

alberto rojo

la física en la vida cotidiana



siglo veintiuno
editores

colección
ciencia que ladra...

Lo que se ve y lo que se oculta

Los rayos de luz

Dice Pablo Neruda: “Estoy muerto, estoy asesinado, estoy naciendo con la primavera [...], porque ha salido el sol”. Esta referencia a la luz es un ejemplo aislado en una lista innumerable de alusiones poéticas, filosóficas y religiosas al acto de ver, de percibir rayos de luz emitidos y reflejados por objetos tan próximos como el faro de un auto o el espejo del baño, y tan remotos como la Luna o las estrellas. A su vez, la historia de las teorías sobre los diversos fenómenos visuales, como el azul del cielo, el arco iris, el halo de la Luna, los espejismos o el rojo de un hierro candente, abarca miles de años. Pitágoras, filósofo griego del siglo VI a.C., sugirió que la luz está hecha de rayos que actúan como tentáculos que se propagan en línea recta desde el ojo hasta el objeto, y la sensación de ver se produce cuando el rayo toca el objeto. Si bien esta idea suena exótica, si invertimos la dirección de propagación de estos rayos obtenemos la descripción básica que aceptamos hoy. Digamos, entonces, que la luz está hecha de rayos que se propagan en línea recta. Esta descripción es válida en muchísimos casos y nos ayudará a entender fenómenos visuales de nuestra vida diaria. Pero antes de embarcarnos en un *tour* de fenómenos ópticos es oportuno aclarar que los rayos

son sólo parte de una descripción más abarcadora de la luz. Eso no quiere decir que hablar de rayos de luz sea incorrecto, sino que se trata de una descripción incompleta. Sin embargo, resulta útil y válida en muchos casos, del mismo modo que, por ejemplo, los distintos mapas de una ciudad, el del tendido eléctrico, el de las calles, el de los subterráneos, el de los distritos y barrios nos dan información sintética de distintos elementos de interés; todos son, a su manera, correctos y complementarios, aunque ninguno dé una descripción completa de la ciudad. La historia de la ciencia es la historia de la búsqueda de mapas de la realidad, de ese vasto y complejo mecanismo que es el universo.

En este caso nos ocuparemos de los rayos de luz, un concepto que, como uno de los mapas de la ciudad, nos guiará por algunos de los fenómenos visuales de nuestra experiencia diaria.

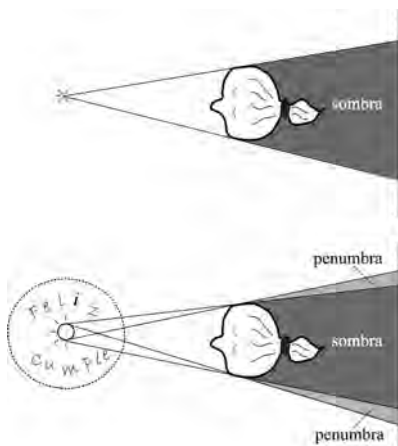
Sombra y penumbra

Alicia eligió poner una sola velita en su torta de cumpleaños. Se apagan las luces de la habitación. La vela es un centro del que emanan rayos de luz tenue en todas las direcciones. Algunos rayos iluminan los rostros de los invitados que ya cantan “Cumpleaaaños feeeeliz”. Otros rayos siguen de largo e iluminan la pared. Al tratarse de una fuente de luz que es casi un punto, la sombra en la pared está bien delimitada, la frontera entre luz y oscuridad en la pared está marcada por los rayos que pasaron rasantes por la silueta de los invitados. Si la luz proviniera de sólo un punto, la silueta de la sombra sería una línea perfecta.

Miremos esto de otro modo. Saquemos a los invitados de la habitación y supongamos que la vela es un perfecto punto que emite luz en todas las direcciones. Entonces, a cada punto de la pared le llega uno y sólo un rayo. Al anteponerse alguien o algo

entre el punto de luz y la pared, algunos rayos se interrumpen y no llegan: se formó la sombra. Pero la llama de la vela no es un punto sino una pequeña almendra de luz. Eso quiere decir que a cada punto de la pared de la habitación vacía llegan rayos de luz de distintas partes de la llama. ¿Qué pasa ahora cuando entran los invitados y se anteponen entre la llama y la pared? De vuelta se forma una silueta oscura, pero si la miramos en detalle descubrimos que el borde no es una línea tan definida como en el caso del punto de luz. Como antes, a algunos puntos de la pared no llega ningún rayo. Pero en el borde de la sombra hay puntos a los que llega *parte* de la luz de la vela, puntos en los que sólo algunos de los rayos fueron interrumpidos. Esa transición entre sombra (*umbra*) y claridad es la *penumbra*.

Ahora, una mosca se detiene en la pared, en la sombra; la vela está detrás de Alicia. Si la vela fuera el Sol y Alicia la Luna, la mosca estaría en la zona de un eclipse total. La mosca camina por la pared y empieza a ver *partes* de la vela. Está en la penumbra, o en la zona de un eclipse parcial de vela. En la zona iluminada, es como si hubiera salido el Sol.



En un día soleado, el contorno de nuestra sombra en el pavimento no es un borde afilado sino un contorno difuso, ya que el Sol es un disco y no un punto: si tomamos un punto fijo en la Tierra y trazamos rayos imaginarios hacia el perímetro del Sol, los rayos forman un cono de un ángulo de 2 grados. En ese mismo día de sol, proyecten la sombra de su mano en un papel blanco y vean cómo ese contorno difuso, la penumbra, se hace más definido a medida que acercan su mano al papel. Midan el ancho de ese contorno y divídanlo por la distancia de su mano al papel. Comprobarán que ese cociente es constante y aproximadamente $1/112$. Ése es el ángulo del cono que mencionaba. Dicho de otro modo, una moneda de 1 centímetro de diámetro puesta a 112 centímetros de nuestros ojos bloquea el disco entero del Sol. Ese ángulo es responsable de la penumbra de nuestra sombra.

Una de las coincidencias fortuitas de la naturaleza es que el ángulo del cono del Sol es casi el mismo que el ángulo del cono de la Luna: la luna es cuatrocientas veces más chica que el Sol pero está cuatrocientas veces más cerca. Gracias a esta hermosa coincidencia, en un eclipse la Luna cubre al Sol por completo.¹

Usando este tipo de razonamiento geométrico podremos explicar por qué la sombra del pie es más definida que la sombra de la cabeza. En un día nublado, nuestra sombra es mucho menos definida y a veces hasta imperceptible, ya que la luz no proviene directamente del disco del Sol sino de los reflejos de la luz del Sol en las nubes y nuestro cuerpo es capaz de obstruir sólo una fracción de esa luz. En general, aun en un día soleado, al piso llega la luz directa del Sol y la luz indirecta de los rayos reflejados por

¹ En realidad, las distancias de la Luna a la Tierra y del Sol a la Tierra no son constantes (las órbitas no son círculos sino elipses); cuando la Luna está un poco más lejos de nuestro planeta, al anteponerse entre el Sol y la Tierra, no la cubre del todo.

el medio ambiente. Cuando nos sentamos a la sombra de un árbol o de una sombrilla estamos al resguardo de la luz directa del Sol, pero no de la luz indirecta del resto del medio ambiente.



La mano de Fernando, a un metro del piso, proyecta una sombra de bordes difusos.

Cuando Fernando acerca la mano al piso, a unos 20 centímetros, los bordes de la sombra se vuelven más definidos.

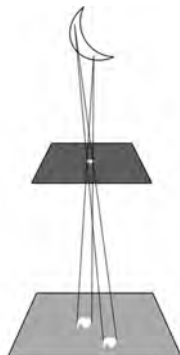
Durante un eclipse de Sol, la Luna intercepta rayos del Sol y el ambiente se va haciendo más oscuro. A la vez, los contornos de las sombras se vuelven más definidos. ¿Por qué?

Un árbol como cámara fotográfica



Cuando el Sol se filtra por los huecos pequeños entre las hojas de árboles altos, proyecta círculos de luz en el suelo. Los círculos son la imagen del Sol. Como el tamaño de los huecos es mucho menor que su distancia

al suelo, sus irregularidades son imperceptibles y el hueco actúa como un punto por el que pasan los rayos, proyectando la imagen del Sol tal como lo hace una cámara fotográfica.



En un eclipse, los círculos en el asfalto se convierten en pequeñas medialunas.

(Foto tomada por Floyd Mattheis durante el eclipse que se vio claro en Tobruk, Libia, el 26 de marzo del 2006.)

Crepúsculo y anticrepúsculo

El Sol está detrás del horizonte pero sigue iluminando el cielo: es el momento del crepúsculo. El cielo, a su vez, ilumina el paisaje. El amanecer y el atardecer son fenómenos simétricos, de modo que la luz del Sol es la misma en los dos eventos, salvo que ocurren en orden inverso. En un caso, la luz del cielo antecede la salida del Sol, en el otro lo sucede. En el momento en que el Sol se pone, el cielo del oeste adquiere un tinte amarillo o naranja. Ese disco es la aureola amarilla, llamado arco crepuscular, está centrado en el Sol y también se lo conoce como aureola solar. Al cabo de unos pocos minutos, un arco azul se

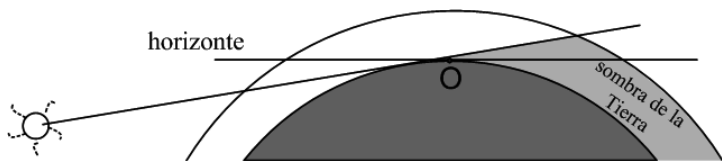
eleva en el horizonte del este. Es la sombra de la Tierra proyectada en la atmósfera, como si fuera una pantalla, delimitada por debajo por el horizonte y por arriba por un arco rojizo, que algunos llaman “anticrepúsculo”. A medida que pasa el tiempo, la sombra va subiendo y el borde entre los arcos se hace menos diferenciado. El cielo va poniéndose más azul y menos luminoso, hasta que llega la noche.

