturaleza de las transiciones de fase y la ineficacia intrínseca de cualquier proceso mecánico. Nuestra consideración de este asunto esperamos que sea menos doloroso, al comenzar elucidando la Primera Ley de la Termodinámica con la sencilla pregunta de por qué se produce una fuerza ascendente neta sobre Atom (figura 18) cuando cabalga sobre las corrientes de aire creadas por el cobertizo en llamas.

En el siglo XIX, los científicos creían que la materia contenía un fluido llamado *calórico* (con anterioridad llamado *flogisto*). Cuando los objetos se deformaban mecánicamente liberarían su fluido calórico, y así se mostrarían calientes al tacto o se expandirían al ser calentados, ya que el fluido calórico se suponía que era «autorrepelente». Hoy en día puede parecer tonto, pero antes de que se comprendiera que la materia está compuesta por átomos, el modelo del calórico parecía un modo razonable de explicar esas y otras observaciones. El misterio de la verdadera naturaleza del calor fue resuelto por Joule, Benjamin Thompson y otros, los cuales demostraron que el trabajo mecánico podía convertirse directamente en calor sin la liberación de ninguna sustancia especial. El término *calor* describe cualquier intercambio de energía sin que el sistema ejerza Trabajo (definido como el producto de fuerza por la distancia). La esencia de la Primera Ley de la Termodinámica consiste en que cualquier cambio en la energía de un objeto solamente puede tener lugar mediante un intercambio de calor o por la realización de un Trabajo.

Sabiendo que toda la materia está compuesta por átomos, ahora reconocemos que cuando un objeto está «caliente», la energía cinética de los átomos constituyentes es elevada, mientras que cuando está «frío» la energía cinética de los átomos es menor. En consecuencia, la «temperatura» de un objeto no es más que un útil registro contable que nos permite seguir la pista de la energía media de los átomos de un objeto. Decimos que algo tiene una temperatura elevada cuando sus átomos contienen una gran cantidad de energía cinética, en comparación con otro objeto con una energía cinética menor, del cual decimos que está «frío».

El frotamiento de dos objetos entre sí, que en una discusión anterior acerca del rozamiento observamos que se podía interpretar en el nivel atómico como el raspado de una cadena montañosa atómica a lo largo de otra, da como resultado la transferencia de energía cinética (el movimiento macroscópico del objeto arrastrado por la parte superior) al movimiento de agitación de los átomos que constituyen ambas superficies. Esta transferencia de energía cinética por átomo es lo que se llama «calor», y la temperatura de los respectivos objetos aumenta, sin que tenga que hallarse presente ningún fluido calórico.

Por el capítulo 11 sabemos que la energía se presenta sólo en dos categorías: potencial o cinética. Puesto que la masa de una molécula de aire es muy pequeña, la variación de la energía potencial gravitatoria (dada por el peso de la molécula multiplicada por su distancia sobre el suelo) a lo largo de la altura del aire de la habitación es tan pequeña que al ignorarla cometemos solamente un error muy pequeño. Así el componente principal de la energía media de las moléculas de aire de la habitación es energía cinética. Ya que la siguiente discusión no depende de la composición química exacta de la atmósfera, nos referiremos a moléculas de «aire» ordinarias. El aire caliente bajo Atom en la figura 18 tiene una energía cinética mayor que el aire más frío que se halla encima de él. Naturalmente, esta

última afirmación no es científica, puesto que no existen cosas como «aire caliente» o «aire frío», sino aire que es caliente comparado con algún otro objeto o frío comparado con otra referencia, que a favor del argumento supondremos que se trata de la temperatura del cuerpo de Atom.

Además de impulsarlo por encima del cobertizo en llamas, el aire caliente debajo de Atom en la figura 18 lo calienta a su vez. Generalmente, cuando un automóvil a toda velocidad choca con un vehículo estacionario o que se mueve lentamente, el coche más rápido frena y el más lento aumenta su velocidad. De modo parecido las moléculas de aire que tienen una energía media mayor que las del cuerpo de Atom transferirán en promedio, después de tropezar con él, parte de su energía cinética a los átomos de su traje, haciendo que se agiten más violentamente que antes. Dado que la energía se conserva siempre en cualquier proceso, la energía media (es decir, la temperatura) del aire disminuirá después de las colisiones, mientras que la temperatura del Mighty Mite (Diminuto Poderoso) aumentará debido a esta transferencia de energía. La naturaleza atómica de la materia deja claro por qué, cuando dos objetos están en contacto térmico, el flujo neto de calor se produce siempre desde el objeto a temperatura más alta al de menor temperatura, y nunca en el sentido contrario. De modo semejante, cuando se expone al aire frío, los átomos del traje del Tiny Titan (Titán Diminuto) se moverán adelante y atrás mucho más deprisa que las moléculas de aire con las que tropieza, de modo que después de los choques el aire se estará moviendo más deprisa a expensas de los átomos de su vestimenta, enfriando a Atom.

Cuando Atom es lo bastante ligero como para flotar en las corrientes de aire (ver figura 18), y si todo el aire que lo rodea está a la misma temperatura, está siendo bombardeado en todas direcciones con aproximadamente la misma fuerza. En este caso, sin que importe su masa, la gravedad lo impulsará eventualmente hacia el suelo. El arrastre térmico que mantiene elevado a Atom proviene de las moléculas de aire más calientes debajo de él, que se mueven más deprisa que las moléculas frías de la parte superior. Hay por lo tanto más colisiones por segundo debajo que Atom que lo impulsan hacia arriba que colisiones por encima que lo empujan hacia el suelo. Es más, la fuerza necesaria para invertir la dirección de una molécula que se mueve más deprisa es mayor que si se mueve lentamente. Las fuerzas van por pares, así que la fuerza que Atom ejerce sobre las moléculas de aire, cambiando su dirección, también empuja a Atom hacia atrás. Habrá por lo tanto una fuerza neta, no compensada, sobre Atom debido a que hay más choques debajo de él que lo empujan hacia arriba que por encima empujando hacia abajo. Esta fuerza no será suave y uniforme, sino que es discontinua y alborotada, y las fluctuaciones estadísticas ocasionales lo empujarán a veces hacia abajo en lugar de hacia arriba, pero la fuerza promedio del gradiente térmico lo desplazará alejándolo de la zona caliente a la región más fría.

Por tanto, en la figura 18 Atom gana tanta energía cinética como potencial. Se calienta ligeramente (es decir, la energía cinética de los átomos de su cuerpo aumenta) por el flujo de calor de la corriente de aire caliente. También se elevará a una altura mayor, aumentando su energía potencial, gracias al Trabajo efectuado sobre él por la fuerza neta ejercida por las moléculas de aire más caliente. La Primera Ley de la Termodinámica establece que el cambio neto de la energía total de Atom es la suma del flujo de calor y del trabajo ejercido sobre él.



Otro ejemplo: cuando el aire caliente empuja contra un pistón en el cilindro de un automóvil, elevando el pistón y haciendo en consecuencia que, a través de una serie de levas y ejes, giren las ruedas, la energía del gas caliente que se aplica al movimiento del pistón se llama *Trabajo*. La revolución industrial surgió cuando los científicos y los ingenieros se dieron cuenta de que durante el intercambio de energía a través del flujo de calor de lo caliente a lo frío, era posible extraer trabajo productivo, en el sentido de una fuerza aplicada sobre una distancia dada. Antes que eso, el desarrollo de máquinas simples tales como palancas y poleas para amplificar las fuerzas necesitaba de la energía almacenada en las personas, animales de tiro, viento o cascadas de agua. El Trabajo suministrado por las personas o los animales se convierte a partir de la energía química almacenada en los productos alimenticios ingeridos. La energía potencial de la comida tiene que cumplir otras muchas tareas, desde el mantenimiento de la temperatura corporal hasta la continuación de las funciones metabólicas y demás. Por consiguiente, la cantidad de energía disponible para empujar hacia abajo una palanca es solamente una pequeña fracción de la almacenada en la comida. En contraste, al liberar la energía potencial quemando carbón o petróleo se permite la conversión más directa de la energía cinética resultante en trabajo. Aunque no resulta eficaz al cien por cien, es mucho más ventajoso que emplear seres vivos.

La Primera Ley de la Termodinámica nos dice que en el mejor de los casos posibles, con todas las pérdidas y perturbaciones externas suprimidas, la cantidad total de trabajo que podemos obtener de cualquier dispositivo es exactamente igual a la del flujo de calor (el cambio de la energía cinética) que mueve la máquina. Por el principio de conservación de la energía, es imposible extraer más trabajo del que está disponible a partir del flujo de calor de una fuente que opera de lo caliente a lo frío. El título de esta sección implica que el universo garantiza que usted no puede ganar nunca (es decir, obtener más de lo que se ha entregado).

Ahora bien, si ganar está descartado, ¿por qué es tan difícil terminar sin pérdidas? ¿No podríamos construir una máquina perfecta tal que, una vez arrancada, continuaría indefinidamente sin necesidad de más combustible? Veremos enseguida que el movimiento al azar de los átomos del gas durante el intercambio de calor establece un límite estricto para la cantidad de trabajo útil que podemos obtener de cualquier máquina, con independencia de lo ingeniosamente que esté diseñada.

### **La segunda ley: nunca se puede terminar sin pérdidas**

No hay nada en el principio de la conservación de la energía, que es la base de la Primera Ley de la Termodinámica, que impida o prohíba la construcción de una máquina con un rendimiento del cien por cien, en la que el trabajo creado por el dispositivo iguale exactamente a la energía calorífica empleada en ello. De hecho, si todo lo que tuviéramos para continuar fuera la Primera Ley de la Termodinámica, esperaríamos razonablemente que las máquinas fueran de una eficacia del cien por cien, puesto que sabemos que la energía no se puede ganar ni perder, sino solamente transformarse de una forma en otra. Con el fin de comprender lo que limita la conversión de calor en trabajo, debemos introducir un nuevo concepto, complementario al de la energía pero tan importante como el de ella. Este concepto, llamado *entropía*, está relacionado íntimamente con el flujo de calor, y hará que Atom viaje con baches, incluso cuando no está flotando sobre corrientes térmicas.

Siempre que se produce una explosión en los cuarteles de la Liga de la Justicia en los satélites que orbitan en el espacio exterior, o en el navío espacial de cinco reactores utilizado por los Vengadores, tiene lugar una violenta y tempestuosa salida de aire hacia los alrededores a baja presión. ¿Por qué? ¿Qué es lo que obliga al aire a salir precipitadamente por las aberturas del satélite de la *JLA*? Una metáfora corriente que se invoca para explicar por qué el aire se precipita hacia una región de menor presión es la de que «la naturaleza aborrece el vacío». Y sin embargo no habría violación de las leyes de Newton si todo el aire permaneciera dentro del satélite de *JLA*, incluso si se deja la puerta abierta, aunque se reconoce que esa situación es extremadamente poco probable. Es el movimiento al azar del aire asociado con la energía cinética de las moléculas de aire lo que está tras la descompresión explosiva que tiene lugar en el satélite.

Imagine que se ha retirado todo el aire de la habitación contigua a la que usted ocupa sentado. En tanto la puerta que conecta ambas habitaciones se mantenga herméticamente cerrada, usted no debería enterarse nunca de que un vacío perfecto está esperando en la habitación de al lado. Las moléculas de aire de su habitación están a cierta temperatura y presión, y andan zumbando alegremente por ella. Este escenario apacible y estable cambia cuando la puerta que separa su habitación de la vacía se abre (con la puerta girando hacia la habitación vacía).

En lugar de preguntar por qué el aire se precipita desde su habitación a la que está vacía una vez que se abrió la puerta, la mejor pregunta es ¿y por qué no ha de hacerlo? Aquellas moléculas de aire que se estaban moviendo hacia la puerta, y que hubieran rebotado en ella si hubiera seguido cerrada, continuarán moviéndose ahora en línea recta al interior de la habitación en la que se hizo el vacío (por la primera ley de Newton). No obstante, sólo una pequeña fracción de las moléculas de aire de su habitación se habría dirigido hacia la puerta justo antes de que se abriera. Algunas moléculas estarían separándose de ella, y chocarían con otras moléculas de aire que se mueven en diferentes direcciones. Es concebible, aunque improbable, que aparte de esas moléculas de aire que se dirigían inicialmente hacia la puerta ahora abierta, todo el resto de las moléculas de aire continuara chocando entre sí, y que ninguna más pasara a la segunda habitación. Esto es tan probable como que, de seguir cerrada la puerta, todas las moléculas de aire, a través de choques al azar, se las arreglaran para evitar siempre la región cercana a la puerta. No tiene que preocuparse si se sentó junto a la puerta, porque una fracción bastante constante del aire está dirigiéndose siempre hacia usted en cualquier momento. Las moléculas de aire ocupan todas las regiones de que disponen, y no hay razón para que no lo hagan. Una molécula específica de aire puede pasar la mayor parte de su tiempo en un rincón determinado de la habitación, pero en promedio cada volumen tiene la misma probabilidad de tener aire como cualquier otro, del mismo modo que en un mazo de cartas bien barajado, cualquiera de las cincuenta y dos cartas tiene la misma probabilidad que cualquier otra de aparecer al levantar la de encima del mazo.

Las moléculas de aire no tienen libre albedrío, y si van a chocar y dirigirse hacia la puerta cuando ésta está cerrada, lo harán igualmente cuando la puerta está abierta. La única diferencia, y es una gran diferencia, es que una vez que las moléculas de aire pasan al interior de la habitación vacía, no existen inicialmente otras moléculas de aire con las cuales chocar. Existen muchas, muchísimas más ocasiones para que los átomos de la primera habitación se desplacen a la habitación vacía que las que tienen para chocar entre sí sin pasar nunca a la segunda habitación. *Entropía* es el término utilizado para describir

el número de formas distintas de que dispone un sistema para organizarse a sí mismo. Un mazo nuevo de cartas con todas las cartas clasificadas en orden numérico y por palos tiene una entropía baja, mientras que la entropía está en su valor máximo una vez que el mazo ha sido mezclado exhaustivamente. Es difícil repartir cuatro ases seguidos a partir de un mazo bien barajado, al igual que es más difícil saber dónde está una determinada molécula de aire si puede estar en dos habitaciones en lugar de sólo en una.

No es imposible —no violaría ninguna ley de la física— que todas las moléculas de la habitación en la que usted se halla ahora sentado, como resultado de las colisiones al azar, se desplacen a la habitación contigua. Pero no se preocupe, es más probable que al barajar con honradez un mazo de cartas resulte un mazo ordenado numéricamente por palos como lo estaba recién comprado. Las probabilidades de que las moléculas de aire se muevan a un lado de la habitación son tan bajas que tendría que esperar más tiempo que la edad del universo antes de que tenga la posibilidad de contemplar cómo ocurre eso. Cuando los físicos dicen que los sistemas tienden hacia una entropía máxima, todo lo que están diciendo es que las situaciones observadas serán las más probables. Cuando usted retira sus calcetines de la secadora después de que hayan estado en ella durante cierto tiempo, es posible que saque al mismo tiempo dos emparejados, pero no cuente con ello. Hay solamente una manera de que eso ocurra, pero muchas más en las cuales los calcetines estarán desemparejados, de modo que el resultado más probable será que usted tendrá que clasificarlos después. La secadora desordena los calcetines, de forma que cada uno tiene una oportunidad de emparejarse con cualquier otro. Las cuestiones que conciernen a la entropía se aplican solamente a tales situaciones dominadas por completo por el azar, y existen obviamente muchos ejemplos en que el orden se impone externamente en un sistema, como en el caso de ordenar manualmente los calcetines.

Cuando se abre la puerta que separa las dos habitaciones y los átomos se desplazan a la segunda, inicialmente vacante, decimos que aumenta la entropía de las moléculas de aire, pero lo que básicamente significa esto es que si algo puede ocurrir, ocurrirá. Existen muchas más maneras por las que las moléculas de aire de la habitación se pueden repartir uniformemente, participando cada una de una porción igual de la energía cinética total de la habitación, que las posibles para que todo el aire se recoja en uno de los rincones, o para que una molécula tenga toda la energía cinética de la atmósfera y el resto se quede sin ninguna. Aquellas cosas que se observan con más frecuencia son las que tienen mayor probabilidad de suceder. La mutante Scarlet Witch (Hechicera Escarlata), originalmente una malvada de la Magneto's Brotherhood of Evil Mutants (Hermandad de Mutantes Diabólicos de Magneto) de la Patrulla X de Marvel Comics, más tarde rehabilitado como un héroe en los Vengadores, tenía un «poder de hechizo», por el cual podía hacer un ademán ante un objeto y sucedía algo funesto. En el número 42 de *West Coast Avengers* (serie publicada en España como *Los Nuevos Vengadores*) se sugirió que su poder consistía en la capacidad de alterar las probabilidades, de tal modo que un suceso altamente improbable adquiriría realmente una cierta probabilidad de ocurrir. De acuerdo con la discusión anterior, caracterizaremos en adelante su talento mutante como el poder para alterar la entropía de un sistema, dando lugar a raras configuraciones (tales como el aire desplazado a uno de los lados de una habitación) más pronto de lo que cabría esperar razonablemente<sup>[45]</sup>.

Con el fin de obtener trabajo útil del aire comprimido en un cilindro de automóvil o del vapor

de una caldera, se tiene en general que expandirlo a partir de una región confinada a una configuración más espaciosa. Piense en las moléculas del aire de la habitación, separadas de la que está vacía. Convendría que pudieran ordenarse para empujar la puerta por sí mismas, sin que usted tenga que hacerlo manualmente. Si retiramos el cierre de la puerta, entonces hay tantas moléculas de aire que golpean la puerta por un lado, sin que ninguna contrarreste por el otro, que se producirá efectivamente una fuerza neta sobre la puerta que la podría abrir por empuje. Ésta es la misma fuerza no compensada que expulsa a los miembros de la Liga de la Justicia al exterior de su satélite cuartel cuando se produce una brecha en el casco. Esta fuerza no compensada se origina rápidamente —el tiempo entre colisiones de las moléculas del aire a temperatura ambiente es menor que un nanosegundo, la milmillonésima parte de un segundo.

Una vez que el aire se ha desplazado al interior de la habitación vacía, tiene un grado mayor de desorden, esto es, su entropía ha aumentado. Al cerrar la puerta, el aire no podrá empujar la puerta para abrirla, a menos que yo extraiga todo el aire de la segunda habitación, repitiendo la situación original (una habitación a presión atmosférica y la otra al vacío). Esto supone esfuerzo, y cuando cuente toda la energía gastada en devolver el sistema a su estado original, termino utilizando más energía que la que obtuve cuando la puerta se abrió al empujarla. No importa lo hábilmente que ordene las cosas, nunca puedo convertir toda la energía de un sistema en trabajo útil —siempre habrá alguna parte que irá al aumento de entropía, la cual no es aprovechable.

Cuando en el motor de su automóvil se enciende la mezcla de gasolina y oxígeno, experimenta una reacción química, liberando calor (lo que quiere decir que los productos de la reacción se mueven con mayor rapidez que antes de la reacción explosiva). Solamente esas moléculas que se mueven más deprisa y que se dirigen en la dirección correcta desplazarán al pistón del motor, llevando la rotación a las ruedas. Las moléculas que se alejan del pistón se desaprovechan desde el punto de vista de obtener algo útil de la reacción química. No solamente no es posible obtener más energía a partir de un proceso de la que se puso en él, sino que la limitación de la entropía implica que siempre obtenemos menos trabajo útil que el que se empleó para establecer el sistema. Éste es el meollo de la Segunda Ley de la Termodinámica. Ningún proceso puede resultar eficaz al cien por cien, y en la realidad la mayor parte de los motores y de las máquinas raramente convierten en trabajo útil más de un tercio de su energía. La Segunda ley de la termodinámica es un ama brutal, pero no parece que haya otra salida. ¿O la hay?

¿Podría yo usar las aptitudes de Atom para tratar de vencer a la segunda ley de la termodinámica? Las moléculas de aire de su habitación se caracterizan por una cierta temperatura, que mide la energía media del aire. La palabra clave es *promedio* —no cada molécula específica del aire de la habitación tiene exactamente la misma energía cinética—. Algunas se mueven un poco más deprisa que el promedio, mientras que otras lo hacen algo más lentamente. El vapor que se escapa de una taza de café recién preparado es un reflejo del hecho de que no cada molécula del conjunto tiene exactamente la misma energía. Las moléculas de agua del café que tienen la suficiente energía como para escapar del estado líquido (más acerca de estas transiciones de fase en el capítulo 14) forman las nubes que rondan sobre el café. Cuanto más caliente está el café, más vapor se forma sobre la superficie del líquido, al haber más moléculas de agua, en la parte superior de la distribución de la energía cinética, que pueden escapar del estado líquido. Cuando usted sopla sobre su café para enfriarlo, no reduce la

temperatura del café, ya que su aliento está a unos 37 °C. En lugar de ello, lo que hace es separar el vapor, retirando las moléculas de agua más energéticas, de modo que ya no puedan volver de nuevo al café. Una vez que se han retirado permanentemente del sistema café/vapor, decrece la energía media (es decir, la temperatura) del café remanente. Este proceso físico se denomina *enfriamiento por evaporación* y es el proceso fundamental de la operación de los refrigeradores y también la razón por la que sudar es más efectivo para refrescarse si hay una fuerte brisa que aleje la transpiración.

La idea de utilizar a Atom para tratar con la Segunda Ley de la Termodinámica es una variación del concepto del enfriamiento por evaporación. Comenzaremos con Atom reducido de forma que sea solamente algo mayor que una molécula de aire. Tendrá una caja junto a él, con una pequeña puerta con bisagras. En este ejemplo Atom asume la identidad del «Demonio de Maxwell», propuesto por James Clerk Maxwell para examinar la segunda ley de la termodinámica. Todas las moléculas de aire de la habitación están a la misma temperatura, lo que significa que no pueden utilizarse para generar un flujo de calor que suministre potencia a una máquina. Pero ahora Atom hace uso del hecho de que la temperatura es una medida promedio, y comienza a clasificar las moléculas de aire de acuerdo con su energía cinética. Recoge las moléculas de aire que se dirigen hacia él moviéndose con más rapidez que el valor promedio, abriendo la puerta de su caja y atrapándolas en su interior (es una caja aislada térmicamente, de modo que dichas moléculas retendrán su energía cinética una vez se hallen guardadas en la caja). Ignora las que se mueven más despacio que el promedio. Al cabo de cierto tiempo habrá captado un gran número de moléculas de aire con una energía cinética mayor que el valor medio inicial. Es más, retirando esas moléculas de movimiento rápido, la energía media de las restantes moléculas de aire disminuye, del mismo modo como cuando usted sopla el vapor del café. Atom puede ahora tomar esas moléculas más calientes que el promedio y, poniéndolas en contacto con moléculas más frías, permitir un flujo neto de calor entre ellas para suministrar potencia a una máquina, obteniendo, por consiguiente, trabajo útil a partir de aire que estaba inicialmente a temperatura media.

O debería ocurrir así, si no tuviéramos que preocuparnos por el propio Atom. Éste gasta energía al abrir y cerrar su caja para clasificar y atrapar a las moléculas energéticas. Esta energía debe incluirse en cualquier balance de la energía total entregada y sustraída del proceso. Ignorar esta contribución equivaldría a decir que usted es capaz de conducir su automóvil por unos pocos céntimos al día, si ignora el coste de la gasolina. Cuando se tienen en cuenta las contribuciones de calor y trabajo de la clasificación de las moléculas de aire por parte de Atom, hallamos que al reunir las moléculas más rápidas el propio Atom proporciona energía a la atmósfera remanente, aumentando su energía cinética promedio, de modo que al final no hay diferencia neta de temperatura. Si usted sopla sobre su café y retira el vapor pero lo reemplaza con otras moléculas que están igualmente calientes, no habrá enfriado su bebida.

No importa el empeño que ponga en probarlo (y, créame, son muchos los que lo han intentado), solamente existe un modo, tratado más abajo, con respecto al escenario de no-ganancia presentado por la segunda ley de la termodinámica. Desgraciadamente, incluso esa opción tampoco está disponible para nosotros.

### **La tercera ley: nunca se puede dejar el juego**

Si las consideraciones de la entropía limitan la cantidad de trabajo útil que podemos extraer de cualquier proceso, tanto si se trata de un motor V-8, de una turbina de gas o de las reacciones químicas en las mitocondrias de sus células, ¿no podríamos soslayar este problema tratando con sistemas sin entropía? Después de todo, es concebible, aunque en la práctica resulte difícil, tener un sistema en el que todos los átomos se hallen en una configuración precisa y uniforme, de forma que no haya incertidumbre con respecto a la localización de cualquier elemento específico del mismo. ¿Por qué no puedo disponer mis dos sistemas que generan el flujo de calor que suministra energía a mi máquina de tal modo que no posean entropía, de forma que no tenga que preocuparme de la segunda ley? La razón por la que esto no funcionaría es que la entropía de una sustancia y su energía interna (que podría estar disponible para la transferencia de calor) están relacionadas, de tal forma que no podemos cambiar una sin afectar a la otra. La entropía de las moléculas del aire de la habitación es una medida de su movimiento al azar. Si disminuyo la energía cinética del aire, el gas se condensará eventualmente en forma de líquido. La entropía del líquido es menor que la de las mismas moléculas en su estado de vapor, porque hay menos incertidumbre en cuanto al lugar en el que puede hallarse una molécula (están en el charco formado en el suelo, en lugar de repartidas por toda la habitación). Pero todavía quedan fluctuaciones caóticas en cuanto a la posición y a la velocidad de las moléculas en el estado líquido. Si se baja más la temperatura del líquido llegará un momento en que la energía cinética media de las moléculas resulta insuficiente para superar los enlaces atractivos entre moléculas, y el material se congela en forma sólida. Los enlaces químicos entre moléculas tienen orientaciones preferentes, de modo que la configuración natural del sólido será una disposición cristalina particular, con todos los átomos o moléculas alineados de una cierta manera. A temperaturas muy bajas, todos los átomos estarán en sus localizaciones cristalinas ideales, y conoceremos la posición de cada átomo determinado.

La entropía de cualquier sólido cristalino será por lo tanto cero, excepto en lo que respecta a las vibraciones atómicas en torno a sus posiciones cristalinas. El sólido tendrá todavía cierta temperatura, por baja que sea, así que los átomos del cristal seguirán agitando de acá para allá. No tendremos realmente incertidumbre, y la entropía será exactamente cero únicamente cuando cesen todas las vibraciones de cada átomo del sólido. El hecho de que la entropía sea cero solamente cuando la temperatura es también cero se denomina la Tercera Ley de la Termodinámica. En el estado de temperatura-cero, ninguno de los átomos tiene energía cinética en absoluto. En este punto decimos que el sólido tiene una temperatura absoluta de cero grados. Utilizamos el adjetivo absoluta porque, no importa el termómetro que se utilice, en este punto medirá energía cinética promedio cero. Observe que ni siquiera el espacio exterior está tan frío. Incluso en el vacío del espacio hay un fondo luminoso y un remanente de rayos cósmicos que transportan energía. De hecho, la radiación de fondo de ondas de radio, que es un vestigio del origen del Big Bang del universo, tiene una energía caracterizada por una temperatura promedio de tres grados por encima del cero absoluto. Así pues, incluso el espacio exterior tiene una temperatura, y por lo tanto una entropía. La única forma de vencer a la segunda ley de la termodinámica es utilizar sistemas con entropía cero, pero esto solamente se puede llevar a cabo en el cero absoluto. Pero si todo está a cero grados, ¿cómo podría obtenerse un flujo de calor para suministrar energía a nuestra máquina? Las tres leyes de la termodinámica casi se diría que conspiran

para impedir que construyamos máquinas perfectamente eficaces, y al igual que los supervillanos de un cómic, debemos resignarnos a una pérdida inevitable. Nuestra discusión sobre la entropía ha descansado tan arraigadamente en las fluctuaciones de los átomos constituyentes que es algo impresionante el que la segunda ley fuera formulada mucho antes de que la mayoría de los científicos se convenciera de que la materia estaba realmente formada por átomos. Desde mediados del siglo XIX en adelante, algunos científicos habían tomado cada vez más en serio la teoría atómica de la materia, mientras otros seguían sin convencerse de la realidad de los átomos. Estos críticos pensaban que aunque la sugerencia de que la materia estaba compuesta de átomos era una idea útil que simplificaba muchos de los cálculos relativos a las propiedades de los fluidos y de los gases, carecía no obstante de sentido adscribir una realidad física a entidades demasiado pequeñas para ser vistas<sup>[46]</sup>. Muchos de las grandes y veneradas autoridades de la física de la época, en particular Ernst Mach (en honor al cual recibe su nombre la velocidad del sonido en el aire, el número de Mach), sostuvieron este punto de vista.

Sin embargo, la hipótesis atómica resultó victoriosa gracias a la misma estrategia por la cual tienen éxito todas las ideas revolucionarias. Cuando Max Planck, uno de los jóvenes turcos de la revolución cuántica (acerca del cual tendremos mucho más que decir en la sección tres), hizo notar en una ocasión: «una verdad científica nueva no triunfa convenciendo a sus oponentes y haciéndoles ver la luz, sino más bien porque sus oponentes mueren con el tiempo y dan paso a una nueva generación que está familiarizada con ella». Un desarrollo clave que convenció a los científicos jóvenes de que los átomos eran reales, a pesar de lo que alegara la vieja institución, fue la explicación de la agitación que presentan los objetos pequeños debido al bombardeo al azar causado por átomos y moléculas, mucho más pequeños aún, al golpearlos desde todas las direcciones. Este fenómeno se denomina *efecto browniano* en honor a Robert Brown, el botánico que observó los movimientos erráticos de un grano de polen en una gota de agua mediante el microscopio.

Aunque el movimiento browniano era conocido desde 1828, hasta 1905 no recibió una descripción teórica satisfactoria, proporcionada en la disertación de la tesis de doctorado en físicas de otra joven estrella naciente, Albert Einstein. Einstein fue capaz de calcular cuantitativamente las trayectorias de una partícula de polen debidas a las colisiones con el fluido acuoso en el cual se hallaba suspendida, y relacionar también la magnitud de las fluctuaciones con la temperatura del medio circundante. El perfecto acuerdo entre los cálculos de Einstein y las observaciones experimentales convencieron a muchos físicos de que la hipótesis atómica era ciertamente correcta. Aunque la investigación de su tesis no fue tan revolucionaria como la que llevó a cabo sobre la relatividad (publicada en el mismo año), Einstein hubiera obtenido el reconocimiento de los físicos, aunque su única contribución a la ciencia hubiera sido su elucidación de la naturaleza estadística que es el fundamento del movimiento browniano.

Cuando Atom se encoge hasta tener más o menos el tamaño de un grano de polen —es decir, hasta una centésima o una décima de milímetro, menor que el diámetro de un cabello humano— comenzará a experimentar el movimiento de un lado a otro que Brown observó por vez primera. Este tamaño es crítico: cuando es mayor, el bombardeo promedio es despreciable; cuando es mucho más pequeño, cabe entre los átomos de aire, de modo que mientras consigue evitar chocar con ellos está a

salvo. En cualquier instante dado pueden existir más moléculas golpeando a Atom desde debajo de forma que será impulsado repentinamente hacia arriba, mientras que en el momento siguiente podrá experimentar un empujón hacia abajo, quizá no tan fuerte como el último empujón hacia arriba, o posiblemente más intenso incluso. Éste es un modo muy lento de llegar a alguna parte, y Atom no tardará en necesitar alguna Biodramina.

No hace falta ser tan pequeño como Atom para experimentar directamente el movimiento browniano. Las colisiones al azar del aire en nuestros tímpanos producen desviaciones que están justo en el límite de nuestra capacidad auditiva. Siéntese en una habitación insonorizada durante treinta minutos y su audición mejorará (al igual que la sensibilidad de sus ojos a la luz difusa aumenta cuando se aclimata a una habitación oscura) hasta ser capaz de detectar las desviaciones en sus tímpanos causadas por el movimiento de los átomos. En una habitación muy silenciosa es posible oír el ruido de fondo emanado de la entropía del aire, o sea escuchar en principio la temperatura de la habitación. El superoído no es una cualidad reservada a los habitantes de Krypton.



**CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN.** Stan Lee, principal redactor y editor de casi todos los cómics de Marvel de la Edad de Plata, era aficionado a la radiación como fuente de los superpoderes de sus héroes. La picadura de una araña radiactiva dio a Peter Parker la fuerza y las capacidades proporcionales de una araña, los Cuatro Fantásticos fueron bombardeados por los rayos cósmicos (protones de alta energía provenientes del Sol y hasta de las galaxias más distantes); Bruce Banner se convirtió en Hulk cuando fue sometido a rayos gamma (más radiación); y Matt Murdock recibió en sus ojos el impacto de un isótopo radiactivo que cayó literalmente de un camión, cegándolo pero dotándolo de un «sentido de radar» y amplificando sus otros sentidos de tal modo que pudo combatir el crimen bajo el nombre de Daredevil. Después de toda esta radiactividad, Lee se cansó de salir cada vez con ese origen de los extraños superpoderes. De ahí que en 1963, cuando creó junto con Jack Kirby un nuevo equipo de adolescentes con superpoderes, la Patrulla X, arrojó en principio la toalla, afirmando que eran mutantes, y de ello se derivaban simplemente sus extrañas capacidades y atributos.

Un miembro original de la Patrulla X, que apareció primero en el número 1 de *X-Men*<sup>[47]</sup>, fue Bobby Drake, de nombre secreto Hombre de Hielo (Iceman). El poder mutante de Drake era la capacidad para disminuir la temperatura de su cuerpo y de su entorno inmediato por debajo de cero grados.

Su cuerpo adquiriría de ese modo una cubierta protectora de agua helada. Como se explica en el número 47 de *X-Men*, Bobby no generaba el hielo que cubría su cuerpo ni el que se proyecta de sus manos cuando emplea su poder mutante. En lugar de ello, al disminuir la temperatura en su alrededor, condensa el vapor de agua que está siempre presente en el aire. Por el momento no necesito criticar el detalle de que cualquier calor —es decir, cualquier energía cinética— que Bobby es capaz de sustraer de su entorno debe ser compensada por una cantidad de calor añadida a alguna parte y, según la segunda ley de la termodinámica, el calor añadido es muy probablemente mayor que el que se sustrae. Los refrigeradores retiran calor de un espacio cerrado, pero este calor debe depositarse en alguna otra parte. Además, los motores de los compresores del refrigerador necesitan energía, y parte de esta energía eléctrica no se convierte en trabajo útil sino que toma la forma de «calor desaprovechado». El gasto de calor de un refrigerador se emite por su parte trasera, colocada usualmente contra una pared. Si alguna vez desea calentar su cocina, no tiene más que dejar la puerta del refrigerador abierta del todo. Mientras el electrodoméstico lucha por disminuir la temperatura de la habitación, depositará más calor en la cocina del que es capaz de retirar. Dónde deposita el Hombre de Hielo el exceso de calor generado cuando disminuye la temperatura de su entorno sigue siendo un misterio.

El recubrimiento del cuerpo del Hombre de Hielo tomó inicialmente la forma de nieve plumosa, y cuando había ganado más control sobre sus poderes en el número 8 de *X-Men*, adquirió una apariencia cristalina como la del hielo. La diferencia entre la nieve y el hielo radica en la disposición de las moléculas de agua que resultan cuando se solidifica al congelarse. Los copos de nieve están formados por agregación del agua contenida en las nubes. Cuando las moléculas de agua se condensan

a partir de la fase de vapor liberan energía, calentando el aire circundante. El aire caliente de menor densidad mantiene la nube en lo alto, como en el caso de un globo de aire caliente. Cuando se juntan demasiadas moléculas de agua, frecuentemente reunidas alrededor de una mota de polvo en la nube, forman una pequeña gota. Cuando la temperatura de la nube está por encima de cero grados, la gota puede caer de la nube en forma de lluvia, convirtiendo su energía potencial en energía cinética. Una gota de lluvia helada se llama aguanieve. La formación de un copo de nieve es un asunto más delicado. Un copo de nieve se crea cuando el vapor de agua se congela lentamente alrededor de una partícula de polvo. Las moléculas de agua se empaquetan en un entramado hexagonal, debido a su forma química. Los átomos metálicos se apilan en un sólido como las balas de cañón o las naranjas en una tienda de comestibles, donde esta estructura de íntimo empaquetamiento está determinada por la naturaleza de la fuerza química que mantiene unidos a los átomos entre sí. Las moléculas de agua tienen una geometría en forma de V, con un átomo de oxígeno en el vértice unido a dos átomos de hidrógeno, sobresaliendo como una antena del tipo de orejas de conejo. La forma de la molécula de agua determina la geometría de su empaquetamiento, que resulta ser un hexágono.

El apilamiento químico explica la simetría séxtuplo de los copos de nieve, pero ¿cómo forman su característica estructura de encaje? En las nubes generadoras de copos de nieve que tienen una humedad relativamente baja, las moléculas de asiento se deben difundir en el copo creciente antes de incorporarse a su estructura. Las moléculas de agua de la nube no están impulsadas en ninguna dirección determinada, pero experimentan un movimiento browniano a medida que fluctúan yendo en una y otra dirección. Este tipo de «paseo aleatorio» es un modo muy lento de desplazarse, puesto que es probable que se dé un paso alejándose del objetivo y otro en dirección a él. Cuando sostiene su mano sobre un objeto caliente, el calor que siente está transportado por las moléculas de aire que se difunden al azar desde la región a alta temperatura. Este método de transportar la energía desde un sitio a otro se llama «conducción», y es bastante ineficaz. En general, a menos que el objeto en cuestión esté tan caliente que tenga un resplandor blanco, usted normalmente ha de colocar su mano cerca antes de detectar un transporte de energía significativo.

La ecuación de Einstein que calcula la distancia a la que se desplaza un átomo fluctuante en función del tiempo, obtenida en su artículo de 1905 sobre el movimiento browniano, indica que se tarda cien veces más para que el agua de un copo de nieve que crece se difunda hasta una distancia de un centímetro de lo que tardaría para desplazarse un milímetro. Como consecuencia de ello, aquellas regiones del copo de nieve en formación que se extienden más allá del cuerpo del copo acumularán agua más rápidamente, porque acorta la distancia que las moléculas han de cruzar en su paseo aleatorio hasta alcanzar el copo. Las regiones de seis puntas en las esquinas del hexágono crecerán por lo tanto primero por la adición de moléculas de agua, y dado que se extienden más lejos, continuarán creciendo más deprisa que las regiones vecinas. Los detalles exactos de cómo se desarrolla un copo —cómo las ramas dendríticas dan lugar a brotes secundarios, el papel que representa la energía depositada por las moléculas de agua que se difunden en la mezcla local y el subsiguiente enfriamiento del copo en formación— dependerán sensiblemente de la humedad y de la temperatura del interior de la nube. La estructura final del copo dependerá también de los detalles exclusivos de cómo se forma el copo alrededor de una partícula de polvo, de forma que nunca dos copos serán exactamente iguales, aunque

es posible hallar copos sorprendentemente similares. Pero en lo esencial, la bella simetría y el orden de un copo de nieve surge de las fluctuaciones desordenadas que están tras el movimiento browniano.

A medida que progresaba su dominio sobre su capacidad mutante, el Hombre de Hielo fue capaz de proyectar «rayos de congelación» desde sus manos, congelando a otra persona u objeto, o creando incluso una gran montaña de hielo bajo sus pies. Para desplazarse mientras combatía a diabólicos mutantes como Magneto, Blob o el siniestro y robótico Sentinels, Bobby generaría con frecuencia una «capa de deslizamiento helada» bajo sus pies, sobre la cual patinaría, como ilustra la figura 19. Bobby crearía en principio una gran montaña de hielo bajo suyo y luego generaría una rampa sobre la cual deslizarse hasta el punto de destino deseado. Bien, en sí mismo esto no violaría ninguno de los principios físicos, suponiendo naturalmente que uno pudiera desde luego controlar las temperaturas locales de esta manera y que haya suficiente humedad en el aire para crear todo ese hielo. Lo que es preocupante sin embargo es la aparente estabilidad de los deslizadores de Bobby, sin que importe lo extensos que sean. En cierto modo, Bobby debería salir delante del centro de masa de este deslizador helado, en cuyo momento es de esperar que ocurran cosas malas.

El centro de masa, también conocido como *centro de gravedad*, es el punto en el cual un objeto se comporta como si toda su masa, con independencia del modo como esté distribuida, estuviera concentrada en este único lugar. Una vara de medir tendría su centro de masa localizado exactamente en su centro. Usted puede mantener en equilibrio la vara a través de su dedo índice, sostenida de forma que se mantenga paralela al suelo, pero sólo si su dedo está colocado bajo este punto medio. Colocar su dedo más cerca de alguno de los lados provocará que la vara gire y caiga. El centro de masa depende de la distribución de la materia en el objeto. Un bate de béisbol, más grueso y más pesado en uno de los extremos, tendrá su centro de masa más cerca del extremo más ancho que del más estrecho.



**Fig. 19.** Escena del n.º 92 de *Amazing Spider-Man*, donde el Hombre de Hielo, de la Patrulla X, se enfrenta a Spiderman debido a un malentendido (tal confusión, que lleva a dos héroes a luchar entre sí hasta darse cuenta de que están del mismo bando tenía lugar una o dos veces al mes en los cómics de Marvel). No ha de sorprender que Spiderman no haya visto nunca nada igual a las rampas deslizantes del Hombre de Hielo, puesto que exhibe una estabilidad cuestionable cuando el héroe mutante se aventura lejos del centro de gravedad de la rampa. © 1971 Marvel Comics

Para ver por qué los deslizadores de hielo de Bobby no se pueden extender demasiado lejos sin

desmoronarse, coloque un libro sobre una mesa. El peso del libro está dirigido hacia el suelo y está equilibrado por la fuerza ejercida por la mesa. El centro de masa está en la mitad de la cara del libro, y mientras éste permanezca encima de la mesa, el libro se mantendrá estable. Pero ahora desplace el libro cerca del borde de la mesa. Al principio una pequeña parte del libro puede colgar fuera del borde de la mesa sin problema. La parte del libro que está sobre el borde crea una fuerza de giro, un momento de torsión. Este peso no soportado del libro intenta hacerlo girar, pero hay más peso sobre la mesa que intenta hacer girar al libro en la otra dirección, de modo que permanece estacionario. Pero a medida que se desplaza más el libro, de forma que su centro de masa no esté ya encima de la mesa sino más allá del borde, el libro girará y caerá al suelo. Esto es debido a que el momento de torsión que trata de hacer girar al libro fuera de la mesa es ahora mayor que el momento contrario que trata de mantenerlo sobre la mesa.



**Fig. 20.** Una escena del n.º 47 de *X-Men*, en la que Bobby Drake (el Hombre de Hielo) habla directamente al lector acerca del mecanismo que subyace bajo sus poderes mutantes de congelación y hace un guiño reconociendo la falta de verosimilitud de algunos (de acuerdo, de todos) de sus extraños logros. © 1971 Marvel Comics

De modo semejante, cuando los deslizadores del Hombre de Hielo se hacen muy amplios, él se desplaza muy lejos del centro de masa de la montaña de hielo que generó originalmente. En lugar de que se deshaga su montaña y su rampa de hielo, es más probable que el momento de torsión que resulta de su deslizamiento a lo largo de su borde se vuelva más grande que la resistencia del deslizador de hielo, y éste debería romperse, del mismo modo que el libro caerá de la mesa cuando la mayor parte de su peso esté fuera del borde. Para satisfacer la mecánica básica, Bobby Drake debería reforzar continuamente la parte inferior de sus deslizadores con pilares de hielo, con el fin de evitar alejarse demasiado hacia el frente de su centro de masa. A veces se reconoce la inverosímil estabilidad mecánica de las construcciones del Hombre de Hielo, como se indica en la figura 20 de un dispositivo de soporte «I, the Iceman» («Yo, el Hombre de Hielo») del número 47 de *X-Men*. Si alguno de los sabios especialistas de física se pregunta lo que mantiene en lo alto las escaleras y las rampas del Hombre de Hielo, lo que nadie puede refutar es lo de «¡una gran ayuda de la imaginación!».

El cómic *La Patrulla X* no fue un gran éxito de ventas en su primera encarnación en la década de los sesenta, y en 1970 dejaron de publicarse historias originales. Cinco años más tarde una nueva dirección de Marvel Comics decidió intentar un resurgimiento de la Patrulla X, y el *All-New, All-Different X-Men* (escrito por Len Mein y dibujado por Dave Cockrum), como se tituló el ejemplar de presentación a gran tamaño, fue un éxito financiero desde el mismo comienzo. A despecho de la promesa implicada por el título, algunos de los personajes de la Patrulla X presentados en este ejemplar provenían del equipo original, pero muchos de los nuevos personajes debutantes, tales como Ororo Munroe (Tormenta), Logan (Lobezno), Peter Rasputin (Coloso) y Kurt Wagner (Rondador Nocturno) se convertirían en favoritos de los aficionados. Nadie se extrañó, sin embargo. Se dice que Stan Lee se quejó de la falta de veracidad de la capacidad mutante de Tormenta para controlar el tiempo climático. No parece que se preocupara por la capacidad de Coloso para transformar su piel en «acero orgánico». No tengo la menor idea de lo que significa esta frase, ni de cómo este poder podría funcionar en el mundo físico, ni tampoco del poder de teletransporte de Rondador Nocturno (bueno, si me conceden suficientes «excepciones milagrosas» supongo que podría tratar de hacer este trabajo), pero los «poderes del clima» parecían demasiado increíbles para el hombre que trajo al mundo al Increíble Hulk y a Silver Surfer (si viaja a través del espacio exterior, ¿sobre qué está haciendo surf?)<sup>[48]</sup>. Pero Stan no debería darse prisa en lanzar piedras sobre el tejado de las casas de los superhéroes. El mismo poder mutante manifestado por uno de las propias creaciones de Stan, el Hombre de Hielo de la Patrulla X original —la capacidad para generar y controlar los gradientes térmicos— también permite a Tormenta (Storm) influir sobre los fenómenos meteorológicos.

En esencia, el tiempo climático es simplemente cuestión de la absorción por parte de la atmósfera de energía en forma de luz solar, pero este hecho tan elemental es casi imposible de predecir de modo acertado. Cuando uno piensa en el tiempo atmosférico acuden a la mente términos tales como *viento*, *lluvia* y *nieve* (especialmente si usted vive en Minnesota, como yo). Todo está gobernado por diferencias espaciales en la temperatura, dirigidas por variaciones en la energía de la luz solar absorbida por la atmósfera.

Las variaciones espaciales de la temperatura atmosférica están asociadas con cambios en la densidad de la atmósfera (el número de moléculas de aire en un volumen determinado). Cuando un

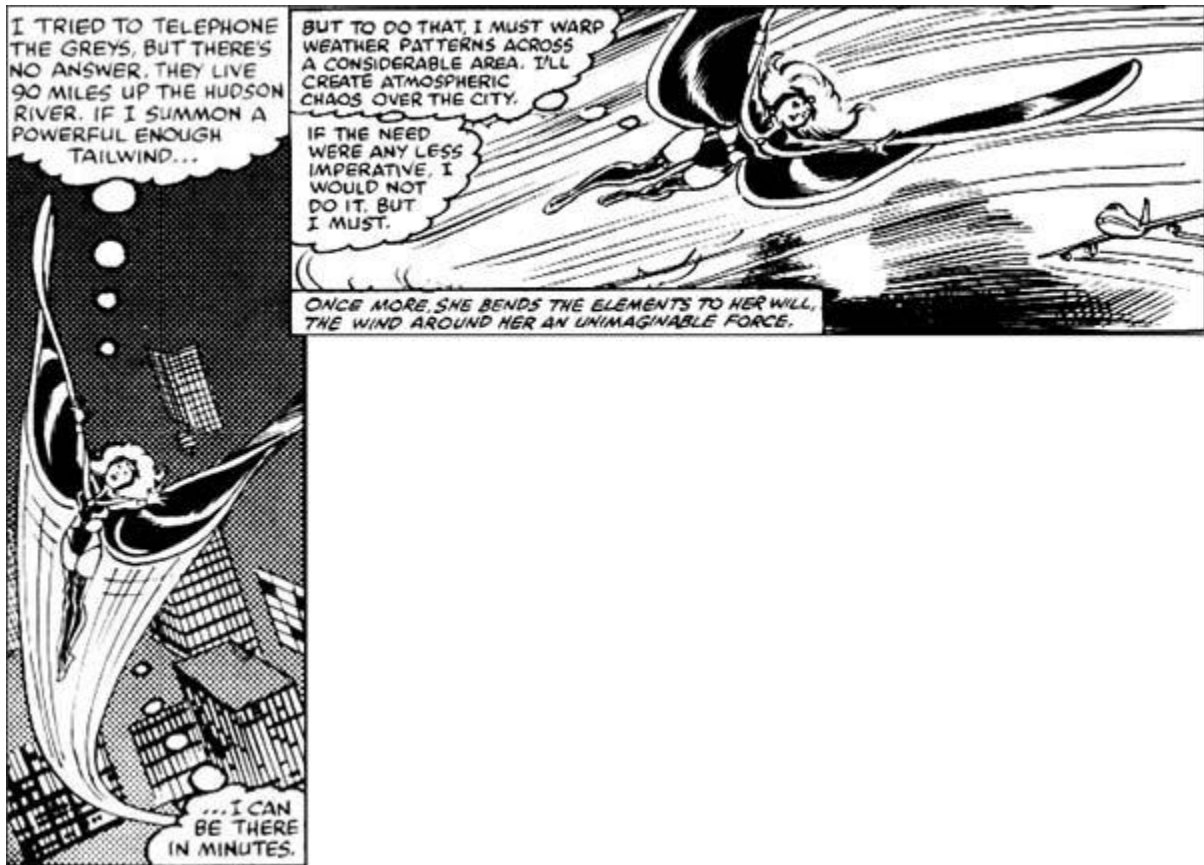
volumen de aire más denso se halla junto a una región más diluida, se producirá un flujo neto de aire desde los espacios de alta densidad a los de baja, hasta que se iguala la densidad de cada elemento de volumen. Este flujo de aire puede entenderse simplemente sobre la base del razonamiento de la entropía tratado en el capítulo previo. Si hay una aportación constante de energía, que mantiene una región a una densidad menor que otra, entonces este flujo de aire (viento) persistirá. El viento puede a su vez desplazar un techo de nubes, cambiando el patrón espacial de la absorción de la luz solar, lo cual cambia las trayectorias del flujo de aire que influye sobre el techo de nubes, y así sucesivamente. La rotación de la Tierra, naturalmente, determina la dirección global de la circulación del aire.

La capacidad para predecir con seguridad el tiempo está por lo tanto limitada por la precisión con la cual se conocen las velocidades y temperaturas iniciales del aire en cierto instante específico y en todos los lugares del espacio. Es más, los cambios de temperatura producen flujos de aire que a su vez cambian la luz solar absorbida, produciendo nuevos esquemas de flujos de aire. Se establece una realimentación no lineal, de modo que cualquier pequeña incertidumbre en nuestro conocimiento de las condiciones iniciales se amplifica rápidamente. En un sistema lineal un cambio pequeño en la entrada da lugar a las correspondientes pequeñas variaciones en la salida, mientras que en los sistemas no lineales, como es el caso del tiempo atmosférico, un cambio pequeño puede producir una gran variación en el resultado. Esto ha llegado a conocerse como el llamado «efecto mariposa», por el cual el batir de las alas de una mariposa en Cleveland puede, varias semanas más tarde, producir las condiciones de un tornado en Chile. Los meteorólogos pueden hacer un excelente trabajo prediciendo el tiempo a corto plazo, pero algo que vaya más allá de unas pocas semanas es intrínsecamente irrealizable, con independencia de la calidad de los sistemas de medida.

Una explicación físicamente plausible de la capacidad de Tormenta para controlar el tiempo es que puede alterar las variaciones de la temperatura atmosférica en cualquier lugar y momento a voluntad. El viento que permite volar a Tormenta, tal como ilustra la figura 21, está creado por un gradiente de temperatura bajo ella. Tormenta utiliza probablemente su poder mutante para hacer que la región de aire que está bajo ella se caliente más que la que está por encima. La temperatura del aire es una medida de su energía cinética promedio, de modo que el aire a muy baja temperatura se mueve mucho más despacio que el aire caliente. Este aire más frío es más denso y caerá hacia el suelo. Las moléculas de aire caliente menos denso que se mueven más deprisa ocuparán el espacio dejado vacante por las moléculas de aire frío, por la sencilla razón de que si se mueven a grandes velocidades, chocando entre sí, habrá muchas más formas de que se dispersen hasta regiones desocupadas que si chocaran y se las arreglaran para permanecer cerca del suelo. La energía cinética promedio de las moléculas de aire caliente es elevada; por consiguiente, la energía potencial gravitatoria es sólo un pequeño sumando en cuanto a su energía total. Una vez que las moléculas de aire caliente están cerca de la región superior fría y las de aire frío cerca del suelo, las moléculas de la parte inferior ganarán energía en sus choques con el suelo caliente, y el aire caliente perderá energía por los choques con el aire frío de la parte superior. Se producirá de nuevo una situación en la cual el aire más caliente está en el suelo y el aire frío por encima de él, y el ciclo continuará.

Este proceso se denomina «convección» y tales bucles de convección térmica son un modo extremadamente eficaz de transferir energía de una fuente caliente a otra fría a través del enlace térmico

del aire de una habitación. De hecho, ésta es la razón por la cual las ventanas de doble vidrio proporcionan un buen aislamiento térmico. Al separar físicamente el vidrio del interior del frío que da hacia fuera, la ventana conserva una temperatura más cercana a la de la habitación. El vidrio exterior frío no puede establecer un bucle de convección fuerte en la habitación. Naturalmente, la energía se puede todavía transferir mediante las moléculas de aire que chocan con el cristal interior caliente y que pasarán esta energía al vidrio exterior más frío, pero esta conducción es mucho más lenta que la convección.