Anticrepúsculo



Vista hacia el este en un atardecer en París. El arco azul encima del horizonte es la sombra de la Tierra proyectada por el Sol que ya está debajo del horizonte del oeste. El arco rojizo encima del arco azul es el anticrepúsculo, creado por los rayos que pasaron por encima del horizonte del oeste. El arco azul va elevándose a medida que oscurece.

El siguiente dibujo ilustra la geometría del anticrepúsculo.



Un observador que esté en el punto O en el atardecer y mire al este, verá la sombra de la Tierra encima del horizonte.

La luz azul del aire

En general, cada rayo de luz que vemos no proviene directamente de la fuente que lo emitió. Muchos llegan a nuestros ojos después de un repetido zigzagüeo por obstáculos, partículas de polvo, moléculas del aire, o cristales de hielo de la atmósfera.

Por ejemplo, el azul del cielo resulta de la manera peculiar en que un rayo se dispersa al chocar con partículas de la atmósfera. Para entender esto tenemos que invocar el hecho de que un rayo de luz blanca que proviene del Sol no es un solo rayo, sino la superposición de rayos de todos los colores. Al chocar con una partícula muy pequeña (o una molécula de aire) de la atmósfera, el rayo se desdobra de modo que los haces más rojizos prácticamente siguen de largo, mientras que los azulados tienden a desviarse en todas direcciones. Cuando miramos el cielo hacia arriba, llega a nuestros ojos la parte azulada de un rayo que chocó con una partícula, quizá con dos, pero no mucho más. Al atardecer, el Sol y el cielo son rojizos porque la mayoría de los rayos de esos colores siguió de largo y llegó a nuestros ojos.

Luz del aire



La luz que nos llega en el aire libre son rayos del Sol reflejados por distintos objetos. Los árboles reflejan el verde. Pero las moléculas de aire también reflejan, sobre todo, la parte azul de la

luz. La luz que nos llega en la dirección de un árbol lejano no sólo son los rayos verdes reflejados por sus hojas sino también la luz reflejada por las partículas del aire. Por eso los objetos más lejanos se van poniendo más claros, primero un poco azulados y luego blancuzcos. El efecto puede apreciarse claramente cuando hay montañas y las más lejanas van poniéndose más claras. Lo interesante de esto es que aun en un día perfectamente despejado la visibilidad no es perfecta, ya que las moléculas de aire dispersan luz. El campo visual en un día perfectamente claro es de unos 300 kilómetros.

Rayos que se quiebran

De la discusión del párrafo anterior se desprende que la luz no siempre se propaga en línea recta. Los rayos de luz pueden “quebrarse” o doblarse. Por ejemplo, si iluminamos un espejo con una linterna, la luz emitida se refleja en el espejo. Este fenómeno, la *reflexión* de un rayo de luz, es un ejemplo en el que el rayo se quiebra en dos partes, cada una de ellas una línea recta. Un segundo fenómeno es la *refracción*, una variante del quiebre del rayo al reflejarse en el espejo y que comentaremos después. Cuando hablamos de la reflexión y la refracción de un rayo de luz nos referimos al quiebre del rayo, a la desviación de su trayectoria respecto de la línea recta. Si entendemos lo esencial de estos dos fenómenos, tendremos una comprensión unificada de varios efectos visuales y de sus aplicaciones prácticas.

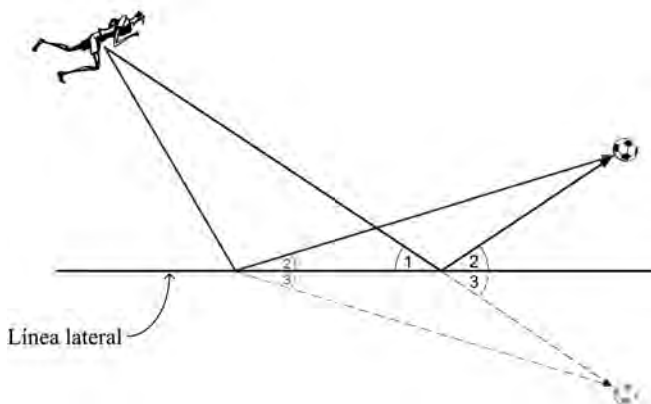
Antes de discutir los ejemplos, preguntémonos entonces: ¿por qué en ciertos casos los rayos se propagan en línea recta y por qué en otros casos se quiebran? Hoy aceptamos la respuesta de Pierre de Fermat (matemático francés del siglo XVII): *los rayos de luz siguen el camino que les toma el menor tiempo*. Por curioso que parezca, en este sencillo principio está encapsulado un gran número de fenómenos ópticos, y vale la pena que

nos detengamos a analizarlo, aunque sea un tiempo corto (“El tiempo”, dice Tennessee Williams en *El zoo de cristal*, “es la distancia más larga entre dos puntos”).

¿Cómo se refleja la luz?

Empecemos por un concepto sencillo: la línea recta. Ustedes están parados en una cancha de fútbol, la pelota está quieta y quieren llegar a patearla lo más rápido posible. ¿Qué camino siguen? La respuesta obvia para todo el mundo es: la línea recta. Con los rayos de luz pasa lo mismo. Un rayo de luz sigue la trayectoria que le toma el menor tiempo, en este caso, la línea recta (si iluminamos un objeto con una linterna en la oscuridad, vemos que los rayos, en efecto, van en línea recta). Ahora compliquemos un poco la situación. Supongamos que tenemos que ir desde un cierto punto de la cancha hacia la pelota, pero en el medio estamos obligados a tocar la línea lateral. ¿Cuál es el camino que nos tomará menor tiempo? La primera parte de la respuesta es: en línea recta hacia la línea lateral y luego en línea recta hacia la pelota. Pero todavía nos queda por saber hacia cuál punto de la línea. La respuesta es sencilla: la trayectoria de mínimo tiempo es tal que el ángulo de llegada a la línea es igual al de salida. ¿Por qué? En la figura que sigue (que el lector impaciente puede saltar) mostramos una versión adaptada de la hermosa demostración que nos regaló Herón de Alejandría, varios años antes de Cristo.

Un jugador tiene que llegar a la pelota en el menor tiempo posible, *tocando la línea lateral*. ¿Qué trayectoria sigue? Para contestar la pregunta dibujemos una pelota “fantasma” del otro lado, a la misma distancia de la línea que la pelota real. Los caminos a la pelota real y a



la pelota fantasma son del mismo largo ya que, en cada caso, los *ángulos* indicados como 2 y 3 son idénticos (en la figura hay sólo dos de los infinitos caminos posibles a la pelota). El camino más corto a la pelota fantasma es la línea recta, de modo que el ángulo 1 es igual al ángulo 3. En conclusión: para llegar a la pelota en el menor tiempo debemos seguir un camino con ángulos iguales de llegada y de salida de la línea lateral. Aplicado a los rayos de luz y en jerga científica, esto se traduce así: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Ésta es la llamada *ley de la reflexión*.

Hace poco tuvimos que encargar un espejo nuevo en casa y la ley de la reflexión de los rayos de luz nos ayudó a economizar gastos. Necesitábamos un espejo para vernos de cuerpo entero, y nos preguntamos cuál era la altura mínima que debía tener el espejo. ¿Es necesario que sea de nuestra misma altura? En la figura mostramos que es suficiente con que el espejo tenga *la mitad* de nuestra altura para vernos de cuerpo entero. Incluso, si nos ponemos muy ahorrativos, teniendo en cuenta la distancia de los ojos al tope de la cabeza, puede ser un poquito menos de la mitad.

Espejito, espejito



La altura mínima de un espejo para vernos de cuerpo entero es un poco menos de *la mitad de nuestra altura*. El rayo de luz que va del pie al ojo se refleja en la parte inferior del espejo, y el rayo que va del tope de la cabeza al ojo se refleja en la parte superior. Invitamos al lector a comprobar con su propio espejo que este efecto es *independiente de la distancia al espejo*.

La reflexión en un espejo aparece en el cuadro *Un bar en el Folies-Bergère* que Edouard Manet pintó en 1882, parte de cuya virtud hipnótica reside en el contraste entre una audiencia que espera el espectáculo y los tristes ojos de cansancio de Suzon, la mujer detrás del bar. Pero su encanto deriva también de una sutil distorsión de la realidad que Manet, violando la ley de la reflexión de los rayos de luz, incorporó a la pintura; una distorsión que confiere a la escena un sentido misterioso persistente aun después de descubrir el “error”. ¿Pueden encontrarlo?

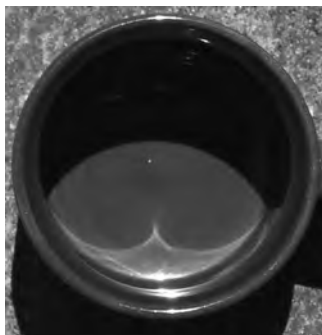
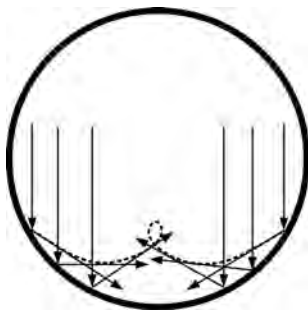
En *Un bar en el Folies-Bergère*, el bar aparece reflejado en el espejo detrás de la mujer, pero la reflexión es incorrecta en tres sentidos. Las reflexiones de botellas de la izquierda del cuadro están pintadas más adelante de su ubicación



real. Mientras que la imagen reflejada de la mujer debería ser apenas visible detrás de ella, Manet la pintó muy a la derecha. Finalmente, el hombre de la derecha está enfrente de la mujer, de modo que debería ser “quien mira la pintura”, ya que la reflexión indica que está frente a la mujer. El observador está mirando la pintura frente a un espejo y mirando su propia reflexión a la derecha.

La cáustica

El hecho de que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión se aplica a la reflexión en una superficie curva: cada rayo se refleja siguiendo la ley de reflexión con la *tangente* a la curva. Esto hace que un haz de rayos paralelos se distorsione en una línea curva, la “cáustica”, que ustedes habrán visto en el fondo de una taza.



Una aplicación de los efectos “cáusticos” del quiebre de los rayos de luz al reflejarse está en el cuento “A Slight Case of Sunstroke”, donde Arthur C. Clarke propone que cincuenta mil fans en un estadio de fútbol, cada uno con un espejo, desvíen los rayos de sol apuntando al referí para quemarlo.

Otra reflexión sobre espejos

La palabra alacena es de origen árabe. Mi conjetura –sin haber consultado un diccionario etimológico árabe– es que se origina en ibn Al Haytham, autor de más de doscientos trabajos sobre óptica, nacido en el año 965 en la ciudad de Basora, la misma de los bombardeos a hospitales y mezquitas, y desde cuyo puerto zarpó Sinbad el marino. Al Haytham, cuyo nombre en latín, Alhacen, quizá justifique la etimología castellana, fue el primer científico en describir la cámara oscura, un cuarto al que la luz fluye por un orificio muy pequeño, proyectando una imagen del exterior. (Hay quienes sostienen que el inusitado realismo de los cuadros de Vermeer y Caravaggio se debe a que son “fotografías pintadas” dentro de una cámara oscura.) Además, clarificó un elemento clave del mecanismo visual que ahora resultará obvio, pero que en la Edad Media era controvertido: los rayos de luz viajan desde el objeto al ojo y no son, como creían Pitágoras y Euclides, tentáculos invisibles que se propagan desde el ojo hacia el objeto. (A pesar de eso, un estudio publicado en el 2002 en la revista *American Psychologist* indicó que más de la mitad de los sujetos encuestados creían en la emisión visual de los rayos de luz.) Alhacen creía que la Luna tenía luz propia, sin embargo, entendió muy bien que todo objeto visible que no es una fuente directa de luz es, de algún modo, un espejo, ya que la luz rebota en él.

Con Alhacen, la ciencia ingresó en la historia de los espejos, tan ligada al romance perpetuo que los seres humanos tenemos con nuestra propia imagen; tan vinculada a los mitos, el arte y la religión: las palabras “reflexionar” y “especular” se originan en espejos. Para Santo Tomás, la especulación (la acción de ver algo usando un espejo, o *speculum*) conduce a la meditación dado que, al ver la similitud reflejada, se observa la causa en su efecto.

Los espejos engañan y desconciertan. Según la superstición griega, era mala suerte y hasta fatal (de ahí el mito de Narciso) mirarse en un espejo. Y hoy sobrevive el equívoco (incluso en textos de física) de que los espejos invierten izquierda por derecha.

Si girásemos esta página sobre un eje vertical y la leyéramos desde atrás (a trasluz, usando una lámpara o la luz del Sol), la palabra

IMAGEN

se leería

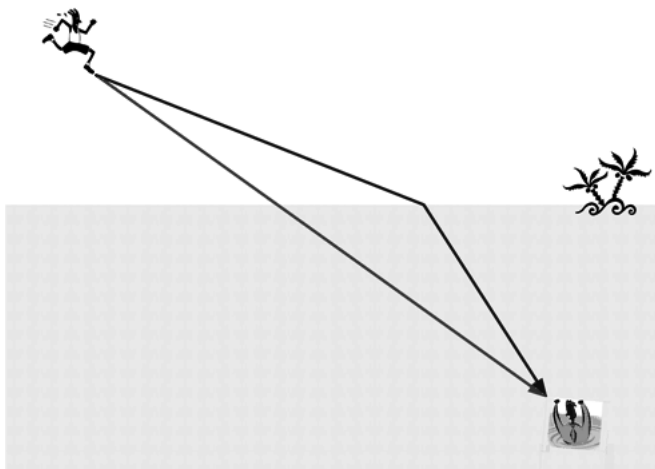
ИMƎAMИ

Si, manteniendo la página en la misma posición, la leyéramos usando un espejo, veríamos lo mismo que a trasluz: ИMƎAMИ, que no es más que IMAGEN visto desde atrás. El espejo, entonces, no invirtió derecha por izquierda sino adelante por detrás. Dicho desde la geometría: nuestra imagen en un espejo es una contraparte visual incongruente de la superficie de nuestra cara, es lo que alguien vería si fuéramos transparentes y pudiera ver nuestra cara por detrás. La inversión de izquierda por derecha de los espejos es un malentendido semántico que Alhacen intentaría remediar recordándonos que las imágenes no son objetos sino representaciones ilusorias, meras imitaciones de la realidad.

Más rayos que se quiebran

En el caso de las reflexiones, la luz –antes y después de reflejarse (en un espejo, por ejemplo)– se propaga en el aire. Un rayo de luz también puede propagarse dentro de algunos materiales, como el vidrio. Ahora bien, el vidrio es más denso que el aire y resulta que, en medios densos como el agua, el vidrio y el aceite, la luz se propaga más despacio que en el aire. La respuesta,

en este caso, sobre cuál es el camino de menor tiempo para ir de un medio a otro, cambia, ya que el camino óptimo *no* es la línea recta, como ilustramos en la figura que sigue:

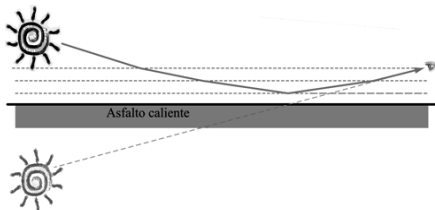


Un guardavidas quiere rescatar a su amigo lo más rápido posible, ¿qué camino debe seguir? Si elige la línea recta nadará un trayecto más largo que si eligiera la línea quebrada. Como todos nos desplazamos más rápido corriendo que nadando, al guardavidas le conviene elegir un camino más largo que la línea recta, de modo de acortar el trayecto en el agua y alargarlo en la playa. El camino *más rápido* es, entonces, la línea quebrada. Del mismo modo, los rayos de luz se quiebran al pasar del aire al agua, o del aire al vidrio. El fenómeno del quiebre del rayo de luz es lo que llamamos *refracción*.

La reflexión y la refracción de los rayos de luz están presentes en un sinnúmero de fenómenos de nuestra experiencia diaria. Uno muy interesante son los espejismos, donde los rayos de luz del sol se curvan al refractarse en el aire cerca de una superficie caliente. Veamos cómo.

ESPEJISMOS

En un día de calor, el aire está más caliente cuanto más cerca está del asfalto. A su vez, cuanto más caliente está el aire menor es su densidad y los rayos de luz se refractan, siguen una trayectoria curva y llegan a nuestros ojos *como* si se hubieran reflejado en el asfalto, creando la ilusión óptica del espejismo. (En la figura representamos la refracción como si ocurriera en tres capas de aire para que el efecto resulte más claro, pero en realidad el rayo se curva en una línea continua.)



En esta foto, el cielo y el camión parecieran reflejados en el pavimento, cuando en realidad la ilusión óptica resulta de la refracción de los rayos de luz debido a las diferencias de densidad del aire caliente. El mismo fenómeno puede verse cerca de paredes calientes.

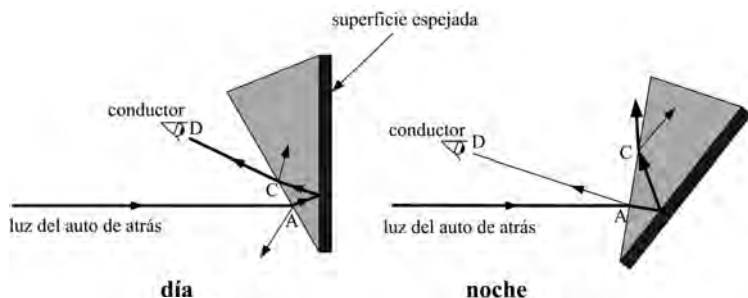


REFLEXIÓN MÁS REFRACCIÓN

Vimos que, cuando un rayo de luz atraviesa un vidrio, se refracta. Ahora bien, los rayos de luz tienen una peculiar propiedad adicional: al incidir sobre una superficie, *una fracción de los rayos se refleja y otra se refracta*. Lo podemos comprobar de noche, en una habitación con una luz encendida. Si vemos la habitación desde afuera, a través del vidrio de la ventana, la percibimos iluminada. Eso quiere decir que muchos de los rayos de

luz atravesaron la ventana desde adentro hacia afuera. Si vemos el vidrio de la ventana desde adentro vemos el reflejo poco intenso de la luz del interior: una pequeña fracción de los rayos se refleja y el vidrio es un espejo que nos devuelve una imagen tenue. Una sencilla aplicación de este fenómeno es el espejo retrovisor del auto, que funciona en dos posiciones, una de día y otra de noche.