**Fig. 21.** Escena del n.º 145 de *X-Men*, en la que la mutante Tormenta emplea su poder para generar gradientes térmicos controlados con el fin de distorsionar las disposiciones del aire, que la arrastrará hacia arriba en celdas de convección. © 1971 Marvel Comics

La parte de aire que está compuesta de vapor de agua depende de la energía cinética promedio (la temperatura ambiente) y de la presión de las moléculas atmosféricas. El aire frío es más denso y tiene más espacio para acomodar a las moléculas de agua. Si Tormenta es realmente capaz de controlar la temperatura local, entonces puede variar también a voluntad la presión barométrica y la humedad. No es disparatado pensar que pueda provocar lluvia localizada, o tormentas de nieve, o incluso generar rayos, aunque su capacidad para controlar la posición exacta del rayo debería estar obstaculizada por factores (tales como las acumulaciones locales de la carga eléctrica del suelo) que están fuera de su control. Como se dijo, si Stan Lee no se hubiera aburrido por su creación del Hombre de Hielo —un

mutante que podía disminuir la temperatura de su propio cuerpo por debajo de cero grados y proyectar también regiones localizadas de baja temperatura a su alrededor—, una mutante como Tormenta, que podía controlar no su propia temperatura, sino la de la atmósfera circundante, no hubiera tenido una difusión tan grande.

Un pensamiento final acerca de una conexión entre una mutación genética y la termodinámica. Según Stan Lee, los mutantes, en particular los que tienen superpoderes asombrosos, pertenecen a una especie del todo nueva, el *Homo superior*, y son distintos de la mayoría de los lectores de cómics, el *Homo sapiens*. El proceso de especiación, que da lugar al desarrollo de especies nuevas, fue dado a conocer por Charles Darwin e independientemente por Alfred R. Wallace en la década de 1850. En la formulación original de Darwin de la teoría de la evolución, propuso que la especiación era un proceso lento y gradual que necesitaba de varios cientos de millones de años para dar cuenta de la diversidad biológica actual. El único problema era que la física de su época proporcionaba una estimación de la edad de la Tierra que era de unos veinte millones de años solamente.

Uno de los científicos más adelantados del siglo XIX, William Thomson (honrado con el título de Lord Kelvin por sus trabajos en el desarrollo de cables de telégrafo trasatlánticos) llevó a cabo un cálculo de conductividad térmica que desafiaba la hipótesis de Darwin. La conductividad térmica es una propiedad básica de toda la materia, y refleja la proporción de calor transferido como respuesta a una determinada diferencia de temperatura. Los metales tienen una conductividad térmica muy alta, de modo que son capaces de transportar el calor muy eficazmente cuando están a distinta temperatura que otros objetos (por ejemplo, una lengua húmeda a 37 °C y un poste de alumbrado por debajo de 0 °C en invierno), mientras que la madera es un conductor térmico bastante pobre. Haciendo el supuesto razonable de que la Tierra era una esfera de roca derretida a 3.900 °C cuando se formó originalmente, y conociendo la conductividad térmica de la roca, Lord Kelvin pudo determinar cuánto tiempo tardaría la Tierra en enfriarse hasta su temperatura presente. Su conclusión de que la Tierra era al menos diez veces más joven que la edad necesaria para proporcionar suficiente tiempo como para que se produjeran los efectos de la evolución fue considerada una sentencia casi fatal para los razonamientos de Darwin. La comprensión de la termodinámica por parte de Kelvin era tenida en tal consideración que la escala de temperatura absoluta mencionada en el capítulo anterior, en la cual el estado de energía cinética nula se registra como una temperatura absoluta de cero grados, se bautizó en su honor con el nombre de «grados Kelvin». No existía ningún error en sus cálculos.

Aunque Darwin no podía apoyarse en el resultado de Kelvin, siguió convencido de la validez de la teoría de la evolución, ya que explicaba muchísimos fenómenos biológicos como para estar equivocada, a pesar de la objeción de Kelvin. Darwin murió en 1882. Pocos años más tarde se descubrió la radiactividad y pronto se cayó en la cuenta de que en el interior de la Tierra había una fuente adicional de calor que Kelvin no había tenido en cuenta, puesto que tanto él como el resto del mundo ignoraba su existencia. Este calor extra del interior de la Tierra prolongaría el tiempo necesario para el enfriamiento del planeta hasta su temperatura actual. Cuando Kelvin rehízo sus cálculos en 1905, incorporando en esta ocasión la energía proporcionada por la desintegración radiactiva, llegó a una estimación mínima de la edad de la Tierra de varios cientos de millones de años. La determinación actual de la edad de la Tierra es de 4.500 millones de años, lo bastante vieja como para proporcionar



un escenario para que opere la evolución. Darwin se fue a la tumba sin saber que Kelvin estaba equivocado, aunque a pesar de ello mantuvo su creencia en la corrección de su teoría de la evolución.

Hay críticos de la teoría evolucionista hoy en día que señalan fenómenos biológicos particulares que la teoría no puede actualmente explicar, pero esto no invalida necesariamente una teoría científica. El movimiento de tres masas que interactúan merced a su atracción gravitatoria normal, por ejemplo, resulta ser tan complicado como para desafiar el cálculo analítico, pero esto no indica que la teoría de la gravitación sea errónea. Siempre existen lagunas en nuestro conocimiento y muchas cosas que no podemos entender actualmente, pero el único modo de cambiar esta situación es mediante el pensamiento crítico y las pruebas de evidencia experimental. Si usted halla que el método científico falla en algunos aspectos de la ciencia, entonces debería honestamente abstenerse de utilizar sus resultados en otros aspectos de su vida. Lo cual le ahorrará dinero en doctores y facturas de consumo de electricidad.

#### 14. Cómo la monstruosa amenaza del misterioso Melter prepara una comida en un instante

**TRANSICIONES DE FASE.** No todo superhéroe posee poderes y capacidades que van mucho más allá que las de los mortales. Algunos, como Batman y Wildcat, se enfrentan con bravura a supervillanos armados con nada menos que un buen garfio y el valor de aparecer en público vistiendo su ropa interior en la parte exterior de su atuendo. Batman intentaría naturalmente equilibrar las posibilidades de algún modo utilizando su cerebro analítico, tan bien entrenado como su cuerpo, para producir una serie fabulosa de armas contra el crimen que guarda en el interior de su útil cinturón. De todos los Marvel Comics, el ingeniero superhéroe alcanzó su apogeo en el número 39 de *Tales of Suspense*, haciendo la presentación del invencible Iron Man (el Hombre de Hierro). Cuando el genial ingeniero eléctrico y constructor de armas Tony Stark hizo su flexible traje de armadura roja y dorada, tiene la fuerza de cien hombres, es capaz de volar utilizando cohetes construidos en las suelas de sus botas, y puede arrojar «rayos de repulsión» conmovientes desde las palmas de sus guantes.

Tendremos mucho más que decir de Tony y de su dorado alter ego vengador cuando lleguemos al capítulo 23, dedicado a tratar de la física del estado sólido. Ahora quiero considerar uno de los miembros contratados de la galería de villanos con superpoderes de los granujas de Iron Man, que lo acosarían una y otra vez. Este villano fue uno de los primeros en provocar realmente temor en el corazón herido por la metralla<sup>[49]</sup> de Tony. Si usted usa un traje de hierro, y su único superpoder proviene de su traje, una de sus peores pesadillas será un villano que posee un «rayo fundidor» capaz de disolver el hierro como mantequilla caliente encima de una estufa. Desgraciadamente para Iron Man, Bruno Horgan poseía tal pistola licuadora, y como el consumado delincuente Melter era muy feliz usándola. Cuando Melter hizo su primera aparición allá en 1963, la noción de un rayo fundidor parecía apropiada solamente para los cómics. Como ahora discutiremos, la ciencia y la ingeniería han avanzado hasta el punto de que dichos dispositivos son un lugar común. Usted tiene probablemente uno en su casa en este momento (sin duda se refiere a él con el nombre de «homo microondas»).

Antes de que podamos contestar a la pregunta de por qué se derriten los sólidos cuando se vuelven muy calientes, necesitamos ocuparnos de una cuestión más básica. ¿Por qué se combinan los átomos para formar sólidos? Ello proviene de la energía y la entropía. Bajo ciertas circunstancias dos átomos pueden tener una energía total menor cuando están lo bastante juntos como para que las «órbitas» de sus electrones se superpongan. Cuando esto sucede se forma un enlace químico entre los dos átomos. Este descenso de energía no siempre es muy significativo. Si los dos átomos se están moviendo muy rápidamente cuando se aproximan, entonces su energía cinética individual será mucho mayor que cualquier descenso de energía resultante de la formación de un enlace químico, y no se habrá formado ninguna unión química entre ellos. Es más fácil enganchar un remolque al anclaje trasero de un camión si nos acercamos lentamente al anclaje que si chocamos con él a 150 km/h. Cuanto más lentamente se mueven los átomos mayor es la posibilidad de que el descenso de energía resultante prevalezca cuando se aproximan, y así permanecerán unidos formando una molécula.

Lo que es cierto para dos átomos vale también para doscientos, o dos millones de trillones de

átomos. Cuando desciende la temperatura de un gas, la energía cinética promedio de cada átomo decrece y mayor es la probabilidad de que los átomos, al chocar, condensen en una nueva fase de la materia, un líquido. Añadiendo energía térmica (calor) al líquido se invierte el proceso, y el fluido hervirá y volverá a la fase vapor. De modo semejante, disminuyendo la temperatura de un líquido se alcanza un punto en el cual los átomos dejan de deslizarse unos junto a otros y quedan enlazados en una red sólida rígida. Si comprimo el conjunto de átomos, los fuerza a permanecer más cercanos entre sí de lo que estarían de ordinario, cambiando la temperatura a la que tiene lugar la transición de fase.

Lo que determina la temperatura y presión exacta bajo las cuales tiene lugar una transición de fase depende de los detalles de cómo se enlazan los átomos individuales cuando se superponen sus nubes electrónicas. Para determinar la temperatura a la que ocurre la transición de fase tal como el derretirse o el hervir, debemos hacer algo más que simplemente contar la energía necesaria para romper cada enlace químico que mantiene unido a un sólido o un líquido. Tenemos que tomar en cuenta también el gran cambio en el desorden de los átomos, es decir, su entropía. Para una energía interna determinada, los sistemas tienden a aumentar su entropía, porque mientras el resto de cosas sigue igual hay muchas más configuraciones desordenadas que las estructuras definidas y ordenadas. La competencia entre el descenso de energía y el aumento de entropía conduce a un fascinante fenómeno colectivo en el cual todos los átomos de un sólido deciden fundirse a la misma temperatura. Por cierto, las burbujas que asociamos con el agua hirviendo en una cazuela provienen de pequeñas irregularidades al calentar el fondo de un cazo. Los puntos individuales del fondo del cazo estarán más calientes que las regiones vecinas y la transición de líquido a vapor se produce en primer lugar en dichos puntos. El vapor bajo el agua forma una burbuja flotante que sube a la superficie. En un recipiente extremadamente uniforme y limpio encima de una fuente de calor homogénea, el nivel de agua en el recipiente descenderá suavemente por evaporación antes de que se produzca ningún burbujeo apreciable, al tener lugar la transición de fase de modo uniforme y silencioso.

Para iniciar el proceso de fusión, debemos añadir energía al sólido. Podemos hacerlo de forma lenta y convencional, colocando el sólido en un horno, o de forma rápida, como lo hace Bruno Horgan con su rayo fundidor. En un horno convencional, los elementos caloríficos (ya sean los chorros de la llama de gas o las bobinas eléctricas) hacen que aumente la temperatura del interior del horno. Un sólido colocado en el horno, tal como un buen asado, alcanzará la temperatura del horno a medida que las moléculas del aire choquen con las paredes del horno, adquieran cierta energía cinética extra y luego hagan su camino hasta el asado. Al golpear la superficie del asado dichas moléculas de aire que se mueven con rapidez transferirán su energía a la carne. Con un horno de conducción uno debe esperar a que las moléculas de aire caliente se desplacen moviéndose aleatoriamente desde las paredes calientes hasta el asado más frío, mientras que con un horno de convección un ventilador genera celdas de circulación desde la parte caliente a la fría y viceversa (como en nuestra discusión acerca de Tormenta, de la Patrulla X, del capítulo anterior). En cualquier caso la superficie del asado se calienta primero, y hay que esperar, a veces varias horas, para que el centro de la carne alcance una temperatura mayor. A medida que aumenta la temperatura interna de la carne, los átomos se agitan cada vez más violentamente alrededor de sus posiciones de equilibrio. A una determinada temperatura la agitación de las fibras contiguas y los depósitos de grasa del asado es lo bastante pronunciada como para que

dichas fibras sufran una transición de fase y se fundan<sup>[50]</sup>. Puesto que esos son los tejidos más duros y fibrosos que sujetan a las células del músculo del asado, al derretirse la carne se vuelve más tierna y fácil de comer. Éste es el mismo principio utilizado por Flash cuando escapa de los sólidos bloques de hielo en los cuales el Captain Cold lo sepulta rutinariamente<sup>[51]</sup>. Uno puede disolver parcialmente esas fibras químicamente, utilizando jugo de limón o una marinada con base de vinagre, pero de nuevo dependemos de agentes químicos que han de propagarse hasta el centro del asado, como en un horno convencional.

Si tiene prisa pero no puede vibrar a supervelocidad, puede utilizar otra técnica. Implica sujetar al mismo tiempo cada átomo individual del sólido y sacudirlo muy rápidamente de atrás a adelante, utilizando la fricción interna para cocer todas las partes del asado simultáneamente. Esto es lo que hacen los hornos microondas y el rayo mortal de Melter.

Cada uno de los átomos de un sólido es eléctricamente neutro, con exactamente tantos protones cargados en el núcleo como electrones cargados negativamente pululan en torno al mismo. Pero los electrones no siempre están distribuidos alrededor del núcleo de un modo perfectamente simétrico. Debido a los caprichos de las nubes de probabilidad y a la naturaleza de los enlaces químicos que mantienen unidos a los átomos, a veces un lado puede tener más carga eléctrica que el otro, por lo que será un poco más negativo por un lado y un poco más positivo por el otro, al igual que una barra de imán tiene un extremo con un polo magnético Norte y el otro extremo con un polo magnético Sur. Este desequilibrio de carga no es muy grande, pero proporciona al campo eléctrico aplicado algo a lo que sujetarse. Incluso moléculas con distribuciones de carga perfectamente simétricas pueden polarizarse mediante un campo eléctrico externo.

Si se aplica un campo eléctrico lo bastante grande a través del sólido, los átomos no equilibrados se alinean con el campo, al igual que la aguja de una brújula girará para apuntar en la dirección de un campo magnético externo. Si ahora invierto súbitamente la dirección del campo eléctrico, todos los átomos darán una vuelta de 180 grados y apuntarán en sentido opuesto. Al cambiar el campo eléctrico de nuevo a su orientación original, los átomos tendrán que girar otra vez. Si cambio la dirección del campo eléctrico atrás y adelante varios miles de millones de veces por segundo, los átomos quedarán girando. Esta energía de vibración elevará muy rápidamente la energía interna promedio de cada átomo del material y con ello elevará su temperatura. A medida que el campo eléctrico externo penetra profundamente en el material (con pocas excepciones) más átomos se moverán también vibrando debido al campo eléctrico oscilante, no solamente los de la superficie. Este proceso es muchas veces más eficaz que el de esperar el transporte de energía por el impacto de las moléculas de aire caliente. La frecuencia de oscilación de los campos eléctricos alternantes se halla en la parte de microondas del espectro electromagnético, y de aquí que este tipo de dispositivo para cocinar se llame un horno microondas.

Los emisores de microondas (llamados *magnetrones*) fueron creados por primera vez para aplicaciones de radar durante la Segunda Guerra Mundial. Los beneficios para la cocina de un dispositivo de ese tipo se advirtieron en 1945, cuando el ingeniero Percy L. Spencer, al estudiar el rango de la energía de microondas emitida por un magnetrón, observó que la barra de caramelo que guardaba

en el bolsillo de sus pantalones se había derretido. Un siguiente experimento con palomitas de maíz confirmó la utilidad no militar de este dispositivo.

Cuanto más fácil resulta a los átomos de un objeto vibrar y rotar con el campo eléctrico oscilante, más deprisa se elevará la temperatura del objeto. Ésta es la razón por la cual los líquidos se calientan más deprisa que los sólidos en un microondas. Usted puede excavar un agujero profundo en un trozo grande de hielo y llenarlo con agua. Colocando la «copa de hielo» llena de agua en un horno microondas podrá hervir el agua mientras la copa de hielo exterior continúa estando fría y sólida. No deje la copa de hielo en el microondas mucho tiempo, sin embargo, puesto que también se derretirá debido a la labor del campo eléctrico alternante, y en mucho menos tiempo del que tardaría en un horno térmico convencional.

Según las descripciones dadas en las páginas de los cómics *Tales of Suspense* y *Iron Man*, ¿podemos inferir que el arma de Melter utiliza el mismo principio que constituye el fundamento de los hornos microondas? Sí y no. Bruno Horgan apareció por primera vez en el número 47 de *Tales of Suspense* como un competidor industrial de Tony Stark y se irritó cuando perdió un contrato gubernamental para construir tanques para la armada de Estados Unidos una vez que el estamento militar descubrió que Cleat Horgan estaba usando «materiales inferiores». La compañía de Stark ganó el contrato de la armada, a pesar de que existía un conflicto de intereses en la información presentada, ya que el informe que describía el uso por parte de Horgan de componentes de calidad inferior había sido escrito por el propio Tony Stark. Más tarde, uno de los aparatos de prueba de gases del laboratorio, construido con piezas de inferior calidad, sufrió un cortocircuito mientras lo estaba examinando y emitió un rayo de energía que fundió todo el hierro que se hallaba en su camino<sup>[52]</sup>. Cuando Horgan se dio cuenta de que el «rayo de análisis» que había creado era realmente un rayo fundidor, rediseñó el aparato en la forma de una unidad portátil y compacta y, vistiendo un horrendo traje azul y gris (reforzando varios estereotipos relativos al sentido de la moda de los ingenieros), decide destruir a sus enemigos y convertirse en hegemónico (reforzando tristemente varios estereotipos referentes al sentido ético de los industriales modernos). Tras un éxito inicial contra Stark Industries y Iron Man, Horgan queda pasmado cuando descubre, al final de la historia, que su rayo ya no resulta efectivo contra el vengador dorado. Melter no es consciente de que Tony Stark ha averiguado la debilidad de su arma: ¡actúa solamente sobre el hierro! Al crear un traje de «aluminio bruñido» que parece indistinguible de su habitual traje blindado, Tony puede combatir a Melter hasta congelarlo, y solamente una cañería derretida por accidente encima de un alcantarillado permite escapar a Horgan para luchar otro día.

De esta historia debemos concluir que el rayo fundidor de Horgan no es un artefacto de microondas portátil. Un campo eléctrico oscilante de un horno microondas actúa sobre cualquier átomo, mientras que el arma de Horgan actúa sobre el hierro (que contiene 26 electrones) pero no sobre el aluminio (con 13 electrones). Más adelante (en el número 89 de *Tales of Suspense*), la pistola del rayo fundidor de Horgan se volvió más específica, con controles para la piedra, el metal, la madera y la carne (¡sí!). Esta especialización ayudó al rescate de Tony cuando, vestido de civil, fue alcanzado por el arma de Horgan, aunque no resultó herido. Bruno Horgan no sabía que Tony Stark era también Iron Man, y no era por lo tanto consciente de que Stark usaba siempre su lámina metálica en su pecho bajo su camisa (para guardar la granada cerca de su corazón en caso de peligro, como se explica en el

capítulo 23) y por eso tenía el arma dispuesta en «Carne» cuando el ajuste correcto hubiera sido «Metal».

Ahora bien, es realmente cierto que cuando dos átomos forman un enlace químico, el descenso de energía es único para los átomos particulares que participan. Así, cada enlace químico tiene su propia energía característica y en principio es posible diseñar un arma de tipo microondas que podría sintonizarse con los enlaces químicos de la piedra en lugar de con los de los metales. De modo semejante, sintonizar con la frecuencia resonante del agua haría eficaz el rayo contra las personas y no contra objetos no animados. Tal «rayo de calor» basado en microondas que provoca un dolor extremo, parecido a una quemadura de segundo grado, cuando el rayo impacta en una persona, ha sido desarrollado recientemente. El motivo para el desarrollo de un arma semejante es el de utilizarla en situaciones de control de multitudes, puesto que el rayo de calor hace que un grupo de personas se disperse de un lugar determinado con el fin de evitar el dolor de la quemadura. No obstante, Con independencia de cómo se sintonice la frecuencia del campo eléctrico oscilante, los enlaces entre los átomos de hierro y los de aluminio en sus respectivos metales son demasiado parecidos como para que un arma diseñada para derretir el hierro no derrita también el aluminio.

Naturalmente, toda esta discusión acerca de Melter y del traje metálico de Tony Stark plantea una pregunta que ha asediado desde hace tiempo al hombre moderno: si podemos colocar un hombre en la Luna ¿Por qué no podemos colocar un objeto metálico en un microondas? La respuesta es que *podemos poner metal* en un microondas, pero los electrones libres del metal podrían provocar algunos problemas graves. Los metales tienen conductividades térmicas elevadas, y pueden provocar incendios en contacto con papel en un horno microondas. Aplicar un campo eléctrico externo a los electrones capaces de transitar por todo el volumen del metal hace más que empujarlos adelante y atrás como ocurre con los átomos fijos.

Un metal en un microondas es un objeto aislado y no hay lugar adonde puedan ir esos electrones impulsados, de modo que se pueden acumular en uno de los extremos del metal. Si existen puntos o bordes cortantes, esta acumulación de electrones puede hacer que se genere un nuevo campo eléctrico de gran magnitud en el interior del objeto metálico.

Si este campo eléctrico llega a ser mayor que 12.000 voltios por centímetro puede provocar una chispa, al no ser capaz el aire de aislar el alto voltaje del metal de la pared del horno, y surgirán pequeñas descargas. Dependiendo de la curvatura del metal, el campo eléctrico inducido puede ser menor que el nivel crítico de descarga, aunque una esquina aguda en una porción de mantequilla recubierta con papel de aluminio puede ser suficiente para crear una chispa que estropee permanentemente la superficie interna del horno (nota personal para mi esposa: lo siento, cariño).

**ELECTROSTÁTICA.** Hasta ahora nos hemos ocupado principalmente de cómo afectan las fuerzas al cambio de movimiento de los objetos, y la fuerza con la que más hemos tenido que ver es la de la gravedad. Tanto si se trata de Superman frenando en su salto o de Gwen Stacy acelerando en su caída fatal, siempre hemos invocado a la gravedad para ocupar el papel de la fuerza  $F$  en la segunda ley de Newton  $F = m a$ . Pero hay otras fuerzas distintas de la gravedad en este universo y en el de los cómics.

Los físicos han descubierto que existen solamente cuatro fuerzas fundamentales en la naturaleza que son tanto necesarias como suficientes para dar cuenta del amplio rango de los complejos fenómenos físicos que observamos. Tales fuerzas son: *a)* la gravedad, *b)* el electromagnetismo y las poco imaginativamente llamadas *c)* fuerza fuerte y *d)* fuerza débil<sup>[53]</sup>. Las dos últimas operan solamente en el interior de los núcleos atómicos y sin ellas los protones cargados positivamente se repelerían entre sí y no podrían existir los elementos estables aparte del hidrógeno. La fuerza débil es la responsable de algunas formas de radiactividad (tal como la desintegración nuclear que condujo a los físicos a sugerir la existencia de los neutrinos, como se mencionó en el capítulo 11) y sin la cual existirían pocos superhéroes o supervillanos. Casi cada fuerza que encontramos en la actividad diaria, aparte de la gravedad, es de naturaleza electrostática. Las fuerzas generadas por nuestros músculos, la fuerza que ejerce sobre nosotros la silla en la que nos sentamos y que evita que caigamos al suelo, la fuerza ejercida por los gases calientes en el cilindro del motor de su automóvil, todas éstas y muchas otras son, a fin de cuentas, eléctricas.

Ha llegado el momento de considerar las fuerzas gemelas de la electricidad y el magnetismo, que veremos que son realmente una única fuerza llamada con propiedad *electromagnetismo*. Muy pocos superhéroes tienen poderes de origen electromagnético. Dos de los primeros personajes de los cómics de la Edad de Plata cuyos poderes empleaban electricidad y magnetismo son Lightning Lad y Cosmic Boy. Esos héroes vienen del futuro, y aparecieron por vez primera en el número 247 de *Adventure Comics* (abril 1958) cuando junto con Saturn Girl viajaban hacia atrás en el tiempo con el fin de reclutar a Superboy para formar la Legión de los Superhéroes. Lightning Lad es capaz de provocar descargas eléctricas desde sus manos, mientras que Cosmic Boy puede controlar objetos magnéticos. El tercer miembro fundador, Saturn Girl, poseía el superpoder de la telepatía mental, que como luego veremos está íntimamente relacionada con la propagación electromagnética. En consecuencia, los tres fundadores de la Legión muestran manifestaciones directas de la electricidad y del magnetismo en acción.

La Legión venía del año 2958 (las historias actuales tienen lugar en el 3005) y estaba formada por adolescentes de planetas distintos con un único superpoder cada uno. El concepto de un club de superhéroes adolescentes del futuro resultó ser muy popular entre los lectores, y la Legión de los Superhéroes se convirtió en un sello característico de *Adventure Comics* hasta el punto de desplazar a Superboy de su propia colección. El número de miembros de la Legión creció con el tiempo, y

actualmente se jacta de contar con más de treinta héroes. Todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza, así como diversas simetrías básicas de las leyes físicas, entraron en liza a medida que los escritores de las historias de la Legión se esforzaban en desarrollar un superpoder para cada héroe. Los Legionarios incluían a Star Boy, que podía aumentar el peso de los objetos, mientras que Light Lad podía hacerlos más ligeros, Element Lad era capaz de transmutar un elemento en otro (lo que implica el control de las fuerzas nucleares) y Colossal Boy podía crecer hasta grandes alturas, mientras Shrinking Violet podía empequeñecerse a sí misma. Ferro Lad podía transformarse en una especie de hierro orgánico (una versión temprana para adolescentes del Coloso de la Patrulla X); de muchacho me impresionó mucho su noble sacrificio para destruir el Sun-Eater en el número 353 de *Adventure*.

Aunque solamente unos pocos héroes tenían como origen de sus superpoderes la electricidad o el magnetismo, los supervillanos emplean con frecuencia esas fuerzas fundamentales de la naturaleza cuando persiguen ya sea ganancias financieras o el dominio del mundo (y ocasionalmente ambas cosas). En particular, en algunos de los próximos capítulos nos centraremos en dos de tales malhechores, Electro y Magneto (y no es difícil atisbar con qué fuerza, la electricidad o el magnetismo, está asociado cada villano).

### **La electricidad estática:**

#### **¡La fuerza más potente de la naturaleza!**

Max Dillon era un electricista muy capacitado pero demasiado egocéntrico. Cuando un compañero de trabajo quedó atrapado en lo alto de una línea de alta tensión, Max no hizo nada hasta que su capataz le ofreció un premio de 100 dólares (en moneda de 1963 equivale a unos 600 actuales) por su rescate. Al liberar al inconsciente colega y hacerlo descender hasta el suelo con un cable, Dillon recibió un beneficio no anticipado al ser alcanzado por una descarga al sujetarse a una línea de alta tensión. Igual que en el caso de Barry Allen (Flash), no solamente no murió ni sufrió ninguna quemadura o daño neurológico a causa del accidente traumático, sino que de hecho ganó la capacidad de almacenar energía eléctrica, que podía descargar a voluntad en forma de rayos<sup>[54]</sup>. El accidente de Dillon, presentado en el número 9 de *Amazing Spider-Man*, pudo haber cambiado su cuerpo, pero dejó intactas sus actitudes antisociales. Al darse cuenta de que ahora poseía temibles poderes eléctricos, diseñó un camuflaje chillón de color verde y amarillo, con una relampagueante máscara amarilla con la imagen de un rayo, y se embarcó en una vida delictiva bajo el sobrenombre de Electro, tal como se ve en la figura 22. Personalmente, si ganó dominio sobre esa tan potente fuerza de la naturaleza no creo que se debiera necesariamente al traje que eligió para usar en público. Quizá si Max Dillon no hubiera sido tan miserable, sus amigos podrían haberle dado algunos consejos acerca de su forma de vestir. Pero es exactamente tal arquetipo de malas elecciones lo que conduce a esos bribones superpoderosos a una vida delictiva.





**Fig. 22.** Una escena del n.º 9 de *Amazing Spider-Man*, donde el supervillano Electro demuestra simultáneamente un concepto avanzado de electromagnetismo y un sentido de la elegancia en el vestir significativamente menos perfeccionado. © 1963 Marvel Comics

Dillon descubrió que su cuerpo podía almacenar una carga eléctrica que le permitía arrojar rayos letales. Las historias que presentan a Electro lo muestran con frecuencia cargando su cuerpo en alguna estación de energía «abandonada», situado entre dos torres transformadoras y dejando que la corriente eléctrica pase a través de su cuerpo (el hecho de que la ciudad de Nueva York tenga estaciones de energía en pleno funcionamiento dispersas por toda su extensión, disponibles para el uso de los supervillanos explica seguramente al menos en parte las altas facturas de consumo que los residentes deben pagar a la Consolidated Edison, por no mencionar los recientes apagones).

Plenamente cargado, Dillon podía proyectar rayos desde sus manos, aunque a veces las descargas procedían de otras partes de su cuerpo. Una vez agotada su carga, quedaba básicamente impedido hasta recibir otra. En esencia el horrible accidente de la línea de tensión convirtió a Dillon en un cañón láser recargable ambulante.

¿Qué significa tener «poderes eléctricos», tales que uno pueda arrojar rayos contra la policía y los superhéroes? Cualquiera que haya arrastrado sus pies por una alfombra peluda en un día seco de invierno y haya tocado luego el pomo de una puerta habrá comprobado que la materia está compuesta de elementos cargados eléctricamente. A diferencia de la masa de un objeto, que es siempre positiva, la carga eléctrica se presenta bajo dos aspectos que se etiquetan arbitrariamente como «positiva» y

«negativa». La expresión «los opuestos se atraen» puede o no ser una guía fiable en los asuntos del corazón, pero resume acertadamente la naturaleza de la fuerza entre objetos cargados positiva y negativamente. Dos objetos con cargas opuestas serán empujados el uno hacia el otro por una fuerza atractiva. De forma semejante, dos objetos que están cargados con la misma polaridad, ya sea positiva o negativa, se repelerán entre sí. Cuando una caja de transporte adquiere un exceso de carga eléctrica debido a rozamientos azarosos por contacto, esta carga ha de ser transferida a los trocitos de espuma de empaquetamiento del interior de la caja. El hecho de que todos los trozos de espuma tengan la misma carga explica que estos trozos livianos se repelan entre sí y se dispersen por el aire cuando se abre la caja. Los electrones cargados negativamente de un átomo son atraídos hacia los protones cargados positivamente del núcleo por la fuerza atractiva electrostática. Cuanto más protones hay, mayor es la carga positiva y mayor la fuerza que impulsa al electrón hacia el núcleo. Sin embargo, cuantos más electrones hay en un átomo, su repulsión mutua es mayor. Esas dos fuerzas, la atracción por el núcleo y la repulsión por parte de los otros electrones, tienden a cancelarse a grandes rasgos, razón por la que un átomo de uranio con 92 electrones y un número igual de protones con carga positiva en su núcleo tiene aproximadamente el mismo tamaño que un átomo de carbono, con seis electrones y seis protones nucleares.

La fuerza atractiva entre dos objetos cargados opuestamente, o la fuerza repulsiva en el caso de dos objetos con la misma carga tiene, notablemente, la misma forma matemática que la ley de Newton de la atracción gravitatoria descrita en el capítulo 2. Es decir, la fuerza entre dos objetos que tienen las cargas eléctricas **carga 1** y **carga 2** está dada por la ecuación

$$\text{FUERZA} = k [(CARGA 1) \times (CARGA 2)] / (\text{DISTANCIA})^2$$

Esta expresión, atribuida al científico francés del siglo xviii Charles Coulomb es casi idéntica a la expresión de la gravitación de Newton, excepto por el hecho de que en lugar de la carga de dos objetos multiplicábamos sus masas, y la constante no se indicaba mediante **k** sino como **G**. Recordemos del capítulo 2 que la ley de Newton de la gravitación describía la fuerza entre dos masas **masa 1** y **masa 2** mediante la expresión

$$\text{FUERZA} = G [(MASA 1) \times (MASA 2)] / (\text{DISTANCIA})^2$$

Matemáticamente esas dos expresiones de la fuerza son equivalentes cuando se reemplaza masa por carga y la constante **G** se renombra como la nueva constante **k**. Debido a que la carga eléctrica no es la misma cantidad que la masa, las unidades de la constante **k** son distintas de las de la constante **G** para que ambas ecuaciones tengan las unidades de una fuerza.

Más importante que el que **k** tenga unidades distintas que **G** es el hecho de que la magnitud de **k** es muchísimo mayor que la de **G**. Consideremos un único protón en el núcleo de un átomo de hidrógeno, orbitado por un único electrón a una cierta distancia. La fuerza atractiva de la gravedad empuja al electrón hacia el protón, y hay una fuerza atractiva adicional debido a que el protón cargado positivamente es empujado hacia el electrón cargado negativamente. La magnitud de la carga del protón es exactamente la misma que la del electrón, estando la carga del protón etiquetada por

convenio como positiva y la del electrón considerada negativa. Aunque puedan tener cargas iguales pero opuestas, la masa del protón es casi dos mil veces mayor que la del electrón. No obstante, cuando  $k$  en la expresión de Coulomb se multiplica por el producto de la carga del protón y del electrón para una determinada separación en un átomo, la fuerza resultante es de diez mil trillones de trillones (un uno seguido de cuarenta ceros) de veces mayor que la atracción electrostática. A escala atómica, la gravedad es irrelevante, y la materia se mantiene unida por la electrostática. Sin la adherencia estática no habría moléculas, ni química ni en consecuencia la vida.

Si la gravedad es tan pequeña comparada con la acción electrostática, ¿por qué tiene tanta importancia para los planetas y las personas? Porque es siempre atractiva. Dos masas, no importa si son grandes o pequeñas, siempre se empujarán la una hacia la otra debido a la gravedad. Aunque existe una cosa llamada antimateria, tiene una masa positiva, y por tanto una atracción gravitatoria normal con la otra materia. Hasta donde ha sido posible determinarlo experimentalmente, solamente existe un tipo de masa con un tipo de atracción gravitatoria positiva. Ciertas enigmáticas observaciones astronómicas han sido interpretadas recientemente como una indicación de la presencia de una suerte de «antigravedad» asociada con una cantidad misteriosa llamada *energía oscura*. Sin embargo, esta explicación es algo controvertida, y en el momento en que escribimos esto los científicos no tienen la más vaga idea de lo que es la energía oscura (razón por la que, aunque ya está bien sobrepasado el año 2000, todavía están por fabricar los automóviles voladores que se nos prometió para estas fechas en las novelas y los cómics de ciencia ficción de los años cincuenta y sesenta). La situación con la electricidad es muy distinta. El hecho de que las cargas eléctricas se presenten en dos clases diferentes, positiva y negativa, introduce la posibilidad de aislar campos eléctricos.

Un electrón que gira alrededor de un protón experimenta un tirón atractivo. Un segundo electrón aproximado a esta disposición es impulsado hacia el protón pero es empujado hacia fuera por parte del primer electrón. Hasta que el segundo electrón no se acerca mucho al protón, la resultante de los empujes hacia el centro y hacia fuera no se anula, junto con la fuerza neta sobre el segundo electrón. Si pudiéramos apantallar tan fácilmente la atracción gravitatoria, los aparatos levitantes como los discos antigravedad del diabólico Wizard serían cosa común. Independientemente de si tiene una carga eléctrica positiva, negativa o neutra, toda la materia tiene una masa positiva y experimenta la atracción gravitatoria por parte del resto de la materia. De esta forma la gravedad siempre acaba venciendo y trata de aproximar a los cuerpos entre sí, incluso a aquellos que son electrostáticamente neutros.

Pero no nos equivoquemos, la electrostática es la fuerza más intensa. Consideremos la forma de la ecuación de la fuerza de Coulomb antes establecida. Si usted tuviera en su cuerpo solamente un 10% más de carga negativa que positiva, en tal caso la fuerza de repulsión electrostática sería lo bastante grande como para elevar un gran edificio de oficinas que tuviera un exceso similar del 10% de carga negativa. Por otra parte, aunque la masa del edificio sea mucho más grande que la suya, no por eso está gravitacionalmente ligado al edificio, a pesar de los ocasionales decretos del lugar de trabajo y de su jefe.

Cuando corre, Flash debería acumular una carga estática enorme debido al rozamiento entre sus botas y el suelo, necesaria para la carrera, al igual que ocurría cuando frotábamos nuestros pies sobre

una alfombra en invierno. La fricción de nuestros pies frotando contra la alfombra, que es un proceso violento a escala atómica, da como resultado la transferencia de electrones, que se reparten por nuestro cuerpo. Estas cargas en exceso se repelen entre sí y no quieren permanecer sobre usted. Cuando usted se acerca al pomo de la puerta, queda disponible un camino para que las cargas retornen a la Tierra (que es capaz de aceptar sin problemas unos cuantos electrones de más o de menos). Si la carga es lo bastante grande, los electrones saltarán a través del aire, al igual que un rayo descarga sobre el suelo el exceso de carga de una nube de tormenta. Al conducir, su automóvil capta frecuentemente un exceso de carga debido a la fricción entre los neumáticos y la carretera, que puede eliminarse tocando el marco metálico de la puerta una vez se ha detenido el coche.

La descarga es dolorosa por dos razones: el área superficial de sus dedos es muy pequeña, de modo que la corriente por unidad de área es grande. De hecho, es preferible tocar la carrocería o el pomo de la puerta con su codo o apoyar todo su cuerpo sobre el objeto metálico. El arco será un precio pequeño (por la reducción del dolor), y las puntas de sus dedos tienen más terminaciones nerviosas, de forma que son más sensibles a la corriente.

Esta electricidad estática inducida por la fricción (conocida técnicamente como «electrificación de contacto») fue reconocida recientemente en el número 208 de *Flash*. Nuestro héroe había terminado de salvar a los ciudadanos de Keystone City<sup>[55]</sup>, una vez más, de un ataque de un subgrupo de su Galería de Rojo, y estaba recibiendo el agradecimiento de un grupo de espectadores. Al pedirle un autógrafa, una persona dio una palmada al hombro de Flash y, al recibir una sacudida, exclamó «¡Eh, mirad! ¡Su uniforme está cargado de electricidad estática!». Este exceso de carga debería en general descargarse sobre el primer objeto metálico cercano conectado al suelo tan pronto como Flash deje de correr. El hecho de que esta electrificación por contacto fuera observada solamente en el 2004 (y no en los previos cincuenta años de los cómics de Flash), sugiere que durante la mayor parte de la carrera de lucha contra el crimen, además de poseer una capacidad para ignorar la resistencia del aire y las aceleraciones dañinas, era igualmente inmune a la acumulación de carga electrostática.

Volviendo a Electro, sus poderes eléctricos proceden sin duda del hecho de que es capaz de almacenar en su cuerpo cantidades muy elevadas de carga eléctrica, sea positiva o negativa. Luego puede descargarse a voluntad, por ejemplo mediante la chispa que arroja desde las puntas de sus dedos al pomo de cobre antes mencionado. Esto está de acuerdo con el hecho de que Electro necesita cargarse a sí mismo antes de emplear sus poderes, y si descarga demasiados rayos queda, en último término, agotado y a punto de que le echen el guante.

Hace sesenta años más o menos, las molestias que sufrió un ingeniero suizo durante una excursión condujo a una innovación tecnológica. Las investigaciones de George de Mestral al preguntarse por qué los espinos se aferraban tan tenazmente a sus pantalones dio como resultado la invención de un mecanismo de cierre (una presilla) que consta de millones de diminutos ganchos y lazos, al que dio el nombre de Velcro. Más recientemente, Robert Full, Keller Autumn, y colaboradores han descubierto que a la capacidad del geco<sup>[56]</sup> para desplazarse por paredes y techos lisos se le puede seguir la pista hasta pelillos microscópicos en los dedos del lagarto llamados *setae*. Pero sin ganchos diminutos en las paredes o en el techo, ¿qué es lo que sostiene las fibras y al propio geco? ¿La adherencia

estática! Las fibras del pie del geco son eléctricamente neutras, pero el lagarto no necesita frotarse sobre una alfombra peluda para pegarse a una pared, porque usa las fluctuaciones de carga de sus setae. Los electrones de las fibras de los dedos del geco están constantemente en movimiento. A veces unos cuantos electrones de más están en un lado de la fibra, haciendo que ese lado quede cargado con una ligera carga negativa, mientras que otras veces unos cuantos electrones de menos están en ese mismo lado, cargándolo algo positivamente. Si el lado de la fibra más cercano a la pared posee, durante un instante, una ligera carga negativa, entonces inducirá una ligera carga positiva en la pared, y se producirá como resultado una fuerza de atracción entre la fibra y la pared. Usted esperará que esta fuerza (conocida como fuerza de Van der Waals) sea muy débil, y tendrá razón. Por ello el geco tiene millones de dichas fibras en cada dedo, de forma que la fuerza atractiva total es lo bastante fuerte como para soportar su peso.

O incluso posiblemente el peso de Peter Parker. Los redactores de Marvel han sugerido que la capacidad de Spidey para reptar por las paredes es de naturaleza electrostática —la película *Spiderman* del año 2002 incluía una escena que mostraba señales de fibras punzantes microscópicas brotando de los dedos de Peter Parker una vez había obtenido sus poderes arácnidos—. Aclaremos que tanto el cómic como la película se apoyan en algo sólido. Recientemente un informe de la Universidad de Manchester en Inglaterra describió el desarrollo de la «cinta geco», formada por millones de fibras diminutas (la longitud de cada fibra es cincuenta veces más corta que el ancho de un cabello humano) capaz de proporcionar una atracción lo bastante fuerte como para soportar una figura de Spiderman en acción del tamaño de un palmo. Una cinta que utiliza la fuerza procedente de las fluctuaciones de carga puede ser, en principio, utilizada y reutilizada instantáneamente, a diferencia de un adhesivo de aplicación única que necesita de un tiempo de tratamiento. Las fibras de la cinta deben ser muy pequeñas para maximizar la proporción de área a volumen, puesto que solamente el exceso de carga fluctuante sobre la superficie de la fibra contribuye a la fuerza atractiva. Con el fin de proporcionar suficiente fuerza como para soportar el peso de una persona, la densidad de las microfibras debe ser muy alta, para compensar la fuerza extremadamente débil de cada fibra. Si esos desafíos de la ingeniería pueden resolverse es algo que está por ver. Pero si la «cinta geco» es alguna vez tan común como el Velcro, ¡no volveré a esperar el ascensor!

**CORRIENTES ELÉCTRICAS.** Miremos de cerca esas descargas eléctricas que emanan de las manos de Electro. Una carga positiva lo bastante grande puede atraer electrones desde muy lejos, incluso a través de kilómetros de cable de cobre. Un término elegante para designar la fuerza ejercida sobre los electrones que se mueven a través del cable es *voltaje*. Los electrones están cargados negativamente, de modo que un voltaje positivo los empuja en un sentido mientras un voltaje negativo repele los electrones en el sentido opuesto. La corriente es otra forma de expresar el número de electrones que pasan por un punto determinado del cable por segundo.

Imagine una manguera de jardín conectada a un grifo externo. En este caso el voltaje representa el papel de la presión que empuja el agua a través de la manguera. La cantidad de agua que sale por el extremo en un período determinado es la corriente. La resistencia de la manguera proviene tanto de pequeñas obstrucciones como de pequeños boquetes a lo largo de su longitud, por los cuales puede escapar algo de agua antes de llegar al final. Cuantos más defectos haya en la manguera, mayor será la presión de agua necesaria para mantener el mismo flujo (corriente) en el extremo de la misma. Sin embargo, del mismo modo que al abrir un grifo en un fregadero, con el agua fluyendo sin una manguera que conecte el grifo con el tubo de desagüe, un voltaje lo bastante fuerte puede producir una corriente eléctrica incluso en ausencia de un cable. Esto es lo que sucede cuando salta una chispa desde la punta del dedo hasta el pomo de la puerta o desde una nube hasta el suelo en el caso de un rayo. Cuanto mayor es la distancia mayor es la fuerza necesaria para impulsar las cargas. Esto es una consecuencia de la expresión de la fuerza electrostática de Coulomb, que se hace menor según el cuadrado de la separación entre las cargas. Una manguera de jardín larga, con varias imperfecciones y agujeros, tendrá más resistencia al flujo del agua a su través que un segmento parecido de manguera. Ésta es la razón por la que usted no recibe una sacudida estática hasta que sus dedos están muy cerca y a punto de tocar el pomo de la puerta: el aire es un aislante eléctrico bastante bueno, y hace falta un campo eléctrico de más de 12.000 v/cm antes de que la acción sobre las cargas eléctricas sea suficiente como para hacer que salten la brecha. Es por esto por lo que, cuando sucede, sentimos una picadura. Y por lo que usted definitivamente no desea que lo desintegren las descargas masivas de Electro.

Cuando usted abre el grifo del fregadero de la cocina, el agua fluye desde la espita al desagüe. En condiciones ordinarias no va desde el grifo hasta el techo<sup>[57]</sup>. ¿Por qué no? En la analogía del agua, la razón es obvia. Hay un empuje hacia abajo de la gravedad sobre el agua que dirige su flujo. Para una carga eléctrica, la dirección en que fluye la corriente está determinada por la localización del «desagüe». La carga eléctrica no puede fluir si no hay sitio para que lo haga. En realidad, esto es cierto también en el caso de nuestra analogía del agua. ¿Quiere saber cómo puede dar la vuelta a un vaso de agua lleno hasta el borde y conseguir que no caiga ni una gota? ¡Hágalo cuando el vaso está bajo el agua en una piscina! Si el agua no tiene sitio para escapar del vaso, seguirá en su interior (siempre que ignoremos las colisiones al azar entre las moléculas de agua de la piscina y las del borde del vaso que hacen que dichas moléculas intercambien sus posiciones).

Lo mismo es cierto para el caso de la electricidad. Con independencia de la magnitud de la carga eléctrica neta que posea un objeto, no se descargará si los demás objetos de alrededor tienen exactamente la misma carga. Técnicamente, el voltaje que repele o atrae las cargas eléctricas presentes es una medida de la «diferencia de potencial», definida como la diferencia de energía potencial de una carga al moverse desde un punto hasta otro. Esto es lo que hace que Electro sea tan peligroso (además de su osado sentido de la moda). Es capaz de controlar su diferencia de potencial respecto de su entorno a voluntad, de modo que puede decidir cuándo y dónde descargar el exceso de carga eléctrica que ha acumulado.

Aplicando un voltaje a través de un conductor, puedo elevar la energía potencial de los electrones en el mismo, como elevo la energía potencial de un ladrillo cuando lo levanto sobre mi cabeza. El ladrillo conserva esta energía potencial extra hasta que lo suelto, en cuyo momento la energía potencial se convierte en energía cinética y el ladrillo se acelera mientras cae. Pero esta conversión no puede tener lugar hasta que dejen de retener el ladrillo. De forma parecida, los electrones de un cable se aceleran y aumentan su energía cinética en forma de una corriente eléctrica, como respuesta al voltaje aplicado a lo largo del cable, pero solamente en el caso de que los electrones tengan algún lugar al que ir. Así como el ladrillo elevado conservará indefinidamente su energía potencial hasta que lo deje caer, los electrones no se acelerarán como respuesta a un voltaje aplicado si el cable no está conectado eléctricamente a algo. Piense otra vez en una manguera de jardín conectada a un grifo. Con independencia de las vueltas que yo de para abrir el grifo, no circulará nada de agua por la manguera si está completamente sellada en el otro extremo. Tengo que destapar el extremo de la manguera para que el agua pueda salir antes de que fluya a través de la manguera (una corriente), en respuesta a la presión de agua (voltaje) en el grifo. La forma técnica de expresar esta idea, es decir que para que una corriente eléctrica pase por un cable, éste debe estar conectado a tierra<sup>[58]</sup>. La Tierra, o «suelo» es obviamente un objeto muy grande, con muchísimas cargas eléctricas, y por lo tanto puede captar electrones de más o ceder electrones a un cable sin dificultad. Esta noción de que para que una corriente fluya debe tener algún sitio adonde ir, es bastante razonable, pero no todo superhéroe parece haberla comprendido.



**Fig. 23.** Una escena del n.º 1 de *Superman*, en la que el defensor de la verdad, la justicia y el estilo de vida americano trata de obtener información de un intrigante de Washington a base de darle demostraciones prácticas de los principios de una toma de tierra. © 1938 National Periodical Publications Inc. (DC)

En el capítulo 1 mencioné las primeras hazañas del Hombre de acero, descritas en el número 1 de *Superman*, antes de que todo el mundo supiera de su existencia. En esta historia Superman intenta descubrir la identidad de la persona que financia al intrigante de Washington que sobornaba a un senador con la finalidad de implicar a Estados Unidos en la guerra europea (recordemos que esta historia tiene lugar en 1939). El empresario secreto de Alex Creer, «el astuto intrigante de Washington», resulta ser Emil Norville, el magnate de armas (la guerra es buena para los negocios, según el punto de vista de Norville). Por alguna razón, Creer rehúsa inicialmente divulgar el nombre de su patrón a este extraño que usa un conjunto de ropa interior azul y rojo con el sobresaliente accesorio de una capa roja. En el capítulo 1 mencionamos que Superman se deja caer intencionadamente desde lo alto de un



elevado edificio sujetando a Creer, fingiendo que la caída los matará a ambos. Antes de esta escena, para soltar la lengua de Creer, Superman lo agarra como un saco de patatas y salta con él por encima de unas líneas de alta tensión, como se ilustra en la figura 23. Greer se queja de que se electrocutarán, pero Superman aprovecha para darle una lección de física. Aunque su lectura debe considerarse una parte adicional de los esfuerzos de Superman para torturar psicológicamente al intrigante y sacarle información, dejo que decida el lector: «No, no ocurrirá», explica el Hombre de acero, puesto que al fin y al cabo «los pájaros se posan en los cables de teléfono y no por eso se electrocutan, a menos que toquen un poste de teléfono y queden conectados a tierra».

Superman tiene toda la razón. Usted sólo habrá de preocuparse cuando toque un cable de alto voltaje y sujete simultáneamente el poste telefónico (u otro cable a distinto voltaje), y proporcione de este modo un camino para que las corrientes del cable fluyan hacia el voltaje menor. En esta situación desafortunada, el flujo de electrones (la corriente) pasa a través del conductor, digamos, su cuerpo, conectando los dos puntos.

Pero ¡oh, desgracia!, justamente una comprensión tan elemental del circuito eléctrico falta en el número 9 de *Amazing Spider-Man*, en el cual Spidey se enreda con Electro por primera vez. En una escena durante su batalla final, Spiderman se las arregla para desviar una descarga eléctrica que Electro ha arrojado contra él, lanzando una silla metálica a la cabeza de Electro. «Cualquiera con un cierto conocimiento de la ciencia sabe que cualquier metal actúa como un pararrayos —dice Spiderman enseñando a Electro—, como hace esta silla.» Realmente, el fallo de comprensión de Spiderman de cómo funcionan los pararrayos sugiere que este pretendido conocimiento avanzado de la ciencia no es tan eficaz como debiera. La descarga eléctrica se muestra formando un arco que se aleja de Spiderman y persigue a la silla que asciende a pesar de que no está conectada eléctricamente con nada. ¿Por qué la descarga eléctrica de Electro ha de dirigirse a la silla, metálica o no, si una vez que la alcanza la corriente no tiene adónde ir?

La situación se degrada más (desde un punto de vista físico) en el número 1 de *Amazing Spider-Man Annual* (febrero de 1964) en donde Spidey se enfrenta de nuevo a Electro y esta vez, como una precaución extra, conecta deliberadamente un cable a su tobillo para asegurar que sigue puesto a tierra todas las veces. Cuando se lucha con un supervillano capaz de arrojar rayos letales a usted, una buena conexión sólida a tierra es justamente lo que usted no desea.

Todo el intríngulis de un pararrayos no consiste en que esté hecho de metal, sino que el rayo tocará el elemento más alto del edificio (el pararrayos), y la corriente eléctrica es transportada seguidamente desde la varilla del pararrayos por conducto de un cable y de un modo seguro a tierra, evitando de este modo que se produzca fuego en el tejado del edificio. La descarga eléctrica entre la punta de sus dedos y el pomo metálico tiene lugar solamente cuando su dedo está muy cerca de la puerta, dado que cuanto menor es la distancia menor es la resistencia que tiene que superar el arco. De forma semejante, el rayo trata de minimizar la distancia y, por consiguiente, la resistencia de su camino al suelo electrificado. Por esto usted no querrá permanecer bajo un árbol durante una tormenta eléctrica, pues ello aumentaría la probabilidad de que el rayo que cae en el árbol alto lleve a cabo un desvío a través de su cuerpo. Cuando se está solo en un campo vacío durante una tormenta, se debería estar

tumbado en el suelo para disminuir la probabilidad de ser alcanzado por el rayo. Si el pararrayos de un edificio no está conectado al suelo, la corriente eléctrica que entra en la varilla hallará un camino de resistencia elevada para pasar a tierra, a través del tejado y del edificio, con los perjuicios concomitantes para la estructura.

Un daño de este tipo sería con seguridad el destino de Spiderman cuando se conectó intencionadamente a tierra, garantizando por lo tanto que toda la energía eléctrica de Electro tenga que pasar a través de su cuerpo en su camino hacia un estado de menor potencial. La «fuerza arácnida» de Spiderman le permitirá soportar parte de las lesiones de la descarga eléctrica, pero al conectarse a tierra se coloca en una situación mucho peor que la necesaria.