El espejo retrovisor



Las caras del vidrio del espejo retrovisor no son paralelas (la figura lo exagera para clarificar el efecto). Durante el día recibimos la luz que se refracta en A, luego se refleja en la superficie metálica del espejo y se refracta de nuevo en C para llegar a nuestros ojos (D). Durante la noche queremos minimizar la intensidad de la luz del auto de atrás y ajustamos el espejo para recibir la luz reflejada directamente en el vidrio del espejo que, como explicamos arriba, es menos intensa que la refractada.

REFRACCIÓN DE LA LUZ: UN EXPERIMENTO CASERO

El siguiente experimento ilustra el quiebre de los rayos de luz al pasar del agua al aire.

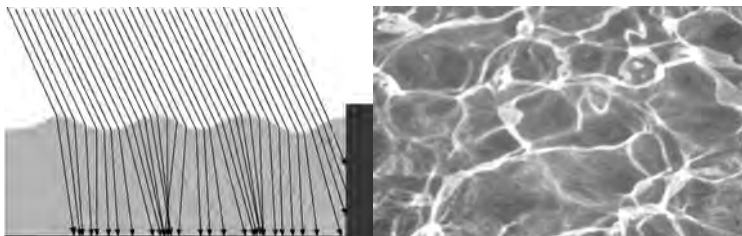


1. Pegar con cinta adhesiva una moneda en el fondo de una taza vacía.

2. Desplazar la cabeza hasta el ángulo preciso en que la moneda desaparece de la vista.

3. Sin mover la cabeza, agregar agua. ¿Qué se ve?

Un efecto muy familiar es el motivo móvil de líneas iluminadas que habrán visto en el fondo de las piletas. Su origen es sencillamente el quiebre de los rayos de luz, que inciden paralelos cuando vienen del Sol, y se desvían por la superficie irregular del agua concentrándose y separándose en distintas zonas del fondo.



En este capítulo hicimos una breve excursión por los fenómenos visibles y los rayos de luz. En los capítulos que siguen mostraré otros ejemplos de la física cotidiana, que elegí influido por una frase del Talmud:

“Para entender lo invisible,
observen con cuidado lo visible”.

Lo que se frena, lo que gira y lo que se acelera

Relatividad sin Einstein

Los invito a considerar una pregunta inocente. ¿Por qué, en el avión, las azafatas esperan que pase la turbulencia para servir la comida? Me dirán que la respuesta es obvia, sobre todo si alguna vez se volcaron el café en medio del vuelo (yo me lo vuelco igual en la quietud de mi escritorio, pero ésa es otra historia). Sin embargo, algo que puede resultarles evidente encierra una verdad profunda de la física. Pasada la turbulencia, comer en el avión que se mueve a velocidad constante es equivalente a comer en la quietud del comedor de su casa. Para el pasajero del avión en pleno vuelo (en ausencia absoluta de tambaleos) es perfectamente lícito decir que es él el que está quieto y que los que están en el café del aeropuerto son los que están en movimiento. Más aún, si ustedes se quedaran dormidos y se despertaran en medio de un vuelo perfectamente apacible y silencioso, les sería imposible determinar, sin mirar por la ventana, si están en movimiento o quietos en el aeropuerto. Esa idea, la imposibilidad de determinar mediante experimentos mecánicos (como por ejemplo saltar o tirar una lapicera hacia arriba y verla caer) el estado de movimiento uniforme es lo que conocemos hoy como el postulado de relatividad

de Galileo. En otras palabras, el movimiento a velocidad constante no es absoluto sino relativo: no tiene sentido decir que el avión se está moviendo o que el aeropuerto se está moviendo. Lo que sí tiene sentido es decir que el avión y el aeropuerto se mueven uno respecto del otro. Esta magnífica idea es la primera gran unificación de la física: la unión del reposo con el movimiento. La quietud y el movimiento uniforme son la misma cosa observada desde diferentes puntos de vista, desde distintos “sistemas de referencia”. Luego vendrían otras unificaciones, como la electricidad y el magnetismo. Y con Einstein la idea de la relatividad de Galileo llega a una culminación, ya que él la extiende a *todos* los experimentos de la física, no sólo los mecánicos, sino aquellos que involucran electricidad, magnetismo y luz.

Para darles una idea de lo revolucionario de este concepto, les comento cómo se pensaba antes de Galileo; esto es, el punto de vista aristotélico de la cuestión. Para Aristóteles (y al seguir su razonamiento se darán cuenta de que la intuición nos convierte a todos en aristotélicos encubiertos) el “estado natural” de las cosas es el reposo. Al fin y al cabo, si pateamos la pelota en el parque, a la larga se detiene y las bolas de billar estarán quietas un instante después de que las golpee el taco.

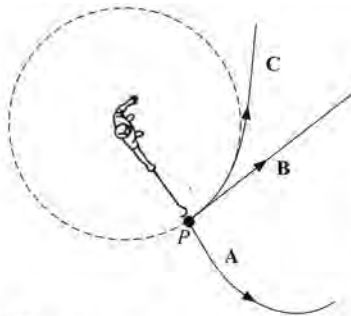
La idea aristotélica es que las fuerzas *mantienen* el estado de movimiento; hay que seguir pateando la pelota para que no se frene, y a una bola hay que seguir pegándole con el taco para que no se detenga. Todo esto suena muy lógico. En cambio, acabamos de decir que el reposo y el movimiento uniforme son lo mismo (en el sentido de que el movimiento se refiere siempre a la relación de dos objetos). Esto significaría que, si en algún experimento la fuerza mantuviera el estado de movimiento uniforme de un objeto, la misma situación vista desde otro sistema de referencia indicaría que la fuerza mantie-

ne el estado de reposo, y esto no es satisfactorio. Llegamos así al gran cambio de pensamiento, formulado por primera vez por Isaac Newton: como el movimiento uniforme es relativo y no absoluto, las fuerzas ocasionan *cambios* en el estado de movimiento uniforme (o en el estado de reposo, que, como vimos, es lo mismo).

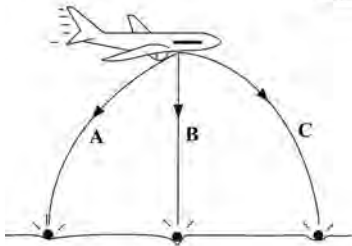
¿Cómo reconciliamos entonces la relatividad galileana y las ideas de Newton con la experiencia diaria? La respuesta invoca lo que, en un sentido abarcador, se llaman “fuerzas de fricción”. Al abandonar el contacto con el pie, la pelota sale con una cierta velocidad respecto del piso. En su viaje por el suelo del parque choca con innumerables moléculas de aire, con el pasto y con otras cosas que encuentra en su camino, cada una de las cuales ejerce una pequeña fuerza que le *cambia* su estado de movimiento uniforme y la frena hasta que su velocidad es igual a la del piso, y llega a lo que (arbitrariamente) llamamos “reposo”. El conjunto innumerable de choques de la pelota con las moléculas de aire y con la tierra y el pasto del suelo es lo que, sintéticamente, llamamos fricción, que la frena. Esa fuerza de fricción, que está presente siempre en nuestra experiencia cotidiana, es en parte responsable de que tendamos a pensar en un sentido aristotélico y no newtoniano. Pero hay todavía más.

Nuestra percepción intuitiva del movimiento es a veces errónea, a la manera de los equívocos de las ilusiones ópticas. En el siguiente minitest les muestro algunos ejemplos donde la percepción intuitiva del movimiento suele estar equivocada.

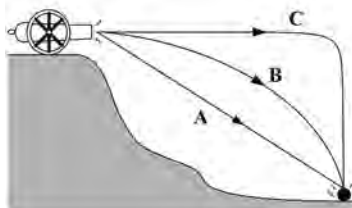
Minitest de aptitud newtoniana



1. Una esfera de acero está atada a una soga y se la hace rotar en un círculo horizontal (en líneas de trazo). En el punto P la soga se rompe. Visto desde arriba, ¿cuál de las tres opciones se aproxima más al camino seguido por la esfera después de que la soga se rompe?



2. Una bola de bowling cae accidentalmente de un avión que vuela en dirección horizontal. Visto por una persona que está quieta en la Tierra, ¿cuál de las tres opciones se aproxima más al camino seguido por la bola después de abandonar el avión?



3. Un cañón dispara una bala en el tope de un precipicio. ¿Cuál de las tres opciones se aproxima más al camino seguido por la bala?