No está claro por qué los creadores de Spiderman, el guionista Stan Lee o el dibujante Steve Ditko, deberían cargar con la culpa de estas meteduras de pata. Esta ambigüedad proviene del «método Marvel» de producción de cómics en los años sesenta. En la competencia diabólica de Marvel (como llamaba Lee de forma jocosa a DC Comics), un escritor de cómics producía un guión detallando no solamente los títulos y los diálogos y globos de los pensamientos de cada viñeta, sino también cómo debería dibujarse cada una de ellas. A continuación un editor revisaba el guión, haciendo los cambios necesarios, y lo pasaba luego al artista, que dibujaría el cómic tal como figuraba descrito en el guión. El esbozo se repasaba luego con tinta, se le añadía el texto y se coloreaba, utilizando los diálogos y los títulos del guión, y el escritor no veía usualmente la historieta hasta que estaba disponible para su venta en los quioscos. Este sistema funcionaba bien en la medida en que se disponía de suficientes escritores y editores como para cubrir el número de cómics producidos por mes, pero en Marvel a comienzos de los años sesenta el número de escritores era reducido, en particular uno: Stan Lee, quien era a la vez el editor y el escritor de (en 1965, por elegir un año en particular) *Los Cuatro Fantásticos*, *Spiderman*, *La Patrulla X*, *Los Vengadores*, las historias del Capitán América y Iron Man (ambos en *Tales of Suspense*), el Doctor Extraño, las historias de la solitaria Antorcha Humana y Nick Furia, agente de S. H. I. E. L. D.<sup>[59]</sup> (en *Strange Tales*); *Giant-Man*, *Namor* y *El Increíble Hulk* (en *Tales to Astonish*); *Daredevil*; y *Sgt Fury and His Howling Commandos* (un cómic sobre la Segunda Guerra Mundial). Si las historias del Universo Marvel tenían un sentido y una estructura coherente, se debía sin duda al hecho de que había una única voz creativa que guiaba los diversos cómics.

Con tantas historias creadas cada mes, no había simplemente manera de que Lee tuviera tiempo para elaborar los guiones completos de todos esos cómics. En el ínterin los artistas que trabajaban para Marvel eran *freelancers*, e intervenían en el trabajo en cada ejemplar, se les pagaba y luego recogían las instrucciones para el guión de la siguiente historia (si no trabajaban, no cobraban). Debería mencionar, de paso, que los artistas que trabajaban para Marvel en esa época eran algunos de los mejores en la profesión, e incluían a titanes como Jack Kirby, Steve Ditko, Don Heck, John Romita y Gene Colan. Esos artistas tenían tanto talento que fueron capaces de seguir ganándose la vida durante las Edades Oscuras del cómic de mediados de los cincuenta, cuando toda la industria estuvo a punto de extinguirse debido en parte a la confusión creada por *La seducción del inocente*. Por consiguiente, eran expertos en cómo contar una historia en términos gráficos, y no necesitaban un escritor de cómics que les sujetara las manos con instrucciones viñeta a viñeta acerca de lo que deberían dibujar en cada página.

Por tanto, Stan Lee halló una sabia solución al problema del poco tiempo y mucho talento disponible: dejar que los artistas cuenten la historia. Lee escribía una breve sinopsis, variable en extensión desde unas pocas páginas a algunos párrafos<sup>[60]</sup>, describiendo el guión del último ejemplar. En esencia, daba a los artistas un boceto de la trama de la historia (cómo debería ser el villano, cuáles serían sus poderes y cómo los obtenía, cómo debería perder el héroe las primeras escaramuzas contra el villano y, finalmente, la estratagema inteligente que otorgaría la victoria al héroe al término del ejemplar). El artista volvía entonces a su estudio y construía una historia gráfica que seguía la sinopsis de Lee. Cuando el trabajo artístico era devuelto, Lee escribía las leyendas y los diálogos de cada viñeta, y el cómic quedaba listo para enviarlo a la imprenta. En consecuencia tanto Lee como los artistas podían llamarse legítimamente los coescritores o co-guionistas de cada número creado al estilo Marvel. Así tanto los hombros de Lee como los de Ditko soportan la culpa de la ignorancia de Spidey sobre el concepto de la conexión eléctrica a tierra, pero ellos sabían que electricidad más agua da como resultado un cortocircuito. El clímax de la batalla de Spiderman con Electro en el número 9 llegó cuando Spidey sujeta una manguera de incendios cercana, como las que solían ser corrientes en muchos edificios de oficinas antes de la llegada de los sistemas de rociado en el techo, y remojó a Electro con una buena ducha de agua. Cuando Spiderman sujetó la manguera y abrió la válvula principal de presión, pensó: «Eh, ¿qué clase de experto científico soy? ¿Por qué no pensé en esto inmediatamente?». Mientras dejaba que Electro sufriera un chasquido completo, continuó: «¡El agua y la electricidad no hacen buenas migas!».

Bien, como dije antes, empezamos a tener dudas acerca de qué clase de científico experto es Peter Parker, pero es cierto que el agua y la electricidad no se combinan. Esto es debido a que el agua de la ciudad, aunque técnicamente neutra desde el punto de vista eléctrico, contiene una gran concentración de iones de impurezas. El agua corriente del grifo es por lo tanto bastante buena conductora de la corriente eléctrica. Electro está a una gran diferencia de potencial, razón por la cual resulta ser una amenaza letal para los superhéroes. Al empaparlos con agua, Spiderman conecta en último término un cable entre Electro y la tierra, permitiendo que el gran exceso de carga que Dillon ha almacenado fluya de su cuerpo. Ésta es una lección de física que parece estar bien aprendida en el universo Marvel. Cuando Electro es vencido por Daredevil en el segundo ejemplar del cómic de dicho héroe, la policía lo mantiene empapado con una manguera de agua (a Electro, no a Daredevil) con el fin de transportarlo con seguridad al cuartel en un vagón acorazado.

**LA LEY DE AMPÈRE.** Supongo que deberíamos reñir a Lee y Ditko por el fallo descrito en el capítulo anterior relativo a si los metales conducen una corriente cuando no están conectados a la tierra. Las prisas por sacar un cómic mensual, combinadas con la necesidad de contar una historia emocionante, explican seguramente más de unas cuantas meteduras de pata tanto en Marvel como en DC a lo largo de los años. Como se destacó anteriormente, esas historietas de cómics nunca intentaron funcionar como libros de texto de física. Resulta así tanto más impresionante que en el mismo ejemplar de *Spiderman* en el que Electro hace su presentación veamos una ilustración perfecta de una propiedad misteriosa y fundamental de la electricidad. Llegados a un punto de la historia, después de un descarado atraco a un banco, Electro aparece escapando de las autoridades escalando el lado de un edificio del mismo modo que Spiderman. La viñeta se reproduce en la figura 22, en donde vemos a un observador que exclama: «¡Miren! ¡Ese hombre vestido tan raro está subiendo a la carrera por el lado del edificio!». Un segundo hombre en la calle recoge la narrativa: «¡Se está sosteniendo con las vigas de hierro del edificio mediante rayos eléctricos, usándolas como imanes! ¡Es increíble!».

Esta escena inspira dos sensaciones. La primera es de nostalgia por la ya pasada época en la que los peatones narraban rutinariamente los acontecimientos que tenían lugar en su presencia, proporcionando un buen espectáculo a cualquier transeúnte accidental. La otra es de placer al darnos cuenta de que la escalada de este edificio por Electro es realmente un uso físicamente plausible de sus poderes. El polarizado Max Dillon (Electro) comprende, al igual que el segundo transeúnte de la viñeta, que las corrientes eléctricas crean efectivamente campos magnéticos. Este fenómeno, llamado *efecto Ampère*, fue observado por primera vez por Hans Christian Oersted (del cual recibe su nombre una unidad de fuerza de campo magnético) y fue explicado plenamente por André-Marie Ampère (en honor del cual la unidad de corriente eléctrica recibe el nombre de *amperio*). ¿Por qué el control de la electricidad por parte de Electro le permite generar campos magnéticos y en cambio Magneto, el mutante señor del magnetismo, no controla, en justa reciprocidad a voluntad las corrientes eléctricas? La respuesta a esta cuestión revela una profunda simetría entre la electricidad y el magnetismo, que se encuentra tanto en los cómics como en el mundo real.

Una carga eléctrica en reposo ejerce una fuerza sobre otra carga eléctrica. Cuanto más lejos se halle esta segunda carga, menor es la fuerza y, dependiendo de su polaridad, la segunda carga será atraída o repelida por la primera. Podemos decir por lo tanto que hay una «zona de fuerza» rodeando a esta primera carga. Otra forma de describir esta «zona de fuerza» es decir que alrededor de la primera carga existe un «campo eléctrico». Una segunda carga eléctrica colocada cerca de la primera experimentará una fuerza, como si fuera empujada en uno u otro sentido por el campo eléctrico de la primera carga. La intensidad del campo eléctrico depende de la magnitud de la carga eléctrica en este punto y varía con la distancia a la primera carga, muy cerca de la cual la fuerza sobre la segunda carga es grande, mientras que a medida que la separación aumenta la fuerza decrece con el inverso del cuadrado de la distancia (según la expresión de Coulomb). Si la separación entre las dos cargas se duplica, la fuerza disminuye por un factor de cuatro, y si la separación se triplica, la fuerza es solamente

un noveno.

Hay otro campo creado por una carga eléctrica, pero solamente cuando está en movimiento, llamado «campo magnético». Si una corriente que fluye por un cable se mantiene cerca de la aguja de una brújula, la aguja se desviará como si un imán se hubiera aproximado a ella (éste fue el descubrimiento de Oersted). De hecho, dos cables paralelos que transportan corriente eléctrica se atraerán o repelerán entre sí, dependiendo del sentido de las corrientes, comportándose igual que lo harían dos imanes cuando sus polos se enfrentan norte con sur (atracción) o sur con sur (repulsión). El campo magnético generado por los «rayos eléctricos» de Electro proporcionan en efecto una atracción con el campo magnético de las vigas de hierro del edificio, permitiéndole escalar edificios o adherirse a los automóviles que pasan (como hizo al efectuar una escapada en el número 2 de *Daredevil*).

La fuerza que surge entre cables que transportan corriente no es de naturaleza electrostática. El cable es eléctricamente neutro antes de que fluya la corriente, con el número de electrones de sus átomos equilibrado con el mismo número de núcleos atómicos cargados positivamente. Mientras pasa una corriente a través del cable, el mismo número de electrones que entra por un extremo sale por el otro. Esta fuerza extra entre los cables que transportan corriente es debida al campo magnético creado por ellos. ¿Por qué es esto así? ¿Por qué una corriente eléctrica crea un campo magnético, igual en todos los aspectos al de un imán ordinario? Un indicio clave tras el fenómeno del magnetismo es que implica cargas eléctricas en movimiento relativo. Es decir, las cargas han de moverse relativamente entre sí.

Si dos cargas eléctricas se mueven en la misma dirección y con igual velocidad, entonces, desde el punto de vista de las cargas, están en reposo. En este caso la única fuerza entre las dos cargas, desde su punto de vista, es electrostática. Para alguien que se halla en reposo en el laboratorio se manifiesta una fuerza extra asociada al movimiento y llamada magnetismo. El que la fuerza magnética esté relacionada con el movimiento relativo de las cargas eléctricas sugiere que hay una sencilla explicación para el fenómeno del magnetismo: la teoría de la relatividad especial. Exponer cómo la teoría de Einstein de 1905 puede explicar los campos magnéticos requiere más palabras, pero lo intentaremos hacer sin matemáticas.

Emplearé un agradable razonamiento dado por Milton A. Rothman en su excelente libro, *Discovering the Natural Laws (Descubriendo las leyes naturales)*, que ilustra cómo el movimiento relativo de las cargas puede crear una fuerza en una situación en la que no hay ninguna cuando están en reposo. Piense en dos vías de tren muy largas tendidas la una junto a la otra, una de ellas con un gran número de cargas negativas igualmente espaciadas a la distancia de un centímetro, y la otra con un número igual de cargas positivas, también separadas por un centímetro. Supondremos que esas filas de cargas eléctricas positivas y negativas se extienden a lo largo de kilómetros, y así no tendremos que preocuparnos de quedarnos sin cargas a medida que se desplazan a lo largo de la vía. A continuación introducimos una carga de prueba —una carga positiva, para facilitar el razonamiento— a cierta distancia de esas líneas de cargas. Esta carga de prueba no experimentará ninguna fuerza neta, puesto que es repelida por la línea de cargas positivas con la misma intensidad que es atraída por la serie de cargas negativas. Ahora las dos vías se empiezan a mover con la misma velocidad en sentidos opuestos, hacia la izquierda las negativas y hacia la derecha las positivas. Si la carga de prueba permanece

estacionaria, entonces pasa junto a ella el mismo número de cargas positivas por unidad de longitud, y todavía no habrá una fuerza neta. Una fuerza extra se desarrollará, sin embargo, si la carga de prueba positiva se mueve hacia la derecha a la misma velocidad que las cargas positivas de la vía, que también se mueven hacia la derecha.

En el capítulo 6, cuando tratamos los efectos de las grandes velocidades de Flash, nos ocupamos de la propiedad de la teoría de la relatividad especial según la cual, desde el punto de vista de un observador estacionario, la longitud del objeto en movimiento se contrae. Desde el «punto de vista» de la carga de prueba positiva, que se mueve con la misma dirección y velocidad que las cargas positivas, está quieta comparada con esta serie de cargas positivas. La carga de prueba verá por lo tanto a las cargas positivas de la vía espaciadas un centímetro de distancia. La serie de cargas negativas que se mueven en el sentido opuesto, por otra parte, estarán contraídas en su longitud y por lo tanto se hallarán más cercanas que un centímetro de separación para la carga de prueba. La atracción y la repulsión sobre la carga de prueba están ahora desequilibradas, y ésta experimentará una fuerza neta atractiva. A esta fuerza extra, que se presenta al observador externo cuando las cargas se mueven relativamente entre sí, le damos un nombre especial: magnetismo. Según este razonamiento está claro que un objeto en movimiento que no tiene carga neta (es decir, eléctricamente neutro) no experimentará ninguna fuerza extra, lo cual está conforme con el hecho experimental de que los campos magnéticos se crean solamente por corrientes positivas o negativas.

Hemos observado con anterioridad que la fricción entre las botas de Flash y el suelo debería transferir carga estática al velocista escarlata. Debido a que cargas eléctricas en movimiento crean campos magnéticos, resulta enigmático que Flash, aunque corre a supervelocidad, no genere un enorme campo magnético que arrastraría tras él a cualquier objeto de hierro que no esté bien sujeto (y muy pocos lo están). Debemos asociar tanto esta carga eléctrica que falta como su correspondiente campo magnético a la eficacia de su «aura» que también le permite evitar los efectos destructivos de la resistencia del aire<sup>[61]</sup>.

Es realmente raro que el magnetismo se explique invocando la teoría de la relatividad especial en el caso de cargas eléctricas en movimiento, dado que es fácil ignorarla cuando el objeto en cuestión se mueve mucho más lentamente que la velocidad de la luz. Se comete sólo un error muy leve si despreciamos la relatividad incluso cuando el objeto se mueve a un décimo de la velocidad de la luz. No obstante, en el caso de cargas eléctricas que se mueven mucho más despacio que la velocidad de la luz, se produce un efecto relativista con la creación de un campo magnético. El efecto es menor, sin duda, pero ¿cuánto? Se puede mostrar matemáticamente que el límite superior de la magnitud del campo magnético creado por una carga en movimiento es igual a su campo eléctrico dividido por la velocidad de la luz. La velocidad de la luz es un número grande, y por tanto, para un campo eléctrico determinado, el campo magnético asociado con la carga en movimiento será débil, pero estará ahí de todos modos. El aumento de la magnitud de la corriente eléctrica, ya sea desplazando más cargas eléctricas o haciendo que se muevan más deprisa, genera un campo magnético mayor.



**Fig. 24.** Superboy demuestra un conocimiento práctico de la teoría electromagnética, al construir un electroimán portátil (del n.º 1 de *Superboy*). © 1949 National Periodical Publications Inc. (DC)



**Fig. 25.** Continuación de la escena del n.º 1 de *Superboy*, donde el adolescente de acero usa su cerebro además de sus músculos para capturar a la banda «Smash and Grab Gang».© 1949 National Periodical Publications Inc. (DC)

Una comprensión de la ley de Ampère que relaciona las corrientes eléctricas con los campos magnéticos hace posible aparatos útiles tales como los electroimanes. Un electroimán es una espira de alambre enrollado alrededor de un núcleo de hierro magnético. La corriente que fluye por la espira crea un campo magnético que amplifica el del propio hierro. Un dispositivo de este tipo fue construido en el número 1 de *Superboy*, cuando el adolescente de acero detiene a una banda de ladrones que corren por la ciudad en una escuadrilla de tanques individuales robados de un depósito de excedentes de la armada custodiado solamente por unos pocos vigilantes nocturnos fácilmente dominables. Estas versiones de 1949 de Hummers permiten a los forajidos aterrorizar a voluntad al pueblo de Coastville. La banda de rufianes «Smash and Grab Gang» (la Banda Machacar y Pillar) (sí, ése era realmente su nombre) utilizaban esas tanquetas para irrumpir en los bancos y provocar desorden. Aunque hubiera podido volar fácilmente por los alrededores y recoger todas las tanquetas con la mano, como se muestra en la figura 24, Superboy decide adoptar una estrategia más técnica. «Necesitaré solamente una



locomotora, una dinamo de esa estación transformadora y unos pocos kilómetros de cable», explica el titán adolescente a una reciente víctima de la banda criminal. Superboy transporta por el aire una gran dinamo eléctrica hasta el vagón de carbón vacío detrás de una locomotora, y comenta: «Esta dinamo dará la corriente que necesito cuando esté acoplada. Ahora a por la bobina» En la viñeta siguiente vemos que emplea «unos pocos segundos para enrollar esos kilómetros de cable» dando vueltas y vueltas alrededor del cuerpo de la locomotora. En la página siguiente (figura 25) asistimos a la recompensa cuando Superboy arranca el motor (probablemente hay bastante carbón para empezar) y anuncia: «Tengo el electroimán más grande que se haya hecho nunca, y uno que puede dar la vuelta al mundo». Las vías del tren pasan adecuadamente no sólo por el centro del pueblo, sino justo al lado de las tanquetas de los vándalos. «¿Qué ha pasado? ¡Estamos volando!», grita uno de los rufianes cuando su tanqueta se dirige a la locomotora magnética. «¡Es esa locomotora!», dice un villano mejor informado. «¡Es un imán que atrae a nuestros tanques!»

Esto es perfectamente correcto desde una perspectiva física. La dinamo es la fuente de la corriente eléctrica que pasa a través de unos cuantos kilómetros de cable alrededor del motor. La corriente en el cable crea un campo magnético que se proyecta desde el centro del bucle de cable. Si un material magnético tal como el motor de una locomotora se coloca en el interior del bucle, potencia el campo magnético generado. Sin embargo, por qué el fuerte campo magnético generado por el electroimán casero de Superboy no hace que se atasquen las ruedas de acero de la locomotora, impidiéndoles por lo tanto girar, permanece en el misterio.

**EL MAGNETISMO Y LA LEY DE FARADAY.** El primero de los verdaderos villanos con los que topó la Patrulla X en el número 1 de *X-Men* es Magneto, el imitante amo del magnetismo, cuyo superpoder consiste en la capacidad para generar y controlar los campos magnéticos. Magneto podía lanzar misiles sobre nuestros héroes y desviar el curso de objetos magnéticos, aunque quedaba indefenso contra un bate de madera de béisbol. De hecho, algunos objetos metálicos son inmunes al poder de Magneto: es capaz de levantar un automóvil con bastante facilidad, pero no una cuchara de plata ni una pulsera de oro. ¿Qué determina el que algunos materiales sean magnéticos, incluso aunque no pase por ellos ninguna corriente, y otros no? ¿De dónde proviene el magnetismo?

La teoría de la relatividad especial puede ser responsable en último término del campo magnético creado por una corriente eléctrica que implica el desplazamiento de cargas eléctricas, pero ¿qué hay de los imanes hechos de hierro? Los imanes que usamos para sujetar las listas de la compra en la puerta de nuestros refrigeradores no parece que tengan partes móviles, y sin embargo crean campos magnéticos. Resulta que la relatividad es también en último término responsable del magnetismo de un trozo de hierro en reposo.

Cada protón, electrón y neutrón del universo tiene un diminuto campo magnético asociado con él. Este campo es escasamente observable comparado con el campo magnético de la Tierra o con los campos creados por corrientes eléctricas. Los electrones que giran alrededor de los núcleos pueden considerarse grosso modo como unos bucles de corriente que generan campos magnéticos. Pero incluso sin este efecto «orbital», queda todavía un campo magnético en el interior de los átomos. ¿De dónde proceden estos minúsculos campos magnéticos intrínsecos de las partículas subatómicas? La respuesta involucra a la mecánica cuántica, de la que trataremos en la siguiente sección.

Un principio de la teoría especial de la relatividad es que el espacio y el tiempo deberían considerarse debidamente como una única entidad, llamada espacio-tiempo. Cuando se hace este ajuste en la ecuación fundamental de la física cuántica, la teoría predice que los electrones deberían tener un campo magnético interno muy pequeño, cuya magnitud está de acuerdo de forma precisa con el valor medido. El campo magnético interno de electrones, protones y neutrones tan sólo se comprende matemáticamente en la versión relativista de la mecánica cuántica, donde el tiempo y el espacio están tratados en pie de igualdad en un «espacio-tiempo» cuatridimensional. Incluso para la materia estacionaria, la relatividad resulta ser imprescindible para entender el magnetismo. Así pues, sin Einstein, no hay relatividad, y en consecuencia no hay magnetismo. Sin magnetismo, no hay hierro magnético, y lo que es más importante, ¡no hay imanes para las puertas de los refrigeradores! Por lo tanto sin relatividad no hay forma de evitar que nuestras listas de la compra se caigan al suelo y allí sean dadas de lado y queden sin leer. En ausencia del descollante logro de Einstein en la física teórica, nos hubiera esperado a todos una lenta y persistente muerte por inanición.

Generalmente, los pequeños campos magnéticos de los electrones en el interior de los átomos

suelen ir emparejados, al igual que cuando se colocan juntos dos imanes se orientan alineándose en polos separados. Cuando los campos magnéticos del interior de un átomo se emparejan, no hay un campo magnético neto asociado con el átomo, del mismo modo que un átomo ordinario no tiene un campo eléctrico neto, porque el número de protones positivos del núcleo está equilibrado por un número igual de electrones cargados negativamente. La mayor parte de los materiales, tales como el papel y el plástico, no son magnéticos, e incluso muchos metales, como la plata y el oro, tienen todos sus momentos magnéticos emparejados<sup>[62]</sup>.

Si la mayor parte de los materiales no tienen campos magnéticos netos debido a que sus momentos magnéticos atómicos están emparejados, entonces ¿cómo es que Magneto puede levitar y hacer levitar a otros, como se muestra en la figura 26? La base física de este truco es que Magneto puede generar un campo magnético tan grande que polariza sustancialmente los campos magnéticos internos de nuestros átomos, convirtiéndonos a nosotros o a cualesquiera otros objetos en imanes.

Antes de empezar esta discusión sobre la levitación magnética, debo insistir antes en que Magneto no eleva a las personas a través de su influencia sobre el hierro de su sangre. Dejemos aparte la cuestión del efecto de una presión homogénea en las venas y arterias del cuerpo de una persona y centrémonos en su lugar en el magnetismo de la sangre. Unos pocos metales, tales como el hierro y el cobalto, tienen la configuración justa de imanes de electrones no emparejados tales que el átomo tiene un campo magnético no nulo. No obstante, el hierro de nuestra sangre está presente principalmente en forma de hemoglobina, una proteína cuya función es la de captar y transportar el oxígeno y el dióxido de carbono cuando respiramos. La hemoglobina es una molécula muy grande que consiste en cuatro grandes proteínas (llamadas *globinas*, y que parecen gusanos plegados) unidas entre sí. Cada una de esas proteínas contiene una gran molécula llamada grupo «heme», compuesta de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y hierro. Los átomos de hierro del centro de cada molécula heme están ligados a sus átomos vecinos. Hay otro término técnico para el átomo de hierro unido a átomos de oxígeno: óxido. Un óxido, como puede confirmar cualquiera que haya tratado con chatarra, es débilmente magnético. La forma común del óxido tiene tres átomos de oxígeno unidos a dos átomos de hierro (llamados *hematíes*) y no es magnético, a pesar de que cuatro átomos de oxígeno unidos a tres átomos de hierro (llamado *magnetita*) es magnético. El campo magnético del hierro en el hematíe desaparece cuando se combina con átomos de oxígeno, porque el hierro y el oxígeno al compartir químicamente sus electrones emparejan los imanes electrónicos no cancelados del hierro. Dependiendo de si la hemoglobina ha captado una molécula de oxígeno extra para llevar a las células, o transporta una molécula de dióxido de carbono para ser exhalada, el hierro puede tener un campo magnético no cancelado o bien ninguno. Pero en un determinado instante solamente una fracción de su sangre es capaz incluso de quedar afectada por un campo magnético externo<sup>[63]</sup>.

Aunque el hierro no está unido químicamente a los átomos de oxígeno, es posible que sea no magnético si todos los átomos individuales no están apropiadamente alineados. Ordinariamente los átomos del interior de una pieza de hierro o de cobalto se alinearán, formando pequeñas regiones llamadas *dominios* en donde todos los campos magnéticos de los átomos de hierro apuntan en la misma dirección. Sin embargo, consideraciones de entropía hacen que los dominios apunten en direcciones diferentes, de modo que sus campos magnéticos combinados se cancelen. Caliente una barra de hierro

de forma que los átomos tengan mucha energía térmica y estén libres para girar, y a continuación colóquelo en un campo magnético intenso. El campo externo obliga a la mayor parte de los dominios a apuntar en la misma dirección, de modo que la pieza de hierro al enfriarse otra vez a la temperatura ambiente tiene un gran campo magnético neto. Si golpea la barra de hierro magnetizado con un martillo o lo calienta en una estufa, provocará que los dominios magnéticos se reorienten al azar, con el efecto de que el imán pierda casi toda su fuerza magnética. Algunos imanes de refrigerador flexibles, del tamaño de una tarjeta de crédito, tienen sus dominios magnéticos alineados en pequeñas tiras a su largo. Más que tener todos sus dominios apuntando en la misma dirección, es más fácil alinearlos de forma que una tira tenga su polo norte apuntando hacia el refrigerador, mientras la tira adyacente tenga su polo norte apuntando hacia fuera de la nevera, y así sucesivamente<sup>[64]</sup>.



**Fig. 26.** Escena del n.º 6 de *X-Men* (arriba) y del n.º 1 de *X-Men* (abajo). Magneto amenaza o escapa del mutante Ángel (el personaje que tiene alas), ilustrando la capacidad de Magneto para hacer levitar objetos no magnéticos tales como una gran roca o a sí mismo, mediante el principio de la levitación diamagnética. © 1963. 1964 Marvel Comics

Los materiales que forman dominios magnéticos con los campos magnéticos de los átomos vecinos apuntando en la misma dirección se denominan *ferromagnéticos* (llamados así por el hierro, el ejemplo más conocido). Muchos átomos de sólidos tienen una interacción magnética muy débil con sus

vecinos, de modo que si se colocan en un intenso campo magnético externo, se alinearán en la dirección del campo pero se desordenarán de nuevo a temperatura ambiente una vez que se retira el campo. Estos materiales tales como la molécula de oxígeno, el óxido nítrico gaseoso y el aluminio, se denominan paramagnéticos. Y hay una tercera clase de materiales en la cual, debido a la naturaleza de las interacciones entre átomos adyacentes y a la ordenación química de los átomos, sus campos magnéticos atómicos (generados por las órbitas electrónicas de los átomos) se alinean opuestamente al campo magnético externo. Si el polo norte del campo magnético externo apunta hacia arriba, el polo norte del imán atómico gira para apuntar hacia abajo. Estos materiales se llaman diamagnéticos, y anulan cualquier campo magnético externo. Las moléculas de agua son diamagnéticas y, dado que estamos compuestos principalmente de agua, también lo somos nosotros.

Gracias a nuestro diamagnetismo, Magneto es capaz de levitar y de hacer que lo hagan otros como se muestra en la figura 26. En campos magnéticos de intensidad moderada, los átomos de su cuerpo no son susceptibles de polarizarse. La interacción diamagnética es débil, de forma que a temperatura ambiente las vibraciones normales de los átomos sobrepasan el intento de alinearlos magnéticamente. En un campo muy intenso, de unas 200.000 veces más grande que el campo magnético de la Tierra (y unas cien veces mayor que el campo del imán de un refrigerador), los átomos diamagnéticos de su cuerpo pueden ser inducidos para que apunten todos en el mismo sentido, opuesto al del campo aplicado. Así como dos imanes se repelen si se acercan entre sí de modo que se enfrenten por su polo norte, la persona ahora polarizada magnéticamente será repelida por el campo magnético externo que crea Magneto —el campo real que alineó los átomos magnéticamente en primer lugar—. A medida que Magneto aumenta el campo magnético que genera, la repulsión magnética puede volverse lo bastante grande como para contrarrestar el empuje hacia abajo de la gravedad. Es decir, la fuerza hacia arriba de la repulsión magnética puede ser igual o mayor que la fuerza hacia abajo del peso de la persona, y el resultado es una fuerza neta hacia arriba sobre la persona, elevándola del suelo. El conseguir esto conlleva un campo magnético muy grande, y cuanto más pesada es la persona, mayor es el esfuerzo. Pero puede hacerse, y el High Field Magnetic Laboratory de la Universidad de Nijmegen en Holanda tiene imágenes y vídeos en su sitio web de ranas, saltamontes, tomates y fresas flotando, demostrando la realidad de la levitación diamagnética.

Si una corriente eléctrica genera un campo magnético, entonces ¿podría un campo magnético en movimiento inducir una corriente en un cable cercano? La respuesta, como cualquiera que haya leído los cómics de la Patrulla X debería saber, es afirmativa. En batallas anteriores con la Patrulla X, y ocasionalmente con endebles humanos, Magneto empleó su talento mutante para transformar un objeto de metal en un arma ofensiva o en una pantalla protectora. El poder de Magneto es más efectivo en metales que ya están magnetizados. Sólo existen tres elementos (el hierro, el cobalto y el níquel) que son magnéticos a temperatura ambiente. Magneto puede manipular una viga de acero para darle cualquier forma que desea gracias al hierro que contiene, pero su poder sería limitado con un colgante de oro, a menos que desee emplear un esfuerzo tremendo para polarizar el material usualmente diamagnético. Pero el poder real de Magneto no reside tanto en su capacidad para ejercer fuerzas sobre otros materiales como en su control sobre las corrientes eléctricas.

Así, por ejemplo, el amo mutante del magnetismo construyó una vez un panel de control

computerizado que automatizaba los campos reductores de poder que impedían a la Patrulla X interferir con su plan de conquista mutante de la humanidad. Para evitar que la Patrulla X desactivara el dispositivo, Magneto lo configuró de forma que no tuviera botones ni controles que permitieran reprogramarlo. Magneto controla el panel alterando las corrientes eléctricas que fluyen a través de los circuitos, afectándolos mediante los campos magnéticos que crea. Para mayor abundamiento, variando el campo magnético sobre el panel de control, Magneto podía hacer que se originaran corrientes.

¿Cómo podría un campo magnético variable crear una corriente eléctrica? La pregunta nos retrotrae al punto en que iniciamos nuestra discusión sobre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos: el movimiento relativo.

Al igual que un imán puede atraer o repeler a otro segundo imán que se le aproxime, un campo magnético externo puede ejercer una fuerza sobre una corriente eléctrica. Como se describió en el capítulo anterior, cargas eléctricas en movimiento generan un campo magnético que puede atraer o repeler otros campos eléctricos, ya estén creados por otra corriente eléctrica o por un imán de refrigerador. Cuando las cargas no se mueven, pero están en un cable colocado en un campo magnético externo, no se ejercerá fuerza sobre ellas<sup>[65]</sup>. Pero ¿qué ocurre si la barra imantada externa se mueve, mientras las cargas permanecen en reposo en el cable? Supongamos que el imán se mueve hacia el cable. Desde el punto de vista del imán, él no se mueve en absoluto, sino que es el cable el que se está moviendo hacia él.

El magnetismo es, en esencia, una cuestión de movimiento relativo. Si usted fuera un pasajero con los ojos vendados en un automóvil que se mueve a velocidad constante en línea recta, ¿cómo podría demostrar que cuando ha llegado a su destino lo que se ha movido es el coche y no el escenario? Si usted cambia su velocidad o su dirección entonces experimentará una fuerza asociada con la aceleración, y esto le dará una indicación de que es usted el que se mueve. Pero en un movimiento uniforme usted no puede demostrar realmente si es usted o bien todo lo demás lo que está en movimiento. Todo lo que puede asegurar es que usted se está moviendo relativamente a su entorno.

De forma similar, cuando un imán se mueve hacia un cable, desde el punto de vista del imán éste se halla estacionario y son las cargas (tanto los electrones móviles como los iones fijos cargados positivamente) del cable las que se mueven hacia él. Pero cargas eléctricas en movimiento crean un campo magnético que interacciona con el campo del imán. Así pues, al mover un imán cerca de un cable, el imán ve dos corrientes eléctricas de iones positivos y electrones cargados negativamente. Se ejerce una fuerza sobre las cargas del cable y los electrones se mueven libremente en respuesta a esta fuerza. De este modo Magneto es capaz de afectar la dirección de las corrientes eléctricas en cualquier dispositivo a voluntad, aunque la precisión con la que puede guiarlas depende de la precisión con la que pueda manipular esos campos magnéticos.

Si el movimiento relativo es el único factor que importa al considerar si un campo magnético afecta a las cargas eléctricas, entonces ¿qué puede decirse de una situación en la cual el imán está en reposo, pero el cable se mueve hacia el mismo? ¿Generaría eso una fuerza sobre las cargas?

A esto la física responde «¿por qué no?». Si empujo un cable a través del espacio, los electrones del mismo se están moviendo, al igual que si sujeto el cable en reposo y aplico un voltaje entre sus extremos. En cualquier caso los electrones se mueven a cierta velocidad. Con respecto al imán, es como si hubiera una corriente eléctrica fluyendo junto al mismo, y sabemos cómo interaccionan las corrientes y los imanes. En esta situación se aplicará una fuerza sobre las cargas en el cable en movimiento que las impulsarán a moverse. Arrastrando el cable a través del campo magnético externo, convertimos la energía física implicada en el movimiento del cable en una forma de energía manifestada por la corriente eléctrica. Para el caso de una espira de cable, no importa si el imán se impulsa a través del bucle o es el bucle el que se mueve con respecto al imán. Mientras exista un movimiento relativo entre las cargas del cable y la magnitud del campo magnético que atraviesa el aro, se inducirá una corriente, incluso sin un voltaje externo. Este mecanismo puede parecer poco lógico, pero de hecho es como se genera la electricidad que llega a su casa.

Una estación de energía eléctrica, como la que emplea Electro para cargarse para una noche de delitos, opera sobre el principio de que si un campo magnético que pasa a través del plano de una espira de cable cambia, se induce una corriente en el cable. Se trata de la conocida ley de Faraday, llamada así en honor de Michael Faraday. La dirección de esta corriente inducida es tal que crea un campo magnético que se opone al campo magnético externo variable. Esto es una consecuencia de la conservación de la energía, como explicaremos en un instante. En ciertas circunstancias esta corriente se denomina *corriente circular*, pero tiene lugar siempre que el campo magnético que pasa a través de una espira aumenta o disminuye.

Imagine un gran imán doblado en forma de un anillo partido, de forma que el polo norte se enfrente al polo sur, con una espira sostenida en el hueco abierto entre los polos norte y sur. Inicialmente el plano de la espira forma un ángulo recto con los polos magnéticos, de forma que el campo magnético pasa a través de la espira. Si ahora se gira la espira 90 grados, el plano de la misma se retira de los polos, de modo que la cantidad de campo magnético que pasa la espira es muy pequeño. Otra vuelta de ángulo recto y ahora la bobina vuelve a enfrentarse a los polos y el campo magnético que la atraviesa es otra vez grande. Un cuarto de rotación más y el campo a través de la bobina es mínimo nuevamente, y así en adelante. Por cada cambio en el campo magnético que pasa a través de la bobina, tanto si hay un aumento como un descenso, se induce una corriente. El sentido de la corriente inducida cambia de atrás a adelante a medida que la bobina va rotando. Hay trucos para convertir una corriente alterna (conocida como CA) en una corriente continua (conocida como CC). Hay muchas razones prácticas, en las que no entraremos, para utilizar la CA para nuestras necesidades eléctricas. Las bobinas están hechas para girar 50 veces por segundo, que es por lo que en Europa la potencia CA tiene una frecuencia de 50 Hz (Hz es una abreviatura de la unidad de frecuencia «Hertz» y mide el número de ciclos o giros por segundo), mientras que en Estados Unidos la frecuencia de la CA es de 60 Hz.

Cuando cambia el campo magnético que pasa a través de bobinas giratorias fluye una corriente. Desde el punto de vista de la conservación de la energía, nos damos cuenta de que se necesita energía para hacer girar la bobina con el fin de que se origine una corriente eléctrica antes no existente. En el número 1 de *The Dark Knight Strikes Again* (*El caballero negro ataca de nuevo*) que presenta la visión



futurista de Frank Miller del universo DC según la cual los superhéroes están obligados al vasallaje y Lex Luthor gobierna el país, la electricidad suministrada a un tercio de una gran ciudad era generada obligando a Flash a mover continuamente una especie de rueda de molino. Recordemos del capítulo 11 que Flash se las había arreglado para hallar una forma de eludir el principio de la conservación de la energía mediante su capacidad para golpear una «fuerza de velocidad», de modo que en la visión de Luthor podría también obtener un beneficio económico de esta suspensión de las reglas de la física. En nuestro mundo, en el que todavía hemos de hallar una única excepción al principio de la conservación de la energía, la energía que hace girar las turbinas y genera electricidad proviene del mismo proceso que utilizamos para preparar el té.

Todas las plantas comerciales de energía generan electricidad haciendo hervir el agua. El vapor resultante hace girar una turbina (un término elegante para un molinillo) al cual están conectadas las espiras de cable de los potentes imanes. Para hervir el agua se tiene que quemar carbón, petróleo, gas natural o basura (o biomasa, que suena mejor). Alternativamente, el exceso de calor generado por una reacción nuclear puede hacer hervir el agua y hacer girar la turbina. Pero todo ello tiene por finalidad crear vapor para hacer girar una turbina conectada a una bobina entre los polos de un imán. La energía química almacenada en el carbón, petróleo o basura tiene el mismo origen que la energía química del alimento que comemos, es decir la fotosíntesis de las plantas. La luz solar es un subproducto de la reacción de fusión nuclear que tiene lugar en el núcleo del Sol (así pues, todas las plantas de energía eléctrica podrían contemplarse como plantas nucleares o plantas solares, dependiendo de su inclinación política).

El giro de los molinos de viento resulta de las diferencias de temperatura en la atmósfera, que provienen de las variaciones espaciales de la luz solar absorbida por la atmósfera o desviada por las cubiertas de nubes. Obviamente, las células solares (a tratar en la sección tres) necesitan de la luz solar para funcionar. De modo parecido, la potencia hidráulica, en la cual la energía potencial del agua en una presa o cascada se convierte en energía cinética en una turbina, requiere evaporación por el sol seguida de condensación para restaurar la gran diferencia de nivel con el agua. Aparte del control de las mareas y de la potencia geotérmica, en la cual el calor interno de la Tierra se utiliza para evaporar agua, todos los demás mecanismos que generan electricidad comportan la conversión de energía solar a otra forma de energía. Claramente, sin luz solar, ninguno de nosotros estaría aquí. Quizás los guionistas de Superman perseguían algo cuando cambiaron la fuente de los poderes de Kal-El de la excesiva gravedad de Krypton a la luz de nuestro Sol.

**ELECTROMAGNETISMO Y LUZ.** Puede que a mediados del siglo XIX la frontera americana en expansión no hubiera visto muchos luchadores contra el crimen disfrazados, pero no había escasez de héroes que quisieran pelear por la verdad, la justicia y el estilo de vida del Oeste. Cosa buena, ciertamente, ya que la popularidad de los cómics del oeste experimentaron un auge vertiginoso en la década de los años cincuenta del siglo XX, ayudando a la solvencia de los editores de cómics durante el desplome de los superhéroes precipitado por la campaña lanzada por la *Seducción del inocente* del Dr. Wertham. *All-American Comics*, que presentaba las aventuras de Linterna Verde y la Justice Society of America, se convirtió en *All-American Western*, protagonizada por el «llanero luchador» Johnny Thunder (maestro de escuela durante el día, pistolero de noche) y All-Star Comics se convirtió en *All-Star Western* con los Trigger Twins. En el mundo de DC, el rebelde solitario Jonah Hex, lleno de cicatrices (físicas y psicológicas) recorría el oeste de Estados Unidos enderezando entuertos y protegiendo viudas. De modo semejante, Bat Lash y el Vigilante administraban la justicia... bueno, por su mano. En el universo Marvel, los cómics del oeste eran cosa de muchachos, con el Chico Two-Gun, el Chico Colt, Chico Ringo y Chico Rawhide, procediendo en esencia del mismo modo, yendo de pueblo en pueblo (aunque raramente se encontraban entre sí) enfrentándose a buscavidas y ladrones de diligencias. Mientras los representantes de la ley de mediados del siglo XIX fueron limpiando el Salvaje Oeste, tanto en nuestro mundo real como en el de los cómics, los físicos elucidaban las propiedades de la electricidad y el magnetismo, sentando los cimientos de nuestro estilo de vida inalámbrico.

En 1862, el físico escocés James Clerk Maxwell, mientras se agravaba la guerra civil, dio un monumental salto teórico relacionando la electricidad y el magnetismo y entró triunfalmente en una era de avance científico. Las ecuaciones halladas por Coulomb, Gauss, Ampère y Faraday se conocen ahora con el título genérico de «ecuaciones de Maxwell», ya que éste reconoció cómo se combinaban para predecir y proporcionar una comprensión fundamental de la radiación electromagnética. Ninguno de esos científicos hubiera protagonizado su propio cómic, pero sin ellos seguiríamos leyendo a la luz de las velas.

Para comprender cómo funciona una tostadora o una bombilla eléctrica, recuerde la analogía del agua que antes invocamos para explicar las corrientes eléctricas: la presión del agua del grifo era el análogo de un voltaje eléctrico, mientras que la cantidad de agua por unidad de tiempo fluyendo a través de una manguera representaba la corriente eléctrica. Para indicar que la manguera no era perfecta y que había que aplicar continuamente una presión finita para mantener un flujo constante a través de ella, sugeríamos que la manguera tenía regiones parcialmente bloqueadas así como pequeños boquetes a lo largo de su extensión, a través de los cuales podía escapar el agua y dejar de participar en el flujo principal de corriente. Alternativamente, para una presión de agua fija, cuanto mayor es la resistencia, menor es la corriente. Estos principios de sentido común se pueden combinar en una sencilla ecuación:

## VOLTAJE = CORRIENTE X RESISTENCIA

Se la conoce como ley de Ohm, por Georg Ohm, otro científico pionero de los primeros tiempos del electromagnetismo, en honor del cual recibe su nombre la unidad básica de resistencia. Cuanto más larga y delgada sea la manguera, y más obstrucciones y agujeros tenga a lo largo de su recorrido, mayor es la resistencia del flujo de corriente. Una gran presión en uno de los extremos de una manguera larga y estrecha corresponderá en el otro extremo a un escaso goteo, a una distancia de varios kilómetros del grifo. Es por esto que son gruesos y cortos sus cables de puente, para que la corriente suministrada por una batería no se degrade en el intervalo que tarda en llegar a la segunda batería.

Los agujeros en la manguera representan pérdida de energía, y explican, en nuestra analogía con el agua, por qué una presión uniforme (fuerza) produce una corriente constante de agua, y no una corriente que se acelera como indicaría la segunda ley de Newton. Los cables de cobre no tienen como es obvio agujeros a través de los cuales puedan escaparse los electrones, pero ofrecen resistencia. En un extremo del cable los electrones experimentan una gran fuerza debido al voltaje acelerador. Por lo tanto tienen una gran energía potencial. Al fluir a lo largo del cable, su energía potencial se convierte en cinética. Cuanto mayor es su energía cinética, más rápidamente se moverán los electrones por el cable, y mayor es la corriente.

Las imperfecciones o impurezas del cable son un impedimento para la velocidad, y los electrones que se mueven rápidamente chocan con estos defectos, transfiriéndoles parte de la energía y haciendo que los átomos vibren, que es la causa por la que se calientan los cables. Para un voltaje dado, la corriente resultante está determinada por el balance entre la energía cinética ganada por los electrones debido al voltaje aplicado y a la energía transferida a las imperfecciones. Estas imperfecciones son impurezas o átomos que están fuera del alineamiento cristalino del resto de la red. Como tales, tienen su propia nube de electrones a su alrededor, al igual que los otros átomos del cable. Cuando esas imperfecciones se agitan tras las colisiones con la corriente eléctrica, sus cargas eléctricas oscilan. Considere una variación del péndulo oscilante del capítulo 9, en el cual la masa sujeta a un delgado resorte lleva ahora también una carga eléctrica. A medida que la masa cargada se desplaza hacia delante y atrás es una corriente eléctrica, pero una para la cual cambia continuamente la velocidad de la carga. De esta forma genera un campo magnético que también cambia en magnitud. Sin embargo, un campo magnético cambiante induce una corriente eléctrica. La carga oscilante generará continuamente por lo tanto un campo eléctrico variable en fase con un campo magnético cambiante, radiando al espacio. Cuanto más rápidamente oscile la masa cargada mayor será la frecuencia de las oscilaciones eléctricas y magnéticas creadas. Puesto que las ondas eléctricas y magnéticas tienen energía, el péndulo oscilante cargado se irá frenando, aunque no haya resistencia del aire. Hay un nombre especial para los campos eléctricos y magnéticos oscilantes creados por el movimiento armónico del péndulo cargado: se llama luz.

### **Por qué las lentes de rayos X anunciadas en los cómics son una estafa total**

Los átomos oscilantes de impureza en un cable que transporta una corriente dan lugar a campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Cuanto más rápidamente oscilan los electrones de las imperfecciones

del cable, mayor es la frecuencia de las ondas electromagnéticas generadas. A temperatura ambiente, todos los átomos (y sus electrones) del cable vibran a un ritmo de aproximadamente mil millones de ciclos por segundo. En consecuencia, cualquier objeto a temperatura ambiente emite ondas electromagnéticas de una frecuencia de mil millones de ciclos por segundo. Las ondas electromagnéticas con esta frecuencia de vibración se llaman radiación infrarroja. Cuanto mayor es la temperatura, más deprisa baten los átomos del objeto, y mayor es la frecuencia de la radiación emitida.

Dependiendo de lo rápidamente que se agitan las cargas de los átomos, es decir, de cuántas veces por segundo se mueve adelante y atrás, las ondas pueden tener una longitud de onda (la medida de la distancia entre picos de la onda) desde algunos metros hasta el diámetro de un núcleo atómico. En el primer caso, a esas ondas electromagnéticas las llamamos *ondas de radio* (con una frecuencia de alrededor de un millón de ciclos por segundo) y en el segundo caso las ondas ultracortas reciben el nombre de *rayos gamma* (con una frecuencia de más de mil billones de ciclos por segundo). Los rayos gamma tienen más energía y pueden por lo tanto dañar más a una persona que las ondas de radio, como se refleja en el hecho de que nadie ha ganado nunca superpoderes al estar en las proximidades de una antena de radio de FM. Pero en esencia ambos son el mismo fenómeno. Para que los átomos de un cable, tal como el delgado filamento del interior de una bombilla, emitan ondas electromagnéticas que nuestros ojos puedan detectar, lo que llamamos luz visible, los átomos han de agitarse oscilando unos mil trillones de veces por segundo.

Estamos finalmente capacitados para entender por qué brilla el Sol. Como se mencionó en el capítulo 2, la intensa presión gravitatoria en el centro del Sol significa que los protones (núcleos de hidrógeno) choquen con frecuencia de forma que algunos se funden entre sí para formar núcleos de helio. La masa de un núcleo de helio es ligeramente menor que la de los dos protones y dos neutrones por separado, y el déficit de masa corresponde a una gran liberación de energía, según la expresión de Einstein  $E = mc^2$ . Esta energía emitida equilibra la atracción gravitatoria hacia el interior, y el Sol se mantiene relativamente estable a medida que quema su combustible (y cada segundo se quema mucho combustible, 600 millones de toneladas de hidrógeno). Parte de la energía resultante de esta reacción de fusión tiene la forma de energía cinética, y los núcleos de helio cargados que se mueven rápidamente emiten radiación electromagnética al acelerarse. La aceleración es la razón de cambio de la velocidad, y así cada vez que los núcleos de helio aumentan su velocidad, frenan o bien cambian de dirección al chocar con otros núcleos del denso núcleo estelar, emiten luz. Resulta que la luz que vemos procedente del sol es muy antigua, al abrirse camino lentamente desde el centro del Sol hasta la superficie. Es difícil ver algo en una noche nublada porque la densa atmósfera saturada de agua dispersa la luz en todas las direcciones. La densidad es mayor en el interior de nuestro Sol, y la luz generada por una reacción nuclear tarda un promedio de 40.000 años antes de que pueda difundirse desde el núcleo hasta la superficie solar.

Nuestros ojos pueden ver la luz visible porque la mayor parte de la luz del Sol que atraviesa la atmósfera está en esta porción del espectro electromagnético. Cuando evolucionaron las criaturas sin ojos hasta dotarse de visión, los ojos que desarrollaron eran especialmente sensibles al tipo de ondas electromagnéticas más predominantes. Hay menos rayos X emitidos por el Sol que nos alcanzan, en comparación con la luz de la porción «visible» del espectro. En consecuencia, si nuestros ojos se

hubieran sintonizado solamente a los rayos X, viviríamos en un mundo de oscuridad casi total. Aquellas criaturas que viven en oscuridad total, tales como las que habitan las profundidades del océano en las que no penetra la luz solar, no desperdician recursos genéticos en ojos superfluos ni en pigmentación de la piel, sino que se apoyan en otros sentidos para navegar en su mundo.

Volviendo a la Edad de Plata de los cómics, vendedores sin escrúpulos, sacando partido de los intereses lascivos de los lectores de cómics, vendían «gafas de rayos X» que prometían al usuario la posibilidad de ver a través de objetos sólidos tales como la ropa. Si bien esas lentes de rayos X empleaban un principio similar a las gafas de «visión nocturna», que convierten la radiación infrarroja en luz visible, (más sobre ello en la sección tres) no hay suficientes rayos X fuera del despacho de un dentista como para convertirlos en un producto útil. Así que trate de mantener su dinero alejado de esas empresas.

Los animales que son principalmente nocturnos dedican la mayor parte de sus receptores ópticos a los bastoncillos de alta sensibilidad, sacrificando la visión de los colores que tienen menos conos, a fin de detectar las pocas ondas electromagnéticas presentes. Pero cualquier animal o persona que desarrollara una «visión de rayos X» pasaría la mayor parte de su tiempo tropezando con objetos, y ello sería una clara desventaja evolucionista. Cuantos más electrones tiene un átomo, más intensamente dispersa los rayos X. Esto explica por qué los rayos X pueden penetrar a través del tejido blando (que en su mayor parte es agua) hasta reflejarse en los huesos mucho más densos. Probablemente Superman es capaz de emitir rayos X a partir de sus ojos, que penetran a través de materia de baja absorción antes de reflejarse y ser detectados por el Hombre de acero. Los que no son de Krypton solamente pueden ver la luz de una fuente externa reflejada por un objeto en dirección a nuestros ojos. Al cuerpo humano le supone un gasto de energía y de materia prima el desarrollar células del nervio óptico sensibles a luz de baja longitud de onda, de modo que hay poco interés en el desarrollo de una capacidad para detectar los ocasionales rayos X.

### **Seguro que está pensando en que debería tener un casco de papel de aluminio**

El jefe del equipo mutante de superhéroes conocido como la Patrulla X es el telépata en silla de ruedas Charles Xavier, conocido también como Profesor X. Aunque su destrozada espina dorsal le haya dejado incapaz de caminar, era un formidable general para su equipo de mutantes «buenos» gracias a su capacidad para leer y proyectar sus pensamientos en las mentes de otros. La base física de la telepatía del Profesor X (y la de su protegida Jean Grey, así como la de Saturn Girl de la Legión de Superhéroes, de hecho) es que las corrientes eléctricas variables en el tiempo pueden crear ondas electromagnéticas detectables por alguien suprasensible.

Todas las células de nuestro cuerpo tienen una función. Las células de los músculos existen para generar una fuerza, tanto si se trata de la flexión del bíceps como del bombeo del corazón. Las células del hígado filtran las impurezas de la sangre, mientras que las del estómago y del intestino las sitúan ahí en primer lugar. El papel de las células nerviosas o neuronas es el proceso de la información. Una forma de efectuar esto es transmitiendo y alterando corrientes eléctricas. Los objetos cargados que se mueven de una neurona a otra no son electrones, sino átomos de calcio, sodio o potasio que o bien han

perdido uno o más de sus electrones o bien han adquirido electrones extra (tales átomos cargados se llaman *iones*). Una acumulación de iones en una región del cerebro crea un campo eléctrico que a su vez obliga a otros iones de otras neuronas a moverse. Los iones en movimiento constituyen una corriente que genera un campo magnético. Experimentos de neurocientíficos que utilizan electrodos sensibles colocados en el interior del cerebro pueden detectar los campos eléctricos generados por el movimiento de dichos iones, que normalmente varían al azar en el tiempo. En función de donde se localice el electrodo en el cerebro y de la tarea que éste esté realizando, los campos eléctricos registrados adoptarán una forma de onda coherente, oscilando según diversos ciclos periódicos antes de volver abruptamente al fondo azaroso. Los neurocientíficos están iniciando la difícil tarea de identificar las variaciones de voltaje y determinar su significado (si es que hay alguno) en relación con tareas de comportamiento. La mente humana, con toda su vasta complejidad, está construida a partir de tales sencillos elementos.

Aunque los científicos están muy lejos de entender cómo, de ser así, las corrientes eléctricas del cerebro conducen a la consciencia, hay un aspecto de las corrientes neuronales en el que podemos confiar: el que las cargas eléctricas en movimiento generan campos magnéticos. A su vez, debido a que las corrientes iónicas del cerebro están cambiando continuamente de dirección y de magnitud, los correspondientes campos magnéticos varían con el tiempo y crean a su vez corrientes eléctricas. El efecto neto es que a partir del cerebro radian ondas magnéticas de muy baja frecuencia siempre que tiene lugar una actividad eléctrica. Las longitudes de onda, las amplitudes y las fases de esas ondas electromagnéticas están determinadas por las corrientes iónicas dependientes del tiempo a partir de las cuales se originan. La amplitud de esas ondas es extremadamente débil, pues su potencia es de más de mil millones de veces menor que el fondo de ondas de radio que nos rodea en todo momento (ordinariamente, el hecho de que vivamos en un mar de señales de radio es ignorado, hasta que uno enciende un receptor de radio y no puede sintonizar claramente una estación particular). Pero las ondas electromagnéticas creadas por las corrientes cerebrales existen, aunque su intensidad sea demasiado débil para ser observada a menos que el sensor esté colocado directamente sobre la cabeza de la persona. En el caso de ciertos poderosos mutantes tales como el Profesor X, o residentes de la luna Titan del siglo XXX (Saturn Girl) su excepción milagrosa implica cerebros lo bastante sensibles como para detectar las ondas electromagnéticas generadas por los pensamientos de otros. Naturalmente, si usted está usando un casco de metal (una precaución adoptada por el diabólico hermanastro de Xavier, Juggernaut; Magneto y otros precavidos enemigos de la Patrulla X) entonces su cabeza estará blindada de forma que las ondas electromagnéticas salientes (y cualesquiera entrantes) resultan apantalladas.

Una piedra lanzada a un estanque crea una serie de ondulaciones que se vuelven más débiles a medida que se alejan del punto de caída. Las moléculas de agua tienen una gran cantidad de energía cinética, impartida por la piedra que cae. Pero cuando las ondulaciones se hacen más extensas, la cantidad de energía de las moléculas de agua se reparte a lo largo de las circunferencias crecientes. La energía cinética de las moléculas de agua por unidad de longitud del borde del anillo se diluye a medida que el agua se propaga hacia fuera, de forma que para una piedra lanzada en medio del océano Pacífico en la costa de California no se produce ningún cambio perceptible. Del mismo modo se produce una disminución de la intensidad de las ondas electromagnéticas cuanto más se aleja uno de

su origen. El hecho de que la intensidad de las ondas electromagnéticas decrezca con la distancia al origen de las mismas explica por qué, cuando el Profesor X necesita localizar a un mutante particularmente alejado, utiliza un amplificador electrónico de sus poderes mentales llamado Cerebro. Presentado por primera vez en el número 7 de *X-Men* como un mutante automatizado detector de ondas cerebrales, fue adaptado en siguientes ejemplares para aumentar la sensibilidad de los poderes telepáticos del Profesor X. El reconocimiento de que a fin de detectar una señal electromagnética distante uno debería utilizar un amplificador externo es consistente con el mecanismo físico que fundamenta el poder mutante del Profesor X. Es también por esto por lo que las estaciones de radio y de televisión utilizan megavatios de potencia para transmitir sus señales. Un vatio es una unidad de potencia, definida como la energía (en julios o en  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$ ) por segundo, y un megavatio es un millón de vatios. Cuanto mayor es la potencia con la que puede emitir una estación de radio, mayor será la intensidad de las ondas electromagnéticas que alcanzan una antena remota, y mayor será la señal recibida por el receptor de radio. Las estaciones de radio comerciales generan sus señales merced a cambios oscilantes en una antena grande. Su receptor de radio o de televisión no emplea la tecnología de Cerebro para amplificar la señal distante, sino que utiliza transistores para esta función, de los que nos ocuparemos en detalle en el capítulo 23.

La detección de ondas electromagnéticas creadas por los pensamientos de alguien es una cosa, pero ¿podemos invertir el proceso para determinar las corrientes neuronales que las generaron, es decir podemos realmente leer e interpretar los pensamientos de otra persona? Sí, el profesor X y Saturn Girl probablemente lo hacen del mismo modo que funciona la «televisión invertida». Déjeme explicarle cómo funcionaría esto.

Las señales de televisión consisten en ondas electromagnéticas enviadas por un transmisor potente que, luego de tropezar con la antena del tejado, hace que las cargas oscilen con una frecuencia y amplitud característica de la señal incidente. La información codificada en la onda electromagnética se envía entonces al televisor. El corazón del conjunto es el tubo de imagen que consiste en una gran superficie de vidrio en el cual se ha evaporado un material fosforescente que emite un breve destello de luz cuando es golpeado por un electrón energético. Esta cara de vidrio es uno de los lados de una caja de vidrio de forma irregular. En el extremo estrecho de la caja hay un cable, calentado por una corriente eléctrica de modo que los electrones son expulsados del mismo. Estos electrones, ahora libres, se dirigen, mediante placas «guía» metálicas a voltajes convenientes, hacia el otro extremo del tubo de imagen, es decir hacia el extremo que tiene la gran superficie recubierta de material fosforescente. Eligiendo el voltaje correcto en las placas metálicas de guía, los electrones pueden dirigirse para que choquen en una región específica de la pantalla. El interior del tubo del televisor está al vacío, para reducir así el número de moléculas vagabundas de aire que podrían provocar desviaciones no deseadas del haz electrónico. Mí donde el haz choca con la pantalla, depositando su energía cinética en el material fosforescente, provoca que se emita un destello de luz. Los voltajes aplicados a las placas de guía se ajustan a continuación, y el haz de electrones se dirige ahora a otra posición de la pantalla, iluminando otro fósforo o dejándolo oscuro si el haz se ha detenido. Este proceso sigue hasta que el haz de electrones se ha desplazado a través de toda la pantalla. Una serie determinada de regiones iluminadas y oscuras a través de la pantalla proporciona una imagen en la cara delantera del televisor.

Al cambiar ligeramente la imagen proyectada sobre la pantalla se puede producir la ilusión de movimiento. Una emisión de radio simultánea con la transmisión de las señales luminosas proporciona el sonido. Si en el punto en que incide el haz de electrones se utilizan tres fósforos distintos o filtros emitiendo luz roja, verde y azul, entonces mediante ligeros ajustes de la cuantía en que debe iluminarse cada filtro en cada posición se tendrá como resultado una imagen en color. La física básica que es el fundamento de la televisión es que la información codificada en la onda electromagnética contiene un conjunto de instrucciones sobre la magnitud y la duración de los voltajes a aplicar a las placas guía.

El haz de electrones variable en el tubo de imagen produce a su vez su propio conjunto de ondas electromagnéticas, diferente de las ondas recibidas por la antena, pero relacionadas con la imagen del televisor. Una antena sensible situada cerca de este monitor podría detectar esas ondas electromagnéticas y, con el software apropiado, reconstruir la imagen que la corriente electrónica trata de crear. Este «televisor inverso» es una forma muy ineficaz de tener dos aparatos mostrando la misma imagen, pero sería un método mediante el cual una persona podría leer la información proyectada sobre el monitor de un ordenador sin intervenir directamente en el mismo. O por el cual enviar información de un cerebro a otro.

¿Qué hay del Profesor X utilizando el poder de su mente de imitante para controlar las acciones de otros? Experimentos recientes sugieren que esta situación podría no ser tan improbable. Se ha demostrado que no solamente podemos detectar los débiles campos magnéticos creados por las corrientes iónicas del cerebro sino que también es posible el proceso inverso. Los neurocientíficos han desarrollado una herramienta de investigación llamada *Estimulación Magnética Transcranial (EMT)*<sup>[66]</sup>. En este procedimiento se aplica a la cabeza de un sujeto de prueba un campo magnético variable al azar, proporcionando estimulación eléctrica a regiones seleccionadas del córtex cerebral. El tiempo de reacción del sujeto y su capacidad para iniciar un movimiento voluntario de la mano son estorbados por la aplicación del campo magnético externo.

La capacidad para controlar las acciones de otro, utilizando solamente el poder de la mente, no está limitada a los mutantes y a los héroes del siglo XXX de la luna Titán de Saturno. De hecho, he llegado a conocer una demostración de tales asombrosos poderes mentales. Mis clases inducen con frecuencia en mis estudiantes a salir de estampida del aula o a caer en un profundo amodorramiento.



## 20. Viaje al microuniverso

**FÍSICA ATÓMICA.** Los lectores de cómics esperan, de manera bastante razonable, que el héroe triunfará al final de la historia. Lo divertido, así pues, está en los desafíos que hay que superar a medida que la historieta mensual se acerca a su término. Una característica a destacar es que cuanto mejor es el supervillano mejor es la historia, lo que es probablemente una razón por la cual *Los Cuatro Fantásticos* fueron tan populares a inicios de los sesenta. Es cierto que el diseño gráfico de Jack Kirby era un factor relevante, así como la trama y la descripción de los personajes del intrépido cuarteto, obra de Stan Lee. Pero si un superhéroe sólo es tan bueno como su némesis, entonces los Cuatro Fantásticos alcanzaron su esplendor en el ejemplar número 5 (julio de 1962) cuando se convirtieron en los «prisioneros del Doctor Muerte».

Victor von Doom era un genio científico, sólo aventajado por Reed Richards, el jefe de los Cuatro Fantásticos. Richards y Von Doom asistieron a la misma escuela, formándose ambos en estudios de ciencia (en el mundo de los cómics, las instituciones de más nivel compiten por alumnos estudiosos al estilo de como en nuestro mundo real las universidades lo hacen por los atletas). Von Domm fue expulsado cuando uno de sus experimentos científicos «prohibidos» salió desastrosamente mal, reventando el laboratorio y dejando cicatrices en su cara. Ocultando su desfiguración tras una máscara metálica, diseñó un traje blindado de alta tecnología que rivalizaba con el de Iron Man y comenzó una larga cruzada de conquista del mundo como Doctor Muerte. Naturalmente, al no haber acabado su graduación, Von Doom no es realmente un doctor, y éste es muy probablemente su resentimiento con respecto a su estatus A. B. D.<sup>[67]</sup>, junto con su deseo de humillar a Reed Richards, objeto de sus ambiciones diabólicas. A diferencia de los villanos de los cómics DC de los sesenta, que siempre acababan detenidos y entregados a la policía al final del relato, los Cuatro Fantásticos nunca parecían capaces de acabar el combate con el Doctor Muerte más allá de un empate. Naturalmente, puesto que además era el dictador de la pequeña nación europea de Latveria, nunca quedaba demasiado claro cuáles eran las autoridades a las que se podía entregar un jefe de estado.

Para mayor abundamiento, su orgullo era tan grande que prefería enfrentarse a una muerte casi cierta que a la cárcel. En consecuencia, una típica contienda con el Doctor Muerte finalizaría con éste perdido en el espacio, abandonado a su suerte en otra dimensión o atrapado en el tiempo, destinos todos ellos proyectados por él para los Cuatro Fantásticos. En el clímax del apropiadamente titulado «El regreso del Doctor Muerte» del número 10 de *Los Cuatro Fantásticos*, Doom fue alcanzado por un

rayo reductor que había planificado utilizar contra los Cuatro Fantásticos. La historia terminó con Doom reducido a la nada, pero esto no sería lo último que veríamos del supervillano. Seis ejemplares después, en el número 16 de los Cuatro Fantásticos, los cuatro héroes viajaron al «micromundo del doctor Doom», donde supieron que éste había sobrevivido a su dura experiencia de contracción. En algún momento de su reducción de tamaño entró en un «micromundo, un mundo que podría caber en la cabeza de un alfiler». Más tarde, en el número 76 de *Los Cuatro Fantásticos*, Reed, Ben y Johnny se aventuraron dentro de un completo microuniverso, es decir un universo (al menos una galaxia) de micromundos. El microuniverso se describía como si estuviese en el interior de una mancha de un portaobjetos de microscopio, en el laboratorio de Reed Richards. Esto eliminaba al menos la necesidad de explicar la enorme coincidencia en el número 16 de *Los Cuatro Fantásticos* del Doctor Muerte y los CF situados exactamente encima de uno de tales microplanetas cuando empezaron a reducirse.

Si el micromundo que Doom encontró y que conquistó a renglón seguido podía caber en la cabeza de un alfiler, entonces su diámetro en el ecuador es aproximadamente de un milímetro. Como comparación, el diámetro de la Tierra es de 13.000 km. Un kilómetro es un millón de milímetros, así que el micromundo es treinta mil millones de veces menor que la Tierra. Recuerde que en el capítulo 7 tratamos de las dificultades inherentes a la reducción de tamaño de un objeto. El micromundo no puede ser seis mil millones de veces más denso que nuestro planeta, a menos que esté compuesto de la materia de una estrella enana blanca. El hecho de que el Doctor Muerte, los Cuatro Fantásticos y los habitantes de este micromundo puedan caminar normalmente sugiere que no es éste el caso. Tanto el Doctor Muerte como Reed Richards parecen tan rápidos en el micromundo como lo son a tamaño normal, y la Cosa no es menos fuerte, así que es improbable que pierdan átomos al reducirse de tamaño. Debemos por lo tanto concluir con pesar que el micromundo del Doctor Muerte se parece mucho a sus otros «planes maestros», impresionantes en principio pero decepcionantes en su logro.

Si es tan difícil construir un mundo que quepa en la cabeza de un alfiler, ¿qué podemos hacer con la aventura de Atom, «The Deadly Diamonds of Doom», en el número 45 de *Atom*? En esta historia, un artefacto de diamante hallado en el monte Pico de las Islas Azules es llevado a Ivy Town por un arqueólogo amigo de Ray Palmer (alter ego de Atom). Unos haces extraños de rayos emanan de él, convirtiendo a las personas y a los gatos domésticos en estatuas de diamante. «Aunque esto parezca sólido —piensa el profesor Palmer mientras alcanza los controles de su tamaño y peso— ¡hay grandes abismos de espacio entre los átomos que forman el diamante!»

Muy cierto. La mayor parte de un átomo es en realidad espacio vacío entre el núcleo cargado positivamente y la localización promedio de los electrones cargados negativamente. Cuando el Diminuto Titán se encoge hasta escalas subatómicas, descubre otro planeta completo ¡dentro de un átomo! No sé qué decir acerca de lo que compone a este planeta. No puede estar formado por átomos, ciertamente, puesto que es menor que los electrones que residen en el artefacto de diamante. Desde luego el descubrimiento de que podrían existir civilizaciones enteras residiendo en el interior de los átomos de la materia ordinaria hubiera hecho ganar a Palmer un premio Nobel como muy poco, junto con fortuna y fama mundial. Tal es la característica de este héroe que ni siquiera consideró informar acerca de este descubrimiento científico, ni de ninguno de los otros micromundos que encontró en los números 4 y 19 de *Atom comics*, en el 18 de *La Liga de la Justicia*, y en el número 53 de *Brave and the Bolds*.

Aunque la pretensión de los cómics de que hay micromundos en el interior de los átomos es pura fantasía, la región del interior de un átomo tal como es entendida por la mecánica cuántica no es menos extraña. En los «espacios vacíos» del interior de un átomo hay «ondas de materia» asociadas con el movimiento de un electrón. Estas ondas de materia son la clave para comprender la física atómica.

### **¿Qué puede hacer cuando todo lo que sabe es incorrecto?**

Ha llegado el momento de profundizar en el mundo de los átomos. Las cosas tratarán de física en las próximas páginas, pero tenga paciencia conmigo. Pronto volveremos a los cómics. Hace falta cierto trasfondo para comprender por qué algunos físicos toman en serio la noción de universos paralelos y de un número infinito de Tierras.

A finales del siglo XIX había un cuerpo creciente de evidencia experimental que indicaba que los principios físicos descritos en los capítulos anteriores fallaban al explicar el comportamiento de los átomos y de la luz. Los físicos estaban bloqueados tratando de explicar por qué relucían las cosas calientes. Coloque un atizador de hierro en un rugiente fogón y, al calentarse, se pondrá primero al rojo vivo y, al cabo de un tiempo, al blanco. Gracias a la teoría del electromagnetismo de Maxwell discutida en el capítulo anterior, los físicos comprendieron que las cargas eléctricas oscilantes de cada átomo, al vibrar a medida que el atizador se calienta cada vez más, emitían luz, y que cuanto más rápidamente se agitaban los átomos en torno a sus posiciones de equilibrio, mayor sería la frecuencia de la radiación electromagnética resultante. Ya en el siglo XIX los científicos habían diseñado técnicas ingeniosas para medir tanto la luz ultravioleta como la infrarroja, en las regiones más alta y más baja del espectro electromagnético visible, delimitando la delgada franja de luz que pueden ver nuestros ojos. En consecuencia podían medir con precisión cuánta luz emitía exactamente un objeto caliente para una longitud de onda determinada a medida que se hacía aumentar su temperatura. Descubrieron dos cosas sorprendentes. La primera, que la fracción de luz emitida para una determinada longitud de onda depende solamente de la temperatura del objeto, y de ninguna otra característica. Independientemente de la composición material, forma o tamaño de un objeto, lo único que determina el espectro de luz emitida era su temperatura. La segunda, que la cantidad total de luz emitida no era infinita y que dependía también solamente de la temperatura. Este segundo punto fue la primera ficha de dominó que cayó conduciendo en último término al desarrollo de la mecánica cuántica.

El hecho de que la luz de un objeto caliente dependa solamente de su temperatura impide que obtengamos algo de nada. Si dos objetos hechos de distintos materiales a la misma temperatura emitieran distintos espectros de radiación, habría una forma de tener una transferencia neta de energía entre ellos, y en consecuencia trabajo útil sin flujo ninguno de calor. Aunque esto sería una violación útil de la segunda ley de la termodinámica, resulta que no tiene lugar justamente por dicha razón. Un beneficio práctico del hecho de que el espectro de luz emitida dependa *solamente* de la temperatura es que podemos utilizar la intensidad de luz emitida como función de la longitud de onda para determinar la temperatura de objetos allí donde no pueden usarse los termómetros corrientes. Así es como se mide la temperatura de la superficie del Sol (de unos 6.100 °C aproximadamente) y el remanente de la radiación de microondas de fondo cósmico del Big Bang (tres grados sobre el cero absoluto), a través del espectro de luz que producen.

El segundo descubrimiento, el de que la energía emitida por un objeto incandescente no es infinita, no representó realmente un trauma para los físicos. Lo que hallaban incómodo era que la teoría electromagnética de Maxwell predecía que la cantidad de energía luminosa emitida debería crecer sin límite. Los cálculos utilizando la teoría de Maxwell predecían correctamente cuánta luz se debía emitir a bajas frecuencias, en acuerdo exacto con las observaciones. Al crecer la frecuencia de la luz emitida por un objeto caliente hacia la región de la parte ultravioleta del espectro, la intensidad de luz medida alcanzaba un pico y para frecuencias mayores disminuía de nuevo hasta un valor bajo, que era lo esperable tanto de la conservación de la energía como del sentido común. No obstante, la curva calculada indicaba que la intensidad debería volverse infinitamente alta al aumentar la frecuencia. A esto se le llamó la *catástrofe ultravioleta*, aunque era una «catástrofe» solamente para los teóricos que hacían los cálculos. Muchos científicos verificaron una y otra vez los cálculos, pero no pudieron encontrar ningún error.

Las ecuaciones de Maxwell habían funcionado tan bien en todos los demás casos (condujeron a la invención de la radio en 1895 y harían eventualmente posible el desarrollo de la televisión, así como todas las formas de comunicación inalámbrica) que era dudoso que hubiera en ellas algo fatalmente equivocado. Antes bien, los científicos concluyeron que el problema debería residir en la aplicación de la teoría de Maxwell a los átomos vibrantes de un objeto incandescente. De nuevo, muchos intentaron hallar un enfoque alternativo, alguna teoría distinta que pudiera explicar el espectro observado de la luz emitida por un objeto incandescente. Aquí es donde resulta importante el hecho de que el espectro dependa solamente de la temperatura del objeto. Si la teoría del electromagnetismo no pudiera explicar el comportamiento de uno o dos elementos exóticos de la materia, bien, eso hubiera sido algo embarazoso, pero no una tragedia. Esta incapacidad para explicar una propiedad compartida por *toda* la materia era francamente embarazosa y había que hacer algo.

En 1900, el físico teórico Max Planck, reconociendo que situaciones desesperadas exigen determinaciones desesperadas, hizo lo único que pudo para explicar el espectro de luz emitida por un objeto incandescente: hizo trampas. Primero determinó la expresión matemática que correspondía a la curva de incandescencia obtenida experimentalmente. Una vez supo qué fórmula necesitaba, se dispuso a encontrar una justificación física para ésta. Luego de ensayar diversos esquemas, la única solución que pudo obtener y que le proporcionaba la ecuación de la curva de incandescencia necesaria implicaba imponer restricciones a la energía de los átomos que formaban el cuerpo incandescente. Planck propuso en esencia que los electrones de cada átomo podían tener solamente energías específicas. De la palabra latina para «cuanto», esta teoría se llamó física cuántica. La separación entre niveles de energía adyacentes era en la práctica muy pequeña. Y quiero decir *realmente* muy pequeña: si la energía de una pelota de tenis bien golpeada es de  $50 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ , entonces la separación entre los niveles adyacentes de energía de un átomo es menos de una trillonésima parte de un  $\text{kg m}^2/\text{s}^2$ . Esto debería proporcionar cierta perspectiva la próxima vez que usted escuche ufanarse a un comercial de que la última innovación de un automóvil o de un detergente para lavar ropa representa un «salto cuántico».

Planck tuvo que introducir una nueva constante en sus cálculos, un parámetro ajustable al que llamó **h**. Supuso que cualquier cambio en la energía de un átomo solamente podía tomar los valores **E**

=  $hf$ , o  $E = 2hf$  o  $E = 3hf$ , y así sucesivamente, pero ninguno de los intermedios (así pues el átomo no podría tener nunca un cambio de energía de, digamos,  $E = 1,6 hf$  o  $17,9 hf$ ) donde  $f$  es la frecuencia característica del elemento atómico específico. Esto es como decir que un péndulo puede oscilar con un período de un segundo para completar un ciclo o diez segundos, pero que es imposible conseguir que el péndulo oscile en cinco segundos. El propio Planck pensó que esto era estrofalario, pero que era necesario para que sus cálculos dieran la respuesta correcta. Una vez que obtuvo la expresión correcta del espectro de un objeto incandescente, intentó hacer que el valor de  $h$  pasara a ser cero. Para su desánimo descubrió que al hacerlo su expresión matemática volvía al resultado de energía infinita del electromagnetismo clásico. El único medio de evitar este resultado infinito sin sentido era decir que los átomos no pueden tener los valores de energía que quieran, sino que deben efectuar siempre cambios en saltos discretos de magnitud  $E = hf$ . Puesto que  $h$  tiene un valor pequeñísimo ( $h = 660$  trillonésimo de trillonésimo de un  $\text{kgm}^2/\text{s}$ ) nunca advertimos esta «granularidad» de la energía cuando tratamos con objetos grandes tales como pelotas de béisbol o automóviles en movimiento. Pues la escala de energía de un electrón en un átomo es del todo significativa y no puede ignorarse en absoluto.

El hecho de que la energía de los electrones de un átomo pueda tener solamente valores discretos, sin nada intermedio, es ciertamente extravagante. Imagine las consecuencias de este carácter discreto de la energía en el caso de un automóvil que va por una autopista a 80 km/h si la constante  $h$  de Planck fuera mucho mayor. La teoría cuántica nos dice que el automóvil podría ir a una velocidad menor, 60 km/h, o a una velocidad más rápida, 100 km/h, pero no a ninguna otra velocidad intermedia! Aunque podamos concebir que el automóvil va a 88 km/h y calcular cuál sería su energía cinética, sería físicamente imposible que fuera a esa velocidad, de acuerdo con los principios de la física cuántica. Si el automóvil absorbe alguna energía (de una ráfaga de viento, por ejemplo), podría aumentar su velocidad hasta los 100 km/h, pero solamente si la energía del viento puede salvar la diferencia en la energía cinética. Para una ráfaga de una energía ligeramente menor, el automóvil ignorará el impulso del viento y continuará con su velocidad original. Solamente si la energía del viento corresponde exactamente a la diferencia en la energía cinética de 60 a 80 km/h, o de 60 a 100 km/h, el automóvil «aceptaría» este impulso y pasaría a moverse a una velocidad mayor. La transición a la velocidad más alta sería casi instantánea, y la aceleración durante este cambio sería terrible para los ocupantes del automóvil. Esta situación parece ridícula cuanto se traslada al tráfico de la autopista, pero describe correctamente la situación de los electrones en un átomo.

¿Hay algún modo de comprender por qué la energía de un electrón en un átomo puede tomar solamente ciertos valores discretos? Sí, realmente, pero antes debe usted aceptar un concepto ciertamente extraño. De hecho, toda la «extrañeza» asociada con la física cuántica se puede reducir a la afirmación siguiente: *Hay una onda asociada con el movimiento de cualquier materia, y cuanto mayor es el momento del objeto más corta es la longitud de onda de la misma.*

Cuando algo se mueve, tiene un momento. El físico Louis de Broglie sugirió en 1925 que, asociado con este movimiento, existe cierta especie de «onda de materia» relacionada con el objeto, y la distancia ente picos adyacentes o puntos más bajos de esta onda (su longitud de onda) depende del momento del objeto. Los físicos se refieren a la «función de onda» de un objeto, pero nosotros seguiremos hablando de la «onda de materia» como un recuerdo de que nos estamos refiriendo a una

onda asociada con el movimiento de un objeto físico, ya sea un electrón o una persona.

Esta onda de materia no es una onda física. La luz es una onda de campos eléctricos y magnéticos alternantes creados por una carga eléctrica acelerada. Las ondulaciones provocadas por el viento en la superficie de un estanque o los anillos concéntricos formados cuando se lanza una piedra al agua son el resultado de oscilaciones mecánicas de la superficie del agua. Las ondas de sonido son una serie de compresiones y expansiones alternantes de la densidad del aire o de algún otro medio. En contraste, la onda de materia asociada con el momento de un objeto no es como ninguna de esas ondas, sino en cierto sentido cabalga moviéndose con el objeto. No es un campo eléctrico ni magnético, ni puede existir separada del objeto, ni necesita de un medio para propagarse. Pero esta onda de materia tiene consecuencias físicas reales. Las ondas de materia pueden interferir cuando dos objetos pasan cercanos entre sí, al igual que cuando dos piedras se tiran a un estanque con una pequeña distancia de separación, cada una crea una serie de anillos de ondulación concéntricos sobre la superficie del agua que forman un patrón complejo allí donde se intersecan los dos anillos. Si pregunta a cualquier físico qué es realmente esta onda de materia, le dará una diversidad de expresiones matemáticas que siempre concluyen en la prudente respuesta de tres palabras: *no lo sé*. Por una vez, nuestra conocida «excepción milagrosa» se aplica al mundo real en lugar de a las páginas de cuatricromía de los cómics.

A menos que un objeto se mueva a una velocidad cercana a la de la luz, su momento puede describirse como el producto de su masa por su velocidad. Un camión Mack tiene más momento que un Mini-Cooper, si ambos van a la misma velocidad, ya que la masa del camión es mayor. El Mini-Cooper podría tener un momento mayor si viajara a una velocidad mucho mayor que el camión. Los físicos usan la letra **p** para representar el momento de un objeto, dado que obviamente **p** indica *momento*<sup>[68]</sup>. La longitud de onda de esta onda de materia se representa con la letra griega lambda ( $\lambda$ ). La longitud de onda de las ondas de materia fue propuesta por de Broglie (y verificada experimentalmente por Clinton Davisson y Lester Germer en 1926) como relacionada con el momento del objeto mediante la sencilla relación momento por longitud de onda igual a constante, o  $p \lambda = h$ , donde **h** es la misma constante que introdujo Planck para dar cuenta de la curva de incandescencia de los cuerpos calientes.

El hecho es que el producto del momento de un objeto por la longitud de onda de la onda de materia sea una constante significa que cuanto mayor es el momento menor es la longitud de onda. Dado que el momento es el producto de la masa por la velocidad, los objetos grandes tales como las pelotas de béisbol o los automóviles tienen un momento muy grande. Una bola rápida lanzada a 150 km/h tiene un momento de unos 61 kgm/s. Según la relación  $p \lambda = h$ , dado que **h** es tan pequeña, esto indica que la longitud de onda (la distancia entre picos sucesivos de la onda, por ejemplo) de la onda de materia de la pelota de béisbol es menor que una millonésima de trillonésima de la anchura de un átomo. Esto explica por qué nunca hemos visto una onda de materia en el estadio de béisbol. Obviamente no hay forma de que podamos detectar nunca una onda tan diminuta, y las pelotas de béisbol, en la mayoría de los casos, son objetos de buen comportamiento que siguen las leyes de Newton de la física clásica.

Por otra parte, la masa de un electrón es muy pequeña, de modo que tendrá un momento muy pequeño. Cuanto menor es el momento mayor es la longitud de onda de la onda de materia, puesto

que su producto es constante. En el interior de un átomo la longitud de onda de la onda de materia de un electrón tiene aproximadamente el mismo tamaño que el átomo, y no hay forma de que podamos ignorar tales ondas de materia al considerar las propiedades de los átomos. Cuando el superhéroe Atom de DC Comics reduce su tamaño hasta el de un átomo, debería ver algunos espectáculos extraños. Como ese tamaño es menor que la longitud de onda de la luz visible de modo que, así como nosotros no podemos ver las ondas de radio, cuya longitud de onda está en el rango de varios centímetros hasta un tercio de metro, la visión normal de Atom debería resultar inoperativa, y él sería más o menos del mismo tamaño que las ondas de materia de los electrones del interior del átomo. Se sugiere en su cómic que a este tamaño el cerebro de Atom interpreta lo que ve como un esquema de un sistema solar convencional, ya que no tiene un sistema de referencia válido para descifrar de otro modo las señales percibidas por sus sentidos.

Imagine un electrón girando alrededor de un núcleo, arrastrado hacia el interior por la atracción electrostática entre los protones cargados positivamente del núcleo y la carga negativa del electrón. Mientras el electrón viaja alrededor del núcleo solamente ciertas longitudes de onda pueden encajar en un ciclo completo. Cuando el electrón ha vuelto a su punto de partida, habiendo completado una órbita completa, la onda de materia debe estar en el mismo punto de su ciclo en que se la dejó. Por insólita que sea la noción de onda de materia, sería más difícil de entender si al dejarla cuando estaba en su punto máximo (por ejemplo), después de haber completado una órbita completa, estuviera ahora en un valle. Con el fin de evitar un salto discontinuo desde un máximo a un mínimo cada vez que la onda completa un ciclo, solamente son posibles para el electrón ciertas longitudes de onda que encajan sin ruptura en una órbita completa. Esto no es distinto de la situación de una cuerda de violín pulsada, con sólo ciertas frecuencias posibles de vibración. Debido a que la longitud de onda de la onda de materia está relacionada con el momento del electrón, esto indica que los momentos posibles del electrón están restringidos a sólo ciertos valores discretos definidos. El momento está a su vez relacionado con la energía cinética, de modo que el requisito de que la onda de materia no tenga saltos discontinuos al final de cada órbita determina que el electrón solamente puede tener valores discretos de energía en el átomo.

Estas energías finitas son un resultado directo de la restricción de las longitudes de onda posibles de las ondas de materia, que a su vez son debidas al hecho de que el electrón está sujeto al interior del átomo. Un electrón que se mueve a través del espacio vacío no tiene restricciones en su momento, y en consecuencia su onda de materia puede tener todas las longitudes de onda posibles<sup>[69]</sup>. Un trozo de cuerda puede tener cualquier forma cuando agitamos un extremo, siempre que el otro pueda también moverse libremente. Pero si la cuerda está sujeta en ambos extremos, como en el caso de una cuerda de violín, entonces el rango de los movimientos de la cuerda está rigurosamente limitado. Cuando ahora pulsamos la cuerda sujeta, solamente puede vibrar con ciertas frecuencias, determinadas por la longitud y el ancho de la cuerda y la tensión con la que está atada. Hay una frecuencia más baja fundamental para la cuerda, y muchos otros armónicos más altos, pero la cuerda no puede vibrar con cualquier frecuencia arbitraria una vez está constreñida de este modo.

De forma parecida el electrón está sujeto en una órbita por su atracción electrostática hacia el núcleo cargado positivamente. Si se «pulsas» de la forma adecuada, la onda de materia del electrón

ligado puede adoptar un estado más alto de energía. Cuando el electrón regresa a continuación a su frecuencia fundamental, debe hacerlo mediante un salto discreto. La energía se conserva; por consiguiente, el electrón solamente puede disminuir su energía al volver al nivel de menor frecuencia entregando un paquete de energía igual a la diferencia entre su nivel de mayor energía y el de menor energía en el cual se restablece. Debido a que las energías disponibles para el electrón son discretas, valores bien definidos semejantes a los armónicos posibles para una cuerda sujeta, este salto de un estado de energía al otro se llama *transición cuántica* o *salto cuántico*. El paquete discreto de energía entregado por el electrón al efectuar esta transición está normalmente en la forma de luz, y un cuanto de energía luminosa se llama *fotón* (un concepto introducido por Albert Einstein en 1905 —un año de mucha ocupación para él y para la física— aunque el término *fotón* no fue acuñado hasta 1926 por Gilbert Lewis).

Si un tubo de vidrio se llena con un gas como el neón y se hace pasar una corriente eléctrica a través del gas, los electrones energéticos de la corriente chocarán a veces con los átomos de neón. Cuando la energía de los electrones energéticos es la exacta, los átomos de neón pueden quedar excitados a un estado de mayor energía. Después de la colisión, los átomos excitados de neón volverán a su configuración inicial de menor energía, emitiendo un fotón de luz que tiene la frecuencia (y por tanto el color) que corresponde a la diferencia de energía entre sus estados inicial y final. Ésta es la razón por la cual las luces de neón tienen su identificable color. Cambiando el tipo de gas del tubo se pueden seleccionar diferentes colores de la luz. Usted podría hacerlo con cualquier gas, pero solamente ciertos elementos tienen una transición dentro de la franja visible del espectro luminoso. Si los átomos sufren colisiones altamente energéticas que los conducen a estados de energía más alta, entonces las longitudes de onda discretas de luz se liberarán cuando los diversos armónicos regresen al nivel fundamental. Elementos distintos tienen distintas series de armónicos y frecuencias fundamentales, al igual que cuerdas distintas de un violín o de una guitarra tendrán modos vibratorios distintos dependiendo de su longitud, anchura y tensión. Dos cuerdas de violín idénticas sujetas con la misma tensión tendrán el mismo rango de frecuencias posibles cuando se pulsan. De modo parecido, dos átomos idénticos tendrán el mismo espectro de luz emitida cuando retornan de un estado excitado. De este modo el espectro de longitudes de onda de luz emitida por un átomo energético es único y se puede considerar como la firma del elemento particular. El elemento helio, más ligero que el aire, fue descubierto por la detección de su espectro característico de luz que proviene del Sol (la palabra *helio* deriva de Helios, el dios griego que representa al Sol). Mediante una comparación cuidadosa con el espectro de luz emitida por el hidrógeno y otros gases, los científicos concluyeron que esta serie de longitudes de onda debía provenir de un nuevo elemento que no había sido encontrado en la Tierra en esa época. Afortunadamente para el Macy's Thanksgiving Day Parade<sup>[70]</sup>, con el tiempo se descubrirían bolsas de helio en el subsuelo terrestre.

La noción de que hay una onda asociada con el movimiento de cualquier objeto y de que su longitud de onda es inversamente proporcional a su momento es extraña, pero aceptando este concepto misterioso ganamos una comprensión de las bases de toda la química. Aproxime dos átomos lo bastante cerca entre sí, y podrán formar un enlace químico, y al hacerlo crearán una nueva unidad básica, la molécula. ¿Por qué harían esto los átomos? Los electrones cargados negativamente del primer



átomo repelerán desde luego a los electrones cargados negativamente del segundo átomo. Antes de la mecánica cuántica, no había una explicación satisfactoria de por qué el universo no consistía en átomos elementales aislados.

La fuerza conductora que hay tras los enlaces entre átomos consiste en las interacciones de las ondas de materia de los electrones de los distintos átomos. Cuando los dos átomos se mantienen alejados, las ondas de materia de los electrones atómicos no se superponen. Cuando los átomos se acercan lo bastante entre sí de forma que las nubes de electrones de cada átomo se entrecruzan, sus respectivas ondas de materia electrónica comienzan a interferir, formando una nueva configuración de onda, al igual que dos piedras lanzadas en un estanque crean un patrón intrincado de ondulaciones que es muy distinto del patrón que crearía cada piedra separadamente. En la mayoría de los casos este nuevo patrón es un desorden discordante de alta energía, similar al sonido resultante de un clarinete y violín tocados simultáneamente por aficionados sin formación ni talento musical. En esos casos los dos átomos no forman un enlace químico y no reaccionan químicamente. En unos pocos casos especiales las dos ondas de materia interactúan armoniosamente, creando un nuevo patrón de onda que tiene una configuración de menor energía que las dos ondas de materia separadas. En estos casos especiales los dos átomos pueden disminuir su energía total permitiendo que las ondas de materia interactúen de este modo, y una vez en un estado de menor energía, es necesario añadir energía para separarlos físicamente. De este modo, a pesar de la considerable repulsión entre los electrones cargados negativamente, los dos átomos se mantienen unidos por un enlace químico, debido a la naturaleza ondulatoria de los electrones.

Esos razonamientos acerca de niveles discretos de energía de un átomo que se originan a partir de esas órbitas particulares que corresponden a un número entero de longitudes de onda de la onda de materia del electrón parecen tan sensatos que es una lástima que no sean correctos. El electrón no se puede considerar que se mueva en una órbita circular o elíptica alrededor del núcleo cargado positivamente, a pesar de la atractiva analogía con nuestro sistema solar. En primer lugar, el electrón sería constantemente acelerado al desviarse siguiendo un trayecto curvo. Como se razonó en el capítulo anterior, una carga eléctrica acelerada en una órbita circular emite ondas electromagnéticas que transportan energía, de forma que a medida que el electrón emite luz en su órbita pierde energía cinética. Con el tiempo el electrón caerá en espiral hacia el núcleo en menos de una billonésima de segundo, de forma que no existirían elementos estables, y por tanto no habría química ni vida si los electrones se movieran realmente en órbitas curvadas.

A pesar de todo, la noción de que solamente se permiten ciertas longitudes de onda, con los correspondientes niveles discretos de energía, sigue siendo válida, aunque la imagen que hemos empleado para llegar hasta aquí haya de considerarse solamente una metáfora útil y no una descripción literal. En lugar de pensar en el electrón como una partícula puntual que se mueve en una órbita circular con una onda de materia particular asociada con él, la teoría completa de Heisenberg y Schrödinger, de la que se tratará en el próximo capítulo, nos dice que hay una «función de onda» para el electrón. Del mismo modo que en el caso de la cuerda de violín pulsada no tiene sentido preguntar dónde está exactamente la onda en la cuerda, igualmente en el caso del electrón en un átomo su onda de materia se extiende por todo el átomo y no podemos especificar la posición del electrón ni su

trayectoria con más precisión que ésta. Los electrones solamente emiten o absorben luz cuando se mueven de una configuración a otra en el átomo. Como veremos en el próximo capítulo, esas ondas de materia son también responsables de ¡la crisis de las Tierras infinitas!

**MECÁNICA CUÁNTICA.** La historia original del número 4 de *Showcase* que describe cómo ganó Barry Allen sus poderes de supervelocidad y se convirtió en el Flash de la Edad de Plata, entregaba el testigo de la Edad de Oro de los superhéroes. Justo antes de ser alcanzado por la descarga eléctrica que lo roció a la vez con productos químicos exóticos, el policía científico Allen hacía una pausa relajante en su laboratorio tomando un pastel y un vaso de leche mientras leía el número 13 de *Flash Comics*, que presentaba al Flash de la Edad de Oro en su cubierta. Después de que el terrible accidente otorgara a Barry sus superpoderes, sus pensamientos inmediatos se dirigieron al modo de hacer uso de esas potencialidades para ayudar a la humanidad. Inspirándose en el cómic de Flash que había estado leyendo antes de ser alcanzado por el rayo, se vistió un traje rojo y amarillo y dio comienzo a su carrera de lucha contra el delito como el Flash de la Edad de Plata (aunque se refería a sí mismo simplemente como Flash, sin darse cuenta de que era un personaje de cómic de la emergente Edad de Plata de los superhéroes). En un giro que hoy en día describiríamos como «postmoderno», y entonces fue considerado una «idea inteligente», se decidió en los cómics de Flash de la década de los sesenta que el personaje de Flash de los años cuarenta (que usaba un traje distinto y había obtenido su supervelocidad por un accidente químico distinto, aunque tampoco plausible) era un personaje de cómic de la «realidad» de Barry Allen.

El Flash de la Edad de Oro (cuya identidad secreta era Jay Garrick) fue considerado ficticio en lo que concierne al Flash de la Edad de Plata hasta septiembre de 1961. En la clásica historia «Flash of Two Worlds» («Flash de dos mundos») en el número 23 de Flash (figura 27), se reveló que el Flash de la Edad de Plata y el Flash de la Edad de Oro existían ambos, pero en *Tierras paralelas*, separadas por una «barrera vibratoria». En esta historia el Flash de la Edad de Plata (Barry Allen) vibró accidentalmente a supervelocidad a la frecuencia exacta necesaria para pasar hasta la Tierra en la cual vivía su ídolo el Flash de la Edad de Oro (Jay Garrick). Una vez se dio cuenta de que estaba en el mundo de los héroes de la Edad de Oro, Barry encontró a Jay y se presentó a sí mismo. «Como sabes —explicó el policía científico—, dos objetos pueden ocupar el mismo espacio e instante si vibran a distintos ritmos.» Al parecer Barry Allen era mejor científico forense que físico teórico. Independientemente de su frecuencia de vibración (y, como vimos en la sección dos, los átomos de un sólido vibran simplemente porque tienen una temperatura no nula) no hay forma de que dos objetos puedan ocupar el mismo espacio y el mismo instante de tiempo (a menos que nos refiramos a cantidades sin masa como los fotones luminosos).

El redactor de la historia «Flash of Two Worlds» fue Gardner Fox, que había escrito también muchos de los cómics del Flash de la Edad de Oro. Propuso un mecanismo para explicar cómo el héroe de la Edad de Plata pudo leer los cómics que presentaban al héroe de la Edad de Oro en su segunda Tierra, y proporcionó también algunos detalles de sus hábitos de trabajo. Como supuso Barry: «Un escritor llamado Gardner Fox escribió sobre tus aventuras, ¡que decía que se le aparecían en sueños! Obviamente cuando Fox estaba dormido ¡su mente estaba “sintonizada” en tu Tierra vibratoria! ¡Esto explica por qué “soñaba” *The Flash!*»<sup>[71]</sup>. Este encuentro cruzado entre los Flash de la Edad de Plata y

Edad de Oro fue un éxito entre los aficionados de los cómics, y el Flash de la Edad de Plata cruzaría cada vez con más frecuencia la barrera vibratoria que le conducía a la Tierra-2. El mundo en el que residía el Flash de la Edad de Oro, aunque apareció antes cronológicamente, fue llamado Tierra-2, mientras que el mundo de la Edad de Plata recibió el nombre de Tierra-1. El mundo del lector, en el cual todos los superhéroes existían solamente como personajes ficticios de cómics, fue llamado Tierra-Principal. Eventualmente la Liga de la Justicia de América de la Edad de Plata de los años sesenta, que comprendía a Flash,Linterna Verde, Atom, Batman, Superman, la Mujer Maravilla, y otros superhéroes, se reunió y tuvo una aventura con la Liga de la Justicia de América de Tierra-2 de los años cuarenta, cuyos miembros comprendían a Flash, Linterna Verde, Atom, Batman, Superman, la Mujer Maravilla, y otros. Tan popular fue este encuentro de los dos superequipos que pronto se convirtió en una tradición anual. Pero la Justice League y la Justice Society sólo pudieron visitar la Tierra de los otros varias veces antes de que la novedad desapareciera. Pronto la Justice League se ramificó y visitó otras Tierras, tales como Tierra-3, donde el análogo diabólico de la Liga de la Justicia de América había formado el Sindicato del Crimen de América (Crime Syndicate of America, supuestamente para distinguirse de su contrapartida criminal europea). El Capitán Marvel, es decir, Billy Batson, que podía convertirse en superhéroe exclamando «¡Shazam!», y el resto de su elenco de apoyo habitaban Tierra-S, y a su debido tiempo recibieron una visita de cruce por parte de la Liga de la Justicia de América<sup>[72]</sup>. Tierra-X, Tierra-4 y otras siguieron pronto, y con el paso del tiempo la frase «multiuniverso» se tornó apropiada para describir el número aparentemente sin límite de universos alternativos que abundaban.



Fig. 27. La cubierta del n.º 123 de *The Flash*, donde se da a los fans del cómic una indicación de que existían dos mundos más allá del suyo propio. © 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

Los ejemplares de *La Liga de la Justicia de América* que describen el encuentro de los héroes de las edades de Plata y de Oro siempre llevaban títulos tales como «Crisis en Tierra-2» o «Crisis en Tierra-X». Las tramas se tornaron tan enrevesadas y con tantas historias alternativas que en 1985 DC Comics intentó normalizar el multiuniverso. Las miniserias que durante un año describieron este proceso de

simplificación se llamaron «Crisis en las infinitas Tierras». Con una vasta limpieza de continuidad en camino, los escritores y editores de DC Comics aprovecharon esta oportunidad para desembarazarse de los mundos menos populares y llevar a todos los héroes de los mejores títulos de ventas a una Tierra (precisamente la Tierra-1 de los héroes de la Edad de Plata). En consecuencia, las miniseries *Crisis en las infinitas Tierras* es notable entre los aficionados a los cómics por las muertes del Flash Barry Allen y Supergirl (ambos murieron heroicamente combatiendo contra el diabólico tirano que amenazaba destruir la Tierra-1 de la Edad de Plata) y por la supresión de Superboy de la historia de Superman. A diferencia de la mayor parte de las fatalidades de los cómics, tanto Barry Allen como Supergirl siguieron muertos casi definitivamente (con resurrecciones ocasionales como estrellas invitadas como truco de ventas), mientras que las aventuras de lucha contra el crimen empezaron a retroceder de nuevo hasta los años de adolescencia de Clark Kent. Por ridículo que pueda sonar lo anterior, el concepto de un número infinito de mundos paralelos podría ser uno de los ejemplos más extraños de física correcta en los cómics!<sup>[73]</sup> Justo cuatro años antes de la publicación del número 4 de *Showcase*, la noción de un número infinito de universos paralelos y divergentes fue propuesta seriamente como una interpretación de las ecuaciones de la mecánica cuántica. En otras palabras: *algunos científicos creen que el concepto de los universos paralelos es un concepto serio y viable de la física teórica*. Las teorías actuales indican que si tales Tierras alternativas existen, serían como las descritas en el universo de los cómics de Marvel, en donde ligeros cambios en un personaje de la historia tal como los presentados por el Centinela en historietas como «¿Qué pasaría si Gwen Stacy hubiera vivido?» conducen a mundos divergentes que nunca pueden ser visitados por nuestra realidad, independientemente de nuestra frecuencia vibratoria.

### **Las grandes mentes piensan de un modo parecido**

Hasta aquí a lo largo de este libro hemos tratado de lo que los físicos llaman *mecánica clásica*. Entender lo que significa la «mecánica» de algo significa que puede predecir la estática (por ejemplo, el mayor ángulo con el que se puede colocar una escalera para que permanezca en equilibrio contra una pared) y el movimiento de objetos (tal como la velocidad con la que cae la escalera cuando comienza a resbalar, una vez identificadas las fuerzas externas que actúan sobre ella). La ecuación fundamental que gobierna cómo se moverá un objeto macroscópico como resultado de una fuerza aplicada es nuestra vieja amiga la segunda ley de Newton del movimiento,  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$ . Para el movimiento de objetos grandes tales como automóviles, pelotas de béisbol y personas, las fuerzas dominantes son la gravedad, el rozamiento y la electrostática. Incluso cuando consideramos la electricidad y el magnetismo, seguimos haciendo uso de  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$ , donde  $\mathbf{F}$  en la parte izquierda de esta ecuación es o bien la fuerza de Coulomb de atracción o de repulsión entre cargas eléctricas o bien la fuerza de un campo magnético sobre una carga eléctrica en movimiento. El aspecto de la «mecánica cuántica» que justifica esta separación de la «mecánica clásica» como una rama distinta de la física es que cuando consideramos electrones y átomos,  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$  deja súbitamente de comportarse bien. Luego de un gran esfuerzo tratando de «corregir» la física clásica para los átomos (ajustando las leyes de Newton sin subvertirlas del todo) los físicos se vieron forzados a concluir a regañadientes que en el interior de los átomos se aplicaba otro tipo de «mecánica». Es decir, que era necesaria una nueva ecuación para describir la respuesta de los átomos a fuerzas externas. Después de unos veinticinco años de intentar

una forma u otra para esta ecuación, casi simultáneamente Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger obtuvieron la forma correcta del equivalente para los átomos de  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$ .

No teman: no hay peligro de que tratemos aquí del enfoque de Heisenberg ni del de Schrödinger con ningún detalle matemático. Dentro unas cuantas páginas escribiré la ecuación de Schrödinger, pero será solamente para que la podamos mirar maravillados como si fuera un animal exótico de zoológico. El tratamiento de Heisenberg de la física cuántica emplea el álgebra lineal, mientras que Schrödinger utiliza una complicada ecuación diferencial en derivadas parciales (por sencillez nos centraremos en Schrödinger en el resto de este capítulo). Explicar por completo sus teorías rompería el pacto que hemos mantenido hasta ahora de que no emplearíamos en estas páginas nada más complicado que el álgebra de instituto (el álgebra que hemos utilizado hasta ahora en este libro tiene la misma relación con el álgebra lineal que una mosca tiene con una casa<sup>[74]</sup>).

No obstante, con respecto a las matemáticas hay dos puntos que vale la pena destacar aquí. El primero es que, a diferencia del caso de Isaac Newton visto en el capítulo 1, el cual tuvo que *inventar* el cálculo para aplicarlo a sus leyes del movimiento recientemente descubiertas, tanto Heisenberg como Schrödinger pudieron utilizar las matemáticas que ya habían sido desarrolladas al menos un siglo antes. Las ramas matemáticas del álgebra lineal y de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que emplearon Heisenberg y Schrödinger para describir sus ideas físicas habían sido inventadas por matemáticos del siglo XVIII y XIX, y se hallaban bien establecidas en la época en que fueron necesarias en 1925.

Con frecuencia los matemáticos desarrollan una nueva rama de las matemáticas o del análisis por el simple placer de construir una serie de reglas y de descubrir las condiciones y principios que se derivan lógicamente de ellas. Ocasionalmente, los físicos descubren más tarde que para describir el comportamiento del mundo natural investigado resultan indispensables las mismas herramientas que previamente existían solamente para satisfacción de la curiosidad intelectual de los matemáticos. Por ejemplo, la tarea de Einstein al desarrollar la teoría general de la relatividad en 1915 hubiera sido mucho más difícil si no hubiera dispuesto de la ayuda de la teoría de la geometría de varias dimensiones de Bernhard Riemann, desarrollada en 1854. Este panorama de físicos que llevan a cabo avances del mañana mediante las herramientas matemáticas del ayer se ha repetido tan frecuentemente que los físicos tienden a no pensar mucho en ello.

El segundo punto acerca de las teorías de Heisenberg y Schrödinger es que, aunque emplean ramas diferentes de la matemática y tienen una apariencia muy distinta, tras un análisis cuidadoso (que Schrödinger llevó a cabo en 1926) se puede mostrar que son matemáticamente equivalentes. Puesto que describen el mismo fenómeno físico (átomos, electrones y luz), y están inspirados por los mismos datos experimentales, quizá no sea muy sorprendente que resulten ser la misma teoría, a pesar de que los lenguajes matemáticos utilizados para expresarlas sean muy distintos.

Schrödinger y Heisenberg, de modo independiente, desarrollaron el mismo año descripciones distintas del mundo cuántico. La noción de que tales ideas se hallan «maduras» para su descubrimiento en ciertos momentos de la historia se encuentra una y otra vez, y no está confinada a la física teórica.

Naturalmente, el simple mimetismo explica gran parte de la similitud en los programas de televisión o en las películas de Hollywood, del mismo modo como el despunte de Superman en *Action Comics* condujo a una proliferación de los cómics de superhéroes por parte de muchos otros editores, incluyendo Nacional Comics, con la esperanza de embotellar al rayo de nuevo. Hay, sin embargo, casos bien documentados de estudios de cine o cadenas de televisión que de forma independiente y simultánea han decidido que ha llegado el momento de reintroducir un determinado género, tal como las películas de piratas o la serie del doctor urbano. Este sincronismo ocurre también en los cómics, como en el ejemplo de la Patrulla X y la Patrulla Condenada. En marzo de 1954, DC publicó el número 80 de *My Greatest Adventures*, presentando el debut de superhéroes inadaptados (Robotman, Negative Man y la obligada compañera femenina, Elastic-Girl), cuyos extravagantes poderes hicieron que la sociedad los evitara. Estaban dirigidos por un genio en silla de ruedas llamado el Jefe, que los convenció para luchar en equipo en ayuda de la misma sociedad que los rechazaba, combatiendo con frecuencia a sus opuestos de la Hermandad del Crimen. Tres meses más tarde los aficionados podían comprar el número 1 de *X-Men*, publicado por Marvel Comics, donde podían ver a un equipo de mutantes (Cíclope, la Bestia, Ángel, el Hombre de Hielo y, de nuevo la obligatoria compañera, la Chica Maravillosa) cuyos extravagantes poderes provocaron el rechazo de la sociedad normal. Estos adolescentes con superpoderes estaban dirigidos por el telepata mutante en silla de ruedas Profesor X, que los había reclutado y entrenado para ayudar a la misma sociedad que los rechazaba, enfrentados con frecuencia a sus opuestos de la Hermandad de Mutantes Diabólicos.

A pesar de algunas profundas diferencias (el Profesor X es calvo y va bien afeitado, mientras que el jefe es pelirrojo y tiene barba), las espectaculares similitudes de concepto hicieron que muchos aficionados a los cómics se preguntaran si la Patrulla X no estaba copiada del modelo de la Patrulla Condenada. Sin embargo, entrevistas con los escritores de ambos cómics y la investigación de historiadores de cómics indican que es más probable que la aparición casi simultánea sea una coincidencia. El largo período de tiempo necesario para concebir, escribir, dibujar, entintar y poner las letras de un cómic antes de su proceso por la imprenta y su distribución en los quioscos sugiere que la Patrulla X estaba ya en producción cuando apareció por primera vez la Patrulla Condenada.

Otro caso de sincronismo de publicaciones es el de los monstruos de estercolero cubiertos de musgo *Swamp Thing* de DC (escrito por Len Wein) y *Man-Thing* de Marvel (escrito en colaboración por Gerry Conway), que aparecieron en 1971 con un mes de diferencia entre ambos. Tanto Wein como Conway insistieron en que sus creaciones no tenían nada que ver, y en que el hecho de que fueran compañeros de habitación en esa época era puramente fortuito.