Respuestas: 1-B, 2-C, 3-B

En el primer caso, en el momento justo en que se rompe la soga, la velocidad de la esfera es tangente al círculo. Al romperse la soga, la partícula queda libre de fuerzas horizontales, y pro-

sigue en línea recta, la trayectoria que, según Newton, siguen los cuerpos en ausencia de fuerzas. Si ustedes eligieron C no se sientan mal. Leonardo da Vinci también estaba confundido con el movimiento circular. “Todo lo que se mueve con furia en el aire continúa el movimiento de aquel que lo mueve –escribió en algún descanso en los tres años que le llevó pintar la Mona Lisa–, por consiguiente, si este último se mueve en un círculo y se lo suelta durante el movimiento, seguirá una trayectoria curva.” La equivocación de Leonardo es parte de lo que en la Edad Media se conocía como “la teoría del ímpetu” (una “mejora” a las ideas de Aristóteles) según la cual, cuando un objeto está en movimiento, adquiere una fuerza interna llamada ímpetu que lo mantiene en ese movimiento. Esta teoría es contraria a los principios fundamentales de Newton, según quien *no se necesita ninguna fuerza para mantener a un objeto en una línea recta a velocidad constante*.

En el segundo caso, si contestaron B cayeron presa de una suerte de “ilusión mecánica”. La respuesta correcta es C porque, al caer del avión, el movimiento de la pelota es la combinación de dos movimientos: uno en línea recta a velocidad constante en dirección horizontal (la velocidad del avión), y otro en línea recta en caída libre hacia abajo. Lo que pasa es que, en general, cuando observamos objetos que tiramos, por ejemplo desde un auto en movimiento, permanecemos en el sistema de referencia del auto y vemos (en situaciones en que la fricción del aire es mínima) caer al objeto verticalmente en línea recta. Creamos entonces la ilusión de que el objeto cae verticalmente respecto del piso.

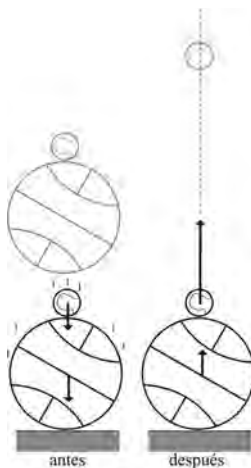
En el tercer caso, si contestaron C razonaron a la manera de Alberto de Sajonia, un filósofo del siglo XIV. Según don Alberto, al salir del cañón, el ímpetu de la bala domina sobre la gravedad y, por lo tanto, sigue en una línea recta horizontal hasta que el ímpetu se empieza a gastar y la trayectoria se curva un poco.

Cuando el ímpetu se agota, la bala cae verticalmente. Esta trayectoria viola los principios de Newton aunque es –a pesar de aludir a las infaustas caídas del coyote en sus ardidés contra el correcaminos– de algún modo “intuitiva”.

En este capítulo quiero contarles algunas historias de fuerzas y cambios de movimiento. Pero antes, les muestro un truco de inspiración galileana cuya explicación ilustra la utilidad de describir lo mismo desde distintos sistemas de referencia.

El truco de las dos pelotas

Pongan una pelota de tenis justo encima de una pelota de básquet y déjenlas caer al mismo tiempo. Verán que, al rebotar, la pelota de tenis sale despedida y, si las ubicaron bien alineadas al principio, llega a una altura mucho mayor que la inicial. ¿Por qué?



Con un poco de paciencia, analicemos primero una simplificación de este problema: una pelota de tenis se mueve hori-

zontalmente a (digamos) 10 metros por segundo de izquierda a derecha y choca con una pared muy pesada (o el parabrisas de un camión) que se mueve a 5 metros por segundo de derecha a izquierda (o lo que es equivalente y quizás enrevesado pero útil, a -5 metros por segundo). ¿A qué velocidad rebota la pelota? Para la respuesta conviene cambiar de sistema de referencia, ver el choque en ese sistema, y luego volver al sistema de referencia inicial.

El truco de ida y vuelta al sistema inicial puede sonar complicado, pero es muy útil. A veces las cosas se ven mejor desde otro ángulo. A modo de analogía, supongan que están en el colegio en París, y que saben contar en francés pero no tienen un muy buen dominio del idioma. La maestra les dicta una operación aritmética complicada, con muchas cifras, multiplicaciones, divisiones y esas cosas. Ustedes anotan los datos que escuchan en francés, hacen el cálculo en castellano, y luego traducen el resultado y se lo dicen a la maestra en francés. Para ustedes, el castellano es un “sistema de referencia” donde las cosas se ven más claras. Del mismo modo, la situación es más transparente si vemos el choque desde un sistema de referencia apropiado. Veamos entonces el choque desde un auto que se mueve a la misma velocidad que la pared. Noten que estamos cambiando el sistema de referencia. Como estamos moviéndonos a -5 metros por segundo, desde este nuevo sistema de referencia veremos que todas las velocidades aumentan en 5. Si algo estaba originariamente en reposo, un árbol en la ruta por ejemplo, ahora lo vemos moverse a 5 metros por segundo. Y lo importante es que a la pared la vemos en reposo ($-5 + 5 = 0$) y a la pelota de tenis la vemos a 15 metros por segundo, de izquierda a derecha, claro. La simplificación de la situación está en que ahora tenemos el choque de una pelota con una pared en reposo, y eso es más fácil de visualizar: la pelota rebota e invierte su velocidad y se mue-

ve a -15 metros por segundo. Ahora viene lo sutil: volver al sistema inicial. Para eso debemos salir del auto y pararnos en la ruta, donde estábamos inicialmente. Esto equivale a invertir el proceso de sumar 5: sustraemos 5 a todas las velocidades. Resultado: la pelota rebota a -20 metros por segundo.

Volvamos al problema original, y consideremos que la pelota de básquet es como una pared para la de tenis. Esto es, por cierto, una aproximación, pero nos dará una idea de lo que está pasando. Cuando la de básquet toca el piso las dos pelotas cayeron desde la misma altura y en ese momento –como veremos en detalle más adelante en este capítulo– tienen la misma velocidad. Llamémosle V para sentirnos matemáticos. Primero la de básquet rebota en el piso e invierte su velocidad (siempre hay una mínima separación entre ambas). Pensemos a la pelota de básquet como una pared. Desde el sistema de referencia de esa pared, la de tenis se le aproxima a $2V$ y, al chocar, invierte su velocidad para moverse a $2V$ hacia arriba, *respecto* de la pared. Entonces, desde el sistema de referencia del piso, la pelota se mueve a $3V$. Como analizaremos en un momento, esto significa que la altura es nueve veces mayor. Si bien este análisis tiene, como dije, aproximaciones, el experimento es bastante dramático y la pelota de tenis sale despedida a una altura inesperada.

Fuerzas como flechas

Dijimos que las fuerzas causan cambios de velocidad y que el primero en enunciar esto fue Isaac Newton. Como los cambios de velocidad son algo sutil, permítanme pasearlos por unos ejemplos casi abstractos para entender estas sutilezas.

Si una fuerza actúa sobre algo, le cambia la velocidad a ese algo. Por ejemplo, supongamos que una pelota de tenis se mue-

ve de izquierda a derecha a una velocidad de 4 metros por segundo. Fíjense que les di dos datos: 1) la pelota se mueve de izquierda a derecha, y 2) se mueve a 4 metros por segundo. Representemos esa información con una flecha que apunta de izquierda a derecha y que tiene unos 4 centímetros de largo.



La flecha representa la *velocidad* de la pelota de tenis. En este ejemplo la pelota se mueve sobre una superficie horizontal perfectamente lisa y nos olvidaremos del movimiento vertical. Ahora supongamos que en un cierto momento le pegamos un raquetazo, y que ahora la pelota se sigue moviendo de izquierda a derecha, pero a una velocidad de 5 metros por segundo. A la nueva velocidad la podemos representar por una flecha de 5 centímetros de largo.



La velocidad cambió y la pregunta sutil es: ¿cómo representaríamos el *cambio* de velocidad? Respuesta: por una flecha de 1 centímetro de largo dirigida de izquierda a derecha. Dicho de otro modo, a la flecha de largo 5 la podemos pensar como dos flechas, una de 4 y otra de 1, puestas una a continuación de la otra. Como el cambio de velocidad es de izquierda a derecha, concluimos, siguiendo el dictamen del gran Isaac, que sobre la pelota actuó una *fuerza* de izquierda a derecha.

Compliquemos un poco la cosa. Habrán visto que en los partidos de tenis las pelotas cambian de dirección cuando les pega la raqueta. Supongamos entonces que a la misma pelota de antes le pegamos otro tipo de raquetazo después del cual se mueve a 5 metros por segundo pero *en otra dirección*, no de izquierda a dere-

cha. ¿Cómo representaríamos el cambio de velocidad en este caso? Del mismo modo que antes, pensando a la velocidad después del raquetazo como dos flechas puestas una a continuación de la otra:



De este modo el *cambio* de velocidad está representado por la flecha punteada. En este ejemplo, el raquetazo ejerció una fuerza en la dirección de la flecha punteada. Dado que le cambió a la velocidad de la pelota tanto la dirección como su magnitud, la fuerza aplicada es mayor que en el caso anterior.

Las velocidades y las fuerzas son magnitudes que deben representarse por flechas ya que, para especificarlas, hay que indicar la magnitud y la dirección. Y lo que Newton enfatiza en su *segunda ley* de la mecánica es que la fuerza y el *cambio* de la velocidad están en la misma dirección. Más adelante les daré más ejemplos de esto.