**Fig. 28.** Erwin Schrödinger, físico teórico, premio Nobel y mujeriego. Fue el creador de la ecuación de Schrödinger, fundamento de la mecánica cuántica y de nuestro moderno estilo de vida tecnológico. Si el comportamiento de los objetos en la escala atómica está gobernado por las ondas de materia que acompañan su movimiento, entonces lo que la física atómica necesita es una ecuación de ondas que describa la evolución de dichas ondas en el espacio y en el tiempo. Los físicos de principios de la década de 1920 intentaron elaborar una ecuación de ese tipo, hasta que en 1925 Erwin Schrödinger (figura 28) adivinó esencialmente la expresión matemática correcta.

Con la ecuación de Schrödinger los científicos tuvieron un marco con el cual podían comprender las interacciones de los átomos con la luz. Ésta fue la motivación de Schrödinger para el desarrollo de su ecuación de ondas de materia. Una generación más tarde, equipados con la comprensión de la naturaleza de la materia posibilitada por la ecuación de Schrödinger, un nuevo grupo de científicos desarrolló el transistor y, separadamente, el láser y la fisión nuclear (centrales nucleares y bombas atómicas) y la fusión nuclear (bombas de hidrógeno). Los caminos que condujeron tanto al transistor como al láser fueron difíciles, y solamente con la guía de la teoría cuántica se pudieron desarrollar con éxito. Una generación más tarde se crearían el reproductor de CD, el ordenador personal, el teléfono móvil y el reproductor de DVD, por citar solamente unos pocos inventos. Y puesto que ninguno de ellos hubiera sido posible sin el transistor o el láser, ninguno de ellos hubiera sido posible sin la ecuación de Schrödinger. Es una pequeña maravilla que hasta hace poco el retrato de Schrödinger haya

estado en el billete de mil schillings<sup>[75]</sup> de su Austria natal, puesto que puede en verdad considerarse uno de los arquitectos del estilo de vida que damos por supuesto en el siglo XXI.

Hace poco he dicho que Schrödinger «adivinó» la forma de la ecuación de onda de materia. Quizás «adivinó» es una palabra demasiado fuerte. Erwin Schrödinger empleó una considerable intuición física para desarrollar una nueva ecuación que describiera el comportamiento de los átomos. Los meros mortales puede que no sepan nunca exactamente cómo alguien como Newton o Schrödinger hacen lo que hacen. La penetración que conduce a una nueva teoría de la naturaleza es quizás más poderosa que la de la creación artística, puesto que una teoría física nueva debe ser no solamente original sino también matemáticamente coherente y estar de acuerdo con las observaciones experimentales. La teoría más elegante del mundo es inútil si queda refutada por los experimentos.

Aunque no podamos saber cómo Schrödinger hizo lo que hizo, sabemos dónde y cuándo lo hizo. Los historiadores de la ciencia nos dicen que Schrödinger desarrolló su famosa expresión en 1925 mientras se encontraba en un chalet de los Alpes suizos prestado por un amigo durante unas largas vacaciones de navidad. Es más, aunque sabemos que su mujer no estaba en ese chalet, sabemos también que no estaba solo. No sabemos, sin embargo, cuál de las muchas amigas de Schrödinger le acompañaba.

Llegados a este punto el lector podría querer examinar de nuevo el retrato de Schrödinger de la figura 28. Podíamos tener una nueva contestación a la pregunta «¿Por qué sonrío?». Es cierto que Edwin no nos impresiona como seductor. Si alguien se ha preguntado si existe alguna expresión matemática que lo haga a uno atractivo para el sexo opuesto, la ecuación de Schrödinger pudiera ser un buen comienzo. Incluso la breve sinopsis de física cuántica presentada en este capítulo habrá sin duda, fiel creyente, potenciado su atractivo romántico. Esto se añade, naturalmente, al irresistible *sex-appeal* que otorga un conocimiento enciclopédico de los cómics de superhéroes.

### **El gato de Schrödinger de los dos mundos**

La ecuación de Schrödinger es la  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$  de los electrones y los átomos. Así como la segunda ley de Newton, una vez que se han especificado las fuerzas externas  $\mathbf{F}$ , describe la aceleración  $\mathbf{a}$ , y de aquí la velocidad y la posición de un objeto, la ecuación de Schrödinger, dada la energía potencial del electrón mediante el término  $V$ , permite el cálculo de la probabilidad por volumen  $\Psi^2$  de hallar el electrón en un cierto punto del espacio y del tiempo. Una vez que conozco la probabilidad de dónde estará el electrón, puedo calcular la localización o el momento *medio* del mismo. Dado que los valores *medios* son las únicas cantidades que tienen fiabilidad, esto es realmente todo lo que se debería pedir a una teoría.

El énfasis sobre las cantidades *medias* en la física cuántica es distinta de nuestra consideración de los promedios en la anterior discusión de la termodinámica (capítulo 12). Allí hablamos de la energía media por átomo de un objeto, caracterizada por su temperatura, porque resultaba cómodo. En principio, si tuviéramos suficiente tiempo y memoria de ordenador, o fuéramos tan superveloces como Flash o Superman, podríamos seguir la pista de la posición y del momento de cada molécula de aire

de una habitación, por ejemplo. Podríamos, por tanto, calcular la fuerza instantánea sobre las paredes por unidad de superficie, lo que proporcionará la misma información que una determinación de la presión. En los sistemas cuánticos, por otra parte, las propiedades de tipo ondulatorio de la materia establecen un límite a nuestra capacidad de efectuar mediciones, y el promedio es lo mejor que podemos obtener.

¿Qué tiene la naturaleza ondulatoria de la materia que hace tan difícil medir con precisión la localización precisa de un electrón en un átomo? Piense en una cuerda de violín sujeta con una frecuencia de vibración fundamental y varios tonos armónicos más altos. Suponga que la cuerda está vibrando a una frecuencia determinada, pero que es una que no podemos oír. Si las vibraciones fueran tan rápidas que no pudiéramos ver vibrar la cuerda, ¿cómo comprobaríamos que en realidad vibra? Un modo sería tocando la cuerda y sintiendo las vibraciones con nuestros dedos. Si las puntas de nuestros dedos fueran lo bastante sensibles (como las de Matt Murdock, conocido también con el nombre de Daredevil), podríamos incluso determinar la frecuencia exacta con la que ha estado vibrando la cuerda.

Digo «ha estado vibrando» porque, una vez que hemos tocado la cuerda, ya no oscilará más a la misma frecuencia que antes. O bien habrá dejado de vibrar del todo o estará vibrando a una frecuencia algo distinta. Quizás podamos determinar la frecuencia de vibración acercando nuestros dedos pero no haciendo contacto directo con la cuerda. De este modo podemos sentir las vibraciones del aire provocadas por la cuerda oscilante del violín. Con el fin de aumentar la sensibilidad de esta medición, necesitamos aproximar mucho nuestros dedos a la cuerda. Pero entonces las vibraciones del aire se reflejarán en nuestros dedos y rebotarán hacia la cuerda, proporcionando una retroacción que puede alterar su configuración vibratoria. Cuanto más distantes mantengamos las puntas de nuestros dedos, más débil será la retroacción, pero entonces nuestra determinación de la frecuencia vibratoria será menos precisa.

Las oscilaciones de la onda de materia de un electrón en un átomo son justamente tan sensibles a las perturbaciones. Las mediciones de la localización de un electrón perturbarán su onda de materia. Se ha escrito mucho acerca del papel del «observador» en la física cuántica, pero no es más profundo que el hecho de que cuando usted trata de mirar algo más pequeño que la sonda que se usa para verlo, perturbará lo que está tratando de ver.

La teoría cuántica puede proporcionar determinaciones muy precisas del tiempo promedio que hay que esperar antes de que la mitad de una gran cantidad de isótopos nucleares haya sufrido una desintegración radiactiva (definido como su «vida media»), pero esto no es útil para predecir cuándo se desintegrará un único átomo. El problema con los sucesos singulares queda bien ilustrado por el siguiente desafío: tomo un euro de mi bolsillo y se me permite lanzarlo al aire una *sola* vez. ¿Cuál es la probabilidad de que salga cara? Casi con seguridad su instinto le pide contestar que un 50%, pero usted sospecha que hay trampa. Y tendrá razón, es una pregunta con trampa. A los que contestarían que la probabilidad de obtener cara es del 50% les digo: demuéstrenlo. Y no podrán, nunca de acuerdo con una única tirada, mientras vivamos en un mundo con euros de dos caras. Si usted lanza la moneda mil veces (o lanza mil monedas una vez) hallará que para una moneda aceptable, muy cerca del 50% de las

veces se obtendrá cara. Pero la probabilidad es una guía pobre para sucesos únicos aislados. Sin embargo la probabilidad es todo lo que ofrece la ecuación de Schrödinger. Esto no sentó bien entre muchos de los físicos antiguos que estaban acostumbrados a la precisión de reloj de la mecánica newtoniana, y propusieron un experimento conceptual que abriría una «caja de Pandora» en la cual colocaron un gato.

Plantearon la siguiente situación: una caja, dentro de la cual hay un gato y que también alberga una botella sellada de veneno y otra caja más pequeña conteniendo un isótopo radiactivo. El elemento radiactivo tiene una vida media de una hora, lo que significa, según la mecánica cuántica, que después de una hora hay una probabilidad del 50% de que haya sufrido una desintegración. Un subproducto de esta desintegración nuclear es la emisión de una partícula alfa (conocida de otro modo como núcleo de helio), y la botella de veneno está dispuesta de tal modo que se romperá al ser alcanzada por esta partícula. Así, después de una hora, hay un riesgo del 50% de que el gato esté muerto, habiendo sucumbido a los vapores del veneno liberados cuando la botella fue alcanzada por la partícula alfa, y una probabilidad del 50% de que la botella siga intacta, con el gato vivo y en buen estado.

De acuerdo con la ecuación de Schrödinger, antes del límite de una hora, en cuyo punto uno abre la caja y mira en su interior, puede describirse significativamente al gato como «la superposición (promedio) de un gato muerto y un gato vivo». Una vez que se abre la tapa, la «función de onda del gato promedio» colapsa en una que describe un gato o bien 100% vivo o 100% muerto, pero no hay modo de conocer lo que se observará antes de abrir la tapa. Si las paredes de la caja son transparentes, nunca estará seguro de que la luz del exterior no haya perturbado el proceso de desintegración (recuerde que la observación de los sistemas cuánticos puede alterarlos a veces). Muchos físicos han considerado esta interpretación deficiente (a pesar de que experimentos recientes sobre los estados cuánticos entrelazados de luz, como se describe en el número 19 de *Justice League of America* sugieren que esto es exactamente lo que ocurre), y se han dedicado muchas ideas y razonamientos para intentar resolver la sensación desagradable asociada con el gato de Schrödinger. Una solución provocativa a este problema, descrita seguidamente, permite que Flash y Superman viajen a Tierras alternativas.

En 1957, Hugh Everett III sugirió que una vez que el gato está precintado en la caja, se crean dos universos paralelos casi idénticos que se bifurcan: uno en el cual al final de la hora el gato está vivo y otro en el cual está muerto. Lo que hacemos cuando abrimos la caja no implica el colapso de funciones de onda ni que el gato está 50% muerto y 50% vivo antes de que miremos. Más bien todo lo que hacemos al final de la hora es determinar en cuál de los universos vivimos, si aquel en el que el gato está vivo o en aquel en el que el gato está muerto. De hecho, por cada proceso cuántico para el cual hay al menos dos resultados posibles, existe ese número de universos, correspondiendo a los diferentes resultados posibles. Una vez que las dos Tierras se han separado en la bifurcación, debido a los dos resultados posibles de un determinado suceso cuántico, cada una evoluciona de modo diferente, dependiendo de las miríadas de sucesos cuánticos ulteriores que tienen lugar luego de este punto de ramificación inicial. Si la bifurcación de las Tierras tuvo lugar recientemente, entonces una Tierra particular pudiera parecerse a nuestro propio mundo. Si la separación ocurrió hace mucho tiempo, entonces durante el tiempo transcurrido habrán existido muchas oportunidades para que los sucesos cuánticos subsiguientes tengan resultados distintos de los observados en nuestro mundo. La historia de esta

segunda Tierra puede ser bastante parecida a la nuestra entonces, pero cabe también la posibilidad de diferencias sensoriales<sup>[76]</sup>.

De aquí que la teoría cuántica da una justificación física para ambas historias de «¿Qué pasaría si?» del Universo Marvel y las Tierras Alternativas de DC Comics. En una de las Tierras, Jay Carrick inhaló «vapor de agua pesada» en un accidente de laboratorio, ganando el don de la supervelocidad con el cual luchó en pro de la justicia, como Flash con sus compañeros de equipo en la Justice League of America. En la otra Tierra el policía científico Barry Allen fue rociado con una serie de productos químicos mientras era alcanzado simultáneamente por un rayo, dejándolo con el don de la supervelocidad, con el cual luchó como Flash con sus compañeros de equipo de la Liga de la Justicia de América. En otra Tierra, un supervelocista cometió crímenes como el diabólico Johnny Quick con sus compañeros del Crime Syndicate of America. Hay en principio un número infinito de Tierras, correspondiendo a todos los resultados posibles de todos los efectos cuánticos factibles, aunque una tesis básica de esta teoría es que ordinariamente no puede haber comunicación entre esas múltiples Tierras alternativas. Ordinariamente. Al parecer, para alguien capaz de vibrar a supervelocidad como Flash, el viaje entre esos muchos mundos tendría lugar con tanta frecuencia como aquella con la que los lectores siguieran comprando tales historias.

Para los físicos la propuesta de Hugh Everett III conduce a crisis muy diversas en las Tierras infinitas. La solución de los muchos-mundos al problema del gato de Schrödinger representó para la mayoría de los físicos un ejemplo de que el remedio puede ser peor que la enfermedad. No obstante, no hay nada lógica o físicamente inconsistente en esta teoría, y nadie ha sido capaz de demostrar que es incorrecta. Los físicos que consideraban intelectualmente insatisfactorio decir que una teoría completa de la naturaleza solamente puede predecir probabilidades no pudieron aceptar la noción de que la teoría describe realmente la creación espontánea y continua de un número infinito de universos alternativos. El modelo de los «muchos mundos» puede considerarse la tía loca de la teoría cuántica desde su publicación, y ha sido guardada en el ático metafórico hasta muy recientemente. Nunca se me enseñó, por ejemplo, cuando estudié mecánica cuántica en el instituto y luego con más detalle en la universidad. Descubrí el modelo de los «muchos mundos» por casualidad cuando, como estudiante graduado, me tropecé con un ejemplar del libro de 1973 de Bryce DeWitt y Nelly Gram, *La interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica*, abandonado en un despacho de estudiante graduado. En un exitoso intento de posponer mis deberes, tomé este extraño libro, empecé a leerlo y como resultado aprendí que en algún sitio había otro James Kakalios que estaba realmente acabando a tiempo su tarea (cuyo conocimiento no me resultó grato).

Si bien pocos físicos prestan atención al modelo de los «muchos mundos», hay una clase de físicos teóricos que han demostrado ser grandes defensores de esta idea: los teóricos de cuerdas.

### **Por qué Superman no puede cambiar la historia**

En los años que siguieron al desarrollo de la ecuación de Schrödinger, los científicos han desarrollado técnicas para describir cómo interactúa la onda de materia del electrón con versiones cuánticas de campos eléctricos y magnéticos (un proceso llamado Electrodinámica cuántica o QED) y

cómo se comportan las ondas de materia de los quarks del interior de un núcleo (un proceso llamado *cromodinámica cuántica* o QCD). Un objetivo pendiente de la física teórica es entender cómo puede describirse la gravedad mediante procesos cuánticos. Hay una teoría de la gravedad perfectamente buena, a saber la teoría general de la relatividad de Einstein. Hay una teoría excelente para describir la naturaleza cuántica de los electrones (QED). Combinar esas teorías en un todo coherente ha demostrado estar más allá de las capacidades de cualquier teórico de la actualidad. Lo más cerca que los teóricos han estado de una teoría cuántica de la gravedad es algo llamado «teoría de cuerdas».

Una simplificación grosera de la teoría de cuerdas es que sugiere que la masa en sí misma es una onda, o más bien una vibración de una cuerda elemental, y que esas «cuerdas» son los constituyentes básicos de todo lo que forma el universo. En su estado actual, muchos físicos son escépticos con respecto a la teoría de cuerdas. Su primera objeción es que para que las ecuaciones se equilibren, la teoría de cuerdas funciona solamente en once dimensiones (diez espaciales y una temporal). Esto es algo embarazoso porque, hasta donde podemos distinguir, vivimos solamente en tres dimensiones espaciales, y ninguno ha hallado nunca dimensiones adicionales<sup>[77]</sup>. Para resolver esta discrepancia los teóricos de cuerdas han sugerido que existen realmente once dimensiones, pero que siete de esas dimensiones espaciales están enrolladas en forma de pequeñas bolas de un diámetro inferior a la milésima de la billonésima de una trillonésima parte de un centímetro, una escala de longitud llamada la longitud de Planck. Otro inconveniente de la teoría de cuerdas está relacionado con esta noción extradimensional: sondear escalas tan pequeñas de longitud requiere en correspondencia energías más altas que las que pueden alcanzar los aceleradores de partículas actuales y los de la próxima generación. Sin la verificación proporcionada por el experimento, el único criterio para determinar si las ecuaciones se hallan en el camino correcto es la elegancia matemática. Esto podría ser peligroso, porque aunque es cierto que las ecuaciones de la mecánica clásica, de la electricidad y el magnetismo y de la mecánica cuántica poseen realmente una cierta belleza matemática, no hay a priori ninguna razón para creer que la naturaleza se preocupa de si hallamos que las ecuaciones son elegantes o no. No obstante, la teoría de cuerdas es en el presente el único candidato probable para una teoría cuántica de la gravedad y solamente estudios más avanzados determinarán su éxito.

Los físicos que desarrollan la gravedad cuántica han invocado la interpretación de los muchos mundos con el fin de resolver las inconsistencias lógicas de sus cálculos que implican el viaje en el tiempo. Recientemente algunos científicos han proclamado que el viaje en el tiempo no es físicamente imposible, aunque es muy improbable que se pueda realizar realmente nunca. El problema con el viaje en el tiempo hacia el pasado está resaltado en la famosa «paradoja del abuelo». En resumen, si uno pudiera realmente retroceder en el tiempo, sería posible matar a su abuelo cuando era joven, antes de que fuera concebido su propio padre. De este modo usted impediría su propio nacimiento, pero la única manera de poder impedir eso es habiendo nacido primero. Con el fin de hallar una escapatoria a este enigma, los físicos teóricos modernos han desempolvado la interpretación de los muchos mundos de Hugh Everett III. Si hubiera ciertamente un número infinito de universos paralelos alternativos, entonces (razonan los teóricos) cuando usted viaja hacia atrás en el tiempo, las rigurosas distorsiones del espacio-tiempo necesarias para realizar este viaje le enviarían a usted a un universo paralelo al suyo

propio. Entonces será libre de matar a tanto abuelos como balas tenga, sin miedo de alterar su propia existencia, puesto que su propio abuelo está a salvo en el pasado de su propio universo, imperturbado por la devastación que usted está infligiendo en el pasado de mundos alternativos.

Estas ideas teóricas modernas fueron realmente anticipadas en la aventura de 1961 del número 146 de *Superman*, «Las grandes proezas de Superman». En esta historia Superman acepta viajar al pasado como un favor a Lori Lemaris, una sirena de la ciudad sumergida de Atlantis con la cual mantuvo una «relación especial» (cuando ella era niña y amiga suya, Lori no era la novia de Superman). Lori implora a Superman que evite el hundimiento de Atlantis, que tuvo lugar hace millones de años. Superman argumenta que todos sus intentos previos (presentados en anteriores ejemplares de *Action Comics* y *Superman*) para cambiar la historia habían fallado, pero las súplicas de Lori (y lo que parecen ser ojos de alcoba) convencieron a Superman para hacer el intento. Dado que hace falta un gran esfuerzo y una velocidad mayor que 340 m/s para romper la barrera del sonido (el esfuerzo, como se discutió en el capítulo 5, es debido en parte al trabajo que hay que hacer para apartar el aire del trayecto), en DC Comics se propuso que con un esfuerzo todavía mayor y una velocidad mucho mayor uno podría atravesar la «barrera del tiempo» (tanto Flash como Superman, ambos capaces de esas velocidades necesarias, viajarían en el tiempo hacia atrás y adelante conforme lo requiriera la trama).



Fig. 29. Superman viaja en el tiempo y salva a Abraham Lincoln de ser alcanzado por el disparo de John Wilkes Booth. ¿O no fue así? © 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

Superman retrocede al menos hasta ocho millones de años antes de nuestra era y alcanza casi el momento exacto en que la avanzada civilización de Atlantis, que reside en una pequeña isla alejada de la costa de lo que parece ser un centro de descanso costero, está próxima a sucumbir a «unas olas gigantescas causadas por un terremoto colosal submarino». Superman corre a otra isla a una distancia a salvo del temblor submarino, la cual es el hogar de otra civilización avanzada. Nada se dice de por qué no hemos sabido nunca de esta otra antigua civilización. Superman toma prestado cierto «metal extraño» de edificios que iban a ser destruidos en esta otra isla y modela una enorme grúa con la cual eleva la isla completa de Atlantis, depositándola en una isla desierta segura, donde queda a salvo del terremoto. No entremos en lo que pudiera componer ese «extraño metal», para tener una fuerza de tensión suficiente para izar una isla.





Fig. 30. Superman, en el mismo cómic de la figura 29, ahora se da cuenta de que la historia ha permanecido cambios a pesar de su travesía en el tiempo realizando «grandes proezas». © 1961 National Periodical Publications Inc, (DC)

En esta ocasión, a diferencia de intentos previos, Superman pudo cambiar con éxito el curso de la historia, y decidió hacer varios descansos en su viaje de retorno a su época, aprovechando la oportunidad para «reparar» diversos acontecimientos históricos. Salva a los cristianos de ser devorados por los leones del Coliseo romano<sup>[78]</sup>, toma el lugar de Nathan Hales cuando está a punto de ser ejecutado por los británicos, evita la masacre de Custer en Little Big Horn, y se deja caer por el Teatro Ford el 14 de abril de 1865. Como se muestra en la figura 29, cuando John Wilkes Boot está a punto de asesinar al presidente Lincoln, tiene tiempo de gritar «¡Sic Semper... Ulp!» mientras las manos que pueden aplastar diamantes se cierran sobre la pistola. Superman se siente ahora como un niño en una tienda histórica de caramelos y decide intentar salvar a la población de su planeta natal Krypton.



**Fig. 31.** Superman descubre en 1961 lo que los teóricos cuánticos han conjeturado recientemente: que el viaje en el tiempo debe implicar también necesariamente el transporte a universos paralelos alternativos. © 1961 National Periodical Publications Inc, (DC)

Puesto que pierde sus superpoderes bajo la luz roja del sol Rao de Krypton (por entonces la explicación de sus asombrosas capacidades se atribuía al sol amarillo de la Tierra) Superman decide construir una flota de naves espaciales a partir de barcos terrestres hundidos y enviarla a Krypton para permitir que todos escapen a otro mundo. Utilizando su visión telescópica observa a sus padres desembarcando en un nuevo planeta con un niño Kal-El. En este momento Superman se da cuenta de que ha caído en una paradoja, puesto que si sus padres nunca lo enviaron a la Tierra cuando niño, ¿cómo es que puede salvarlos ahora?

De vuelta a su presente en 1961, el Hombre del Mañana descubre que todos los libros de historia permanecen inalterados, tal como se muestra en la figura 30. Lincoln fue tiroteado de verdad en el Teatro Ford y Nathan Hale y el General Custer están descritos de modo semejante sufriendo sus

destinos sin Superman, quien no puede entender cómo es posible eso, ya que «con seguridad, los libros [de historia] son ciertos». Ejem. Volviendo a seguir la pista de sus pasos en el tiempo, Superman llega a una Tierra alternativa (figura 31) en la cual los libros de historia dan el apropiado crédito al papel ejercido por Superman corrigiendo los «errores» del pasado.

¡Ah! Superman descubrió en 1961 lo que los físicos teóricos redescubrieron en el 2001: que el viaje en el tiempo solamente es posible mediante la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica. Superman cumplió ciertamente con esas proezas asombrosas, alterando el curso de la historia, pero en un universo alternativo, no en el suyo propio (ver figura 31). Un fenómeno semejante tiene lugar en el número 267 de *Los Vengadores* de Marvel Comics, donde el demonio temporal Lord Kang el Conquistador resulta que ha creado un vasto número de Tierras alternativas como subproducto de sus frecuentes viajes en el tiempo con el fin de derrotar a sus antagonistas superhéroes. Otro ejemplo más de cómics adelantándose al avance de la física.

**FENÓMENOS DE EFECTO TÚNEL.** Un aspecto de la mecánica cuántica que es difícil de aceptar por parte de los científicos jóvenes en su etapa de iniciación es que la ecuación propuesta por Schrödinger predice que bajo ciertas condiciones la materia puede pasar a través de lo que debería ser una barrera impenetrable. De esta forma la mecánica cuántica nos indica que los electrones son bastante parecidos a Kitty Pryde de la Patrulla X, la cual poseía la capacidad mutante de amurallarse tras paredes sólidas (como se muestra en la figura 32), o como Hash, que puede «vibrar» a través de barreras (ilustrado en la figura 33). Esta extrañísima predicción no es menos cierta que extravagante. La ecuación de Schrödinger permite calcular la probabilidad de que el electrón se mueva de una región del espacio a otra, aun cuando el sentido común nos diga que nunca podría efectuar dicha transición. Imagine que está en una cancha de balonmano al aire libre con una serie de cercas en tres lados de la cancha y una pared de hormigón cerrando el cuarto lado. Por el otro lado hay otra cancha al aire libre idéntica, rodeada también por una cerca en tres de sus lados y compartiendo la pared de hormigón con la primera cancha. Usted es libre de pasearse por donde quiera dentro de la primera cancha, pero al faltarle superpoderes no puede saltar sobre la pared de hormigón para pasar a la segunda cancha. Si uno resuelve la ecuación de Schrödinger correspondiente a esta situación encuentra algo bastante sorprendente: los cálculos indican que usted tiene una probabilidad muy alta de hallarse en la primera cancha (no hay sorpresa en ello) y una probabilidad pequeña pero no nula de aparecer en la segunda cancha al otro lado de la pared (¿eh?). Normalmente, la probabilidad de pasar a través de una barrera es muy pequeña, pero solamente se puede decir que son imposibles las situaciones para las cuales la probabilidad es exactamente cero. El resto es tan sólo improbable.



**Fig. 32.** Una escena del n.º 130 de *X-Men*, que muestra a Kitty Pryde (quien todavía no pertenecía a la Patrulla X) empleando su capacidad mutante para caminar a través de las paredes y así espiar a la Reina Blanca del Club Fuego Infernal. © 1980 Marvel Comics

Éste es un fenómeno intrínsecamente propio de la mecánica cuántica, en el sentido de que clásicamente no hay modo posible de que usted se encuentre en la segunda cancha. Este proceso cuántico se llama *efecto túnel*, lo que es un mal apodo, ya que usted no cava un túnel al atravesar la pared. No se deja ningún agujero detrás, ni tampoco pasa usted por encima de la pared o por debajo de ella. Si ahora tuviera que pasar en la otra dirección por la pared, ésta sería una barrera tan formidable como cuando usted se hallaba en la primera cancha, y ahora tendrá la misma probabilidad mínima de volver a la primera cancha. Pero *efecto túnel* es el término que los físicos utilizan para describir este fenómeno.

Cuanto más rápido corra usted hacia la pared, mayor es la probabilidad de que aparezca en el otro lado, aunque no se mueva tan deprisa como para saltar por encima. Es sin duda de esta forma como Flash, tanto en la versión de la Edad de Oro como en la de la de Plata, es capaz de utilizar su gran velocidad para pasar a través de objetos sólidos, como se muestra en la figura 33. Es capaz de aumentar su energía cinética hasta el punto en que la probabilidad de atravesar la pared, según la ecuación de Schrödinger, se convierte casi en certeza.



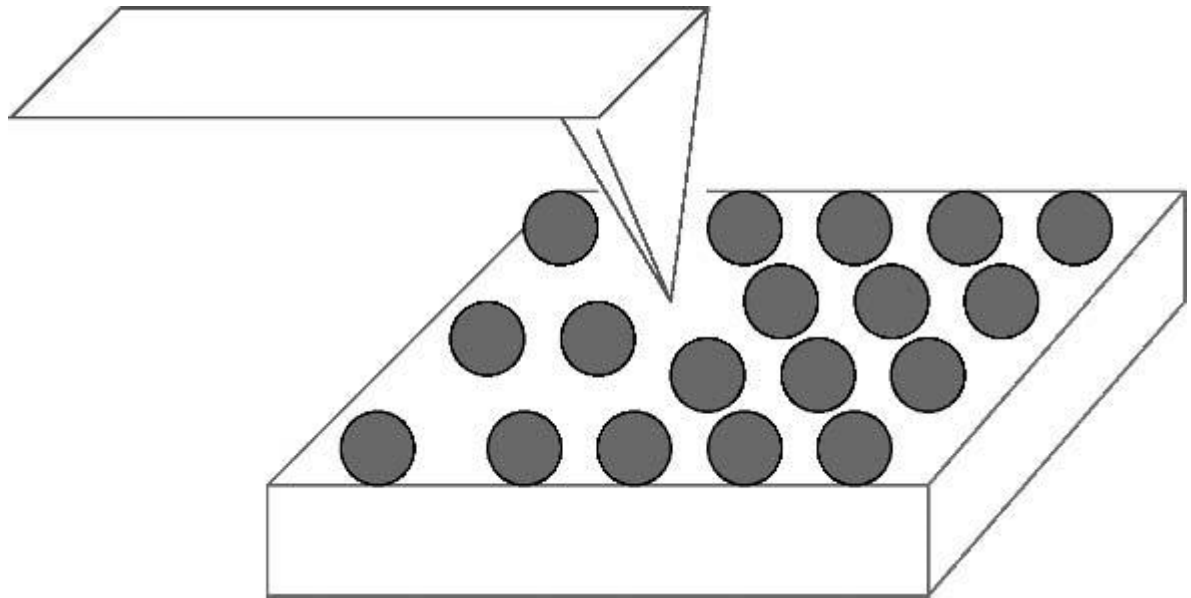
**Fig. 33.** Escena del n.º 123 de *Flash*, en el que Jay Garrick, el Flash de la Edad de Oro, demuestra el proceso de la mecánica cuántica llamado *efecto túnel*. La onda de materia de un objeto tiene una probabilidad pequeña pero no nula de atravesar una barrera sólida. Cuanto más rápidamente se dirige el objeto hacia la barrera mayor es la probabilidad de la transición. Como observa correctamente Jay, la barrera no resulta afectada por el proceso de efecto túnel. © 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

Considere dos metales separados por el vacío. Un electrón en el metal de la izquierda es como una persona en la primera cancha de baloncesto. En lugar de una pared de hormigón, un delgado espacio vacío separa este electrón del segundo metal, que puede ser considerado como otra cancha. Un electrón en un metal tiene una probabilidad pequeña pero no nula de encontrarse en el segundo metal. El electrón no pasa a través del espacio vacío y no tiene suficiente energía cinética para escapar por sí mismo del metal. (Esto es algo bueno, pues de otro modo los objetos estarían perdiendo continuamente electrones por todas partes, y la adherencia estática sería uno de los problemas más preocupantes de cada día.) En lugar de ello, la onda de materia del electrón se prolonga en el vacío, disminuyendo en magnitud. Un fenómeno similar tiene lugar con las ondas de luz que se mueven desde un medio más denso a otro de menor densidad. Bajo condiciones para las cuales la onda luminosa sería reflejada en su totalidad en la interfaz, queda todavía una pequeña difracción de luz en el medio menos denso. La

magnitud de la onda difractada decrece cuanto más progresa en el interior del medio menos denso. Puesto que el cuadrado de la función de onda del electrón representa la probabilidad de hallar la partícula en un punto del espacio y del tiempo, un valor finito para la «onda de materia» indica que existe una probabilidad de que el electrón se halle en el segundo metal. Si el trecho no es demasiado grande (comparado con la longitud de onda de materia del electrón, que en la práctica es algo menor de un nanómetro), entonces la onda de materia tendrá todavía un valor apreciable en el segundo metal. Por dejarlo más claro digamos que el electrón de un lado de la barrera se mueve hacia la obstrucción, y la mayor parte de las veces se refleja simplemente en la pared. Si un millón de electrones golpea la barrera, entonces, dependiendo de su altura y amplitud, 990.000 electrones podrían reflejarse y 10.000 pasarían al otro lado.

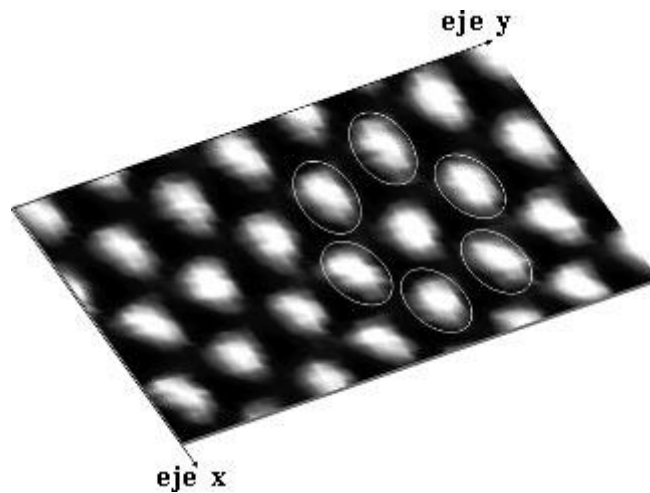
Si la separación entre los dos metales es demasiado grande, entonces incluso para los electrones más energéticos la probabilidad de experimentar el efecto túnel es extraordinariamente pequeña. El momento de una persona es grande, de modo que nuestras longitudes de onda de materia son muy pequeñas, mucho menores que la millonésima de la trillonésima parte de la anchura de un átomo y mucho menores que la anchura de la pared de hormigón que nos separa de la segunda cancha de baloncesto. No obstante, si usted corriera hacia la pared de hormigón, hay una minúscula probabilidad de que su onda de materia alcance el otro lado de la pared. Cuanto mayor sea su energía cinética mayor será su oportunidad de experimentar el efecto túnel. Los que dudan de que eso es posible están invitados a lanzarse desde ahora contra paredes de hormigón, y a perseverar en sus intentos sin que importen lo descorazonadores que puedan ser los resultados iniciales.

Los electrones de un sólido traquetean con una frecuencia de más de mil billones de veces por segundo. En consecuencia, en un segundo tendrán unos mil billones de oportunidades de efectuar el paso a través de una barrera por efecto túnel. Envíe bastantes electrones contra una barrera, y si su altura no es muy grande ni tampoco lo es la separación, una fracción apreciable pasará al otro lado en virtud del efecto túnel. El fenómeno del efecto túnel de la mecánica cuántica no solamente ha sido comprobado para los electrones, sino que es el principio fundamental en el que se basa un tipo único de microscopio llamado *microscopio de exploración por efecto túnel* (*Scanning Tunnelling Microscope*) que permite obtener imágenes directas de los átomos. Como se muestra en la figura 34, cuando una punta metálica se acerca mucho, aunque sin tocarla, a una superficie metálica, puede interceptar las nubes electrónicas que envuelven cada átomo de la superficie. Cuando los electrones pasan por efecto túnel de un átomo a la punta metálica, se registra una corriente eléctrica en un medidor conectado a la ranura. El que tenga lugar o no el efecto túnel depende en gran medida de la separación entre los átomos de la superficie y la punta metálica de exploración. Un cambio en la distancia de solamente la mitad de un átomo puede cambiar la probabilidad del efecto en un factor de más de mil. Moviendo la punta lentamente sobre la superficie y midiendo cuidadosamente la corriente en cada lugar, es posible trazar un mapa de la posición de cada átomo en la superficie.



**Fig. 34.** Dibujo que muestra el mecanismo básico de un microscopio de exploración por efecto túnel. Una fina punta de metal se aproxima mucho a una superficie conductora. La proximidad es de unos pocos diámetros atómicos. Cuando la punta pasa por encima de un átomo de la superficie, las nubes de probabilidad de los electrones del átomo pueden llegar a experimentar el efecto túnel hasta la punta. Cuando la punta está justo encima del átomo, la probabilidad del efecto túnel es alta y la corriente en la punta será grande. De esta forma es posible explorar y captar imágenes de los átomos de la superficie.

Una imagen de este tipo se muestra en la figura 35, que deja ver la localización de átomos de carbono en la superficie de un cristal de grafito (más conocido como «mina de lápiz»). La escala en gris no es real (los átomos de carbono no son negros ni blancos, ni tienen ningún color en lo que a esto respecta), pero se utiliza para representar la magnitud de la corriente registrada en la punta en cada posición, lo que a su vez refleja la densidad electrónica que hay en cada punto. La figura 35 nos muestra que los átomos de carbono del grafito forman placas hexagonales que son casi bidimensionales, bastante parecidas a las placas de seis lados que forman un copo de nieve. El hecho de que los átomos de carbono formen retículas hexagonales implica que un cristal de grafito consiste en hojas de átomos de carbono como la de la figura 35 descansando unas sobre otras. Al formar un cristal tridimensional a partir de tales hojas bidimensionales, el sólido apila cada hoja sobre la otra como las finas capas de un pastel de hojaldre. Los planos del grafito sólido se mantienen unidos tan débilmente que se les puede separar con la mano, simplemente raspando la punta de un lápiz a lo largo de una hoja de papel. El hecho de que esta forma de carbono sólido forme un utensilio de escritura mejor que si todos los átomos de carbono tuvieran cuatro enlaces iguales (compuesto conocido como «diamante») puede deducirse directamente de esta imagen atómica.



**Fig. 35.** Imagen del microscopio de exploración de efecto túnel de los átomos de la superficie del grafito, la forma del carbono empleada para la mina de los lápices. Cada mancha blanca indica una región del espacio en la que la corriente túnel es elevada para esa posición de la punta (ver figura 34). Se aprecia bien la retícula hexagonal de los átomos de carbono, La escala de grises se emplea para indicar la intensidad de la corriente de efecto túnel. El eje  $y$  se extiende a lo ancho de 1 nm, mientras que el eje  $x$  es de 0,5 nm de largo, Cortesía de la doctora Laura Adams y del profesor Alien Goldman de la Universidad de Minnesota.

En el próximo capítulo trataremos de la física de los transistores y diodos, y me salgo del guión para decirle que esos dispositivos semiconductores son en esencia válvulas que regulan y amplifican el flujo de corriente. Una manera de conseguir controlar esta corriente es a través del proceso del efecto túnel. Cuando dos conductores están muy próximos entre sí, separados por una delgada barrera aislante, normalmente no puede fluir corriente de un conductor al otro. Aplicando un voltaje a lo largo de esta estructura de sándwich, puede variarse la altura efectiva de la pared que separa los electrones de una región de los de la otra. Como se dijo, la probabilidad del efecto túnel es una función muy sensible a la altura de esta barrera. De este modo el efecto túnel se utiliza para modular el flujo de electrones a través del dispositivo. Estos «diodos de efecto túnel» son componentes integrales de los teléfonos móviles, así como de otros dispositivos de estado sólido. El efecto túnel de la mecánica cuántica no es por lo tanto una novedad teórica esotérica o útil solamente en los microscopios atómicos. Muchos de los productos que asociamos con nuestro actual estilo de vida no hubieran sido posibles de no ser porque el efecto túnel es un fenómeno fiable.

Cuando aplicamos las leyes de la física cuántica a objetos grandes como Kitty Pryde de la Patrulla X (fig. 33), hallamos que el efecto túnel sigue siendo posible, pero muy poco probable. ¿Cuán improbable? Suponiendo que la masa de Kitty sea de 50 kg (uno de sus nombres en clave era Sprite, después de todo), incluso si se lanzara contra la pared, con toda la velocidad de que es capaz, un millón de veces por segundo, tardaría más de la edad del universo antes de que pudiera esperar atravesar hasta el otro lado por el efecto túnel. Claramente la excepción milagrosa entra en juego aquí de forma contundente. Con nuestra comprensión avanzada de la física, podemos describir con seguridad el



poder mutante de Kitty Pryde como capaz de alterar su función de onda cuántica macroscópica para aumentar a voluntad su probabilidad de experimentar el efecto túnel hasta el ciento por ciento. Muy útil cuando uno se ha dejado las llaves olvidadas dentro del coche.

Un antiguo rompecabezas de los cómics es que si Kitty Pryde puede pasar a través de las paredes, ¿cómo es que no cae a la vez a través del suelo? ¿Y cómo, cuando está «en fase» y es inmaterial, puede caminar? En el número 141 de *X-Men* se argumentaba que mientras estaba en fase, Kitty camina en realidad sobre una capa de aire, sin estar en contacto real con el suelo. Cuando es inmaterial en su modalidad en fase no resulta por lo tanto afectada por ninguna trampa abierta bajo ella. Suponiendo por un momento que pueda realmente caminar sobre el aire, es decir que de algún modo el aire proporcione suficiente resistencia para ejercer una fuerza de reacción sobre sus pies que le permita un empuje de avance, impulsándola hacia delante, la cuestión sigue siendo cómo su pie parcialmente material puede seguir a su cuerpo a través de una pared.

Sin embargo, si el mecanismo por el cual es capaz de pasar a través de barreras sólidas es efectivamente el efecto túnel de la mecánica cuántica, entonces es perfectamente razonable que no se deslice a través del suelo. Cuando un electrón experimenta el efecto túnel desde un lado de la barrera al otro, conserva su energía en el proceso. Si tiene un cierto valor de energía cinética y potencial en un lado de la barrera, tiene la misma energía total después de haber completado el proceso de efecto túnel. De hecho, el efecto túnel solamente puede tener lugar cuando la energía del objeto es exactamente la misma en ambos lados de la barrera. La relación de la energía cinética a la potencial puede cambiar cuando se atraviesa una barrera por efecto túnel, desde una región permitida a otra.

Técnicamente, Kitty no puede caminar mientras está experimentando el efecto túnel, puesto que no puede aumentar su energía apoyándose contra ningún objeto, ya sea el suelo sólido o un colchón de aire. Pero a la vez no puede perder tampoco ninguna energía. Todo lo que necesita hacer es caminar normalmente mientras se acerca a la pared, activar su poder mutante para maximizar su probabilidad de efecto túnel, y entonces resbalará a través del tabique con la misma velocidad que tenía cuando se aproximaba al mismo. En las ocasiones en que desea pasar en fase a través del suelo, como en el número 4 de *Astonishing X-Men*, en donde realmente pasa en fase a través de casi treinta metros de metal sólido para llegar a un laboratorio subterráneo, debería saltar ligeramente mientras está todavía en fase corporal, y a continuación justo antes de que su pie toque el suelo, activar su capacidad mutante de efecto túnel. Continuaría su movimiento con la energía cinética última que tenía en su estado sólido, y descendería con una velocidad constante. Esto es probablemente más seguro para ella que si mantiene activado su potencial mutante de efecto túnel hasta que está cerca del suelo de la habitación inferior, y evita materializarse cerca del techo, donde tendría que vérselas con su ahora elevada energía potencial gravitatoria.

**FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO.** Si algún superhéroe demuestra el valor del aprendizaje de la física y en particular del estudio de los semiconductores que es parte de la física del estado sólido, es Iron Man, quien usaba un traje de armadura de alta tecnología para luchar a favor de la justicia. El núcleo de las asombrosas capacidades ofensivas y defensivas de Iron Man era una moderna (en 1963) maravilla tecnológica: el transistor.

El transistor fue efectivamente un dispositivo revolucionario, puesto que su capacidad para amplificar y modular voltajes tuvo un impacto profundo en nuestras vidas. Inicialmente el transistor se utilizó solamente para duplicar las funciones de los tubos de vacío, de forma que los aparatos de radio y de televisión pudieron llegar a ser más ligeros y eficaces. A medida que los científicos e ingenieros desarrollaron técnicas para obtener transistores cada vez más pequeños, su uso para cálculos matemáticos condujo al desarrollo de los ordenadores electrónicos. El transistor de estado sólido es el origen de casi todos los dispositivos electrónicos en uso actualmente. En este momento ya tenemos bastante física bajo nuestro cinturón como para comprender cómo funciona este notable dispositivo. Antes de profundizar en la física de los semiconductores, repasemos los acontecimientos que condujeron al debut de los cómics de Shellhead<sup>[79]</sup>.

La guerra fría aparece bastante en las aventuras mensuales de los cómics de la Edad de Plata de finales de los cincuenta e inicios de los sesenta. En DC Comics, pilotos de guerra con sus «efectos correctos» figuraron de modo prominente en varias ofertas. Cuando un alienígena Linterna Verde hizo un aterrizaje forzoso en la Tierra y estuvo a las puertas de la muerte en el número 22 de *Showcase*, instruyó a su anillo de poder para buscar alguien atrevido, honrado y valiente al cual pudiera legar el anillo y el farol de poder. El anillo seleccionó a un piloto de pruebas americano, Hal Jordan. (En el número 6 del *Showcase* de DC otro piloto de combate, Ace Morgan, dirige a los Challengers de Unknown.) La Era Marvel de los cómics comienza en 1961 (el mismo año en que los astronautas rusos y americanos viajaron por primera vez por el espacio), cuando cuatro aventureros —un científico, su novia, su hermano adolescente y un ex piloto de combate— llevaron a cabo un vuelo no autorizado con un cohete a través de un anillo de radiación cósmica para derrotar a los comunistas y enviarlos «a las estrellas». Los rayos cósmicos que absorbieron convertirían a este cuarteto en los Cuatro Fantásticos.

La «amenaza roja» del comunismo siguió dejándose ver en los cómics de Marvel con bastante frecuencia. Hulk, que hizo su aparición un año después que el debut de *Los Cuatro Fantásticos*, debió su existencia a los espías comunistas, cuando el físico Robert Bruce Banner quedó expuesto a una sobredosis de radiación gamma procedente de la detonación de una bomba Gamma. Su ayudante, que era en realidad un espía comunista (usted pensará que un ayudante de investigación llamado Igor debería haber sido una alerta al recibir su permiso de seguridad, pero no se preocupe), no detuvo deliberadamente la cuenta atrás, de modo que pudo eliminar al experto en bombas más adelantado de América, creando en su lugar a Hulk.

La presencia soviética en los primeros cómics de Marvel fue afrontada por la Antorcha Humana, Ant-Man, Spiderman, Thor y los Vengadores. Pero ninguno de los superhéroes Marvel de principios de los años sesenta estuvieron tan estrechamente aliados con la Guerra Fría como el invencible Iron Man. El número 39 de *Tales of Suspense* introdujo al brillante inventor e industrial Tony Stark en el Universo Marvel. Con su destreza con la tecnología transistorizada, Stark desarrolló nuevas armas militares como parte de su esfuerzo de ayudar a Estados Unidos a ganar la lucha contra el comunismo en Indochina. No contento con sólo probar esas nuevas armas en el laboratorio, Stark acompaña a un equipo de inspección al interior de las junglas de Vietnam, para evaluar con más precisión la eficacia de sus inventos. Por desgracia pronto vemos por qué más CEO no adoptan ese enfoque de participación activa para el control de calidad. Un sabotaje mata a los consejeros militares que viajan con Stark, y dejan a Tony abandonado a su suerte con un trozo de metralla de granada alojado en su pecho, peligrosamente cerca de su corazón. Para empeorar las cosas, es capturado y llevado al campamento secreto de Wong-Chu, el «tirano de la guerrilla roja». Un doctor del campamento de Wong-Chu determina que la metralla está migrando y que en cuestión de días alcanzaría el corazón de Stark matándolo.

Wong-Chu ofrece un trato a Stark: trabajar en su laboratorio de investigación armamentística (aparentemente era un campamento de guerrilla bien equipado) a cambio de la ayuda quirúrgica que salvara su vida. Stark accede, intentando usar sus escasos días para crear un tipo de arma que por una parte salvara su vida y por otra combatiera a su captor. Junto con el profesor Yinsen, un brillante físico cautivo también de Wong-Chu, Stark construye un chaleco metálico que, una vez cargado eléctricamente, evitaría que la metralla alcanzara su corazón. Al darse cuenta de que necesitaría armas ofensivas y defensivas si él y Yinsen querían escapar del campamento guerrillero, el chaleco metálico termina cargándose. La muerte de Yinsen es vengada y son liberados los otros prisioneros del campamento cuando Iron Man desafía al señor de la guerra comunista. Al regresar a Estados Unidos a través de las junglas de Vietnam del Norte (una historia no contada por completo hasta años más tarde en el número 144 de *Iron Man*), Tony Stark seguiría utilizando su armadura tecnológica para defender América de la agresión comunista.

Y, en efecto, Shellhead atrajo a los enemigos comunistas. A veces parecía tener un campo de «magnetismo rojo» en el interior de su traje acorazado. Arrastrado por el conflicto vietnamita, Iron Man combatió a más villanos comunistas en sus cuatro primeros años que casi todos los superhéroes Marvel juntos. Iron Man se enfrentó a Red Barbarian (número 42 de *Tales of Suspense*); a Crimson Dynamo (número 46 y 52 de *Tales of Suspense*); a una estación rusa de energía con forma de traje acorazado, diseñado para derrotar a Iron Man; al Mandarin (número 50, 54, 55, 61 y 62 de *Tales of Suspense*); a un señor de la guerra chino modelado según el malvado Fu Manchú de las novelas baratas de Sax Rohmer, quien poseía diez anillos de poder mortales, y a Titanium Man (número 67 a 71 de *Tales of Suspense*), una versión más fuerte de Iron Man construida por los soviéticos para derrotar a nuestro héroe en un conflicto televisado, mostrando así al mundo la superioridad del comunismo sobre el capitalismo. A través de todo esto, Tony Stark mantuvo la ficción de que Iron Man era una persona distinta, contratada por Stark para servirle como guardaespaldas. Dado el número de veces que los agentes comunistas trataron de raptar a Stark o de robar sus planes de investigación, no era una fachada dudosa.

Como si las constantes batallas contra villanos disfrazados no fueran bastante distraídas, Stark era llamado constantemente a testificar ante comités del Senado, que insistían en que su deber patriótico era entregar al ejército la tecnología de Iron Man. Poco sabía el senador Byrd (no el senador homónimo de Virginia Occidental), que condujo las investigaciones de las conexiones entre Iron Man y Stark Industries, que el secreto de Iron Man, el transistor, era de conocimiento público. El transistor fue desarrollado en 1947 por tres físicos de los Laboratorios Bell en Murray Hill, New Jersey, el laboratorio de investigación del servicio público de Bell Telephone. Con el fin de facilitar la adopción de esta nueva tecnología, los Laboratorios Bell pusieron en marcha seminarios para otras firmas interesadas en el uso de los transistores, instruyéndolas en los detalles de este nuevo campo de la física del estado sólido. No es suficiente con construir una trampa para ratones, ¡hay que asegurarse de que los ratones lo sepan!

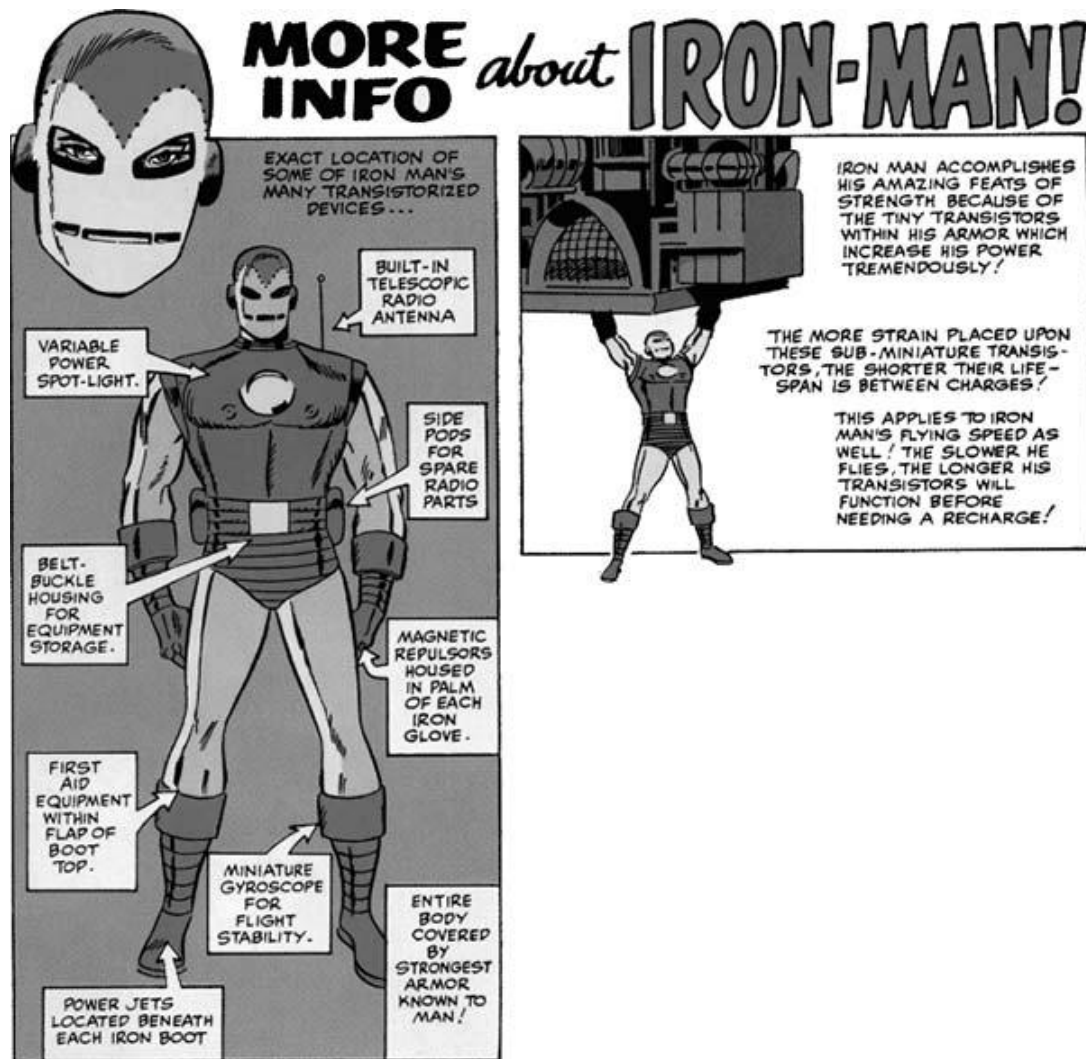
### **El hábito hace al monje**

Tras su primera aparición, el traje de Iron Man sufriría modificaciones casi constantes, tanto cosméticas como significativas. El traje era gris en el número 38 de *Tales of Suspense*, pero en el siguiente ejemplar Stark decidió cambiar el color a dorado, para impresionar más a las mujeres. Usted podría pensar que un industrial multimillonario que se parecía a Errol Flynn (el modelo en el cual los dibujantes basaron sus dibujos del bigotudo Tony Stark) no tendría que preocuparse acerca de si su identidad secreta como Iron Man resultaba atractiva a las mujeres, pero es probable que Tony Stark debiera su éxito a esa atención a los detalles. En el curso de un año el traje sería rediseñado de nuevo, ahora como un conjunto amarillo y rojo más ajustado, como se puede ver en la figura 36, el que, con variaciones menores, persistiría hasta nuestros días.