La venganza de las fuerzas

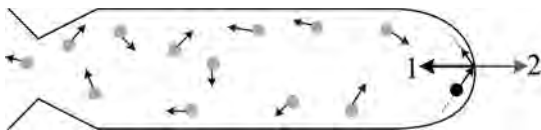
Les sugiero el siguiente experimento: apoyen una esfera de telgopor sobre una mesa y, con una madera, aplástenla bruscamente.



La madera ejercerá una fuerza sobre la esfera y la achatará. Ahora bien, lo interesante es que la esfera también se achatará por abajo, en la parte que está en contacto con la mesa.

El ejemplo ilustra lo que, con cierto arcaísmo, se llama la ley de acción y reacción. La esfera se achata por debajo porque la mesa ejerce sobre la esfera, de abajo hacia arriba, una fuerza idéntica a la que la madera ejerce de arriba hacia abajo. Según Newton, las fuerzas siempre vienen en pares opuestos; si un objeto ejerce una fuerza sobre otro, el segundo objeto le devuelve el favor ejerciéndole una fuerza de igual magnitud, una especie de Ley del Talión de la mecánica. Habrán escuchado la versión que dice “por cada acción existe una reacción idéntica”, o variantes análogas que extrapolan esta sencilla ley del movimiento a la política o a la economía, donde no tienen ninguna aplicación; por eso es que dije que esta forma del enunciado es arcaica.

La propulsión de los cohetes es una aplicación interesante de esta ley (la “tercera ley de Newton”) y contiene una historia divertida de malentendidos por parte de los editores del diario *The New York Times*. Imaginen al cohete como un globo de cumpleaños (con la forma del cohete) lleno de aire, pero con el orificio abierto, sin anudar. Las moléculas de aire chocan con el interior del globo, y algunas salen por el orificio.



Fijen la atención en la molécula que choca contra el extremo derecho del cohete. La molécula, al chocar, cambia su dirección. Eso es posible si una fuerza actúa sobre ella. ¿Quién ejerce esa fuerza? La pared interna del cohete, la fuerza marcada como “1” en

la figura. Pero si la pared ejerce una fuerza sobre la molécula, la molécula ejerció una fuerza igual y opuesta sobre la pared (la fuerza “2”) que empuja al cohete. Esa fuerza, la que las moléculas ejercen sobre la pared derecha, es la que acelera al cohete de izquierda a derecha. Ustedes dirán que también hay fuerzas sobre las otras paredes del cohete, y eso es cierto. Lo que sucede es que la fuerza que la miriada de moléculas ejerce sobre la parte superior del cohete se compensa con la que ejerce sobre la parte inferior. En cambio, la fuerza sobre la parte derecha no se compensa ya que, en la parte izquierda, las moléculas se escapan del cohete. Este principio de propulsión es el mismo de las cañitas voladoras y de los fuegos artificiales. En 1649, el escritor satírico Cyrano de Bergerac escribió su *Voyage dans la Lune*, donde describe un viaje en góndola, en el que unos soldados encienden fuegos de artificio que actúan como cohetes y los lanzan a la Luna. Hasta donde yo sé, es el primer viaje ficticio a la Luna que explota la tercera ley de Newton (¡casi cuarenta años antes de que Newton la formule!).

Mucho tiempo después, en 1919, Robert H. Goddard publicó “Un método para alcanzar altitudes extremas”, un artículo en el que proponía usar cohetes para llegar a la Luna. El 13 de enero de 1920, un famoso editorial del *New York Times* ridiculizó su propuesta equiparando a Goddard con Julio Verne, en cuya novela *De la Tierra a la Luna* los protagonistas son eyectados al espacio por un cañón gigantesco. El 17 de julio de 1969, cuando los tripulantes del Apolo estaban camino a la Luna, el *New York Times* publicó un “descargo” que decía:

Una corrección. En 1920 la página editorial desacreditó la propuesta del profesor Goddard, sosteniendo que “no conoce la relación entre acción y reacción, y la necesidad de tener algo más que el vacío contra lo cual reaccionar. Al parecer [él] carece de los conocimientos que se imparten diariamente en el colegio secundario”.

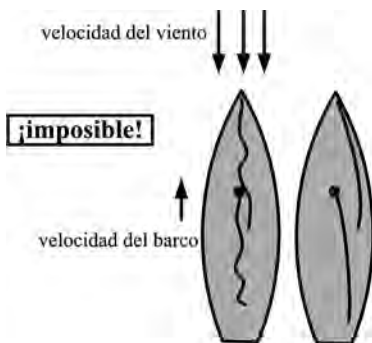
Subsecuentes investigaciones y experimentos confirmaron los hallazgos de Isaac Newton en el siglo XVII y ahora está completamente establecido que un cohete puede funcionar tanto en el vacío como en la atmósfera. El *Times* lamenta el error.

Navegando en contra del viento

El ejemplo de esta sección combina las sutilezas de las fuerzas como flechas, la tercera ley de Newton y la importancia de considerar las *direcciones* de las fuerzas y los cambios en las velocidades.

¿Es posible navegar en contra del viento? Los navegantes saben que sí. Veamos cómo.

Primero, supongamos que el barco está orientado en la misma dirección del viento. Les resultará obvio que en este caso es imposible que el barco se mueva en dirección contraria al viento.



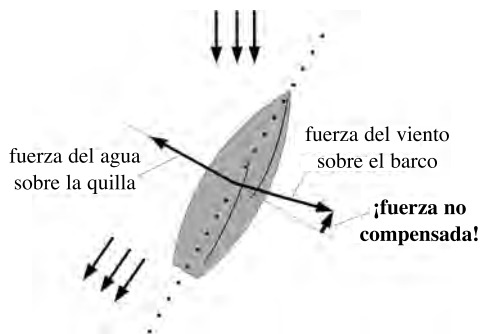
Miremos esta imposibilidad a través de la lupa de lo que vimos hasta ahora. En primer lugar, el viento choca contra el barco. El aire, al chocar, se frenará o invertirá su dirección, tal como pasó con la pelota de tenis chocando con la pared y con las mo-

lécúlas de aire dentro del cohete. Eso quiere decir que hay una fuerza sobre el viento (ya que cambió su velocidad). ¿Quién ejerce esa fuerza? El barco. Y en este punto invocamos de nuevo la tercera ley de Newton (siempre que un objeto ejerza una fuerza sobre otro objeto, el segundo objeto ejercerá una fuerza igual y opuesta sobre el primero). Como el barco ejerce una fuerza sobre el viento, el viento ejerce una fuerza opuesta sobre el barco que lo mueve en la misma dirección.

Ahora bien, si el barco y sus velas están inclinados, es posible navegar en contra del viento. A la razón física ustedes la experimentaron al sacar la mano (prohibido reproducir este experimento) por la ventanilla de un auto en movimiento. Si ubicaron la mano perpendicular al suelo, sintieron un empuje hacia atrás. Pero al inclinar la mano sintieron un empuje combinado, hacia atrás y hacia arriba. Esto se debe al cambio de dirección que la mano impone sobre el viento.



Lo mismo pasa si el barco está inclinado respecto de la dirección del viento. Y aquí debemos subrayar que la quilla del barco juega un papel central en este ejemplo, ya que impide su desplazamiento lateral. Si bien el barco puede desplazarse un poco perpendicularmente a la quilla, supongamos que la quilla actúa como un "riel" que impone al barco un movimiento sobre una línea inclinada respecto de la dirección del viento (la línea punteada de la figura).



Las velas desvían el viento que, a su vez, ejerce una fuerza sobre el barco, de modo análogo a la mano del ejemplo anterior. Si no fuera por la quilla, el barco se movería en la dirección del cambio de velocidad del viento, es decir, en la dirección de la fuerza del viento sobre el barco. Pero la quilla no lo deja: ejerce una fuerza sobre el agua y el agua le devuelve una reacción idéntica, de manera que el barco sólo puede moverse sobre la línea de puntos. Dos fuerzas combinadas, la del viento y la del agua sobre la quilla, actúan sobre el barco y resultan una fuerza no compensada en dirección de la línea de puntos. El barco está navegando en contra del viento. Y cómo olvidarnos de que “ir al viento” es la raíz de la palabra “aventura”.

¿Por qué no se cae la Luna?

Resumiendo lo conversado sobre sir Isaac Newton, sus tres leyes fundamentales de la mecánica son:

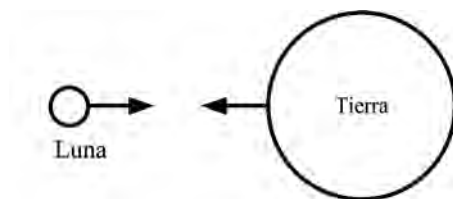
- Un cuerpo sobre el que no actúa ninguna fuerza se mantendrá en reposo o se moverá a velocidad constante y en línea recta.

- Las fuerzas causan aceleraciones, *cambios* en el estado de movimiento. La aceleración es proporcional a la fuerza.
- Cuando un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo ejerce sobre el primero una fuerza igual y opuesta.

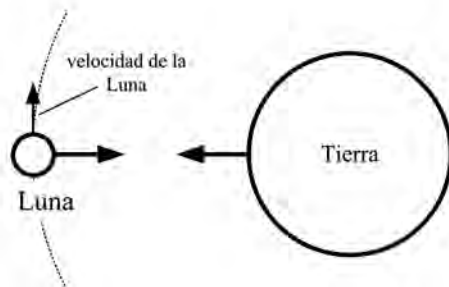
Lo fantástico de la revolución newtoniana es que estas tres simples leyes permiten dar coherencia a un sinnúmero de fenómenos del mundo cotidiano; la riqueza y la complejidad que nos rodea no son más que la intrincada orquestación de tres principios sencillos.

Y Newton va todavía más lejos para mostrarnos que estas tres leyes se aplican no sólo al caos de nuestra experiencia directa, sino al movimiento de los astros en la divina perfección de los cielos. Esta idea resuena en los versos de Walt Whitman: “Creo que una hoja de hierba no es menos que el camino recorrido por las estrellas”.² Para Newton, la misma fuerza invisible que nos mantiene unidos al suelo, que hace que los ríos fluyan y que nos precipitemos por la montaña rusa, es la que mantiene a los planetas girando alrededor del Sol y a la Luna alrededor de la Tierra. La gravitación es un fenómeno universal. Para Aristóteles, en cambio, las leyes del movimiento celeste eran distintas de las de la Tierra. Los planetas y las estrellas tenían almas, o intelectos sobrenaturales que los guiaban en su viaje por el cosmos. Para Newton, la Luna y la Tierra se atraen con una fuerza cuya naturaleza no difiere de aquella que la Tierra ejerce sobre las patas colgantes de jamón crudo.

² “*I believe a leaf of grass is no less than the journey-work of the stars*”. La traducción al castellano es de Borges; agradezco el dato a Cristina Piña.



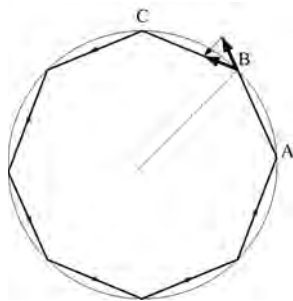
Pero si la Tierra ejerce una fuerza de atracción sobre la Luna, ¿por qué la Luna no cae hacia la Tierra, y en cambio describe un círculo? La respuesta es sencilla. Entender el movimiento circular puede ser evidente, pero también es fácil entenderlo mal. La razón por la que la Luna no cae es porque tiene una velocidad en la dirección *perpendicular* a la dirección de la fuerza que, a su vez, está sobre la línea que une los centros de la Luna y la Tierra. La fuerza de gravedad causa *cambios* en la velocidad de la Luna; la velocidad de la Luna está constantemente cambiando de dirección (aunque no de magnitud) de modo que el cambio está siempre en la dirección de la línea que une la Tierra con la Luna. Ésas son las peculiaridades del movimiento circular que quisiera comentarles en más detalle.



Yendo en círculos

En el llamado movimiento circular uniforme, una partícula, la Luna por ejemplo, describe un círculo y se mueve a una velocidad cuya magnitud es constante. Pero la *dirección* de la velocidad cambia constantemente. En tiempos de Newton no existía la maquinaria matemática para estudiar estas variaciones continuas de velocidad. Lo que hizo Newton para atacar este problema es un truco matemático muy divertido: dividir el círculo en segmentos rectos, de manera que en cada trayecto la partícula se mueve en línea recta.

Siguiendo la línea de razonamiento de Newton, supongamos que tenemos ocho tenistas (el número es arbitrario, como se verá más adelante) equiespaciados sobre un círculo, y que una pelota de tenis viaja entre tenista y tenista en línea recta a velocidad constante. En este caso, el efecto del raquetazo de cada tenista cambia sólo la dirección del movimiento de la pelota y no la magnitud de su velocidad. ¿En qué dirección apunta la fuerza que hace cada tenista?



Tomemos, por ejemplo, el caso del tenista en el punto B de la figura. Inmediatamente antes del raquetazo la velocidad de la pelota está en la dirección AB, y después del raquetazo está en la

dirección BC. El cambio de velocidad está en la dirección de la línea punteada y apunta hacia el centro del círculo.³ Éste es un caso interesante en el que la fuerza sólo cambia la dirección de la velocidad sin cambiarle su magnitud. La fuerza que hace cada tenista apunta hacia el centro del círculo. Si imaginamos que aumentamos el número de tenistas, el polígono correspondiente se va aproximando a un círculo. Concluimos que para mantener algo en movimiento circular rotando a velocidad constante es necesario aplicar una fuerza de magnitud constante que apunta siempre hacia el centro del círculo. El círculo es una forma tan perfecta y el movimiento circular es tan conocido que esta fuerza se ganó un nombre especial, fuerza centrípeta, aunque en realidad es sólo una fuerza más. La fuerza centrípeta en el movimiento de la Luna hacia la Tierra es la atracción gravitatoria.

Charly García, Galileo y la parábola del chorro de agua

Viernes 3 de marzo de 2000. Charly García⁴ tira un walkman desde el balcón de su suite en el noveno piso del hotel Aconcagua, en Mendoza. El aparato describe la proverbial trayectoria parabólica y pega en el borde de la pileta de natación, veinte metros más abajo, a la altura del segundo piso del edificio. “No te tires, Charly”, alcanza a decirle un empleado del hotel. Pero Charly sabe que, saltando a una velocidad un poco mayor que la del walkman, caerá en la pileta. Unos funcionarios que estaban en

³ A no confundirse: la línea punteada está dibujada a cierta distancia del punto B, pero el cambio de velocidad ocurre en B, donde actuó la fuerza.

⁴ Famoso artista argentino, estrella de rock.

una reunión de gobierno en el cuarto piso vieron pasar un cuerpo que caía. Instantes después, Charly concedía un reportaje provocador desde la pileta del hotel.

El primer elemento físicamente ilustrativo en la aventura clavada de Charly es su hipótesis implícita de que la trayectoria del walkman y la suya serían las mismas. ¿Por qué?

La respuesta es la personificación de un fenómeno que en la teoría de Newton aparece como una coincidencia y que dejó de ser una mera casualidad en las teorías del gran Albert Einstein. En síntesis: todos los cuerpos caen con una aceleración independiente de su peso.

Veamos esto con un poquito más de detalle. Según la segunda ley de Newton, las fuerzas causan aceleraciones. Ahora bien, si empujamos con la misma fuerza a un elefante y a una ardilla, es claro que la aceleración del elefante será menor. El elefante es más “masivo” que la ardilla y se resiste más a ser acelerado. Esa resistencia a ser acelerado es la “masa inercial” del elefante; a igualdad de fuerzas aplicadas sobre un cuerpo, cuanto mayor sea la masa inercial, *menor* será la aceleración. Por otra parte, la fuerza gravitatoria, la atracción que la Tierra ejerce sobre objetos como la ardilla y el elefante, es mayor cuanto más masivo sea el objeto. Pero cuando aquí decimos “masivo” no nos estamos refiriendo a la masa inercial. Esa cualidad, que determina la fuerza de atracción a la Tierra, es la llamada “masa gravitatoria”. Cuanto mayor sea la masa gravitatoria de un objeto, mayor será su atracción hacia la Tierra, o hacia cualquier otro objeto masivo. En la teoría de Newton, esas dos masas, la gravitatoria y la inercial, son dos propiedades independientes de cada cuerpo y no tienen por qué ser iguales. Pero resulta que lo son.

Todos los experimentos (el mismo Newton hizo algunos con distintos materiales) indican que la masa inercial y la masa gravitatoria son iguales.

En su cuento “La verdad sobre Pyecraft”, H. G. Wells describe una situación burlesca que ilustra la diferencia entre las dos masas. El miembro de un club, excedido de peso, le pide al narrador una mágica droga hindú que lo ayudaría a adelgazar. Pyecraft pierde peso, pero sin enflaquecer, al punto de flotar hasta el techo y tener que usar un corsé de plomo para mantenerse a nivel del piso. ¡Pyecraft había perdido su masa gravitatoria pero no su masa inercial!

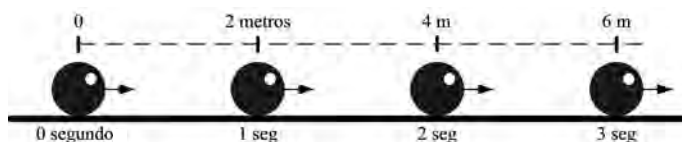
Claro que el cuento de Wells es ficticio, por lo que acabamos de decir de la igualdad entre la masa inercial y la gravitatoria. En la teoría de Newton, esta igualdad aparece como una casualidad. Pero en la teoría de la gravitación de Einstein la distinción entre masa inercial y gravitatoria desaparece. Para Einstein hay un solo tipo de masa, que distorsiona el espacio (el espacio-tiempo para ser precisos), y los cuerpos caen en caída libre en ese espacio distorsionado. En la teoría de Einstein no hay fuerzas, de modo que, en realidad, no es necesario invocar la masa inercial. Un dicho famoso en relatividad es “la materia le dice al espacio cómo curvarse y el espacio le dice a la materia cómo moverse”.

Volviendo a Newton, si las dos masas son iguales, todos los cuerpos caerán con la misma aceleración. La razón es la siguiente. Por un lado, la fuerza gravitatoria es mayor cuanto mayor es la masa. Por otro lado, para esa misma fuerza, la aceleración es menor (en la misma proporción) cuanto mayor es la masa. El resultado es que los efectos se cancelan y *la aceleración gravitatoria es independiente de la masa*.