Las armas que estaban repartidas por todo el traje también experimentarían mejoras casi constantes. Inicialmente Stark tenía proyectores de «magnetismo invertido» en las palmas de sus guantes, pero muy pronto fueron convertidos en «rayos de repulsión» que eran en esencia «rayos de fuerza». Un gran disco suspendido sobre su pecho albergaba una «mancha luminosa de potencia variable» que evolucionaba hasta un «uni-haz» (no estoy seguro de lo que hacía esto). Originalmente tenía una antena de radio que se extendía por su hombro izquierdo, pero mejoras en la tecnología de transmisión y recepción inalámbricas le permitieron incorporar esta función en el interior del cuerpo de su traje de hierro.

La armadura en sí misma es todavía bastante pesada, incluso en su forma más flexible y elegante. El único modo en que Stark puede caminar en su prisión de hierro y levantar objetos que pesan varias toneladas es mediante la aplicación de «diminutos transistores del interior de su armadura que aumentan tremendamente su potencia». Y va a necesitar esta potencia extra. Para estimar el peso de la coraza, suponga que el traje de Iron Man es de tres milímetros de grueso y tiene la densidad promedio del hierro, que es aproximadamente de  $8 \text{ g/cm}^3$ . El área de la superficie necesaria para fabricar el traje puede calcularse de un modo aproximado suponiendo que el tronco de Tony es un cilindro y su cabeza otro más pequeño, y que sus brazos y piernas son cilindros más pequeños y más largos (¿recuerda la historia sobre el pollo esférico del capítulo 10? Esta vez supondremos un Iron Man cilíndrico). Si Tony tiene una altura de un metro ochenta centímetros y su chaqueta es un 50 Regular, entonces su área total

es de unos 26.200 cm<sup>2</sup>. El volumen de hierro del interior de su traje se halla multiplicando el área superficial por el grueso de la armadura de 3 mm, arrojando un volumen total de metal de aproximadamente 7.860 cm<sup>3</sup>. Para determinar cuánto pesa, multiplicamos este volumen por la densidad (8 g/cm<sup>3</sup>) y obtenemos 62.880 g, excluyendo el peso de toda la circuitería transistorizada. Tony Stark acarrearía todo esto en su maletín (con una camisa cubriendo la armadura como camuflaje, ver el número 55 de *Tales of Suspense*), a excepción de la placa del pecho, naturalmente, que lleva puesta constantemente para evitar que la metralla avance hasta su corazón. En consecuencia, simplemente para arrastrar casi 40 kg de armadura en su maletín, Tony debería haber desarrollado un supercuerpo considerable y ejercer fuerza como parte de las ventajas de ser Iron Man.



**Fig. 36.** Viñetas de una sección extra de «Todo sobre Iron Man» del n.º 55 de *Tales of Suspense*, que proporcionan un esquema del Vengador Dorado de los años sesenta, y que explican que la carga para el abastecimiento de potencia que alimentan sus transistores se consume cuanto más los utiliza.

El peso del traje lleva a la pregunta de cómo sus botas cohete permiten volar a Iron Man. Si el

traje pesa casi 70 kg, y el propio Stark lleva la báscula a 80 kilos, entonces los propulsores de sus botas tienen que suministrar una fuerza hacia abajo de 150 kg, justo para que Iron Man ronde por el aire. Probablemente esos cohetes utilicen una reacción para expeler los reactivos de las suelas de sus botas. Puesto que cada acción está equilibrada por una reacción igual y opuesta, esta fuerza hacia abajo supone un impulso hacia arriba sobre Iron Man, manteniéndolo en lo alto. Si quiere acelerar, entonces sus botas tienen que proporcionarle incluso más fuerza, dado que solamente la fuerza en exceso de su peso proporcionará una aceleración ( $F = m a$ ).

Tony tenía que viajar con frecuencia desde la planta de sus Stark Industries en Long Island hasta la mansión de los Vengadores en cuestión de diez minutos. Esto corresponde a una velocidad media de 185 km/h, lo que es casi la mitad de la velocidad del sonido. Ignorando la energía que puede emitir Shellhead para apartar el aire de su camino mientras corre a esta velocidad, esto supone una energía cinética  $(1/2) m v^2$  a esta velocidad, su armadura requiere al menos 1,37 millones de  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$  de energía. En comparación, una persona promedio gasta más de ocho millones de  $\text{kg m}^2/\text{s}^2$  de energía en un día completo. Cuando Iron Man necesitaba viajar a grandes distancias prescindía de los cohetes de las botas y utilizaba los patines de rodillos motorizados que las equipaban. No solamente serían más eficaces en cuanto a consumo de fuel, dado que no hay que gastar energía para contrarrestar la gravedad manteniendo a Shellhead en el aire, sino que siempre que frena podría utilizar la energía de rotación y un alternador para recargar sus baterías internas, como ocurre con un automóvil. De este modo Tony Stark anticipó la reciente tecnología de automoción de motor híbrido.

En los años setenta Iron Man iba de color verde, y su coraza estaba ahora recubierta con una fina capa de células solares que le permitían recargarse bajo la luz directa. La energía solar de un día medio en Estados Unidos es de alrededor de  $200 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$  por segundo sobre un área de un metro. Acabamos de calcular el área superficial del traje de Iron Man, igual a  $26.200 \text{ cm}^2$ , lo que significa que la cantidad de energía que recibe por segundo es de  $2.262 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$  (en cualquier instante solamente la mitad del área disponible está orientada hacia el Sol); mientras sus botas necesitan un gasto de potencia de más de más de un millón de  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$ . Si las células solares tienen un rendimiento del 50% en la conversión de la energía solar en energía almacenada en las baterías de Tony (la mayor parte de las células solares disponibles comercialmente tienen un rendimiento de conversión de solamente un 10%) Iron Man tendría que reposar en la playa durante casi tres horas para absorber suficiente luz solar para un viaje de ese estilo. No hemos tenido en cuenta la energía necesaria para hacer funcionar la unidad interna de aire acondicionado del traje (apartar el aire del trayecto a 185 km/h hará que una persona dentro de un metal se empape en sudor), ni tampoco si tiene que disparar sus rayos de repulsión durante el vuelo. En el curso normal de un día típico de la vida de Iron Man, gastará energía mucho más deprisa que lo que pueda recargar sus baterías de almacenamiento mediante células solares.

Para dar crédito a los escritores de los cómics de Iron Man, su preocupación por los mecanismos de Tony para recargar las baterías de almacenamiento de su armadura implica un reconocimiento del principio de conservación de la energía. Desde su primera aparición en el número 39 de *Tales of Suspense*, siempre se reconoció que hacer funcionar el traje mecanizado que desarrolló Stark necesitaba de grandes cantidades de energía y que cuanto mayor fuera el gasto de potencia, más deprisa se reducirían las reservas de energía que podía llevar encima. No solamente era necesaria una reserva de energía

eléctrica para animar sus botas a reacción y activar los servomotores que le permitían moverse en el traje y aumentar su fuerza, sino que su placa pectoral necesitaba también energía eléctrica para proteger su corazón de la metralla que llevaba siempre consigo desde el fatídico día en Vietnam. El Iron Man de los años sesenta hubo de arrastrarse en ocasiones por el suelo luego de una batalla agotadora, en busca de una toma de corriente eléctrica para recargar sus baterías de reserva.

Incluso después de haber llevado a cabo la transición a la armadura impulsada por energía solar, el traje de Stark podía quedarse seco en una emergencia. En el número 133 de *Iron Man*, Tony apuró cada último ergio de energía (un ergio es una diez millonésima de  $1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ ) de su traje en una enardecida batalla sin límites con el Increíble Hulk. Tony concentró toda la energía almacenada en su traje en un puñetazo final, y logró lo que había sido antes imposible: Iron Man noqueó a Hulk dejándolo inconsciente. Pero el coste para Tony Stark fue alto. Sin ninguna potencia en absoluto para mover su traje, Stark quedó atrapado, incapaz de moverse dentro de su ahora rígida coraza. Para empeorar las cosas, la cubierta protectora de las ranuras de sus ojos y boca había quedado enclavada para apantallararlo del cohete explosivo. Tony estaba por tanto enfrentado a la sofocación una vez que el aire contenido en el traje se consumiera. Ant Man necesitaría todo el ejemplar siguiente para abrirse camino a través de la entrada de la bota a reacción de Iron Man para viajar a lo largo de la armadura, evitando los mecanismos protectores internos del traje, y desacoplar las cubiertas protectoras del blindaje del rostro.

### **Combate y combate con rayos de repulsión**

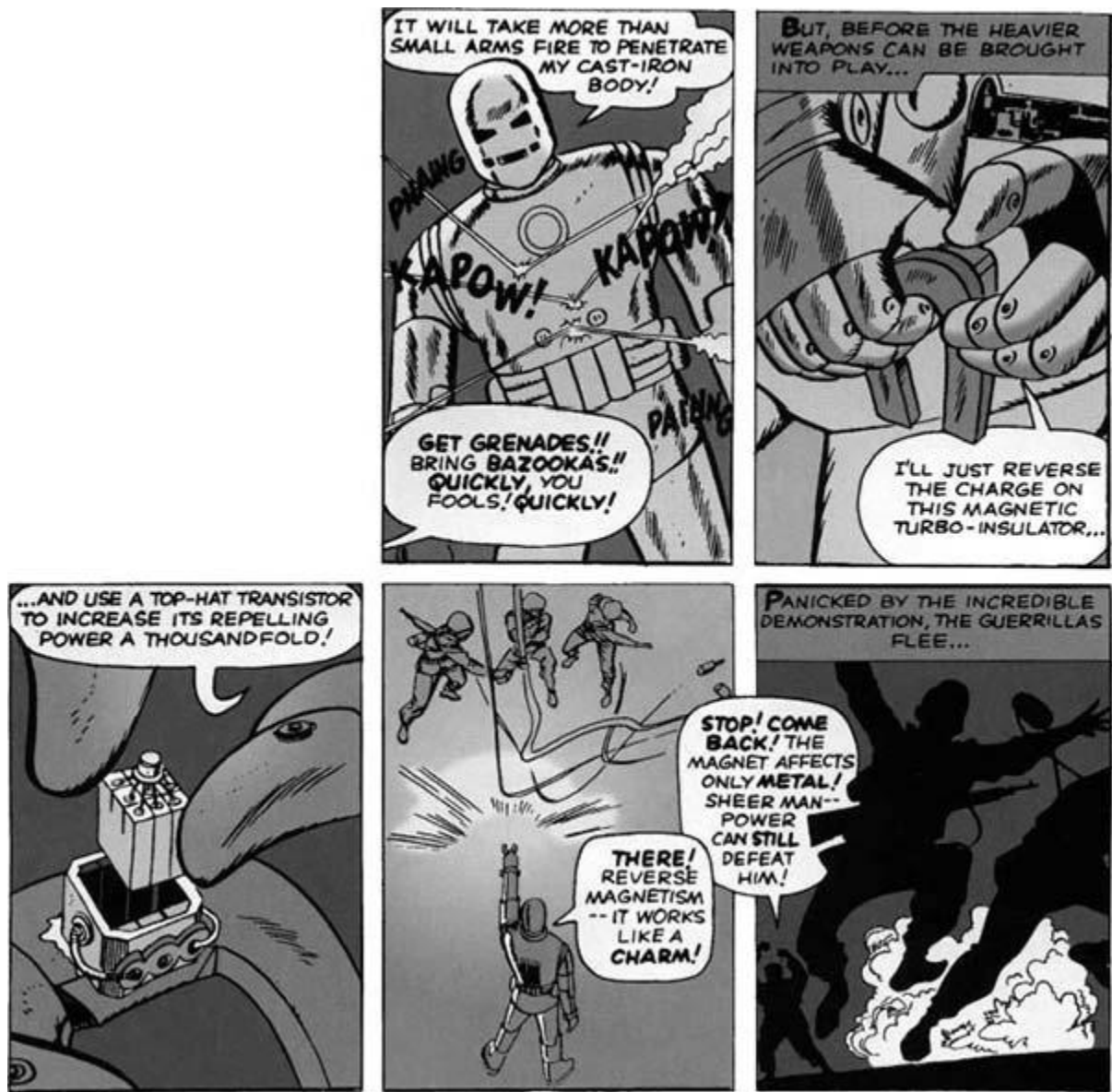
De todas las armas de Iron Man, la más eficaz es la de sus «rayos de repulsión», lanzados desde discos en las palmas de sus guantes blindados. En su primera aparición en el número 37 de *Tales of Suspense*, la primera versión de su arma de repulsión basada en sus guantes era un rayo de «magnetismo inverso» utilizado para escapar del campamento prisión de Wong Chu. Los guardias de Wong-Chu, al ver que las pequeñas armas de fuego rebotaban sin dañarlo en el traje de hierro que usaba el intruso, respondieron preparándose a disparar bazucas y a lanzar granadas al invasor yanqui. La figura 37 muestra esto mientras preparan el armamento pesado. Tony se toma su tiempo para «invertir la carga de su turbo aislante magnético y usa un transistor con forma de sombrero de copa» para aumentar mil veces su poder de repulsión. Al lanzar los rayos desde su mano, desviando las armas, exclama: «Eh, aquí. El magnetismo inverso ¡funciona como un embrujo!».

De hecho, debería funcionar como un embrujo, puesto que no hay forma de que pueda hacerlo utilizando la física del estado sólido. Solamente hay un aspecto de la escena resumida antes que es físicamente correcto, y que involucra al «transistor de sombrero de copa». No hay nada que sea un «turbo aislante magnético», eso no es más que tecno-cháchara. El modificador «turbo» es lo que hace que tales aislantes parezcan algo estupendo. Existen imanes que son no metálicos, es decir que son aislantes eléctricos y a pesar de ello generan un gran campo magnético, y existen en efecto dispositivos llamados «transistores de sombrero de copa». Se les llama así porque parecen pequeños cilindros, del tamaño de una goma de borrar (fue a principios de los años sesenta, bastante antes de que la miniaturización de los transistores hiciera posible la fabricación de millones de tales dispositivos en un chip del tamaño tan sólo de unos pocos milímetros en cada lado), con un pequeño disco en su base

desde el cual se extendían los electrodos, semejante a una de las piezas del juego del monopoly. La viñeta en la que se ve a Tony Stark empleando tal dispositivo para amplificar la corriente de su «turbo aislante magnético» es físicamente plausible. Pero no así la penúltima viñeta, en la que emplea a continuación dicho dispositivo para desviar las granadas y los disparos de bazuca mediante el «magnetismo inverso».

Aunque cada electrón, protón y neutrón de cada átomo tiene un campo magnético intrínseco, la tendencia natural de los imanes a alinearse, encarando el polo norte con el sur, tiene el efecto de cancelar el magnetismo de la mayoría de los átomos. Cualquier campo magnético creado por Iron Man usando un potente electroimán en la palma de su guante solamente sería efectivo si *a)* las granadas lanzadas contra él estuvieran por alguna razón ya magnetizadas; *b)* fueran lanzadas de forma tan perfecta que el polo norte de cada una estuviera orientado en la misma dirección y *c)* el campo magnético creado por la mano de Iron Man estuviera también orientado de modo que el polo norte estuviera dirigido hacia las granadas que llegan, lo que tendría el efecto de acelerar los proyectiles hacia él. Es improbable que Tony Stark pueda contar siempre con que sus oponentes cooperen con proyectiles magnéticos convenientemente orientados.





**Fig. 37.** Iron Man, en su primera aparición en el n.º 39 de *Tales of Suspense*, lucha para escapar del campamento-prisión vietnamita utilizando un transistor del tipo sombrero de copa y un «turbo aislante magnético». © 1962 Marvel Comics

Irónicamente, el rayo de magnetismo inverso de Iron Man tiene una oportunidad mejor de funcionar sobre objetos no magnéticos. Recuerde nuestra discusión del capítulo 18 relativa a Magneto y al fenómeno de la levitación diamagnética. A diferencia de metales como el hierro o el cobalto, para los cuales los campos magnéticos atómicos internos se alinean en la misma dirección, muchos materiales, incluyendo el agua, son diamagnéticos. En este caso cuando están expuestos a un campo magnético externo los imanes atómicos se orientan para oponerse al campo aplicado. En este caso todos los polos sur de los imanes atómicos se alinean para apuntar en la dirección del polo sur del imán externo, es decir, en la forma opuesta a la que se comportaría un imán de hierro. Así pues el proceso

mismo de intentar magnetizar al objeto conduce a una fuerza repulsiva. En el capítulo 18 dijimos que si el campo magnético creado por Magneto es más que 200.000 veces mayor que el campo magnético terrestre, entonces esta fuerza repulsiva puede sobrepasar al peso del objeto, levantándolo del suelo. De modo parecido, el magnetismo inverso de Iron Man podría repeler objetos, pero solamente si fueran diamagnéticos, y no funcionaría con objetos metálicos que son o bien ferromagnéticos o bien paramagnéticos (los que se alinean con el campo aplicado). Magneto crea esos grandes campos magnéticos mediante su poder mutante, pero Iron Man debe hacerlo a la antigua usanza mediante electroimanes (parecidos al construido por Superboy en el capítulo 18). Puesto que Iron Man no transporta una dinamo eléctrica consigo, unos pocos disparos de este rayo de magnetismo inverso agotarían sus baterías más deprisa que una pelea con Hulk. Es más, el culatazo de tales armas es considerable. Cuando se proporciona una gran fuerza que golpea su objetivo, se inducirá una fuerza igual y opuesta sobre el cañón y el tirador que lo sostiene. Tony Stark fue inteligente al montar sus rayos de repulsión en sus guantes. Cerrando los servomotores que permiten moverse a sus brazos blindados, su traje de hierro proporciona una masa inercial grande y rígida para absorber el retroceso siempre que dispare su arma basada en los guantes.

Aunque es posible que el «magnetismo inverso» no sea físicamente práctico, armas portátiles de pulsos de energía han empezado a hacer la transición desde las fantasías de los cómics a la investigación militar. Desde luego tales armas no pueden ser lo mismo que los «repulsores magnéticos» que utiliza Iron Man, por las razones antes expuestas. La energía necesaria para generar un campo magnético lo bastante grande como para desviar un objeto utilizando solamente la repulsión diamagnética es tan grande que sería más eficaz emplear armamento convencional. No obstante, sistemas de energía «pulsante» se hallan bajo desarrollo activo por el ejército. Generando un gran voltaje en el interior del arma que se pueda descargar rápidamente en una milésima de segundo, la potencia (energía dividida por tiempo) podría ser muy elevada. Este pulso electromagnético, si se dirige contra un objetivo, depositaría su energía en una región localizada en menos tiempo del necesario para que se disipe el calor de modo seguro. En los laboratorios de física se utilizan rayos láser de alta intensidad asestados mediante pulsos extremadamente breves, para derretir casi instantáneamente una región pequeña de una superficie cristalina, y en principio el mismo proceso podría emplearse con fines ofensivos. El gran problema es el requisito de energía de un arma de ese tipo. Si uno debe transportar una planta de energía en miniatura con el fin de disparar un arma de energía pulsante de ese tipo, se perdería el elemento sorpresa en cualquier situación de combate.

### **La física del estado sólido explicada de modo fácil**

¿Qué es un transistor, ese elemento electrónico que, de acuerdo con Stan Lee al menos, está dotado de las milagrosas facultades que permiten a Iron Man encerrar entre rejas a Mandarin, Crimson, Dynamo y Titanium Man? Una respuesta breve es que los transistores son válvulas que regulan el flujo de la corriente eléctrica en un circuito. Tales respuestas son fáciles de recordar, pero no nos dicen nada acerca de cómo funcionan realmente los transistores. La primera pregunta que deberíamos plantear es: ¿qué es exactamente un semiconductor, si no es metal ni aislante? Oímos mucho acerca de que vivimos en la Era del silicio, pero ¿qué es lo que hace tan especial al silicio? En las pocas páginas que siguen intentaré condensar más de cincuenta años de física del estado sólido para contestar a estas cuestiones.

El silicio es un átomo, un elemento básico de la naturaleza, como el carbono, el oxígeno o el oro. El núcleo de un átomo de silicio tiene 14 protones cargados positivamente y por lo general 14 neutrones eléctricamente neutros, y para mantener la neutralidad de la carga hay 14 electrones cargados negativamente rodeando al núcleo. Estos electrones residen en las «órbitas mecanocuánticas» que, como se vio en los capítulos 20 y 21, se originan de la naturaleza ondulatoria de toda la materia. Las posibles «órbitas electrónicas» son específicas para cada elemento y determinan las energías permitidas del electrón.

La mecánica cuántica nos permite calcular, mediante la ecuación de Schrödinger, las «órbitas» permitidas de los electrones de un átomo, y saber cuántas órbitas posibles distintas puede tener un electrón en un átomo es como saber el número de disposiciones de sillas en una clase (permanezcan a mi lado; esta metáfora de la clase va a resultar útil para explicar los metales, los aislantes y los semiconductores). Las sillas representan solamente clases posibles o virtuales; la clase no es real hasta que los estudiantes no entran y ocupan sus asientos. Si solamente viene un estudiante y toma asiento, esto es como tener un único electrón en una órbita mecanocuántica posible. Llamaremos a esto la clase de hidrógeno, en analogía con el átomo que tiene solamente un electrón en su forma neutral estable. Si hubiera dos estudiantes sentados en la clase, tendríamos el helio, catorce estudiantes formarían el silicio, y así en adelante. Los primeros estudiantes que entran en la clase ocupan las sillas del frente de la misma, cerca de la pizarra en nuestro ejemplo hipotético. El último estudiante que entre se sienta cerca de la parte de atrás del auditorio, lejos de la pizarra (en la que estará el núcleo cargado positivamente). Esta disposición con cada silla ocupada por un estudiante describe la configuración de menor energía. Para un átomo de carbono con seis electrones, las órbitas más cercanas están ocupadas. Si el átomo de carbono gana alguna energía, absorbiendo luz por ejemplo, algunos de sus electrones ocuparán entonces órbitas de mayor energía.

El que un material sea metal, semiconductor o aislante depende de la separación de energía entre el nivel más alto ocupado por un electrón y el siguiente nivel desocupado más próximo disponible. En la analogía de la clase el sólido puede concebirse como un auditorio muy grande con muchas filas de sillas, suministradas por los átomos constituyentes que forman el material. Habrá una galería vacía que contiene un número igual de asientos. Si los electrones que se sientan en las sillas de menor energía de la primera fila<sup>[80]</sup> han de conducir electricidad cuando se aplica un voltaje a través del sólido, entonces ganan una energía extra. Solamente pueden absorber esta energía si hay un estado vacío de mayor energía al que se pueda desplazar al electrón (recuerde la discusión de los niveles de energía cuantificados del capítulo 20). Las propiedades eléctricas de cualquier sólido están determinadas por el número de electrones que residen en los asientos de primera fila y por la separación entre los asientos ocupados más bajos y los siguientes vacíos de la galería.

La diferencia entre aislantes y metales queda clara con esta analogía. Un aislante es un sólido en el que cada asiento de la primera fila está ocupado, mientras que un metal es un material para el cual están ocupados solamente la mitad de los asientos del nivel inferior. En un metal hay un gran número de asientos vacíos en la primera fila disponibles para un electrón, y la aplicación de un voltaje, tanto si es pequeño como grande, puede acelerar los electrones a estados de mayor energía (lo que corresponde al transporte de una corriente eléctrica). Los metales son buenos conductores eléctricos porque sus

sillas inferiores ocupadas por electrones están solamente medio llenas. Para el aislante cada silla está ocupada y, al faltar el ascenso a la galería, no resultará ninguna corriente al aplicar un voltaje a través del material. Si aumento la temperatura de un aislante, proporcionando un exceso de energía externa en forma de calor, parte de los electrones pueden elevarse hasta la galería antes vacía. En la galería habrán muchos asientos libres para que el electrón transporte una corriente, pero esto durará solamente el tiempo durante el cual la temperatura se mantenga elevada. Si la temperatura desciende, los electrones de la galería descenderán y volverán a sus asientos de baja energía en la primera fila.

Si el aislante absorbe energía en forma de luz, puede elevar inmediatamente un electrón a la galería. Cuando el electrón retorna a su asiento de la primera fila, tiene que conservar energía y de este modo cederá la misma cantidad que había absorbido previamente. Hará esto o bien emitiendo luz de la misma energía que fue absorbida inicialmente, o bien puede inducir vibraciones atómicas (calor). Es por esto por lo que la luz brillante sobre un objeto lo calienta —los electrones absorben la energía de la luz, pero pueden devolver la energía absorbida en forma de calor—. Si la energía de la luz es insuficiente para elevar un electrón desde los asientos de la primera fila muy ocupada hasta los de la más vacía, la luz no es absorbida. En este caso, la luz de menor energía es ignorada por los electrones del sólido y pasa sin más a través de éste. Los aislantes tales como el vidrio de ventana son transparentes debido a que la separación entre la primera fila llena y la galería vacía para este material está en la zona ultravioleta del espectro, de forma que la luz visible con una energía menor pasa sin más a través suyo. Por otra parte, los metales siempre tienen asientos vacíos disponibles para absorber luz incluso en la primera fila medio vacía. No importa lo pequeña que sea la energía de la luz, un electrón de un metal puede absorberla y devolverla después de retornar a su asiento de menor energía. Ésta es la razón por la que los metales son brillantes. Siempre emiten la misma energía luminosa que absorben, y no hay un límite menor para la energía que pueden absorber.

Un semiconductor no es más que un aislante con un desfase de energía relativamente pequeño comparado con la energía de la luz visible que separa la banda inferior llena de la siguiente banda vacía. Para una separación de energía tal, una cierta fracción de los electrones tendrá suficiente energía térmica a temperatura ambiente como para ascender a la galería. Cuando los electrones están excitados en la plataforma superior, el material tiene ahora dos formas de conducir la electricidad. Por cada electrón ascendido a la banda de energía más alta que puede conducir electricidad, queda un estado vacío tras él. Las sillas vacías en la primera fila antes llena se pueden considerar como «electrones positivos» o «agujeros», y pueden transportar también corriente. Si un electrón adyacente a un asiento vacío se desliza para ocuparlo, entonces el sitio vacío se ha desplazado una posición. De esta forma podemos considerar que el agujero se mueve como respuesta a un voltaje externo y puede también transportar corriente. Naturalmente, los electrones originales volverán a caer a la primera fila, llenando los asientos vacíos que dejaron tras ellos (aunque no necesariamente los mismos que ocupaban al principio). Cuando ciertos semiconductores absorben luz, hay bastantes electrones excitados en la banda superior y agujeros en la inferior como para convertir el material de un aislante en un buen conductor eléctrico. Tan pronto como se apaga la luz, los electrones y los agujeros se recombinan, y el material se vuelve aislante de nuevo. Estos semiconductores se llaman *fotoductores* y se utilizan como sensores luminosos, ya que su capacidad para transportar corriente eléctrica cambia teatralmente

cuando se exponen a la luz. Ciertos detectores de humos, controles remotos de televisión y los mecanismos de apertura automática de puertas de los supermercados utilizan fotoconductores para su funcionamiento.

Los dispositivos semiconductores se construyen típicamente de silicio porque éste tiene un intervalo convenientemente justo bajo el rango de la luz visible. Además es un elemento abundante (la arena está compuesta por dióxido de silicio) que es relativamente fácil de purificar y manipular. Hay veces en que las restricciones físicas del tamaño del intervalo de energía del silicio limita el rendimiento del dispositivo, y en este caso se pueden utilizar otros materiales semiconductores, tales como el germanio o el arseniuro de galio. Las capacidades de visión nocturna de Iron Man y los de los dispositivos militares hacen uso de las propiedades de fotoconducción de un semiconductor y de un pequeño intervalo de energía que está en la zona infrarroja del espectro electromagnético.

Todos los objetos emiten radiación electromagnética debido a que están a cierta temperatura, de modo que sus átomos oscilan a una frecuencia determinada que refleja su energía cinética promedio. En una noche oscura y sin luna, la temperatura de la mayoría de los objetos inertes disminuye (puesto que no absorben luz solar), así que emiten radiación a frecuencias más bajas. Los humanos, por otra parte, tienen procesos metabólicos que mantienen una temperatura uniforme de 37 °C. En consecuencia, emitimos una cantidad apreciable de energía (tanta como una bombilla de 100 w) en la zona infrarroja del espectro. Nuestros ojos no son sensibles a esta parte del espectro, pero se pueden elegir semiconductores que tengan una gran fotoconductividad cuando quedan expuestos a la luz infrarroja. Por la noche la luz infrarroja emitida por una persona de sangre caliente es mucho mayor que su entorno más frío.

Ciertas gafas de visión nocturna que utilizan «imagen térmica» detectan esta luz mediante semiconductores en el papel de lentes, que absorben la radiación infrarroja emitida por un objeto a una temperatura de unos 38 °C. La fotocorriente en el detector del semiconductor es transportada a continuación a un material adyacente, construido químicamente para emitir un rayo luminoso cuando se recombinan los electrones y los agujeros fotoexcitados. De este modo la luz infrarroja que nuestros ojos no pueden detectar usualmente se desvía hacia la parte visible del espectro electromagnético, permitiéndonos así ver en la oscuridad. Esas gafas detectan también luz visible, al igual que luz infrarroja durante el día. Todos los objetos emiten más o menos la misma intensidad de luz si están a la misma temperatura (recuerde nuestra discusión sobre curvas de luz del capítulo 20). Cuando los objetos que rodean a una persona están más calientes (debido a la luz solar absorbida) el contraste entre la luz infrarroja de una persona y de su entorno inanimado disminuye, y en consecuencia la utilidad de las gafas.

### **¿De qué color son los ojos de la Mujer Invisible?**

Una comprensión de la fotoconductividad de los semiconductores ayuda también a resolver la cuestión que ha mantenido perplejos desde hace mucho a los aficionados de los cómics: ¿por qué no es ciega la Mujer Invisible? Cuando los Cuatro Fantásticos hicieron su viaje en cohete de aciago destino, Sue Storm (ahora Susan Richards) obtuvo la capacidad de volverse completamente transparente a

voluntad. ¿Cómo puede hacerlo, y cómo puede ver si la luz visible pasa a través de ella? La pregunta más básica es: ¿cómo vemos algo?

Las moléculas que forman las células de nuestros cuerpos absorben luz de la parte visible del espectro electromagnético. El añadido de ciertas moléculas, como la melanina, puede aumentar esta absorción, oscureciendo la piel. Como resultado de su exposición a los rayos cósmicos, la Mujer Invisible tiene la capacidad de aumentar el «intervalo de energía» de todas las moléculas de su cuerpo (ésta es probablemente la naturaleza de su «excepción milagrosa»). Si la separación entre la primera fila más baja llena y la galería superior vacía aumenta de tal forma que se extienda a la porción ultravioleta del espectro, entonces la luz visible será ignorada por las moléculas de su cuerpo y pasará sin más a través de ella. Esto no es tan carente de lógica, todos poseemos células invisibles que son transparentes a la luz visible. De hecho, usted las está utilizando ahora, al leer este texto a través de las lentes transparentes de sus ojos.

La luz solar contiene una gran cantidad de luz ultravioleta, que tiene más energía que la luz visible. En general no pensamos en la parte ultravioleta del espectro solar hasta que no nos bronceamos en un brillante día de verano. Cuando Sue se vuelve invisible, sigue absorbiendo y reflejando luz de la región ultravioleta del espectro. No podemos verla porque los bastoncillos y los conos de nuestros ojos no absorben de modo resonante la luz ultravioleta. Gafas especiales UV (como las que instaló el Doctor Muerte en su máscara armada) podrían desplazar la luz ultravioleta reflejada por Sue hacia la región visible del espectro, mediante un mecanismo similar al usado en las gafas de «visión nocturna» que desplazan la luz infrarroja de baja energía hacia la parte visible del espectro.

Esto explica también por qué puede ver la Mujer Invisible. Los bastones y los conos de sus ojos, cuando es transparente, son sensibles a la luz ultravioleta dispersa que se refleja en nosotros y que es ignorada por nuestros ojos. El mundo que ve Sue mientras es invisible no tiene el colorido normal que nosotros percibimos, puesto que el desplazamiento de las longitudes de onda de la luz que ella detecta no está asociado con los colores del arco iris. Las ventanas nos resultan transparentes porque transmiten la luz visible y absorben la ultravioleta. No podemos ver la luz ultravioleta, así que no podemos percibir su absorción. No obstante, cuando Sue es invisible una ventana le parecerá un gran espacio oscuro, mientras que otros objetos le parecerán transparentes. Con algo de práctica será capaz de maniobrar bastante bien.

Este mecanismo que explica la capacidad de Sue para ver mientras es invisible fue sugerido en el número 62 de *Los Cuatro Fantásticos* (diciembre 2002) que corresponde al número 461 de la serie que comenzó en 1961. En este ejemplar, escrito por Mark Waid y dibujado por Mike Wieringo, se nos dice que, mientras es invisible, Sue ve detectando los rayos cósmicos dispersados que están alrededor nuestro pero que no podemos percibir con la visión normal. La idea es correcta, pero la fuente de iluminación es errónea. Los rayos cósmicos del espacio exterior no son fotones de luz sino que en su mayor parte son protones a alta velocidad que, luego de chocar con átomos de la atmósfera, generan una lluvia de electrones, fotones de rayos gamma, muones (partículas elementales relacionadas con los electrones), y otras partículas elementales. Usualmente no nos preocupamos del daño que produce la radiación ni de obtener superpoderes mediante la mutación inducida por rayos cósmicos, al menos al

nivel del mar, ya que el flujo de partículas es un trillón de veces menor que el de la luz solar. Si Sue dependiera de los rayos cósmicos para ver al nivel de la calle estaría constantemente tropezando con objetos y personas. Es más plausible que su visión utilice el mismo mecanismo por el cual se vuelve transparente, es decir, un desplazamiento de su composición molecular hacia la parte ultravioleta del espectro.

### **¿Qué es un transistor y por qué debería importarnos?**

Volvamos a Tony Stark y a su armadura transistorizada. Cuando Tony necesita aumentar el poder de repulsión de su turbo aislante magnético utiliza un transistor de sombrero de copa. ¿Cómo pueden los transistores amplificar señales débiles, para que los radios sean portátiles y los rayos de repulsión potentes?

Aunque los semiconductores son útiles como dispositivos fotoconductores, si ésta fuera su única aplicación nadie pensaría en calificar a nuestra era la Edad del silicio. Lo que convierte a los semiconductores tan asequibles para tenerlos en casa es que podemos cambiar su capacidad para conducir la electricidad en un factor de más de un millón con sólo añadir intencionadamente una pequeña cantidad de impurezas químicas. No solamente eso, sino que dependiendo de la impureza en particular, se puede añadir al semiconductor un exceso de electrones o extraerlos de la clase llena, creando por lo tanto agujeros adicionales que pueden asimismo conducir electricidad. Cuando un material con exceso de electrones se coloca cerca de un semiconductor con huecos adicionales, se tiene una célula solar, y si se le añade una tercera capa con exceso de electrones encima de eso, se ha fabricado un transistor.

Se sabe desde hace mucho que el añadido de ciertos productos químicos pueden cambiar las propiedades ópticas y electrónicas de los aislantes. A fin de cuentas, así es como se fabrica el vidrio de color. El vidrio ordinario de las ventanas tiene un intervalo de energía que es mayor que la energía de la luz visible, y por eso es transparente. Pero si al vidrio se añade una pequeña cantidad de manganeso cuando está derretido, después de enfriarse el vidrio tiene un color violeta cuando la luz pasa a través suyo. El manganeso tiene una absorción resonante justo en mitad del intervalo de energía del vidrio, como si hubiéramos colocado algunas sillas de más en las escaleras que enlazan la primera fila llena y la galería vacía. Determinadas longitudes de onda de luz visible que pasarían corrientemente a través del material sin ser molestadas inducirán ahora una transición en los átomos de manganeso añadidos al vidrio. De esta forma se eliminan ciertas longitudes de onda de la luz blanca transmitida a través del vidrio, dando al material de la ventana un color o «tinte». Distintas impurezas químicas, tales como el cobalto o el selenio, añadirán diferentes coloraciones (azul y rojo, respectivamente) al aislante normalmente transparente.

El mismo principio vale para los semiconductores, sólo que las impurezas químicas que elegimos para añadir pueden o bien hacer muy fácil la elevación de los electrones a la galería o bien extraer electrones de la clase llena, dejando huecos en su lugar. Un semiconductor para el cual las impurezas químicas ceden electrones se llama de «tipo-n», puesto que los electrones están cargados negativamente, mientras que aquellos para los cuales las impurezas químicas aceptan electrones de los

estados más bajos ocupados se llaman de *tipo-p*, en referencia a los huecos cargados positivamente que se crean. Lo que es especial en tales semiconductores con impurezas añadidas no es que su conductividad pueda cambiar espectacularmente (si quisiéramos un material más conductor utilizaríamos un metal) sino más bien lo que ocurre cuando ponemos un semiconductor tipo-n junto a otro tipo-p. Los electrones y huecos más próximos a la interfaz entre ambos materiales se recombinan rápidamente, pero las impurezas químicas, que también tienen una carga eléctrica, permanecen detrás. Las impurezas cargadas positivamente en la región de tipo-n y las cargadas negativamente de la región tipo-p crean un campo eléctrico, como el que existe entre cargas positivas y negativas en el espacio. Estos campos eléctricos apuntan en una dirección. Si tratamos de pasar una corriente a través de la interfaz entre los semiconductores tipo-n y tipo-p, se moverán con mucha facilidad en la dirección del campo, y les resultará muy difícil ir en dirección opuesta al campo. Este sencillo dispositivo se llama «diodo» en la oscuridad y «célula solar» cuando se arroja luz sobre él. Cuando las uniones p-n absorben luz, los electrones y los huecos inducidos por la luz crean una corriente, aunque no estén conectados a una batería. Las cargas son empujadas por el campo eléctrico interno con tanta seguridad como si el dispositivo estuviera conectado a una fuente de voltaje externa. Una célula solar puede generar por lo tanto una corriente eléctrica por la combinación de los nuevos electrones y huecos extra inducidos por la luz con el campo eléctrico interno dejado por las impurezas cargadas. Ésta es una de las poquísimas maneras de generar electricidad que no implica el movimiento de un cable a través de un campo magnético y no se necesita consumir combustible fósil para que funcione este dispositivo.

Un transistor adopta la dirección de la corriente eléctrica de un diodo y permite cambiar el campo eléctrico interno. Al hacerlo, el transistor puede considerarse un tipo especial de válvula, en la que una señal de entrada determina el grado de abertura de la válvula, lo cual lleva a su vez a que fluya una corriente grande o pequeña a través del dispositivo. Volviendo a la analogía del flujo de agua para la corriente eléctrica del capítulo 16, una manguera de incendios se conecta al suministro de agua de la ciudad y, al abrir la válvula que conecta la manguera con el grifo, el agua fluye a través de la manguera. Si la válvula está apenas abierta, el flujo será muy débil, y a medida que la válvula se abre más y más, aumenta la cantidad de agua que sale de la manguera. Normalmente tenemos que girar manualmente el mango de la válvula para efectuar un cambio. Imagine ahora una válvula conectada a una segunda manguera más pequeña que transporta un chorro de agua menor. La mayor o menor abertura de la válvula dependerá de cuánta agua aporte la segunda manguera a la válvula. Si considero el flujo de agua de esta segunda manguera como mi «señal», el flujo resultante de la manguera principal de incendios será una versión amplificada de esta señal.

De este modo un pequeño voltaje se puede amplificar sin cambiar nada de la información dependiente del tiempo codificada en el mismo. Cuando Iron Man necesita aumentar mil veces la corriente de sus turbo aislantes magnéticos o bien amplificar la corriente que va a los servomotores que controlan la fuerza del puñetazo de su traje, utiliza transistores que toman pequeñas corrientes y aumentan su amplitud. A pesar de que lo que Tony Stark pueda decirle, los transistores no proporcionan realmente potencia, sino que permiten la amplificación de una señal pequeña, aumentándola muchas veces. Para ello necesitan una gran reserva de carga eléctrica, tal como una batería externa, como si en la analogía del agua la «válvula de transistor» no amplificara la entrada



débil a menos que la manguera de incendios estuviera conectada al suministro de agua de la ciudad. En consecuencia, más que proporcionar potencia, en realidad los transistores utilizan potencia, pero la proporción con la que la utilizan para amplificar una señal débil es mucho menor que la vieja técnica de amplificación (los tubos de vacío) a la que reemplazan. Por esta razón Iron Man estaría con una necesidad desesperada de recarga después de una batalla exigente. Tony se quedaría con frecuencia boquiabierto al ver que sus transistores necesitan recargarse, pero estoy seguro de que se refería realmente a la batería de suministro de sus transistores. Un lapsus de ese tipo es perdonable, estoy convencido de que también yo me equivocaría al hablar después de varios asaltos con Titanium Man.

Antes de los transistores, la amplificación de una corriente débil era realizada por cables calientes y rejillas que guiaban el movimiento de los electrones por el espacio. Se hacía pasar una corriente a través de un alambre de filamento hasta que éste brillaba con luz blanca, y se emitían electrones desde el metal, que eran acelerados por un voltaje positivo aplicado a una placa a cierta distancia, impulsando esos electrones libres hacia ella. Entre el filamento y la placa colectora hay una rejilla (es decir, una pantalla) que puede actuar como una válvula. Si la señal de entrada se aplicaba a esta rejilla, modularía la corriente recabada, abriendo y cerrando la válvula como en la analogía del agua. Con el fin de evitar los choques de las moléculas del aire que dispersarían el haz de electrones apartándolo del electrodo colector, esos cables y rejillas estaban encerrados en un cilindro de vidrio del cual se había extraído casi todo el aire. Los así llamados tubos de vacío eran grandes, utilizaban mucha potencia para calentar los cables y activar la placa colectora, tardaban algo en calentarse al arrancar inicialmente y eran muy frágiles. Los transistores basados en semiconductores son dispositivos pequeños y de baja potencia que están disponibles instantáneamente para amplificar corrientes y son compactos y robustos. Aun así, se tardó años antes de que el transistor, inventado en 1947, desplazara al tubo de vacío en la mayor parte de los dispositivos electrónicos.

Uno no descubre accidentalmente el dispositivo transistor, sino que tiene que construir cuidadosamente una estructura de semiconductor con una elevada pureza y una baja densidad de defectos, de forma que se pueda observar el proceso de amplificación. El duro trabajo y las técnicas experimentalmente innovadoras que permitieron a John Bardeen, Walter Brattain, y William Shockley de los Laboratorios Bell de Murray Hill, New Jersey, construir el primer transistor del mundo fue reconocido por su premio Nobel de física, otorgado en 1956. El mismo día en que Bardeen supo que había sido galardonado con su segundo premio Nobel (en 1972, por el desarrollo de una teoría de la superconductividad), dejó de funcionar la apertura transistorizada de la puerta de su garaje, acentuando la necesidad de continuar la investigación en la física del estado sólido. A medida que progresaron las técnicas de fabricación y de control de calidad, y que aparecieron diseños nuevos y más pequeños de transistores, se realizó otra importante aplicación de esta válvula electrónica especial. Con una pequeña corriente aplicada a la entrada del transistor resulta una pequeña corriente de salida. Un aumento relativamente modesto de la corriente de entrada crea a su vez una corriente amplificada mayor. La salida del transistor puede ser bien una «corriente baja» o una «corriente alta», y una corriente baja se llama *cero*, mientras que si se tiene una corriente alta este estado se llama *uno*. Pequeños ajustes en las entradas de un transistor pueden crear ya sea un uno o un cero para la corriente de salida. Combinando literalmente millones de transistores en configuraciones inteligentes y utilizando una

rama de las matemáticas llamada lógica de Boole<sup>[81]</sup> (desarrollada por un matemático llamado George Boole más de noventa años antes de que fuera inventado el transistor y setenta años antes de que se desarrollara la ecuación de Schrödinger), se tiene el elemento de construcción fundamental de un microordenador.

Un tratamiento completo del modo como los ordenadores manipulan los «unos» y los «ceros» para representar números grandes y llevar a cabo operaciones matemáticas mediante el código binario requeriría otro libro distinto. El punto que deseo remarcar aquí es que en el corazón de todos los microordenadores y circuitos integrados está el transistor. Los chips que están en la base de la electrónica comercial y recreativa que representa un papel creciente en la sociedad, desde los teléfonos móviles hasta los ordenadores portátiles y los reproductores de DVD, son todos ellos simplemente plataformas para la inteligente disposición y conexión de un gran número de transistores. La tecnología computerizada y sin cables que nos envuelve en el siglo XXI no hubiera sido posible sin el transistor, el cual no hubiera sido inventado a su vez sin el conocimiento obtenido previamente por los pioneros de la física cuántica y del electromagnetismo.

Schrödinger no intentaba desarrollar el reproductor de CD ni tampoco reemplazar el tubo de vacío cuando desarrolló su famosa ecuación, pero sin sus investigaciones y las de otros sobre las propiedades de la materia el moderno estilo de vida del que disfrutamos actualmente no hubiera sido posible. Nuestras vidas hubieran sido muy distintas de no ser por los esfuerzos de un puñado relativamente pequeño de físicos que estudiaron el comportamiento del mundo natural. Con pocas excepciones, esos científicos no estaban impulsados por el deseo de crear dispositivos comerciales y aplicaciones prácticas, sino por su curiosidad, que los guiaba, como al Dr. Henry Pym en el número 27 de *Tales to Astonish*, a «trabajar solamente en cosas que estimularan la imaginación».

¿Qué hemos aprendido?

24. ¡Bizarro y yo!

**LAS METEDURAS DE PATA DE LOS SUPERHÉROES.** Comenzamos este libro con un debate sobre cómo Superman, aplicando las leyes de Newton del movimiento, puede saltar un edificio alto de un solo brinco, y terminamos con Kitty Pryde pasando a través de paredes sólidas merced al efecto túnel de la mecánica cuántica y con la armadura transistorizada de Iron Man. A lo largo del camino hemos tratado de los principales temas que serían cubiertos en un currículum de física de estudiante universitario, desde los primeros temas correspondientes a una introducción en físicas (tales como las leyes de Newton del movimiento y el principio de la conservación de la energía) hasta material de alto nivel (mecánica cuántica y física del estado sólido). Sin embargo, sería un descuido por mi parte si le dejara a usted, fiel creyente, con la impresión de que absolutamente todo en los cómics de superhéroes está por completo de acuerdo con las leyes de la física. Me gustaría por lo tanto concluir tratando algunos de estos pocos y raros ejemplos en los que la física de los cómics está realmente equivocada, independientemente de cuantas excepciones milagrosas esté uno dispuesto a conceder.

### **El segundo poder mutante de Cíclope, de la Patrulla X**

El primer mutante joven que el profesor Charles Xavier reclutó para unirlo a su naciente superequipo de la Patrulla X fue Scott Summers, de nombre clave Cíclope (Cyclops). El don mutante de Scott, y también su maldición, era que emitía rayos de «fuerza pura» desde sus ojos. Esos haces de fuerza podían agujerear un muro de hormigón y desviar en su caída una roca de dos toneladas. Únicamente dos materiales eran inmunes a los rayos ópticos de Scott: su propia piel (lo cual estaba bien, porque de otro modo las ráfagas que emanan de sus ojos le hubieran arrancado los párpados de la cara) y el «cuarzo rubí». Cuando cumple con su deber de superhéroe, Scott está obligado a utilizar constantemente gafas de sol, hechas de este material exótico, o bien un visor envolvente. Podía elevar su pantalla de cuarzo rubí mediante botones situados al lado del visor o en las palmas de sus guantes. Cuando usaba el visor, las ráfagas de sus ojos se proyectaban como un único y amplio haz rojo de fuerza, de donde provenía su nombre de superhéroe. Cuando la pantalla de cuarzo rubí estaba bajada, Scott podía ver claramente el mundo teñido de fuego, con el visor o las gafas de sol absorbiendo sin percances el embate destructor de sus haces de fuerza óptica.

Cuarzo es el nombre que los geólogos han adjudicado a la forma cristalizada del dióxido de silicio. Si las moléculas de dióxido de silicio están dispuestas en forma desordenada, como un gran

número de canicas vertidas al azar en un contenedor, entonces el material resultante se llama *vidrio*, pero si las unidades moleculares están apiladas cuidadosamente en una estructura ordenada, el mineral se llama *cuarzo*. Así como hay distintas maneras de organizar en una configuración regular un conjunto de canicas, hay distintas configuraciones cristalinas de cuarzo. Si el mineral contiene una pequeña cantidad de hierro y titanio el cristal resultante tendrá un ligero tono rosado (como en el caso del vidrio de color del capítulo 23), en cuyo caso se llama *cuarzo rosado*. Una suspensión de puntos de rubí en el cuarzo dará como resultado unas vetas brumosas marrones y beige, y este oscuro y ahumado mineral a través del cual es difícil ver se llama *cuarzo rubí*.

Por extraño e incómodo que pueda ser que sus ojos proyecten haces (siempre tendrá que mirar el mundo a través de gafas de cuarzo rubí), no podemos quejarnos, puesto que no importa lo físicamente increíble que esto pueda ser, está cubierto por nuestra norma de «una única excepción milagrosa». Sin embargo, sin tener en cuenta el mecanismo por el cual funciona la ráfaga óptica de Cíclope, hay una perspectiva clave que falta en los cómics y películas de la Patrulla X siempre que Scott anda suelto con su poder mutante. Lo que nunca vemos ni oímos, aunque sabemos que debe suceder por las leyes de la física antes descritas, es el crujido de la cabeza de Scott, debido al retroceso que generan sus rayos de fuerza.

La tercera ley de Newton nos dice que las fuerzas siempre van por parejas, es decir que cada acción está acompañada por una reacción igual y opuesta. Usted no puede empujar contra algo si no hay nada contra lo que empujar. Los cohetes dependen de este principio cuando expelen gases calientes a altas velocidades, de modo que a través de la tercera ley de Newton el retroceso propulsa al navío en la dirección opuesta a la expulsión de gases. De modo semejante, un haz de fuerza tan intenso como para mantener suspendida en el aire una roca de dos toneladas (de donde concluimos que la fuerza de la ráfaga óptica debe ser al menos de 2.000 kg) debería empujar hacia atrás la cabeza de Cíclope con una fuerza de retroceso equivalente de 2.000 kg. Según la segunda ley de Newton del movimiento, es decir **Fuerza igual a masa por aceleración**, su cuerpo (suponiendo una masa de 80 kg) debería adquirir rápidamente una aceleración de más de 20 veces la de la gravedad. A partir de una posición estacionaria, su cabeza se debería mover hacia atrás a varios centenares de kilómetros por hora siempre que emplea su don especial. Debemos concluir, por consiguiente, que además de su potente ráfaga óptica Cíclope posee un segundo talento mutante escondido, por el cual está dotado también con unos músculos del cuello excepcionalmente fuertes.

### **¡Tumba ese edificio!**

Como se dijo al principio de este libro, en los primeros días de los cómics de la Edad de Oro los poderes de Superman se atribuían al hecho de que su planeta natal tenía una intensidad gravitatoria mucho más fuerte que la de la Tierra. Utilizando el estándar de comparación de que es capaz de saltar por encima de un edificio alto de un solo brinco en la Tierra, calculamos en el capítulo 1 que la aceleración debida a la gravedad en Krypton tenía que ser al menos quince veces más grande que la nuestra. El Hombre de acero no estaba por lo tanto hecho realmente de metal, sino que tenía los músculos y la estructura del esqueleto adaptada a una gravedad mucho mayor. Imagine que levanta una garrafa de leche de unos cuatro litros, que pesa unos cuatro quilos. Si quiere experimentar como

sería la vida en un planeta con una gravedad quince veces más ligera que la de la Tierra, debería vaciar el contenedor y llenarlo con algo más de un cuarto de litro de leche. Comparado con sopesar la garrafa completa, hallará que el mismo contenedor con el nuevo contenido de leche es mucho más fácil de sostener. Igualmente en el número 1 de *Action Comics* Superman es capaz de elevar sobre su cabeza un automóvil que pesa unos 1.300 kg. Un peso de 1.300 kg para Superman (adaptado a la gravedad mayor de Krypton) es parecido a que nosotros levantemos sobre la cabeza un peso de 86 kg.

Como dijimos antes, con su creciente popularidad, Superman pasó de ser el campeón de los pequeños a la estrella de un imperio comercial multimillonario en dólares. Las amenazas a que se enfrentaba Superman se volvieron más acérrimas, y sus adversarios se convirtieron en más superpoderosos. El nivel de fuerza de Big Blue aumentó en correspondencia hasta cotas fantásticas. Antes de que transcurriera mucho tiempo era capaz de elevar tanques, camiones, locomotoras, trasatlánticos, aviones de gran tamaño y edificios de oficinas de muchos pisos. De forma parecida, el Increíble Hulk, héroe de Marvel Comics, poseía una fuerza que también ponía a prueba la credulidad. La fuerza de Hulk está ligada a los niveles de adrenalina de su sangre, razón por la cual su presión emocional dispara su transformación desde el endeble Bruce Banner a los ocho pies de la furia verde espesamente musculosa. La correlación con la adrenalina explica también el hecho de que cuanto más colérico se pone Hulk, más fuerte se vuelve. Cuando se lo exaspera apropiadamente se sabe que es capaz de levantar y catapultar un castillo, el lado de un barranco e incluso sostener una montaña que amenaza aplastarlo a él y a otro conjunto de superhéroes de Marvel en las miniseries *Secret Wars*. Aunque Reed Richards corre para modificar la armadura de Iron Man con el fin de canalizar tanto la llama de nova de la Antorcha Humana y la energía electromagnética del Capitán Marvel con el fin de explotar un túnel de salida de la montaña, Reed insulta y se burla deliberadamente de Hulk, sabiendo que su supervivencia depende del Gigante de Jade convenientemente enfurecido.



**Fig. 38.** N.º 86 de *World's Finest*. Superman muestra mucha más fuerza que en el n.º 1 de *Action*, donde elevaba un automóvil sobre su cabeza, haciendo que los espectadores huyeran despavoridos. En contraste, en el anfiteatro nadie está muy perturbado porque un hombre acarree dos rascacielos de oficinas. © 1957 National Periodical Publications Inc. (DC)

Eventualmente Superman se volvería tan fuerte que, como se muestra en la figura 38 del número 86 de *World's Finest*, podría transportar dos edificios de oficinas de gran altura, uno en cada mano, como si fuera llevando dos pizzas, a la vez que vuela. Un examen de esta figura revela una razón por la que es capaz de llevar esos edificios desde Gotham City a una exposición al aire libre en Metrópolis: no estaban conectados a ningún suministro eléctrico o de agua de la ciudad. Tan asombroso como esta exhibición de fuerza es el comentario de Superman: «He obtenido permiso para tomar prestado los dos edificios de Gotham City que me han pedido». No soy capaz de imaginar a quién hay que pedir permiso exactamente para llevarse dos edificios de gran altura. Dudo que ninguno de los superintendentes de esos edificios tenga autoridad para permitir que Superman los tome prestados. Pero es difícil decir no cuando Superman pide si puede llevarse su rascacielos volando a otra ciudad para un acto de beneficencia. Es mejor evacuar el edificio de todos sus trabajadores y equipo directivo y decir: «¡De acuerdo, Superman!».

Incluso si usted acepta que cualquier persona, ya sea un visitante extraño de otro planeta o un científico nuclear bombardeado accidentalmente con radiación gamma, pudiera ser lo bastante fuerte como para levantar un edificio, hay una violación aparte de principios físicos asociados con esas

escenas: simplemente coloque edificios, trasatlánticos y aviones de gran tamaño no diseñados para ser alzados. Están pensados para permanecer quietos, tal como un edificio de oficinas, o bien sujetos en varios puntos, como por ejemplo las tres ruedas bajo un aeroplano en la pista o, en el caso de un buque de guerra, mantenido a flote uniformemente por el agua que desplaza. El problema al levantar un rascacielos, por ejemplo, es que cualquier ligero desvío de la vertical dará como resultado que la gravedad cree un momento de torsión no compensado que intenta torcer al edificio más hacia la horizontal.

Los edificios como rascacielos o castillos son grandes, de modo que la distancia del borde a su centro de masas es considerable (llamada el «brazo de momento» en el capítulo 8). Esas estructuras son bastante pesadas, de forma que hay un peso significativo que intenta girar el edificio. Cuanto mayor es el objeto mayor es la distancia de su borde al punto en el cual Superman o Hulk lo sustenta, y mayor será el «brazo de momento» del momento de torsión que intenta retorcerlo. El momento de torsión en el caso de los edificios transportados por Superman en la figura 38 es varias veces mayor de lo que el hormigón armado (hormigón con varillas de acero en su interior para aumentar su rigidez) puede soportar antes de fracturarse. De forma realista, si usted levanta un edificio y lo lleva volando a algún sitio, irá dejando tras de sí un chorro continuo de desechos de construcción. Superman debería llegar al acto de beneficencia de Gotham City llevando unos pocos cascotes en cada mano, y no dos rascacielos con su integridad estructural intacta. Más que pedir permiso para tomar prestados los edificios, Superman debería pedirlo para destruirlas.

Algunos de los últimos escritores de cómics han reparado en que es imposible, independientemente de su nivel de superfuerza, levantar un edificio y que no se desmorone en sus manos. En el número 249 de *Los Cuatro Fantásticos* de Marvel, el reemplazo de Superman, de nombre clave Gladiator (Gladiador), levanta el borde del Edificio Baxter (el cuartel general de los CF) por su base y lo mece adelante y atrás sin dañar físicamente el rascacielos. Reed Richards, el más inteligente del universo Marvel, reconoce instantáneamente que lo que Gladiador hace es imposible. Elabora la teoría de que Gladiator posee un superpoder sin nombre de quinesis táctil, definida en los cómics como la capacidad para levitar un objeto con el que uno está en contacto físico. No existe, por supuesto, tal cosa como la quinesis táctil, pero eso reduce a un número controlable la cantidad de excepciones milagrosas necesarias para que la historia continúe.

Si comparamos a Giant-Man con una secuoya (y no debido a que su personalidad fuera a veces un poco rígida) observamos que cuanto más alto es el árbol, más ancho es el tronco. Con el fin de proporcionar soporte para la gran masa de encima, un árbol necesita una base muy ancha. Por la época de la firma de la Declaración de Independencia americana, dos matemáticos, Euler y Lagrange, demostraron que una columna más corta que una cierta altura es estable, y estaría comprimida por el peso de material que hace presión hacia abajo sobre su base, pero por encima de una cierta altura (cuyo valor depende de la fuerza del material que compone la columna) la torre resulta inestable en cuanto a torcerse. La más ligera perturbación que la aleja de una orientación exactamente vertical conduce a una fuerza de torsión grande, es decir a un «momento de torsión» como en el caso del columpio del capítulo 8, que hará que la columna se doble bajo su propio peso. Giant Man podría, en principio, crecer tan alto como una secoya, pero tendría que ser igual de móvil (suponiendo que se mantenga bajo el límite

de altura establecido por la ley del cubo-cuadrado —ver capítulo 10—). Cualquier intento para perseguir a un supervillano o luchar contra él llevaría inevitablemente a que la parte superior de su cuerpo se incline hacia delante sobre sus piernas. El peso de su tronco superior haría entonces que su cuerpo girara y, antes de que usted pueda decir «Stan Lee», el viejo Highpockets se hallaría tumbado en el suelo.

Un destino tal le ocurriría inevitablemente a Stilt-Man, un temprano adversario de Daredevil. Stilt-Man poseía un traje mecanizado que contenía dos piernas hidráulicas que, cuando se extendían del todo, le hacían alcanzar una altura de varios pisos. Con la misma seguridad que el verano sucede a la primavera, Daredevil utilizaría el cable de su club de policía para anudar las piernas de Stilt-Man, provocándole una pérdida de estabilidad que hizo que la aventura del ejemplar terminara rápidamente.

Otro misterio relacionado con el centro de masas depende de cómo el enemigo de Spiderman, el Doctor Octopus, es capaz de caminar. El científico Otto Octavius empleaba cuatro brazos robóticos sujetos a un arnés en torno de su pecho, con el cual manipulaba isótopos radiactivos. El inevitable accidente de explosión radiactiva hizo que el arnés y los brazos se fundieran con Octavius, y así nació el Doctor Octopus. Pero esos brazos eran muy pesados, y con frecuencia lo vemos de pie mientras los cuatro brazos se mueven tras él. Deberían crear en consecuencia un gran momento de torsión que hiciera caer de espaldas al Doc Ock, o de cara si se hallaban delante de él. Spidey debería ser capaz de neutralizar (ya que no desarmar) al Doctor Octopus por el sencillo método de tirarle una manzana siempre que viera que los brazos no lo anclaban al suelo.

La rápida e insatisfactoria resolución de esas historias cuando la física se toma demasiado en serio debería dejar muy claro por qué no hay una gran demanda de profesores de física para escribir cómics.

### **La Liga de la Justicia tiene la Luna en una cuerda**

Otra proeza de fuerza poco realista ocurrió al final de la aventura de 2001 de *La Liga de la Justicia* (por esa época se había perdido la parte «de América» de su nombre de equipo, aunque el cómic que presentaba sus aventuras seguía manteniendo el acrónimo *JLA*). En el número 58 de *JLA*, Superman, la Mujer Maravilla yLinterna Verde aparecen empujando la Luna dentro de la atmósfera terrestre con el fin de derrotar a un grupo de renegados marcianos. Quizás sería mejor que volviera atrás y explicara por qué consideraron que ésa era una buena idea.

Los marcianos fueron introducidos en el universo DC en el número 225 de *Detective Comics* de 1955, cuando un profesor de física que trataba de desarrollar un dispositivo de comunicación interestelar creó por casualidad un rayo transportador en su lugar. De ese modo trajo por la fuerza a la Tierra a J'onn J'onzz (el cazarrecompensas marciano). J'onn adoptó eventualmente una identidad de superhéroe luchador contra el crimen, y fue uno de los miembros fundadores de la Liga de la Justicia de América ya en 1960. J'onn J'onzz poseía una serie deslumbrante de superpoderes que coincidían con los de Superman, incluyendo el vuelo, la superfuerza, la invulnerabilidad, la respiración marciana (equivalente al superaliento de Superman), el superoído, la visión marciana y otras varias en las que



Superman solamente podría soñar, tales como la telepatía mental, la invisibilidad y la posibilidad de cambiar de forma. Al igual que hacía falta la kriptonita para impedir que Superman resolviera un problema en un nanosegundo, el Martial Manhunter, al ser más poderoso, necesitaba un talón de Aquiles más corriente para justificar por qué se tomaba la molestia de entrenar y de formar equipo con otros superhéroes. Se reveló por lo tanto que J'onn sufría, como todos los marcianos, de una vulnerabilidad al fuego.

En consecuencia, más que tener que buscar un exótico meteorito del arruinado planeta Krypton, todo lo que hacía falta era una caja barata de cerillas para incapacitar al Detective Marciano.

Se da a conocer en las páginas de *JLA* que J'onn J'onzz se equivoca cuando se considera el último superviviente de la raza marciana, cuando la Tierra es atacada por un pequeño ejército de diabólicos marcianos, poseedores de los superpoderes de J'onn. La Liga de la Justicia atrae a los maléficos marcianos a la Luna, donde los atacantes de Marte no temen al fuego que los debilita. Sin embargo, mientras J'onn J'onzz utiliza su telepatía mental para distraer a esos villanos, Superman, la Mujer Maravilla, y Linterna Verde emplean un enorme cable para arrastrar la Luna al interior de la troposfera terrestre. Un conjunto de superhéroes con dotes mágicas utiliza sus poderes misteriosos para evitar que tanto la Luna como la Tierra sufran catástrofes geológicas a causa de su intensa atracción gravitatoria. Nuestro satélite posee ahora una atmósfera combustible, y los pérfidos marcianos se rinden rápidamente y se someten al exilio en otra dimensión (la zona fantasma, de hecho) antes que ser incinerados. Incluso aunque usted conceda que todo lo anterior es una importante excepción milagrosa de la Liga, se presentan serios problemas en esta narración.

La segunda ley de Newton,  $F = m a$ , nos dice que si se aplica una fuerza neta a una masa, no importa lo grande que sea, habrá una aceleración correspondiente. Hacia finales de 1990 DC Comics había establecido que Superman era capaz de levantar cuatro millones de toneladas. Supongamos que, dado el enorme desafío, tanto la Mujer Maravilla como Linterna Verde se aplican para proporcionar una fuerza equivalente al empujar la Luna. Así la fuerza total que estos tres héroes pueden ejercer es de doce millones de toneladas. Puesto que los héroes sobrenaturales están anulando los efectos de la gravedad, supondremos que mientras la Luna se aproxima a la Tierra no hay ayuda del campo gravitatorio terrestre (esto hará que los cálculos se mantengan a un nivel sencillo). La Luna tiene una masa de casi setenta mil trillones de kilogramos. La ley de Newton indica por lo tanto que la Luna se acelerará debido a esta fuerza, pero que la razón del cambio de movimiento será extraordinariamente pequeña. La aceleración de la Luna será de 0,7 billonésimas  $m/s^2$  (la aceleración debida a la gravedad en la superficie de la Tierra es de  $9,8 m/s^2$ , y por lo tanto llevará mucho tiempo desplazar la Luna una distancia significativa). Con esta aceleración, el tiempo necesario para que la Luna se desplace unos 384.000 km desde su órbita normal hasta el interior de nuestra atmósfera superior es de ¡más de 735 años! Podemos concluir únicamente que J'onn J'onzz llevó a cabo algún retardo sobresaliente para evitar que los inicuos marcianos realizaran lo que estaban haciendo durante más de siete siglos.

## ¿Podría usted volar con las alas de un ángel?

Otro de los miembros originales del equipo mutante de la Patrulla X presentado en 1963 fue Warren Worthington III, cuyo don mutante comprendía dos grandes alas de plumas que crecían de su espalda. Ninguno de los otros miembros de este equipo de superhéroes poseía el poder de volar, y aparte de las rampas de hielo del Hombre de Hielo, Ángel era el único personaje que podía evitar pasear o tomar el autobús cuando tenía que enfrentarse a la Hermandad de Mutantes Diabólicos<sup>[82]</sup>. Otros superhéroes o villanos alados, tales como el Hawkman de DC Comics o el villano Buitre de Spiderman, utilizaron sus dispositivos de «antigravedad», como el metal Nésimo del Buitre, para superar la gravedad. Emplearon sus alas, que estaban conectadas a sus espaldas en el caso de Hawkman o de Hawkgirl o bien surgían de sus brazos como en el caso del Buitre, como timones para ayudarlo a maniobrar mientras se hallaba en el aire. En contraste, el Ángel de la Patrulla X utilizaba sus alas como medios principales de locomoción. Parece ciertamente razonable que si usted tiene alas que crecen en su espalda eso le permitiría volar, pero ¿sería así realmente?

Los pájaros y los aviones se las arreglan para zafarse de las hoscas ataduras de la gravedad mediante el mismo principio físico: la tercera ley de Newton que dice que para cada acción se tiene una reacción igual y opuesta. Un error de concepto corriente es que la presión del aire inducida por un objeto que se mueve rápidamente (llamado *efecto Bernouilli*) es la responsable de que vuelen los aviones. Encontramos esta diferencial de presión cuando nos ocupamos de Flash arrastrando tras él a Toughy Boraz en su ola de supervelocidad, en el capítulo 5. Un objeto que se mueve deprisa tal como el velocista escarlata debe apartar el aire de su camino cuando corre, y deja en consecuencia tras de sí una región de aire con una densidad menor. A medida que el aire corre de nuevo para llenar este vacío parcial, a través del mismo principio aplicado al tratar de la entropía en el capítulo 12, empujará todo lo que encuentre en su camino, como la basura que forma remolinos tras el tráfico rápido o los trenes. Sin embargo, si la diferencia en la velocidad del aire encima y debajo del ala es el resultado del perfil del ala, entonces los aeroplanos no podrían realizar el vuelo invertido, porque la diferencia de presión generada por el efecto Bernouilli tendería a empujar el avión hacia el suelo.

En todo caso, siempre podemos descansar en la tercera ley de Newton, que nos dice que las fuerzas van siempre por pares. Para proporcionar una fuerza ascensional sobre el ala del avión igual o mayor que el peso del mismo, hay que aplicar sobre el aire que pasa una fuerza equivalente hacia abajo por parte del ala. La corriente de aire hacia abajo en la región debajo del ala da como resultado un empuje hacia arriba que lleva al aeroplano al lejano horizonte azul. Cuando Superman salta, empuja hacia abajo sobre el suelo de modo que una fuerza igual y opuesta ejerce un esfuerzo sobre él que lo impulsa a las alturas. De un modo semejante, los pájaros baten sus alas, empujando hacia abajo cierta cantidad de aire. La fuerza hacia abajo del ala sobre el aire está compensada por otra hacia arriba ejercida en el ala por parte del aire. Cuanto mayor es la envergadura del ala mayor es el volumen de aire desplazado y mayor la correspondiente fuerza ascensional. Por esta razón es imposible que el príncipe Namor vuele con sus diminutas alas en los tobillos. Estas minúsculas alas son demasiado pequeñas para proporcionar suficiente fuerza ascensional como para contrarrestar el peso de Namor.

Si Warren Worthington III pesa 68 kg, sus alas deben proporcionar una fuerza hacia abajo sobre

el aire de al menos esos 68 kg, de forma que la reacción del aire sobre sus alas equilibre su peso y lo mantenga por encima del suelo. Si desea acelerar, entonces naturalmente sus alas han de proporcionar una fuerza mayor que 68 kilos con el fin de que haya un exceso de fuerza (empuje hacia arriba menos peso hacia abajo debido a la gravedad) que depare una aceleración neta. Si sus alas suministran una fuerza ascensional de 100 kg mientras que la gravedad ejerce una fuerza hacia abajo de 68 kg, entonces Warren experimenta una fuerza neta vertical de 32 kg. Fuerza igual a masa por aceleración, así que esta fuerza hacia arriba de 32 kg crea una aceleración vertical de 3,35 m/s. Con esta aceleración Ángel pasará de 0 a 96 km/h en poco más de ocho segundos, despreciando la considerable resistencia del aire que tendrá que vencer. Una vez que deja de batir sus alas la única fuerza que actúa sobre él es la de la gravedad que lo arrastra hacia el suelo. Naturalmente, una vez en el aire puede planear, pero debe seguir aplicando una fuerza hacia abajo sobre el aire para volar en realidad y no deslizarse meramente.

100 kg es una fuerza considerable para que la apliquen sus alas, pero no es irrazonable que una persona pueda presionar con un 133% del peso de su cuerpo. Pájaros como el cóndor de California o el errabundo albatros pesan unos quince o diez kilos respectivamente, y a pesar de ello son capaces de generar suficiente fuerza como para volar. Pero Warren Worthington III no está construido como un pájaro. Las aves no tienen alas que se originen en su espalda, sino que sus brazos han evolucionado para formar las alas. Tienen dos modificaciones adicionales que ayudan a sus brazos-alas: *a)* tienen un hueso esternón en forma de quilla, es decir que las aves tienen un gozne formado en el hueso plano del centro de su pecho que es comparable a nuestra caja torácica. Este gozne actúa como un punto de anclaje para su otra adaptación, que es la que sigue *b)* las aves tienen dos músculos extremadamente largos, el *supercorocoiderus* y el *pectoralis*, empleados para el batir de sus alas. Las aves tienen tanta carne en el pecho porque esos músculos tan largos, sus pectorales, proporcionan la mayor parte de la fuerza a las alas en vuelo. Recordemos de los capítulos 5 y 10 que la fuerza del hueso o del músculo aumenta con su superficie transversal. En consecuencia, Ángel debe tener pectorales enormes si es capaz de utilizar sus alas para alzarse del suelo. Con una envergadura de ala de 5 m y un peso de 68 kg, Warren tiene una relación peso-envergadura de 14 Kg/m en contraste con una razón de 4 kg/m de un cóndor californiano. Los brazos de Warren no participan en proveer de fuerza a sus alas, y debe obtener el empuje de elevación utilizando solamente los músculos de su pecho y de su espalda, lo que lo convierte un superhéroe musculoso y bastante ineficaz.

Existen otras adaptaciones al vuelo que podría poseer Warren y que requerirían adicionales excepciones milagrosas. Para reducir su peso corporal, los pájaros tienen huesos muy ligeros, con una estructura muy porosa que a pesar de ello siguen siendo remarcablemente fuertes. Poseen también sistemas respiratorios muy eficaces, de modo que cada molécula de oxígeno que reside en sus pulmones es reemplazada cada dos inhalaciones profundas. En contraste, con cada inhalación nosotros intercambiamos solamente el 10% de las moléculas de aire que están en nuestros pulmones. Las aves necesitan poder renovar rápidamente su suministro de aire, ya que sus músculos del pecho trabajan tan duro para mantenerlos en lo alto. La respiración de Warren podría ser de una parecida eficacia. Pero para todo ello, a menos que esté dibujado con músculos pectorales enormes —lo que lo haría más parecido a algunos de los personajes femeninos de los superhéroes de los años noventa— las alas de su espalda son más ornamentales que funcionales.

## Con ustedes... ¡la Visión!

Cuando Roy Thomas se encargó de las responsabilidades de escritura del cómic de Marvel *Los Vengadores* a mediados de los años sesenta, volvería a presentar con frecuencia los personajes de la Edad de Oro con un rasgo de la nueva Edad de Plata, al igual que había hecho DC Comics cuando iniciaron la Edad de Plata. Uno de los personajes más populares creados por Thomas y el artista John Buscema es Visión. Originalmente un ataviado luchador contra el crimen sobrenatural de la década de los cuarenta, el nuevo Visión presentado en el número 57 de *Los Vengadores* es un androide<sup>[83]</sup> creado por Ultron, otro androide. Ultron es uno de los enemigos más peligrosos de los Vengadores, y Visión tenía inicialmente la intención de infiltrarse en el superequipo para destruirlos desde dentro. Al rebelarse contra su programación, Visión salvó las vidas de los Vengadores y siguió hasta convertirse en un valioso miembro del equipo.

Además de la visión de láser, la capacidad de volar y la mente de un ordenador, Visión tenía el superpoder del control totalmente independiente de la densidad de su cuerpo. Podía hacer que su cuerpo, o cualquier parte del mismo, fuera tan duro como el diamante o tan insustancial como para pasar a través de objetos sólidos. Kitty Pryde de la Patrulla X camina a través de las paredes utilizando su capacidad mutante para cambiar su probabilidad de efecto túnel de la mecánica cuántica, pero Visión seguiría utilizando la puerta para entrar en una habitación.

La densidad de cualquier objeto se define como la masa por unidad de volumen, y se puede alterar ya sea cambiando la masa o variando el volumen. El volumen está gobernado por el espaciado promedio entre los átomos. Cualquier sólido tiene normalmente sus átomos empaquetados bastante estrechamente, de modo que puede considerarse que los átomos se tocan (han de estar muy cercanos para formar enlaces químicos, que son los que en definitiva mantienen juntos a los átomos). A grandes rasgos, todos los sólidos tienen la misma densidad, dentro de un factor de diez más o menos. El diamante es un material duro no porque sus átomos estén empaquetados muy apretadamente, sino porque los enlaces químicos que mantienen juntos a los átomos de carbono son muy rígidos e inflexibles. El grafito, empleado en las minas de los lápices, tiene una composición química idéntica a la del diamante, pero es muy blando. La densidad del grafito es algo mayor que la mitad de la del diamante, pero la gran diferencia en su dureza proviene de los débiles enlaces químicos que mantienen juntas las capas de planos hexagonales de átomos.

Aun cuando Visión fuera capaz de controlar su densidad a voluntad y pudiera mantener la integridad estructural de su cuerpo, no podría pasar a través de las paredes. Un gas, tal como el aire de su habitación, es comparativamente poco concentrado, con el espacio promedio entre átomos de unas diez veces más grande que el tamaño de un átomo. A pesar de ello el hecho de que el aire de su habitación sea menos denso que las paredes no significa que pueda pasar a través de ellas. Lo cual es una suerte, pues de otro modo el aire en un aeroplano se filtraría a través del fuselaje y haría que el viaje por aire fuera una experiencia aún más desagradable. Debemos concluir por lo tanto que Ultron cometió un segundo error cuando construyó la Visión de densidad cambiante (el primero fue creer que un androide noble traicionaría a los poderosos Vengadores).

## ¿Podría Atom usar el teléfono para alcanzar a alguien?

El superhéroe Atom, de DC, ha aparecido a lo largo de este libro, y su capacidad para reducir su tamaño y su masa independientemente ha proporcionado excelentes ilustraciones de un amplio rango de fenómenos físicos. Naturalmente, en ocasiones su empequeñecimiento lo conducirá a extremos ridículos, como que siempre que visita otros mundos que contenían civilizaciones, ciudades y tecnología avanzada todo residía en el interior de un átomo. Dado que hay cerca de un millón de trillones de átomos en un centímetro cúbico de un sólido típico, es asombroso que Atom siempre se las arregle para encontrar esos nanomundos, a menos que exista una característica rutinaria de cada elemento de la tabla periódica. La improbabilidad de los poderes de Atom fue reconocida astutamente en 1989, en una escena de la segunda de sus series regulares, el número 12 de *The Power of the Atom*. En esta historia Atom se reduce a sí mismo y reduce también a un colega para escapar de la trampa mortal de un supervillano, y terminan disminuyendo de tamaño hasta escalas atómicas con el fin de pasar a través de los espacios vacíos de los átomos del suelo. Haciendo un alto en su miniaturización, se sentaron sobre un electrón, hablando de los acontecimientos de los últimos ejemplares. El amigo de Atom observa que son más pequeños que las moléculas de oxígeno y se pregunta «¿Cómo podemos respirar?» A lo cual responde honestamente Atom: «No estoy seguro».

Superman puede volar, Flash puede correr realmente deprisa, Hawkman tiene sus alas y su cinturón antigraavedad, Tormenta cabalga sobre corrientes de aires generadas térmicamente, pero ¿cómo se traslada uno cuando es extremadamente diminuto? Ant-Man usa hormigas carpinteras voladoras como su servicio de taxi personal, la Avispa tiene alas que crecen desde su espalda cuando se encoge a densidad constante, pero Atom tiene a la Bell Telephone. Hay dos aventuras separadas en el número 34 de *Showcase*, el cómic que presenta el debut del Atom de la Edad de Plata. La primera historieta contaba el origen de Atom, del que nos ocuparemos en la próxima sección. En la segunda historieta, «Battle of the Tiny Titans», Atom emplea por primera vez un modo único de transporte. En esta historia necesita enfrentarse a un insignificante caco llamado Carl Bailar que se halla al otro lado de la ciudad. Probablemente luego de buscar Ballard en la guía telefónica, Atom marca su número mientras dispone un metrónomo cerca del receptor, el cual crea un sonido de tipo tic-tac. Haciéndose más y más pequeño, el Poderoso Diminuto salta al interior de uno de los agujeros del micrófono de su teléfono, y en la siguiente viñeta lo vemos saliendo del receptor del teléfono de Carl Ballard.

La «explicación» de este truco se revela en una página de texto de la contracubierta del cómic<sup>[84]</sup>. Al marcar el número de teléfono de Ballard, Atom provoca que un impulso eléctrico viaje desde su teléfono a la central telefónica de intercambio, que a continuación dirige la señal hasta el teléfono de Ballard. Cuando el circuito se completa una vez que Ballard responde a la llamada de la señal, en este caso el tic-tac del metrónomo, se transmite desde el teléfono de Atom hasta el de Ballard. En este punto Atom salta dentro de su micrófono, reduciendo su tamaño hasta el de un electrón, y cabalga sobre esos impulsos desde su teléfono hasta el de Ballard.

El escritor de esta página de texto, el editor de DC Comics Julie Schwartz, describe correctamente cómo un teléfono transforma el sonido en impulsos eléctricos. Un delgado diafragma vibra cuando lo golpean las ondas de sonido, lo que a su vez comprime o dilata gránulos de carbono adyacentes a la

membrana. La conducción eléctrica a través de los granos de carbono es muy sensible a lo apretados que están entre sí. Mientras usted habla, las interconexiones entre los granos se contraen o expanden alternativamente, y la señal eléctrica en el cable se modifica de acuerdo con ello. En el otro extremo de la conexión telefónica, la señal eléctrica motiva que otros granos de carbono experimenten vibraciones equivalentes que se transfieren a otro diafragma. Las vibraciones del diafragma crean ondas de presión en el aire que son detectadas por el oído de la persona que recibe la llamada. En todo lo anterior Julie Schwartz está en lo correcto. Donde yerra es al suponer que Atom podría hacer autostop en los impulsos eléctricos que se propagan a lo largo del cable.

Cuando usted habla ondas de sonido complejas pueden transportar toda suerte de información. Las ondas de sonido pueden detectarse por otra membrana (tal como un tímpano), haciéndola vibrar de acuerdo con la amplitud, longitud de onda e incluso la información de la fase codificada en el mensaje hablado. Pero es la *onda* la que transmite dicha información, no el aire expelido de su boca. Al hablar, usted forma regiones alternativas de menor o mayor densidad de aire (de modo equivalente puede pensar en las variaciones de densidad como modulaciones de presión, una aproximación razonable a temperatura constante) que se mueven alejándose del hablante. No es el aire que sale de su boca lo que alcanza al oyente, pues de ser así usted no tendría que preocuparse de los ruidosos vecinos del apartamento de al lado.

De forma parecida, la información codificada en los impulsos eléctricos en un cable telefónico se transmite mediante ondas de densidad de electrones, en lugar de que los electrones se muevan a lo largo del cable. Lo que ocurre es que una región con una densidad de electrones mayor que la normal es inestable (ya que los electrones cargados negativamente se repelen entre sí) y se expande hacia las regiones adyacentes, provocando una acumulación de densidad de electrones en la siguiente localización espacial, lo que a su vez provoca un nuevo aumento más allá a lo largo de la línea, y así sucesivamente. La velocidad de la transmisión está determinada por la repulsión electrostática que empuja a los electrones alejándolos entre sí. Es decir, si yo sacudo un electrón, ¿cuánto tiempo tardará un segundo electrón que se halla a cierta distancia en responder al movimiento del primero? Resulta que muy poco, pues la interacción eléctrica entre las dos cargas se comunica aproximadamente a un tercio de la velocidad de la luz. Dependiendo de la distancia habrá un lapso de tiempo apenas perceptible entre el movimiento de la primera carga y la repercusión de dicho movimiento sobre la segunda. La velocidad de la luz es tan elevada (300.000 km/s) que este intervalo de tiempo será menor que una mil millonésima de segundo para una distancia de algo más de treinta centímetros. Si Atom cabalgara sobre un electrón que transportara la señal de impulso eléctrico a lo largo del cable telefónico, tendría que saltar al siguiente cúmulo de electrones con una razón de respuesta mayor que la velocidad de la luz con el fin de «cabalgar la onda» en todo su trayecto hasta el receptor.

Es una suerte que la información se transmita en un cable telefónico a la velocidad de la luz, puesto que la velocidad media a la cual se mueve un electrón a lo largo de un cable como respuesta a un campo eléctrico externo es menor que un milímetro por segundo, casi un billón de veces más lento. Si usted tuviera que esperar a que los electrones viajen físicamente a lo largo de los cables telefónicos antes de que se pueda enviar su mensaje, sería más rápido que viajara hasta la casa de la persona con la que quiere hablar y lo haga directamente.

## El superpoder secreta de todo físico

Cuando no está luchando contra el delito como Atom, la identidad civil de Ray Palmer es igualmente heroica, puesto que es un profesor de física en la Universidad de Ivy. Como se dijo en el capítulo 12, fue el descubrimiento de un extraño meteorito a última hora de la noche lo que condujo al progreso en su investigación que permitió a Palmer desarrollar una segunda carrera como un luchador contra el crimen disfrazado. Como se muestra en la figura 39, Palmer descubre que el meteoro es de hecho un trozo de materia de una estrella enana blanca que le hará posible miniaturizarse a sí mismo y controlar independientemente su masa. Ray se esfuerza en elevar y transportar el meteorito, que tiene un diámetro aproximado de unos treinta centímetros, a su coche. Somos partícipes de los pensamientos del profesor Palmer mientras se debate con el enorme peso. «¡Es tan pesado que a duras penas puedo elevarlo! ¡Puf! No conozco la probabilidad de que una enana blanca choque con otra en el espacio, ¡puf!, pero podría ocurrir, y cuando sucedió, este trozo fue a la deriva hasta que aterrizó en este campo.» (Por cierto, como se deja ver también en la figura 39, los profesores de física de mediados de los años sesenta conducían normalmente Cadillacs descapotables.)

Aquí el razonamiento de Ray es acertado. Cuando una pequeña masa de una estrella de un cierto tamaño ha consumido la mayor parte de su combustible elemental, la energía liberada por las reacciones de fusión es insuficiente para contrarrestar el empuje gravitatorio del núcleo de la estrella. La enorme fuerza en el centro de la estrella lleva a una compresión masiva. El núcleo inerte remanente que sigue a la explosión de la supernova se comprime hasta que su densidad es de tres millones de gramos por centímetro cúbico, en cuyo caso llamamos a lo que queda una enana blanca. El empuje de la gravedad en el núcleo remanente de una estrella enana blanca es tan enorme que solamente una explosión cataclísmica generaría suficiente energía como para permitir que un trozo pequeño del núcleo se rompa y se separe del resto de la estrella para flotar a través del espacio. Si, como han sugerido algunos astrofísicos, la luz detectada de un tipo particular de explosión de supernova (llamado *Supernova Ia*) resulta de la colisión de los núcleos de dos estrellas enanas blancas, entonces a partir de la frecuencia de tales supernovas podemos decir que las colisiones de enanas blancas tienen lugar más o menos una docena de veces por año.



**Fig. 39.** El profesor de física Ray Palmer descubre el fragmento de estrella enana blanca, que resultaría ser el ingrediente clave que faltaba para su dispositivo de miniaturización y que le llevaría eventualmente a su pluriempleo como el superhéroe Atom (del n.º 34 de *Showcase*). © 1961 National Periodical Publications Inc, (DC)

Como recuerda el propio Ray mientras se debate con el fragmento de meteoro, la roca que está sosteniendo es pesada porque está compuesta de materia «degenerada». Los electrones se llaman «degenerados» porque están todos en estados cuánticos de la menor energía, a diferencia de una estrella normal en la que los electrones estarían distribuidos en muchos estados cuánticos, algunos con energías mayores. El interior de la enana blanca está compuesto de núcleos de carbono y oxígeno y de un mar de electrones empaquetados tan estrechamente como es posible. El núcleo de las enanas blancas no puede comprimirse más fácilmente, puesto que todos los electrones están ya en el estado de energía más bajo posible. Esto es lo que indica Ray cuando, al aproximar su automóvil, piensa para sí mismo que las estrellas enanas blancas están compuestas por «materia degenerada que ha sido desprovista de sus electrones al comprimirlos en gran medida». Los electrones siguen estando ahí, pero no están asociados con ningunos iones particulares.

Ray está en lo cierto en cuanto a que esta «degeneración» es la razón por la que la estrella enana blanca es tan densa. La roca que está acarreado Ray parece tener un radio de 15 cm. Suponiendo un fragmento de enana blanca esférico, el volumen sería  $(4\pi/3) \times \text{radio}^3$ . En este caso, el volumen de la roca sería  $(4\pi/3) \times (15 \text{ cm})^3 = 14.136 \text{ cm}^3$ . Para hallar la masa de la roca multiplicamos la densidad de la materia de una estrella enana blanca (3 millones de  $\text{g/cm}^3$ ) por su volumen ( $15.000 \text{ cm}^3$ ), lo que nos da



45 mil millones de gramos, igual a 45 millones de kg. Hallamos así que el meteorito de la figura 39 pesa 45 millones de kg. No hay que asombrarse de que el profesor Palmer, profesor de física en la Universidad Ivy, resople y jadee mientras se las ve con su hallazgo: ¡esa pequeña roca pesa 45.000 toneladas!

Pero resulta que esto no es en realidad, técnicamente hablando, una metedura de pata. A pesar de las apariencias no hay nada equivocado en la escena descrita en la figura 39. Y ello es así porque nosotros los profesores de física somos Así De Fuertes. Recuerde esto la próxima vez que patee la arena de la playa para arrojarla sobre la cara de alguien. Nunca se sabe si ese aparente alfeñique de 45 kg de peso posee en realidad un título avanzado en físicas.

**¡LO, TENDRÁ QUE HABER UN FINAL!**<sup>[85]</sup>. No debería sorprender que los cómics y la física hagan buenas migas; al fin y al cabo la diversión que subyace tras la ciencia no es tan distinta de la que encierra la historia de un buen cómic de superhéroes. En ambas situaciones tanto el científico como el lector de cómics (en ambos casos pueden ser el mismo) se hallan enfrentados a una serie de reglas que han de aplicarse a situaciones nuevas y desafiantes. Las reglas pueden ser las ecuaciones de Maxwell de la electricidad y el magnetismo y la ecuación de Schrödinger, y el problema provocativo podría ser el tratar de desarrollar un semiconductor que sea el análogo de un tubo de vacío. Alternativamente, las reglas podrían ser que nuestro héroe es capaz de correr a supervelocidad y tiene un aura que lo protege de los efectos adversarios del rozamiento del aire y de la inducción electromagnética, y el desafío sería que ha de capturar al villano armado con un cañón congelador capaz de helar cualquier superficie, a la vez que recuperar los fondos del banco robado y todo ello sin dañar a ninguno de los inocentes transeúntes. En ambas situaciones el truco consiste en hallar una solución que emplee las reglas conocidas de un modo nuevo (alguna ya conocida pudiese funcionar, la usaríamos), sin utilizar nada que se considere imposible bajo esas directrices. No podemos diseñar un dispositivo transistorizado que para funcionar requiera que los electrones se rompan por la mitad o que se atraigan entre sí sin que intervenga una carga positiva, puesto que nunca se ha observado que la unidad de carga negativa se comporte de ese modo. Análogamente, una historia de cómic de Flash que presenta al velocista escarlata venciendo al Captain Cold disparándole rayos de calor desde sus ojos sería insatisfactoria, ya que no es una capacidad que haya poseído nunca Flash.

El objetivo de la investigación científica básica es el de elucidar las leyes fundamentales de la naturaleza, y el más alto logro es el descubrimiento de una nueva regla o principio. Igualmente buena es la clara demostración de la violación de una regla preexistente, puesto que se descubre una física nueva cuando se comprende bajo qué circunstancias no se aplican las reglas antiguas. Análogamente hay veces en que los personajes establecidos de un cómic adquieren súbitamente una capacidad insospechada, tal como cuando Sue Storm de los Cuatro Fantásticos descubrió en el número 22 de *Los Cuatro Fantásticos* que el bombardeo de rayos cósmicos que le otorgó el poder de la invisibilidad le había conferido también la capacidad de generar «campos de fuerza invisibles»<sup>[86]</sup>. La dinámica entre Sue y sus compañeros de equipo quedó alterada radicalmente tras el descubrimiento de este nuevo superpoder, y con los años aprendería a generar sus campos de fuerza con fines tanto ofensivos como defensivos.

Pero tales casos son raros tanto en los cómics como en la física del mundo real. Existe, sin embargo, un raudal incesante de problemas emocionantes y retadores en física, del mismo modo que hay una fuente ilimitada de cautivadoras historias de cómic esperando ser contadas. Los dos ingredientes centrales son los mismos para la ciencia que para los cómics: una comprensión de las reglas básicas del juego y una imaginación fértil.

Los científicos no consultan generalmente los cómics cuando seleccionan los temas de

investigación (las agencias de financiación tienen tendencia a fruncir el ceño al aprobar propuestas que contienen demasiadas citas a cómics de DC o de Marvel) pero el espíritu de «¿Qué tal si...?» o «¿Qué sucedería si...?» inspira a las mejores investigaciones científicas o aventuras de cómics. Para ser precisos, en ocasiones los cómics y la ciencia ficción han anticipado descubrimientos científicos, al igual que la investigación más avanzada se aplica a veces como punto de partida de aventuras de superhéroes (como en el antes mencionado número 19 de *JLA*).

A veces, le lleva cierto tiempo a la ciencia el ponerse al corriente con los cómics. Como ejemplo consideremos el mágico Abra Kadabra, un villano de Flash que había mortificado al velocista escarlata desde el comienzo de su carrera contra el crimen. Vestido con el convencional atuendo de mago de escenario y un sombrero de copa, utilizaría su «magia» para acosar al virrey de la velocidad, como la vez que lo convirtió en una marioneta humana. Sin embargo, se reveló que Abra Kadabra era un científico del futuro lejano y que su «magia» del siglo XX era en realidad tecnología del siglo LXIV<sup>[87]</sup>. Los creadores de los cómics de Flash suscribían claramente la noción de que la ciencia y la ingeniería de nuestro presente parecerían sobrenaturales a los del pasado distante. Después de todo, imagine la reacción que provocaría usted si pudiera retroceder mil años y mostrar solamente una parte de los dispositivos que se encuentran en una casa moderna ¡suponiendo que lleve consigo también un suministro de energía!

Se dejó deliberadamente indeterminado en la historia de la edad de plata cómo la ciencia del siglo LXIV podía transformar a alguien en un monigote viviente. La «explicación» tendría que esperar hasta finales de los años noventa, donde Kadabra nos informa que empleó nanotecnología para reestructurar a Flash al nivel molecular, demostrando una vez más los problemas que puede causar un ex científico criminal. Es cierto que máquinas de la escala del nanómetro no pueden transformar a la gente en marionetas, pero quién sabe lo que podrá o no hacerse en otros cuantos miles de años, siempre que ello no implique una violación de la física admitida. Como se mencionó en el capítulo 7, una fórmula útil para anticipar avances científicos pudiera ser **Ciencia ficción + Tiempo = Ciencia**.

En justicia, sin embargo, la capacidad profética de la ficción especulativa consigue a veces aspectos tecnológicos correctos, pero ignora ampliamente otras revoluciones que han transformado nuestra sociedad. Consideremos por ejemplo el programa de televisión de 1966 *Perdidos en el espacio*. Este popular programa de televisión imaginaba un viaje a las estrellas de la familia Robinson, acompañada por un robot inteligente y por el Dr. Zachary Smith, un pasajero clandestino villano y cobarde. El programa se presentó el 15 de septiembre de 1969, y se suponía que tenía lugar en el futuro distante, hasta el final de octubre de 1997. Como se señaló en un artículo de 1997 del *New York Times*, que trataba de una reposición de aniversario del episodio piloto, aunque los productores y escritores de *Perdidos en el espacio* no se equivocaron mucho al suponer que treinta años más tarde los navíos estelares y los robots serían factibles, erraron espectacularmente en relación con un aspecto muy importante de la vida moderna de finales de los años noventa.

Una escena que comienza en el control de la misión cuando el navío estelar se prepara para el lanzamiento presenta una hilera familiar de monitores de ordenador manejados por una serie de ingenieros casi idénticos con camisa blanca de manga corta. Junto al codo de cada ingeniero del control

de la misión hay un pequeño disco metálico que uno no encontraría nunca en la NASA de hoy en día. Los escritores de ciencia ficción de 1966 nunca imaginaron que en treinta años el control de la misión sería un entorno libre de humos y por lo tanto sin lugar para ceniceros. Por ese motivo una nota preventiva es que la extrapolación de las innovaciones científicas y tecnológicas potenciales es coser y cantar comparado con la predicción de las costumbres sociales futuras<sup>[88]</sup>.

Si el estudio del mundo natural ha demostrado algo es que, a diferencia de Hulk, cuanto más perspicaces conseguimos ser, más fuertes nos volvemos. Ahora que usted ha terminado este libro, quizás se sentirá un poco más fuerte, si no en armas al menos en mente. Lo cual es el único tipo de fortaleza que realmente importa. Es nuestra inteligencia la que proporciona la ventaja competitiva que nos ha permitido convertirnos en la especie dominante del planeta. No somos tan rápidos como el puma, no podemos volar como los pájaros, ni somos tan fuertes como el oso ni tan indestructibles como la cucaracha. Nuestro poder es nuestra inteligencia. Como dijo el pionero de la mecánica cuántica Niels Bohr: «El conocimiento es en sí mismo la base de la civilización».

El optimismo que está en el corazón de todas las aventuras de cómics reside asimismo en el esfuerzo científico, ya que ambos mantienen la promesa de que superaremos nuestros desafíos físicos y mejoraremos el mundo. Cómo debe emplearse la ciencia, si para paliar el hambre y curar la enfermedad o para desarrollar un ejército de robots asesinos, depende de nosotros. Para una guía de cómo utilizar nuestro conocimiento de modo sabio y ético uno podría hacer algo peor que mirar las historias de los cómics. Esto es tan verdad actualmente como lo fue hace muchos años cuando Ben Parker le dijo a su sobrino Peter ya en el número 15 de *Amazing Fantasy*: «Un gran poder comporta siempre una gran responsabilidad». Pero ¿responsabilidad para hacer qué? Una respuesta fue proporcionada en la historia «Los últimos días de Superman» en el número 156 de *Superman*. Creyendo que iba a morir a causa de una infección del virus X (afortunadamente una falsa alarma), Superman grabó sobre la Luna con su visión de calor un mensaje de despedida al pueblo de la Tierra, un mensaje que habría de ser descubierto tras su fallecimiento. Sus últimas palabras de despedida al pueblo de su planeta de adopción fueron: «Haced el bien a los demás y cada hombre podrá ser un Superman».

¡Adelante, fiel creyente!

En mi curso, «La física de los Superhéroes», han surgido repetidamente las siguientes preguntas, no todas ellas relacionadas con la física. Aunque usted pueda tener opiniones distintas sobre algunas de ellas, como yo soy el profesor, mis respuestas son siempre las correctas.

**¿Cuál es el superhéroe más realista?**

Ésta es fácil. Obviamente, ha de ser Batman, que siempre se las arregla para encontrar un medio de vencer utilizando su aguda mente y su cuerpo muy entrenado. No obstante, dado el número de veces que ha sido dejado inconsciente en sus más de sesenta años de carrera de lucha contra el crimen, debe de tener algún superpoder que lo preserva de desarrollar una lesión cerebral permanente.

**¿Cuál es el superhéroe más inverosímil?**

Ésta también es fácil. Superfuerza, supervelocidad, vuelo, invulnerabilidad, superoído, visión de rayos X, visión calorífica, visión telescópica, visión microscópica, superaliento, superventriloquia, superhipnotismo... ¿y resulta que siempre obedece todas las reglas y nunca ha intentado apoderarse del mundo? Superman es completamente irreal y hay que dar gracias a Dios por ello.

**¿Cuál es la física que subyace tras los superhéroes con poderes mágicos?**

Ninguna. En la Edad de Oro hubo algunos héroes disfrazados cuyos superpoderes se basaban en la magia. Jerry Siegel, quien junto con Joe Shuster presentó Superman al mundo, siguió creando personajes aún más poderosos, como: Espectro, un ángel vengador. Baste decir que son pocos los principios físicos que *no resultaran violados* en una historia típica de Espectro, con éste y sus enemigos diabólicos lanzándose planetas los unos contra los otros y cosas por el estilo. Otros héroes místicos, como Dr. Fate, Doctor Extraño, la Mujer Maravilla (una princesa amazona en último término) y el dios escandinavo del trueno, el poderoso Thor, tenían lo que podría describirse de modo más preciso como «fantasía» en lugar de aventuras basadas en la ciencia ficción, y con una notable excepción, sus capacidades y hazañas ignoraban por completo los principios científicos.

**¿Cuál es la proeza de un superhéroe más increíble aunque físicamente correcta?**

Aunque sorprendente, una característica personal de un héroe de tipo mágico resulta ser correcta desde el punto de vista físico, en el supuesto de que permitimos la excepción milagrosa estándar, naturalmente. Cuando el dios noruego Thor necesitaba trasladarse de un lugar a otro, utilizaba su fuerza descomunal para hacer girar a gran velocidad su martillo Mjöllnir. Lanzándolo en la dirección en que quería moverse, soltaba momentáneamente la correa que sujetaba el mango del martillo para volverlo a agarrar enseguida de nuevo, lanzándose así a través del aire como un misil no guiado. Esto tiene la apariencia de una violación del principio de conservación del momento. De hecho,

en el número 3 de *Batman Comics* (que presenta las aventuras del alter ego en versión superhéroe de Bart Simpson), Radioactive Man está tan furioso cuando espía a un personaje del estilo de Thor que levanta el vuelo de esa manera que le propina un puñetazo diciendo «esto es por romper las leyes de la física». Y, no obstante, tal medio de transporte es físicamente plausible.

Cuando Thor hace girar su martillo, el poderoso Mjölfnir, planta su pie firmemente en el suelo, acoplando el centro de masas de su cuerpo con el de la Tierra. Esto es probablemente lo que hace que Blob, el villano de la Patrulla X, se mueva con dificultad —su capacidad mutante le permite acoplar fuertemente su centro de masas con el de la Tierra— de modo que desplazar a Blob requiere mover la Tierra entera a menos que se rompa la conexión. Cuando Thor está listo para levantar el vuelo, todo lo que debe hacer es saltar ligeramente (rompiendo su conexión con la Tierra) en el instante en que lanza su martillo en la dirección deseada. Ni siquiera necesita seguir con esa táctica de liberar y retomar la correa del martillo. Los atletas no experimentados pueden confirmar que perder pie durante el lanzamiento del martillo puede provocar un corto viaje indeseado. Si uno es tan fuerte como un dios del trueno, puede utilizar esta técnica para volar por el aire con la mayor de las facilidades. No hay que extrañarse de que nombren un día de la semana en honor de este tipo.

### **¿Quién es más rápido, Superman o Flash?**

Flash.

### **¿Qué es el adamantio?**

Un metal de enlace covalente libre de defectos<sup>[90]</sup>.

La resistencia de los materiales está gobernada principalmente por la naturaleza de los enlaces químicos que mantienen unidos a los átomos en la fase sólida. Los enlaces químicos más fuertes se llaman *enlaces covalentes*, en los cuales los átomos individuales comparten mecanocuánticamente sus electrones periféricos con sus átomos vecinos. Para romper esos enlaces, habría que retirar los electrones de todos los enlaces que conectan un átomo con todos los de sus vecinos, un proceso energéticamente costoso. Los metales normales no tienen enlaces direccionales que los mantengan unidos, por lo que se pueden doblar fácilmente como ocurre con los cables. El adamantio, el material más fuerte del Universo Marvel, debe combinar de algún modo las propiedades eléctricas de los metales normales con los fuertes enlaces covalentes hallados en los diamantes. Además, el adamantio debe estar libre de defectos. En un diamante se producen defectos o imperfecciones en regiones del sólido en donde los enlaces atómicos, debido a tensiones o a la inclusión de impurezas, se rompen o se debilitan, y es en esos lugares donde la red de enlaces covalentes se rompe con más facilidad.

### **¿Las garras de Lobezno pueden romper el escudo del Capitán América?**

No. Las garras de Lobezno están compuestas de adamantio, pero la coraza del Capitán América es una especie de aleación de acero y vibranio<sup>[91]</sup>. Este último es un material extraterrestre traído a la Tierra cuando se estrelló un meteorito en la nación africana de Wakanda, gobernada por el superhéroe

Pantera Negra. El vibranio tiene la capacidad de absorber todos los sonidos y convertir la energía transportada por sus ondas en alguna otra forma no bien especificada. Las ondas de sonido son alteraciones de la presión o densidad del aire, y en un sólido, el sonido se transmite a través de las vibraciones de los átomos. El vibranio posiblemente convierte en una transición óptica (aunque en la zona infrarroja del espectro, puesto que no parece que el vibranio resplandezca cuando se utiliza), conservando de ese modo la energía en el proceso. El material que forma la coraza del Capitán América fue el resultado de un accidente fortuito en el laboratorio, cuando se fundieron accidentalmente en forma de aleación el acero y el vibranio. Las condiciones bajo las cuales tuvo lugar esta fusión metalúrgica no se registraron, y su síntesis no se ha vuelto a repetir. La capacidad del vibranio para absorber vibraciones, unida a la rigidez de la aleación de acero, es sin duda la razón por la que todos los que se las ven con la poderosa coraza de Cap deben rendirse.

### **¿Puede viajar usted a través del tiempo corriendo a mayor velocidad que la luz?**

No. Los físicos teóricos han considerado la hipótesis de la existencia de partículas llamadas *taquiones* que no pueden viajar nunca más despacio que la luz. Bajo ciertas circunstancias puede parecer que viajan hacia atrás en el tiempo. Los taquiones se propusieron como una prueba de ciertas consecuencias de la teoría especial de la relatividad. Hasta donde sabemos, no existen, y lo que es más importante, aunque fueran más corrientes que la mala hierba no parece que puedan interactuar con nuestro mundo físico, en el cual ningún objeto puede moverse más deprisa que la luz. Flash debe viajar hacia atrás y hacia adelante en el tiempo usando su rueda de molino cósmica, pero su único valor real es el de proporcionar al velocista escarlata un entrenamiento cardíaco.

### **¿Cómo se pronuncia el título del príncipe Namor?**

Es Sub-Mariner, no Submarine-er. El creador del príncipe Namor, Bill Everett, se enroló en la marina mercante a la edad de quince años (lo dejó dos años más tarde) y estaba probablemente muy familiarizado con este sinónimo de los marinos. Su héroe mitad humano mitad atlante, capaz de respirar bajo el agua, se describe mejor como un marinero sumergido. ¡Imperius Rex!

### **¿Qué pasa con los pantalones de Hulk?**

Cuando el físico nuclear Robert Bruce Banner fue rodeado por rayos gamma, ganó la capacidad de transformarse en un gigante de jade de casi dos metros y medio de estatura y novecientos kilos de peso. Al sufrir su metamorfosis, su camisa, zapatos, calcetines y demás indumentaria quedaron desgarrados en trozos, con excepción de sus pantalones púrpura de moda. En los cómics de Marvel se sugiere que los pantalones de Banner están compuestos de moléculas inestables, inventadas por Reed Richards para los monos de los Cuatro Fantásticos. Este tejido milagroso se expande o se contrae al igual que el que los viste. Los químicos le dirán que no existen las «moléculas inestables» —son las que se desintegran precisamente por ser inestables—. Pero la verdad es que los pantalones de Hulk se mantienen gracias a una fuerza más poderosa que la radiación gamma: el Comics Code Authority.

Existen muchos y excelentes estudios de la historia temprana de los *comic books*. Además de los citados explícitamente en el texto y listados más adelante, recomendaría: *Men of Tomorrow: Geeks, Gangsters, and the Birth of the Comic Book* por Gerard Jones (Basic Books, 2004); *Tales to Astonish: Jack Kirby, Stan Lee, and the American Comic Book Revolution*, por Ronin Ro (Bloomsbury, 2004); y *Great American Comic Books*, por Ron Goulart (Publications International, 2001). Por su amplia y entretenida elucidación de la trayectoria desde los héroes de novela barata a los superhéroes de los cómics, vale la pena repasar la excelente obra en dos volúmenes de Jim Steranko, *The Steranko History of Comics* (Supergraphics, 1970, 1972). Les Daniels ha escrito amplia y elegantemente sobre la historia de los personajes de cómics y son recomendables en especial sus *DC Comics: Sixty Years of the World's Favorite Comic Book Heroes* (Bulfinch Press, 1995); *Superman: The Complete History* (Chronicle Books, 1998); *Batman: The Complete History* (Chronicle Books, 2004); *Wonder Woman: The Complete History* (Chronicle Books, 2001); y *Marvel, Five Pabulous Decades of the World's Greatest Comics* (Harry N. Abrams, 1991). Lo mismo podemos decir de *Silver Age: The Second Generation of Comic Book Artists*, por Daniel Herman (Hermes Press, 2004). Un análisis histórico del papel de los cómics en la cultura popular americana se presenta en *Comic Book Nation*, por Bradford W. Wright (Johns Hopkins University Press, 2001).

Aunque no sea una historia explícita de los cómics, un panorama divertido de los altibajos de los cómics de la Edad de Plata se encuentra en *Baby Boomer Comics: The Wild, Wacky, Wonderful Comic Books of the 1960s*, por Craig Shutt (Krause Publications, 2003).

Otros han explorado la ciencia que está tras los superhéroes de cómics, y cualquier lector que sienta que su personaje favorito no ha sido tratado suficientemente aquí puede consultar *The Science of the X-Men* de Line Yaco y Karen Haber (ibooks, 2000); *The Science of Superman* de Mark Wolverton (ibooks, 2002); *The Science of Superheroes* de Lois Gresh y Robert Weinberg (Wiley, 2002); y *The Science of Supervillains* por los mismos autores y editor (2004). La ciencia que fundamenta otros temas de cultura pop ha sido explorada en *The Physics of Star Trek*, de Lawrence Krauss (Basic Books, 1995); *The Science of Star Wars* (St. Martin's Press, 1998) y *The Science of the X-Files* (Berkley, 1998), ambos de Jeanne Cavelos, *The Physics of Christmas* por Roger High Old (Hide, Brown & Company, 1998); así como su *The Science of Harry Potter* (Viking, 2002).

Aquellos lectores interesados en un tratamiento profundo sobre la filosofía y la naturaleza de las investigaciones físicas deberían tener en cuenta *The Character of Physical Law* (Random House, 1994), [traducción al castellano: *El carácter de la ley física*, Tusquets editores, 2000] y *The Pleasure of Finding Things Out: The Best Short Works* [traducción al castellano: *El placer de descubrir*, Editorial Crítica, 2004], ambos de Richard P. Feynman (Perseus Publishing, 2000), así como *Discovering the Natural Laws: The Experimental Basis of Physics* (Dover, 1989), de Milton A. Rothman, y *The Fermi Solution: Essays on Science* de Hans Christian von Baeyer (Dover 2001).



## Sección I. Mecánica

Aunque este libro cubre muchos de los temas tratados en un curso introductorio a la física, aquellos lectores insaciables que deseen consultar un manual tradicional de física (o bien verificar que no estoy tratando de engañar a nadie) pueden encontrar de ayuda el libro *Conceptual Physics*, de Paul G. Hewitt (Prentice Hall, 2002). Está escrito como un texto de física de bachillerato, de modo que las matemáticas se mantienen a un nivel algebraico. Recomendamos encarecidamente una versión abreviada de las brillantes conferencias de física de Richard Feynman, que cubre las bases de la física clásica, *Six Easy Pieces* (Perseus Books, 1994) [traducción al castellano: *Seis piezas fáciles: la física explicada por un genio*, Editorial Crítica, 2004].

Hay muchas biografías excelentes de Isaac Newton. El lector interesado en aprender más acerca de este pináculo del intelecto puede considerar *The Life of Isaac Newton*, de Richard Westfall (Cambridge University Press, 1994) [traducción al castellano: *Isaac Newton: una vida*, Ediciones Folio, 2004]; *Newton's Gift*, de David Berlinski (Touchstone, 2000); e *Isaac Newton*, de James Gleick (Pantheon Books, 2003).

La discusión sobre la teoría especial de la relatividad del capítulo 6 fue tan fugaz que su brevedad puede atribuirse a la contracción de Lorentz. El primer libro que debería leer cualquiera que esté interesado en este tema es *What Is Relativity*, de L. D. Landau y E. B. Romer (traducido al inglés por N. Kemmerl (Dover, 2003) [la traducción al castellano más reciente es *¿Qué es la teoría de la relatividad?*, Editorial Rubiños, 1993]), que en sólo 65 páginas (figuras incluidas) explica claramente, sin ecuaciones, los conceptos físicos que son la base de la teoría de Einstein. Se pueden hallar tratamientos más avanzados de este fascinante tema en: *Relativity and Common Sense*, de Hermann Bondi (Dover Publications, 1962); *An Introduction to the Special Theory of Relativity*, de Robert Katz (D. Van Nostrand Co., 1964); *Introduction to Special Relativity*, de James H. Smith (W. A. Benjamin, 1965) [traducción al castellano: *Introducción a la relatividad especial*, Editorial Reverté, 1978]; y *Discovering the Natural Laws: The Experimental Basis of Physics*, de Milton A. Rothman (Dover, 1989). Queda advertido de que todos estos tratados presentan la matemática concerniente a la relatividad así como los conceptos físicos.

## Sección II. Energía, calor y luz

Se pueden hallar excelentes visiones de conjunto para el no especialista sobre cómo se crea y se transforma la energía, en particular a escala molecular, en *The Stuff of Life*, de Eric P. Widmaier (M. H. Freeman & Company, 2002); *The Machinery of Life* por David S. Goodsell (Springer-Verlag, 1992); y *Stories of the Invisible*, de Philip Ball (Oxford University Press, 2001). Información de fondo sobre esta misteriosa magnitud se halla disponible en *Energies: An Illustrated Guide to the Biosphere and Civilization* por Vaclav Smil (MIT Press, 1998) [traducción al castellano: *Energía: una guía ilustrada de la biosfera y la civilización*, Editorial Crítica, 2001] y *Energy: Its Use and the Environment*, de Roger A. Hinrichs y Merlin Kleinbach (Brooks Cole, 2001), tercera edición.

Este último es un libro de texto escrito en un nivel prácticamente libre de matemáticas, con abundante información relativa a los sucesos ambientales implicados en la transformación de la energía.

Excelentes informes populares sobre la fascinante historia de la termodinámica son: *A Matter of Degrees*, de Gino Segre (Viking, 2002); *Understanding Thermodynamics*, de H. C. Van Ness (Dover Publications, 1969); y *Warmth Disperses and Time Passes: The History of Heat*, de Hans Christian von Baeyer (Modern Library, 1998). Cuestiones relativas a la medición de la temperatura se consideran de un modo accesible en *Temperatures Very Low and Very High*, de Mark W. Zemansky (Dover Books, 1964), mientras que las transiciones de fase se discuten en *The Periodic Kingdom*, de Peter W. Atkins (Basic Books, 1995); y *Gases, Liquids and Solids*, de D. Tabor (Cambridge University Press, 1979).

Relatos populares sobre la historia de la electricidad y el magnetismo se hallan en: *Electric Universe: The Shocking True Story of Electricity*, de David Bodanis (Crown, 2005) [traducción al castellano: *El universo eléctrico: la sorprendente aventura de la electricidad*, Editorial Planeta, 2006]; *The Man Who Changed Everything. The Life of James Clerk Maxwell*, de Basil Mahon (John Wiley & Sons, 2003); y *A Life of Discovery: Michael Faraday, Giant of the Scientific Revolution*, de James Hamilton (Random House, 2002).

### **Sección III. Física moderna**

Existen muchas y muy buenas exposiciones generales de la física cuántica escrita para los no especialistas. Se recomiendan especialmente: *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, de George Gamow (Dover Press, 1985) y *The New World of Mr. Tompkins*, de G. Gamow and R. Stannard (Cambridge University Press, 1999).

Tratamientos claros y excelentes de la investigación de vanguardia sobre la teoría de cuerdas se pueden encontrar en: *The Elegant Universe*, de Brian Greene (W. W. Norton, 1999) [traducción al castellano: *El universo elegante*, Editorial Crítica, 2006]; *The Fabric of the Cosmos*, de Brian Greene (Alfred A. Knopf, 2003) [traducción al castellano: *El tejido del cosmos: espacio, tiempo y la textura de la realidad*, Editorial Crítica, 2006]; *The Future of Spacetime*, de Stephen W. Hawking, Kip S. Thorne, Igor Novikov, Timothy Ferris, and Alan Lightman (W. W. Norton and Company, 2002), y *Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Universe*, de Lawrence Krauss (Basic Books, 2000).

La revolución de la física del estado sólido, que ha transformado todo en nuestras vidas, está documentado en el accesible *Crystal Fire: Birth of the Information Age*, de Michael Riordan (Norton, 1997) y *The Chip: How The Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution*, de T. R. Reid (Simon & Schuster, 1985).

### **Resumen**

Con ánimo de continuar una revisión de los temas mencionados, el lector debería tener en cuenta estos libros muy amenos que recurren al enfoque de pregunta-respuesta para cubrir un amplio rango de la física para el no experto: *The Flying Circus of Physics with Answers*, de Jearl Walker (Wiley, 1977) and *Mad About Physics: Braintwisters, Paradoxes, and Curiosities*, de Christopher P. Jargodzski y Franklin Potter (John Wiley & Sons, 2000). En un tono semejante, para los que no se dejan intimidar por las matemáticas, tenemos *Back-of-the-Envelope Physics*, de Gifford Swartz (Johns Hopkins University Press, 2003). Los lectores ansiosos por aplicar su conocimiento de la física pueden acudir a *How Does it Work*,

de Richard M. Koff (Signet, 1961) y *Sneaky Uses for Everyday Things*, de Cy Tymony (Andrews McMeel Publishing, 2003), que contiene instrucciones para fabricarse ¡su propio anillo de poder!

Por último, algunas recomendaciones acerca de cómics. Tanto DC como Marvel tienen reimpressiones de conjunto que reúnen los cómics desde la Edad de Oro hasta el presente, con frecuencia editadas con papel de mejor calidad que el de los originales y con un coste menor del que supone adquirir en la actualidad los ejemplares atrasados. Las series de archivo de los volúmenes de DC y Marvel Masterworks son reimpressiones de los cómics de las edades de oro y de plata, enfocadas en un determinado personaje o equipo en formato de cubierta dura. Además, Marvel tiene una colección de reimpressiones en rústica, «Essentials», en las que se reeditan en un papel más barato unos veinte ejemplares de cómics de la edad de plata o posteriores, presentando un determinado personaje o título, en blanco y negro, a un coste inferior a un dólar por ejemplar. Los lectores cuyos recuerdos de sus anteriores favoritos se hayan desvanecido o aquellos que hayan desarrollado un nuevo interés hallarán casi con seguridad un volumen reimpresso en su librería favorita o en la amistosa tienda de cómics de su barrio.

Hay algunas colecciones, sin embargo, que deberían considerarse de lectura obligada como parte de cualquier educación completa sobre los superhéroes disfrazados. En la cabecera de la lista estaría *Watchmen* (DC comics, 1986, 1987), de Alan Moore y Dave Gibbons, que ha sido etiquetada con justicia como el *Guerra y Paz* de los cómics por el director de cine Terry Gilliam.

Por razones legales los personajes de esta historia son versiones cambiadas de los héroes de la Edad de Plata publicados originalmente por Charleston Comics (tales como *Question*, *Blue Beetle*, *Captain Atom*, etc.) y no hace falta estar familiarizados con ellos para disfrutar de la historia. Esas aventuras de personajes las publica ahora DC Comics, donde no resultan perturbadas por el destino que encuentran sus dobles en la épica de Moore y Gibbon. Otra obra de lectura obligada es *The Dark Knight Returns* (DC Comics, 1997), de Frank Miller [traducción al castellano: *Batman: el regreso del Señor de la noche*, Norma Editorial, 2001], que imagina un posible destino futuro para Batman. Estas miniseries están consideradas por la mayoría como las responsables de haber salvado a Batman de su desaparición o, algo peor, su irrelevancia, al devolver al personaje sus raíces más oscuras, adustas y bravas, y ha establecido el tono para varias versiones cinematográficas del Cruzado Enmascarado. Continuando el concepto de futuros posibles de superhéroes, las miniseries *Kingdom Come*, de Mark Waid y Alex Ross (ADC Comics, 1998) [traducción al castellano: *Kingdom Come* (1, 2, 3, 4), Norma Editorial, 2003 y 2004], investiga las relaciones entre los héroes y villanos superpoderosos de DC Comics y las personas normales. La influencia de los superhéroes de Marvel Comics en la sociedad, contemplada desde el punto de vista de un fotógrafo sin superpoderes para el *Daily Bugle*, es explorada en *Marvels* (Marvel Comics, 2004), de Kurt Busiek y Alex Ross. Una de las mejores aventuras de viajes en el tiempo se puede encontrar en la colección *Days of Future Past* (Marvel Comics, 2004), en la que participan muchos de los personajes de las populares películas de la Patrulla X, donde Kitty Pryde retrocede en el tiempo para prevenir un asesinato político que hubiera arrastrado a la humanidad a un futuro negro y distópico<sup>[92]</sup>. Finalmente, para aclarar el paladar de todos estos análisis del mito del superhéroe, conviene leer DC: *The New Frontier*, vols. 1 y 2 (DC Comics, 2004, 2005), de Darwyn Cooke [DC: *New Frontier*, Planeta-De Agostini], una brillante reconstrucción de los albores de la Edad de Plata situados

en la América de la guerra fría de finales de los años cincuenta, cuando esos héroes aparecieron por vez primera.

## Las tres leyes de Newton del movimiento

Los principios básicos de la dinámica, tal como fueron elucidados por Sir Isaac Newton, establecían que *a)* un objeto en reposo permanecerá en el mismo estado, o si está en movimiento uniforme en línea recta, seguirá moviéndose del mismo modo, a menos que esté sometido a una fuerza externa; *b)* si una fuerza externa actúa sobre el objeto, entonces su cambio de movimiento (ya sea en velocidad o en dirección) es proporcional a la fuerza externa, es decir  $\mathbf{F} = \mathbf{m a}$ , y *c)* las fuerzas siempre van por pares, lo cual normalmente se expresa diciendo que para cada acción siempre hay una reacción igual y opuesta.

### Definición de aceleración

La aceleración se define como la relación de cambio de la velocidad (ya sea su magnitud o su dirección) y tiene unidades de distancia/tiempo<sup>2</sup>.

$$\text{Peso} = \mathbf{Mg}$$

Una consecuencia de la segunda ley de Newton ( $\mathbf{F} = \mathbf{m a}$ ), cuando la fuerza externa es la atracción gravitatoria del planeta. La fuerza se conoce en este caso como Peso, y la aceleración debida a la gravedad se indica mediante la letra «g».

$$v^2 = 2gh$$

Una descripción de la velocidad *v* de un objeto que se mueve bajo la influencia de la gravedad, ralentizándose cuando se eleva o acelerando cuando cae, a lo largo de una distancia *h*.

$$\text{Fuerza} = \mathbf{G} \times [\text{MASA 1}] \times [\text{MASA 2}] / \text{distancia}^2$$

La sencilla expresión, hallada también por Sir Isaac Newton, para la fuerza atractiva entre dos puntos masivos cualesquiera. La fuerza es proporcional al producto de las masas de cada objeto e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

$$\mathbf{g} = \mathbf{GM/R}^2$$

Una consecuencia de la ley de Newton de la atracción gravitatoria es que la aceleración debida a la gravedad para un objeto grande tal como un planeta o un satélite puede expresarse mediante el producto de una constante universal *G* (*G* = 66,7 billonésimas de m<sup>3</sup>/kg-seg<sup>2</sup>) por la masa del objeto *M*, dividida por el cuadrado del radio del objeto. Esta expresión es correcta solamente en el caso de masas con simetría esférica.

$$g_k/g_E = \rho_k R_k / \rho_E R_E$$

Dado que la masa  $M$  de un planeta se puede escribir como el producto de su densidad  $\rho$  por su volumen ( $4\pi R^3/3$  en el caso de una esfera) la aceleración por la gravedad  $g=GM/R^2$  adopta la forma  $(4\pi/3)G\rho R$ , y cuando se plantea la relación de las aceleraciones debidas a la gravedad de dos planetas, las constantes  $G$  ( $4\pi/3$ ) se anulan.

### **Fuerza X tiempo = cambio del momento**

Un nuevo planteamiento de la segunda ley ( $F = m a$ ) en la que la aceleración es el cambio de la velocidad dividida por el tiempo durante el cual actúan las fuerzas externas. El momento se define como el producto de la masa por la velocidad de un objeto.

### **Aceleración centrípeta $a = v^2/R$**

Un objeto que se mueve con velocidad  $v$  en un arco circular de radio  $R$  se caracteriza por una aceleración debida a su cambio continuo de dirección. La magnitud de esta aceleración es  $v^2/R$  y, para dar cuenta de su cambio de movimiento, sobre el objeto debe actuar una fuerza externa dirigida en el sentido que va hacia el centro de la trayectoria circular, cuyo valor es  $F = mv^2/R$ .

### **Trabajo = Fuerza X Distancia**

El trabajo en física es otra expresión de la energía, y cualquier cambio en la energía cinética de un objeto debe ser el resultado de una fuerza externa que actúa a lo largo de una distancia dada. La expresión indica que uno no efectúa trabajo cuando mantiene un peso sobre su cabeza, pues aunque se aplica una fuerza no hay desplazamiento del objeto estacionario, lo cual contradice el uso común del término *trabajo*, pero es correcto desde el punto de vista físico, pues una vez que se ha aumentado la energía potencial del objeto al elevarlo una distancia sobre su cabeza, no hay cambio adicional en su energía si se le mantiene indefinidamente en ese estado elevado.

$$\text{Energía cinética} = (1/2) mv^2;$$

$$\text{Energía potencial} = mgh$$

Las expresiones de la energía asociadas con el movimiento (**energía cinética = (1/2)  $mv^2$** ) o para el potencial del movimiento en un campo gravitatorio (**energía potencial =  $mgh$** ). Observe que la expresión para la energía potencial es la misma que para el trabajo efectuado al elevar un objeto de peso  $mg$  a una altura  $h$ .

### **Primera ley de la termodinámica**

En esencia es una reformulación del principio de conservación de la energía, indicando que cualquier cambio de la energía interna de un sistema será el resultado de algún trabajo efectuado sobre o por el sistema y cualquier flujo de calor que entra o que sale del sistema.

## Segunda ley de la termodinámica

En cualquier proceso que convierta en trabajo (definido como el producto de fuerza por distancia) la energía calorífica que fluye de un objeto caliente a otro más frío, se producirá inevitablemente alguna pérdida. Es decir, no es posible transformar el cien por cien del flujo de calor en trabajo productivo. Esto está relacionado con la entropía de los sistemas involucrados en el proceso, la cual es una medida del desorden de sus componentes.

## Tercera ley de la termodinámica

Al disminuir la temperatura de un sistema en equilibrio, que es una medida de la energía media de sus componentes, disminuye la entropía del sistema. La entropía de un sistema es nula sólo si puede tener una sola configuración y ese estado tiene lugar únicamente cuando la energía media de cada componente es nula, es decir a la temperatura del cero absoluto, que nunca puede alcanzarse realmente.

## La ley de Coulomb de la atracción electrostática

La expresión matemática para la fuerza entre dos objetos cargados, indicando que la fuerza es proporcional al producto de la carga de cada objeto dividida por el cuadrado de la distancia que los separa. La fórmula es algebraicamente idéntica a la expresión de Newton para la fuerza gravitatoria. Sin embargo, mientras la gravedad es siempre atractiva, la fuerza entre dos objetos cargados puede ser atractiva si tienen signos opuestos (positivo y negativo) o repulsiva si tienen el mismo signo (ambos positivos o ambos negativos).

## Ley de Ohm $V = R I$

Expresión que relaciona el voltaje  $V$  que atrae o repele las cargas eléctricas en un conductor de resistencia  $R$  formando la corriente  $I$  (número de cargas que se mueven a través de un punto dado por unidad de tiempo). Aunque esta expresión es válida para la mayor parte de los metales, no todos los dispositivos electrónicos obedecen a esta sencilla relación lineal.

## Energía = $h f$

La hipótesis cuántica que establece que el cambio de energía de cualquier sistema atómico caracterizado por una frecuencia  $f$  puede tener lugar solamente en pasos de magnitud **Energía =  $h f$** , donde  $h$  es la constante de Planck, una constante fundamental de la naturaleza. Cuando un sistema reduce o eleva su energía emitiendo o absorbiendo luz, debe hacerlo mediante paquetes cuantizados de energía llamados «fotones».

## La relación de De Broglie $p\lambda = h$

El movimiento de cualquier materia que tiene un momento  $p$  está asociado con una onda de materia de longitud de onda  $\lambda$ , siendo el producto del momento por la longitud de onda la constante

$h$  de Planck.

### **La ecuación de Schrödinger**

La ecuación de onda fundamental para el «movimiento» de los objetos cuánticos. Conociendo el potencial  $V$  que actúa sobre el objeto es posible resolver esta ecuación para obtener la función de onda que caracteriza su comportamiento. El cuadrado de esta función de onda da la densidad de probabilidad de hallar el objeto en un determinado punto del espacio y en un determinado instante, y a partir de esta densidad de probabilidad se pueden obtener los valores promedio o esperados de cualquier cantidad mensurable (posición, momento, etc.).



La semilla de la idea del curso para principiantes sobre la física de los superhéroes que precedió a la escritura de este libro fue plantada por el profesor Terry Jones, del departamento de astronomía de la Universidad de Minnesota, durante un examen oral preliminar de estudiantes. Un obstáculo académico tradicional en la carrera de Física implica un examen del conocimiento general sobre la materia por parte del estudiante, administrado por miembros de la facultad que dirigen sus preguntas al estudiante, el cual está armado solamente con tiza y una pizarra y debe responder en tiempo real. La pregunta de Terry «¿cuánta energía necesita la Estrella de la Muerte para destruir el planeta Alderaan en *Star Wars (Episodio IV - Una nueva esperanza)*?» me condujo a pensar en otros planetas que explotan y me inspiró para basar mi seminario para principiantes en la ciencia de los superhéroes.

Hablando de inspiración, tengo una deuda con mis muchos profesores y mentores de física de los niveles de bachillerato, universidad y postgrado. En particular quisiera dar las gracias a Steve Cotsalas, John Jacobson, Peter Tea, Robert Alfano, Narkis Tzoar, Timothy Boyer, Frederick W. Smith, Kenneth Rubin, Sidney R. Nagel, Robert A. Street, y Hellmut Fritzsche. Me enseñaron física y, con su ejemplo, cómo ser un físico.

Estoy asimismo agradecido a los creadores de las muchas aventuras de cómics. He disfrutado de ellas todos estos años. Hay demasiados nombres para mencionarlos todos, pero guardo un aprecio especial para los esfuerzos de los creadores de los cómics de mi juventud: Gardner Fox, John Broome, Carmine Infantino, Gil Kane, Gene Colan, John Romita, Robert Kanigher, Steve Ditko, y los tres grandes, Julius Schwartz, Stan Lee y Jack Kirby. Sus historias, presentando héroes que empleaban su inteligencia y sus superpoderes para hacer el bien, me enseñaron una temprana lección de la importancia del «poder del cerebro», aunque el poder de un anillo también puede ser cómodo.

Desearía dar las gracias al profesor Lawrence M. Krauss por acceder gentilmente a escribir el prólogo de este libro. También quisiera aprovechar esta oportunidad para agradecer a Craig Shutt (Mr. Edad de Plata) de cuyo libro *Baby Boomer Comics* tomé la ocurrencia del título del epílogo citando una historia de los Cuatro Fantásticos de Stan Lee, quien a su vez lo tomó de la Biblia.

Estoy agradecido a mi madre por instilar en mí el amor por la lectura y por ser un modelo de aprendizaje y pensamiento crítico a lo largo de su vida. Mis propios hijos, Thomas, Laura y David me han ayudado como sujetos voluntarios para muchos de los razonamientos presentados aquí, y sus apreciaciones han resultado beneficiosas. Doy también las gracias a Laura Adams y Allen Goldman por la imagen STM de la figura 35. Mis agradecimientos a los amigos, familia y empleados de Dreamhaven Books and Comics por su solidaridad y sus consejos.

No podría haber escrito este libro sin los aportes de los estudiantes de mi curso seminario de iniciación impartido desde el año 2001 hasta 2003, así como del curso nocturno que di en el año 2003. Ellos enriquecieron la clase con sus comentarios intuitivos, ideas inteligentes y perspectivas únicas

sobre la física de los superhéroes. En particular, las cuestiones planteadas por Eric Caron, Kristin Barbieri, Matt Bialick, Drew Goebel, y Christopher Brummund inspiraron directamente el tratamiento de algunos de los temas cubiertos en este libro.

Uno de los beneficios extra de escribir un libro sobre la física de los superhéroes es que proporciona una nueva perspectiva acerca de cómo considerar viejos problemas. Sin embargo, un inconveniente de tomarse en serio temas fantásticos tales como correr a supervelocidad o ser capaz de ajustar a voluntad la probabilidad del propio efecto túnel es que uno no puede contar con el experimento como comprobación del análisis. Este inconveniente fue mitigado por la deliberada consideración proporcionada por mis colegas de la Escuela de Física y Astronomía de la Universidad de Minnesota. Estoy extremadamente agradecido al profesor E. Dan Dahlberg, quien generosamente ofreció su tiempo para leer cuidadosamente el manuscrito completo en borrador y advirtió muchos errores o simplificaciones excesivas. Además, los profesores Benjamin Bayman, Charles E. Campbell, Michel Janssen, Russell Hobbie, Marco Peloso, y John Broadhurst revisaron capítulos seleccionados de este libro, y éste ha resultado muy mejorado gracias a sus sugerencias. También me han ayudado los provechosos comentarios y sugerencias de Maria Waid, Gerard Jones, y Kurt Busiek. Cualesquiera errores o confusiones que restan son únicamente de mi responsabilidad, aunque me reservo el derecho de alegar que han sido dejados deliberadamente en el texto como «huevos de Pascua»<sup>[93]</sup> para que los descubra el lector atento.

Por último, quisiera ofrecer las gracias y reconocimiento por las contribuciones de las siguientes personas, sin cuya ayuda este libro hubiera resultado mucho más pobre: mi agente, Jay Mandel, por preguntarse si sería posible un libro con este enfoque de superhéroes para enseñar física, por su guía crucial en los primeros diseños y por ayudarme a establecer la entonación del libro. Me siento muy afortunado por tener como editor a Brandan Cahill, de Gotham Books. Su consejo técnico para estructurar el libro ha mejorado en gran manera el manuscrito y ha ahorrado a este autor novel varios «errores de principiante». La visión de Brendan de este libro complementó la mía propia y, lo que es igualmente importante, su propio conocimiento de los cómics le permitió sugerir ejemplos que yo no hubiera tenido en cuenta. Además, el editor de reproducción, Rachelle Nasher, representó un extenso papel al aumentar la legibilidad de la versión final del texto. Jenny Allen se ocupó, con una entrega que ha ido más allá de la amistad, de escanear todas las figuras aquí utilizadas. Las ocasionales crisis técnicas fueron siempre resueltas hábilmente en William Morris por Tali Rosenblat (presente al principio) y Liza Gennatiempo (al final) y por Patrick Mulligan de Gotham Books.

Mi esposa, Therese, ha sido una fuente constante de estímulo. Ha sido desde su inicio de más apoyo para este proyecto de lo que yo podía haber esperado. Ha leído los muchos proyectos y borradores del manuscrito y no puedo imaginar este libro sin su consejo y asesoría general en cuanto a la publicación. Soy un hombre afortunado.

## Notas

<sup>[1]</sup> *Inkers* en el original. Por razones de productividad, es frecuente en los cómics que el dibujante esboce las escenas y otro se haga cargo de pasar a tinta y termine de definir sombras, cabello y otros rasgos. Estos últimos son los *inkers*. (N. del T.)

<sup>[2]</sup> Con este fin, Luthor llegó a ayudar públicamente a Superman en varias ocasiones, con el propósito de que dudase de sus propias intenciones. Tan entregado estaba Lex Luthor a su plan, que incluso salvó la vida del superhéroe cuando estuvo amenazado por otro forajido que esgrimía una espada de kriptonita capaz de matarlo. Podrían pensar los lectores que hubiera sido más sencillo en ese momento abandonar su plan de «desintegrar» a Superman y dejar que el otro malhechor lo matara, pero ¿quién puede realmente entender los procesos de pensamiento de una mentalidad criminal como la de Lex Luthor?

<sup>[3]</sup> El concepto de emplear palabras y dibujos para referir una historia tiene más de quinientos años de antigüedad. Hay ejemplos de «hojas grandes» grabadas en madera de los tiempos de la Edad Media que utilizan marcos decorados, trazos y leyendas (globos o nubes) con palabras.

<sup>[4]</sup> Se refiere al nombre de *pulp magazine* o revista de pulpa de papel, para indicar la mala calidad del papel empleado en su impresión. Hemos preferido traducir el nombre por el de «novela barata». (N. del T.)

<sup>[5]</sup> En el original *pulp-fiction*, es decir, «novelas de pulpa», en alusión a la composición que forma la materia prima del papel. Debemos a Quentin Tarantino una de las obras maestras del cine con el mismo título en clara referencia a ese tipo de novelas de quiosco impresas con papel de baja calidad. (N. del T.)

<sup>[6]</sup> 6 5/8" × 10 1/8", es decir, medidas en pulgadas, en el original. (N. del T.)

<sup>[7]</sup> Se llama agua «pesada» a la que tiene los dos átomos de hidrógeno del H<sub>2</sub>O con un neutrón extra cada uno, mientras que el agua con un alto contenido de minerales se llama «dura». Afortunadamente, durante la época dorada de Flash, en los años cuarenta, los ablandadores de agua no eran corrientes.

<sup>[8]</sup> En alemán en el original: *Zeitgeist*. (N. del T.)

<sup>[9]</sup> Por consiguiente, un arma eficaz anti Linterna Verde, con independencia de la época, sería un bate de béisbol de color amarillo.

<sup>[10]</sup> El conocimiento acumulado acerca del mundo es actualmente tan vasto que los físicos solamente pueden realizar un progreso continuado especializándose en la investigación teórica o

experimental. Los físicos experimentales trabajan en laboratorios y llevan a cabo mediciones, mientras que los teóricos realizan cálculos y simulaciones por computador. Yo soy un físico experimental, mientras que Stephen Hawking es un teórico (la diferencia empieza ahí). Uno de los últimos físicos que verdaderamente sobresalieron tanto en la investigación experimental como en la teórica fue Enrico Fermi.

<sup>[11]</sup> Zafiro azul procedente de la India. Luis XIV lo adquirió en 1668 para la colección de joyas de la corona francesa. Robado poco después, ahora se halla en la Smithsonian Institution de Washington D. C. (*N. del T.*)

<sup>[12]</sup> Como padre, siento cierta afinidad con Jor-El. En muchas ocasiones he estado tentado de meter a mis hijos en un cohete y enviarlos al espacio profundo.

<sup>[13]</sup> Este último poder fue añadido para explicar por qué solamente un simple par de gafas creaban un disfraz tan perfecto que nadie se percató nunca de que el apacible reportero Clark Kent y el mundialmente famoso Superman eran la misma persona. Como se describe en el número 330 de *Superman*, éste hipnotizaba de forma aparentemente subconsciente a todos aquellos que lo veían para hacerles creer que su cara era completamente distinta de la de Clark Kent.

<sup>[14]</sup> Retcon es acrónimo de *retroactive continuity*, idea utilizada por primera vez en 1983 por el escritor de cómics Ray Thomas, quien dijo haberla escuchado en una convención. El término se refiere a los cambios que se efectúan a posteriori en una obra en serie y que afectan a hechos anteriores. Estos cambios se producen debido a nuevos guionistas o para adaptarse a las demandas del público. La abreviación *retcon* se debe a Damian Cugley (USENET, 1988) (*N. del T.*)

<sup>[15]</sup> Cómo podía afectarlo tan intensamente un elemento radiactivo de su planeta nativo, mientras permanecía inmune a los isótopos radiactivos encontrados en la Tierra es más un asunto de condición literaria que uno de plausibilidad física. La kriptonita fue presentada por primera vez en el serial de radio *Adventures of Superman*, emitido en 1943, cuando el actor de radio que representaba al hombre de acero necesitó unas vacaciones al estar extenuado por sobrecarga de trabajo. Los guionistas de la radio crearon el castigo mineral de Superman de forma que otro actor pudiera representar al dañado superhéroe gimiendo ante el micrófono. Algunos años más tarde los guionistas del cómic adoptaron y adaptaron este recurso creativo, y se presentó todo un arco iris de kriptonita (verde, roja, dorada, plateada y otras) con un amplio espectro de efectos sobre Superman.

<sup>[16]</sup> Este inconveniente se soluciona hablando de kilogramos de fuerza o kilopondios, o simplemente de kilos o incluso de kilogramos sin más cuando el contexto está claro. (*N. del T.*)

<sup>[17]</sup> Hulk es más listo de lo que todos piensan (su alter ego es un físico, después de todo).

<sup>[18]</sup> Los que estuvieron implicados en la publicación de cómics tanto de DC como de Marvel en aquellos tiempos negaron que hubiera tenido lugar la referida partida de golf. No obstante, dado que esa historia está considerada por muchos aficionados como el origen de la fortuna de Marvel Comics,

se ha convertido en una leyenda aceptada, sin que importe si está basada en hechos reales.

<sup>[19]</sup> En la película *Spider-Man* del año 2002, la picadura de la superaraña modificada por ingeniería genética le confirió también a Peter la capacidad para disparar telaraña orgánica a través de conductos en sus muñecas. Esto libró a los realizadores de tener que explicar por qué el adolescente Peter Parker era capaz de inventar y fabricar una revolucionaria red adhesiva, a pesar de cambiar al personaje para siempre (una paradoja que nunca preocupó al lector medio del cómic de la Edad de Plata).

<sup>[20]</sup> «Crac» (por crujido) sería la versión en castellano, pero hemos conservado la que figura en la imagen. (N. del T.)

<sup>[21]</sup> La *Escherichia coli* es una bacteria que se encuentra generalmente en los intestinos de los animales. (N. del T.)

<sup>[22]</sup> Un accidente electroquímico de esta naturaleza tan terrible no volvería a ocurrir hasta el número 110 de los cómics de Flash, cuando otro rayo roció al joven Wally West con idénticos agentes químicos, dotándolo también con supervelocidad. Wally comenzó entonces su carrera como un principiante luchador contra el crimen, bajo el imaginativo nombre de Kid Flash.

<sup>[23]</sup> *Scarlet Speedster* en el original, uno de los sobrenombres de Flash. (N. del T.)

<sup>[24]</sup> En varias religiones y culturas el término Armagedón sugiere una gran catástrofe o incluso el fin del mundo. La Biblia contiene una referencia (Apocalipsis 16: 16), y antes de la Segunda Guerra Mundial, la Primera Guerra Mundial era nombrada a veces con ese término. (N. del T.)

<sup>[25]</sup> *Crimson Comet* en el original, otro de los apodos de Flash. (N. del T.)

<sup>[26]</sup> Hay excepciones importantes a este principio general de que la viscosidad aumenta con la velocidad, tales como sucede con la salsa ketchup. Cuando se la agita rápidamente, la viscosidad de la salsa disminuye, siendo así que se ha dicho antes que un golpe repentino sobre el agua aumenta su resistencia a fluir. Esto explica que golpes fuertes y rápidos en el fondo de la botella de salsa ketchup reduzcan momentáneamente su viscosidad y aceleren su salida de la botella.

<sup>[27]</sup> The Weather Channel (TWC) es una red de televisión por satélite y cable que informa sobre el clima durante las 24 horas del día. Tiene su central en Vinings, Georgia (cerca de Atlanta). (N. del T.)

<sup>[28]</sup> *Radar gun* («pistola de radar») en el original, cuyo nombre se debe a que en general tienen la forma de un grueso pistolón. (N. del T.)

<sup>[29]</sup> El relámpago originado por el rayo cubre una distancia de un kilómetro en unas tres millonésimas de segundo (somos incapaces psicológicamente de detectar sucesos que ocurren tan deprisa que nos resultan instantáneos), mientras que el trueno que se crea simultáneamente tarda unos

tres segundos en alcanzarnos. Contando el número de segundos entre ambos sucesos, y haciendo uso del hecho de sobras conocido de que el sonido tarda tres segundos para recorrer un kilómetro, nos permite calcular de forma fácil la distancia que nos separa de la tormenta.

<sup>[30]</sup> Esta «energía negativa» está asociada con estados cuánticos comprimidos y está más allá del propósito de este libro. Y no, su cuñado no puede ser considerado como una vasta e inexplorada fuente de energía negativa.

<sup>[31]</sup> PDA, del inglés *Personal Digital Assistant* («ayudante personal digital»), es un ordenador de mano originalmente diseñado como agenda electrónica. Hoy en día se puede usar como un ordenador doméstico (ver películas, crear documentos, navegar por Internet, etc.). (*N. del T.*)

<sup>[32]</sup> Las hormigas carpinteras son hormigas negras de gran tamaño (de 0,6 cm a 2,5 cm) oriundas de América del Norte. Se hallan también en el noreste de China. (*N. del T.*)

<sup>[33]</sup> El movimiento periódico armónico de un péndulo oscilante es una de las piedras angulares de gran parte de los modelos teóricos que uno estudia en física. Son tantas las veces en que, al intentar describir algún fenómeno natural complicado, comenzamos invocando un péndulo simple, que uno está tentado de parafrasear a Yogi Berra y decir que el 90% de la física es «el movimiento armónico simple» y la otra mitad es el «paseo aleatorio».

<sup>[34]</sup> Tendremos algo que añadir acerca de Atom y de su capacidad de reducirse en el capítulo 12.

<sup>[35]</sup> Los manzanos emplean este principio como parte de su mecanismo de dispersión de semillas. Cuando el fruto ha madurado y alcanzado una masa suficiente, su peso excede la resistencia a la carga del pedúnculo por medio del cual está sujeto al árbol. Cuando se rompe el pedúnculo, el fruto cae al suelo, donde es consumido por los animales y así sus semillas son esparcidas por otros lugares.

<sup>[36]</sup> Compensado de algún modo por el aumento del momento de torsión debido al aumento del brazo de momento (ver capítulo 8).

<sup>[37]</sup> En 1977 los científicos pudieron verificar de forma directa que una densidad de energía suficientemente elevada podía hacer que surgiera materia de manera espontánea. Mediante la colisión de fotones de rayos gamma de alta energía, pudieron crear pares de partículas electrón/antielectrón en el laboratorio, recreando en esencia el mecanismo que operó en los primeros segundos del universo.

<sup>[38]</sup> Resulta que podíamos haber iniciado nuestra discusión del capítulo 1 con una definición de la energía  $y$ , utilizando la regla del álgebra, manipular al revés para «derivar» la expresión  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ , en lugar de empezar con  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$  y determinar la energía, tal como hicimos. Cómo empezar un cálculo es una cuestión de gusto personal. Al final siempre hallaremos la expresión para Gwen Stacy  $v^2 = 2gh$ . Esta conexión entre su velocidad final y la altura desde la que cae es lo importante, y a Gwen le tiene realmente sin cuidado qué ecuaciones usamos para obtenerla.

<sup>[39]</sup> Wally era originalmente Kid Flash, pero hacia 1985 Elimino el *Kid* de su título, tomando la capa de Flash después de que Barry Allen, el Flash de la Edad de Plata, hubiera perecido al salvar nuestro universo del Anti Monitor. Es una larga historia.

<sup>[40]</sup> En inglés *joule*. (N. del T.)

<sup>[41]</sup> Observe que un  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$  es también la unidad para la energía potencial gravitatoria  $EP = mgh$ , cuando para la masa  $m$ , la aceleración debida a la gravedad  $g$  y la altura  $h$ , se utiliza el kg, el  $\text{m}/\text{s}^2$  y el metro. Esto es reconfortante, ya que si la energía cinética equivale a la potencial deberían medirse con las mismas unidades. Indicaría un error en nuestro análisis si la energía cinética tuviera unidades  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$  y la energía potencial o el Trabajo tuvieran unidades de  $\text{s}^2/\text{kg}$  o algo igualmente ridículo.

<sup>[42]</sup> Puesto que aproximadamente la mitad de nuestra ingesta calórica se dedica al mantenimiento de las funciones metabólicas, Flash necesitaría comer el doble de la cantidad estimada.

<sup>[43]</sup> Sin embargo, no todos los meteoritos se queman al entrar en la atmósfera. Para explicar la gran cantidad de kriptonita que consiguió alcanzar intacta la Tierra, en el número 130 de *Superman* se argumentaba que los restos de la destrucción de su planeta eran invulnerables a la fricción del aire.

<sup>[44]</sup> Puesto que Ant-Man se encoge con densidad constante, la fuerza de su puñetazo disminuye en la misma proporción que el área transversal de su bíceps. Sus puñetazos encierran una presión impresionante solamente porque el área superficial de su puño decrece junto con la fuerza aportada por sus músculos.

<sup>[45]</sup> Años más tarde, el poder mutante de Wanda fue asociado con el «caos mágico», pero esto no es más que fantasía. Nada menos que una autoridad como el Dr. Extraño (el Supremo Hechicero del Universo Marvel) declaró en el n.º 503 de *Avengers* que no existía tal cosa.

<sup>[46]</sup> Por fortuna, Atom nunca ha tenido que escuchar comentarios tan hirientes.

<sup>[47]</sup> Más tarde recibirían el nombre de *The Uncanny X-Men*.

<sup>[48]</sup> ¿Sobre rayos cósmicos?

<sup>[49]</sup> La referencia a la metralla cobrará sentido en el capítulo 23, donde se tratará en profundidad del origen de Iron Man. ¡Siga atento, fiel creyente!

<sup>[50]</sup> Aunque los cambios químicos y estructurales causados térmicamente durante la cocción pueden ser muy complejos, para nuestros fines consideraremos el paso clave como aproximado a una transición de licuación.

<sup>[51]</sup> Al vibrar a alta velocidad, Flash imparte energía cinética a los cristales de hielo que lo rodean. Una vibración de 100.000 veces por segundo, incluso en el caso de que sólo pueda inclinarse hacia delante y atrás un centímetro, correspondería a una energía cinética total de  $(1/2)mv^2$  de 35 millones

de  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$ . La transición de fundirse el hielo en agua requiere el añadido de 336 de  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$  por gramo de hielo a 0 °C. Con su exceso de energía cinética Flash es capaz de fundir cien kilos de hielo a su alrededor, liberándose para devolver al Captain Cold a la cárcel de Central City.

<sup>[52]</sup> No puedo subrayar lo suficiente que casi sin excepción uno no puede combinar al azar un conjunto de aparatos de circuitería y potencia en un objeto y «descubrir accidentalmente» que es un rayo de la muerte que funciona a la perfección. (Hablo aquí según mi amarga experiencia.)

<sup>[53]</sup> Estas cuatro fuerzas, en la forma de los villanos Graviton, Zzzax, Quantum y Halflife, pueden ser tan formidables como los Nuevos Vengadores (West Coast Avengers) descubrieron en «La Teoría del Campo Unificado».

<sup>[54]</sup> Los jóvenes lectores de la Edad de Plata podrían ser perdonados si llegaban a la conclusión de que recibir la descarga de un rayo, preferiblemente en conjunción con alguna otra actividad peligrosa, era una de las mejores cosas que podían ocurrirles, después solamente del hecho de quedar expuestos a una dosis masiva de radiación.

<sup>[55]</sup> Se trata aquí del Flash Wally West, quien basaba sus operaciones en Keystone, la ciudad gemela de Central City, el hogar del Flash Barry Allen.

<sup>[56]</sup> Los geos son lagartos de tamaño pequeño a mediano que se encuentran en climas templados a lo largo de todo el mundo. Son únicos entre los lagartos por su vocalización, pues emiten ruidos chirriantes en sus interacciones con sus congéneres. Muchas especies tienen unas plantas de los pies especiales que les permite escalar superficies lisas verticales e incluso recorrer los techos con facilidad. (*N. del T.*)

<sup>[57]</sup> A menos que emplee la agencia de fontanería de Moe, Larry y Curly.

<sup>[58]</sup> El cable no tiene que estar necesariamente conectado al «suelo», sino simplemente a otro punto que esté a un potencial menor que el inicial. Pero en último término, la referencia final de cualquier corriente debe ser el suelo. Siguiendo la analogía del agua, podemos tener un flujo de agua a través de una manguera que esté conectada a un grifo en un extremo y a otro en el otro. Mientras exista una diferencia en la presión del agua entre ambos grifos, existirá un flujo neto de agua, pero para conservarlo indefinidamente el segundo, a menor presión, deberá poder descargar eventualmente su exceso de agua en algún canal de desagüe (o «suelo» en el caso de la situación eléctrica).

<sup>[59]</sup> Supreme Headquarters Internacional Espionage Law-Enforcement Division.

<sup>[60]</sup> En ocasiones, incluso menos. Según una leyenda, la nota de Lee a Jack Kirby para el clásico n.º 48 de los Cuatro Fantásticos, en el que los CF se enfrentan con el ser cósmico Galactus, decía lo siguiente: «El CF lucha con Dios». Kirby, razonando que una entidad tal debería venir precedida por un heraldo que preparara al infeliz planeta para la llegada del devorado creó el personaje de Silver Surfer. Lee se enteró del Surfer cuando el diseño de Kirby para el número 48 de los CF llegó a la oficina



de Marvel.

[61] Cuando el duende extradimensional Mopee otorgó supervelocidad y un aura protectora a Barry Allen en el n.º 167 de *Flash*, sabía lo que hacía. Mopee desapareció al final de la historia antes de que Barry Allen pudiera preguntarle cómo adquirió su aura Wally West (el Kid Flash de la época). En la actualidad, todas las auras de Flash derivan de la Fuerza de la Velocidad, lo cual tiene tanto sentido físico como un duende de diez dimensiones.

[62] Este punto fue ilustrado en el n.º 3 de *Atom*, en el cual el protagonista retrocede al pasado utilizando un Estanque del Tiempo descubierto por el profesor de física Alpheus V. Hyatt. Haciendo brillar una luz de «todos los colores, incluso los sombreados más finos» sobre una región pequeña del espacio, el profesor Hyatt creaba un pequeño portal hacia otras épocas temporales. La abertura de este estanque del tiempo tiene solamente seis pulgadas de diámetro, de modo que el profesor cuelga un imán de un hilo de pescar e intenta encontrar objetos magnéticos del pasado (en apariencia es indiferente a los posibles «efecto mariposa» que cualquier pequeño cambio en la historia pueda tener en el presente). *Atom*, capaz de empequeñecerse lo bastante como para pasar a través del portal se engancharía por un tiempo en el imán colgado y tendría aventuras en el pasado, como en la historia relativa al cambio del calendario juliano al gregoriano mencionada en la Introducción. En la conclusión del cuento del n.º 3 de *Atom*, *Atom* trae de vuelta una moneda de oro de Arabia de los años 500 antes de Cristo (la moneda tiene escrita una mezcla rara de números romanos y arábigos). *Atom* sujeta la moneda mientras el imán es traído de nuevo a la época presente, observando: «¡El profesor quedará desconcertado al ver que este imán recoge una moneda de oro!». Y así fue, con propiedad.

[63] En la película *X-Men 2*, Magneto es capaz de vencer a su guardián y escapar de su celda de plástico sólo después de que su cómplice Mística hubiera inyectado una pequeña cantidad de metal magnético en la corriente sanguínea del guardián.

[64] Intente este experimento. Tome dos imanes del tamaño de una tarjeta de crédito y sujételos de forma que sus lados magnéticos se hallen enfrentados. Cuando los oriente de modo que ambos lados largos apuntan en la misma dirección, usted puede deslizarlos suavemente entre sí. Ahora dé la vuelta a uno de los imanes, de modo que su lado largo forme un ángulo recto con el lado largo del otro imán. Debería advertir un movimiento irregular de desplazamiento de varillas a medida que desliza ahora los imanes entre sí. Lo que usted nota es el campo magnético de una tarjeta avanzando a tumbos sobre las paredes entre las tiras de los dominios magnéticos de la otra.

[65] Los lectores cuidadosos observarán que incluso si un cable está en reposo (con respecto a algunos observadores) los electrones están en movimiento constante, agitándose de acá para allá, puesto que poseen una energía cinética caracterizada por su temperatura. Lo importante en cuanto a la discusión anterior es que en ausencia de un voltaje externo o de un campo magnético cambiante, no hay movimiento neto de los electrones en el cable, de modo que pueden considerarse, en promedio, estacionarios.

[66] Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) en el original. (*N. del T.*)

<sup>[67]</sup> *All But Dissertation*, «todo excepto charlas».

<sup>[68]</sup> En serio, usted no querría representar el momento por la letra **m**, ya que esto llevaría a confusión al no saber si **m** se refiere al momento o a la masa. No estoy seguro de por qué la letra **p** se ha asociado con el momento, pero parece que ha echado raíces.

<sup>[69]</sup> Por tanto, nuestra anterior analogía de un automóvil viajando por una autopista que sólo puede tener velocidades múltiplos de 20 km/h solamente sería válida para un automóvil que da vueltas en una pista cerrada.

<sup>[70]</sup> El desfile del Día de Acción de Gracias de Macy's (unos grandes almacenes neoyorkinos), en el que abundan los globos de plástico llenos de helio. Este gas es más pesado que el hidrógeno, pero tiene la ventaja de no ser explosivo. (*N. del T.*)

<sup>[71]</sup> Aunque la explicación de Barry no es realmente tan apasionante, era práctica común en los cómics de la Edad de Plata que toda frase que no fuera una pregunta se puntuara como exclamativa.

<sup>[72]</sup> En esa época DC había ganado su largo proceso judicial contra Fawcett, el editor de *Captain Marvel*, por infracción del *copyright* en relación con el personaje de Superman. El litigio contra la demanda había contribuido a la casi bancarrota de Fawcett, y DC pudo comprar los derechos sobre el personaje del Capitán Marvel. Aparentemente, ahora que poseían el *copyright* del personaje, a DC no le preocupó más que la publicación del cómic del Capitán Marvel compitiera injustamente con los cómics de Superman dañando su viabilidad económica.

<sup>[73]</sup> En este caso, ¡la exclamación está justificada!

<sup>[74]</sup> En el original se opera un juego de palabras entre «mosca» (*housefly*) y «casa» (*house*). (*N. del T.*)

<sup>[75]</sup> Antigua moneda austríaca (y con anterioridad también alemana). (*N. del T.*)

<sup>[76]</sup> Una recapitulación excelente de la discusión anterior sobre el experimento mental del gato de Schrödinger se puede hallar en el número 32 de *Animal Man*, Aunque para un mejor efecto recomendamos empezar al comienzo de este relato en el ejemplar número 27.

<sup>[77]</sup> A excepción de diablillos tales como Mr. Mxyzptlk, Bat-Mite, Mopee y posiblemente el doctor Extraño cuando fue advertido de que tuviera «¡Cuidado con Triboro, el Tirano de la sexta dimensión!» en el número 129 de *Strange Tales*.

<sup>[78]</sup> La historieta usa la variante *colosseum*. La denominación correcta para el lugar en que los cristianos eran devorados en la antigua Roma es Circus Maximus.

<sup>[79]</sup> El yelmo cilíndrico de su vestimenta original le valió a Iron Man el sobrenombre de Shellhead (Cabeza de Concha), que estuvo unido a él durante cuarenta años, sin que importara lo aerodinámicas

y elegantes que llegaron a ser las últimas versiones de su casco.

<sup>[80]</sup> Los niveles de menor energía son los primeros que se ocupan con electrones. Hablando con propiedad, cada par de electrones de un átomo obtienen su propia sala (se emparejan debido a sus campos magnéticos intrínsecos, polo norte con polo sur). Son los últimos electrones que ocupan los niveles disponibles los que determinan la reactividad química y las propiedades electrónicas del sólido correspondiente, y es la clase que contiene a dichos electrones la que consideramos suya.

<sup>[81]</sup> También álgebra de Boole. En la literatura técnica se emplea también el anglicismo lógica (o álgebra) booleana. (*N. del T.*)

<sup>[82]</sup> Y muy pocas organizaciones actuales, en mi opinión, están lo bastante orgullosas de su «perverso» estatus como para atreverse a incorporarlo en su título y en su papel de carta.

<sup>[83]</sup> Técnicamente, Visión es un «sintezoido», y no, no sé cuál es la diferencia.

<sup>[84]</sup> A finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, los cómics incluían siempre no menos de dos páginas en prosa con el fin de entrar en la categoría postal reservada para las «revistas», que se definían como publicaciones que contuvieran al menos dos páginas de texto.

<sup>[85]</sup> «Lo, there shall be an ending!» en el original, en alusión al título del n.º 43 de *Los Cuatro Fantásticos*. (*N. del T.*)

<sup>[86]</sup> Esto es algo redundante, ya que todo campo de fuerza de los cómics es invisible, salvo uno. Dado que el anillo de Green Lantern es impotente contra cualquier cosa de color amarillo, el malvado Shark en el n.º 24 de *Green Lantern* tiene la facultad de proyectar «¡campos de fuerza invisibles amarillos!».

<sup>[87]</sup> Hastiado del idilio pacífico que la sociedad había alcanzado finalmente, Kadabra retrocedió en el tiempo hasta nuestra época con el fin de infligir trastadas. El deseo de escapar a la monotonía de un futuro utópico hizo que el villano viajero del tiempo Kang de Marvel Comics visitara nuestro presente, empeñado en la conquista del mundo. Al parecer la naturaleza humana, al menos la de algunos humanos, se rebelará siempre ante una sociedad perfecta y bien organizada.

<sup>[88]</sup> A veces esos cambios tardan en producirse. Si los antiguos esclavos griegos de galeras pudieran visitar un gimnasio moderno y contemplar las saludables (comparadas con las suyas) máquinas de remos que emplean hombres y mujeres libres, sus cabezas estallarían sin duda por el pasmo.

<sup>[89]</sup> La *K* indica Acción. («*K stands for Action!*», en el original. Otra broma del autor. Está claro que la *K* sugiere el nombre de Kakalios, pero esta nota al pie trata de contrariar la suposición del lector.) (*N. del T.*)

<sup>[90]</sup> *Adamantium* en el original. Se trata, claro está, de un material ficticio. (N. del T.)

<sup>[91]</sup> *Vibranium* en el original. Otro material ficticio, propio del mundo de los cómics. (N. del T.)

<sup>[92]</sup> La *distopía* califica a un mundo negativo, como indica su etimología (*dis*, «malo», *topos*, «lugar»). Este término (*dystopia*, en inglés) se debe a John Stuart Mill, que lo acuñó por vez primera allá por el año 1868. (N. del T.)

<sup>[93]</sup> *Easter eggs* en el original. Aparte de su significado literal (actualmente los huevos de Pascua suelen ser de chocolate y se decoran con especial atención), existe otro significado que se refiere a sorpresas agradables ocultas en programas, películas, discos, libros, etc. (N. del T.)