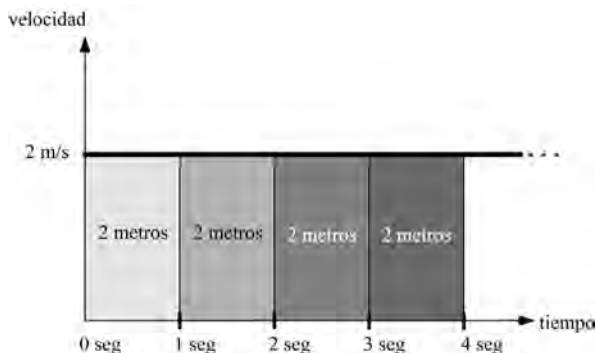
Por eso la trayectoria de un walkman le daba a Charly la información para corregir su trayectoria parabólica. El hecho de que las trayectorias sean las mismas para los dos cuerpos, independientemente de su masa, es un indicio de la naturaleza geométrica de la gravitación, algo que Einstein elaboró con asombrosa maestría.

Miremos la trayectoria parabólica en detalle. Veremos que la caída parabólica es una combinación del movimiento horizontal en línea recta, y de un movimiento acelerado en la dirección vertical.

Consideremos entonces, a modo de preámbulo, una pelota que se mueve en la dirección horizontal. Si la velocidad es constante en el tiempo, la pelota recorre iguales distancias en iguales intervalos de tiempo.

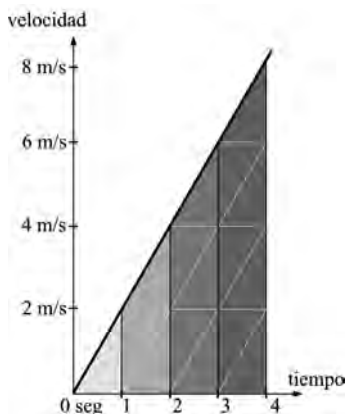


La distancia recorrida es el *producto* de la velocidad por el tiempo. Permitámonos un esfuerzo de abstracción geométrica y pensemos entonces a la distancia como el área de un rectángulo, uno de cuyos lados es la velocidad y el otro el tiempo.



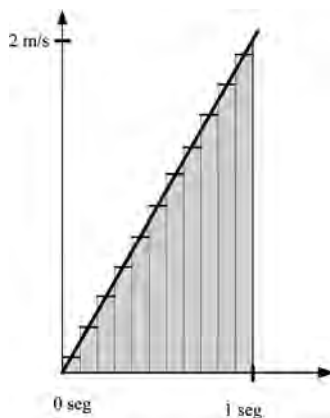
Ahora bien, si la velocidad no es constante, la cosa cambia un poco, pero podemos seguir usando esta utilísima represen-

tación geométrica. Por ejemplo, estamos en un auto quieto y el semáforo está rojo. En el momento en que se pone verde apretamos el acelerador, y la velocidad del auto empieza a aumentar. Digamos que en el primer segundo aumenta de 0 a 2 metros por segundo, en el segundo de 2 a 4 metros por segundo, y así sucesivamente. Por cierto, este caso no es realista, ya que al cabo de un minuto estaríamos a 180 metros por segundo, o 648 kilómetros por hora. En la realidad cotidiana, al cabo de pocos segundos retraemos un poco el pie del pedal para que el auto deje de acelerarse. Pero igual analicemos la situación ideal de *aceleración* constante.



En este caso la velocidad no es una línea horizontal sino una recta inclinada. En el primer segundo, la distancia recorrida es 1 metro, es decir, el área del triángulo claro de la figura. ¿Por qué triángulos si antes dijimos rectángulos? Porque ahora la velocidad no es constante. Pero podemos pensar que la velocidad aumenta de a saltos muy pequeños separados por intervalos muy pequeños de tiempo. Dentro de cada intervalo la velocidad es

constante y puede representarse por un pequeño rectángulo, y el área total es la misma que la de un triángulo.

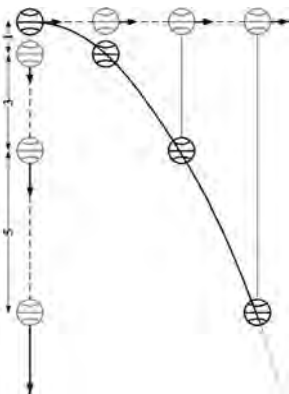


Esto implica que en el segundo segundo la distancia recorrida es 3 metros (tres triángulos), en el tercero 5, en el cuarto 7, etc. Elegí esta forma de presentarles el movimiento acelerado uniformemente porque Galileo, el primero en describirlo en forma cuantitativa, lo enunció así: a intervalos iguales de tiempo, las distancias recorridas corresponden a los enteros impares, que es justamente lo que acabamos de encontrar. Resulta interesante que Galileo no usara ecuaciones sino diagramas para describir el movimiento uniformemente acelerado, que corresponde, nada más y nada menos, que a la caída libre.

Calculemos ahora las distancias *totales* recorridas a medida que pasa el tiempo. En el primer segundo la distancia es 1. En el siguiente segundo se agregan 3, luego 5, etc., de modo que las distancias totales son 1, 4 ($1+3$), 9 ($1+3+5$), 16 ($1+3+5+7$), etc. Es decir, la distancia aumenta como el cuadrado del tiempo ($1 = 1^2$, $4 = 2^2$, $9 = 3^2$, $16 = 4^2$, etc.). La velocidad, por su parte,

aumenta proporcionalmente al tiempo (por ejemplo, se duplica cada vez que el tiempo se duplica). Esto significa que la distancia aumenta como el cuadrado de la velocidad. En el ejemplo de la pelota de tenis y la pelota de básquet, al rebotar la pelota de tenis triplica su velocidad, lo cual implica que, idealmente, alcanzaría una altura nueve veces mayor.

Si ahora, en vez de a Charly García, tiramos una pelota de tenis de un edificio, y le sacamos fotos a intervalos regulares de tiempo, las fotos indicarán una secuencia como la de la siguiente figura (la pelota dibujada en negro); una composición de un movimiento uniforme horizontal y un movimiento acelerado uniformemente en la vertical (las pelotas dibujadas en gris). Ésa es la famosa parábola, que no sólo ocurre en las pelotas de tenis y en estrellas de rock que se tiran de edificios, sino también en los chorros de agua que salen de las mangueras y de las fuentes.



El énfasis de este análisis es que, si las velocidades horizontales de dos objetos son las mismas, las parábolas descritas serán idénticas, aun cuando sus masas sean distintas.

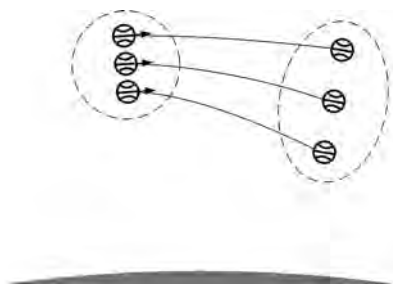
“¿Sabés por qué me tiré del balcón?”, me preguntó Charly en una sesión musical que compartí con él. “Para demostrar que no somos todos iguales.”

¿Por qué hay dos mareas por día?

La fuerza de gravedad acelera los cuerpos hacia el centro de la Tierra. Como ya vimos, si tiramos dos cuerpos desde la misma altura, y *si la fuerza de gravedad fuera la única fuerza que actúa sobre ellos*, entonces los dos cuerpos llegarían al suelo al mismo tiempo.

Ahora bien, la fuerza de gravedad no es la misma a distintas alturas. A medida que nos alejamos del centro de la Tierra, la atracción es menor. El efecto no es perceptible en nuestra experiencia cotidiana ya que nunca variamos demasiado nuestra distancia del centro de la Tierra. Pero hay situaciones en las que la *variación* de la atracción gravitatoria tiene efectos visibles. Una de ellas es la marea, algo que los que alguna vez nos quedamos dormidos en la playa conocemos muy bien.

Para ilustrar el efecto, supongamos que tiramos desde distintas alturas, con la misma velocidad horizontal, *tres* pelotas de tenis. Al cabo de un instante cada pelota describirá una fracción de parábola. Ahora bien, como caen desde alturas donde la gravedad



es distinta, la caída de cada una será distinta: la de abajo caerá una altura mayor y la de arriba caerá menos que las otras dos.

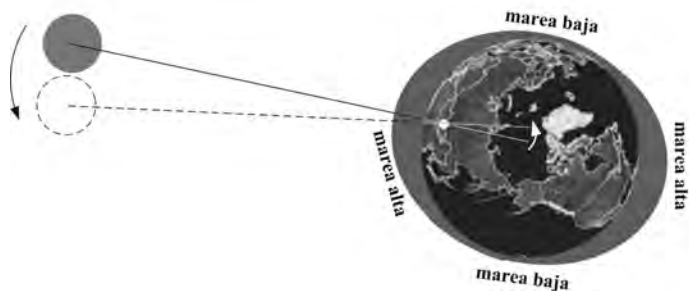
Si aplicamos lo mismo a un cuerpo deformable, a una esfera de líquido por ejemplo (indicada en líneas de puntos en la figura), veremos que el efecto combinado del movimiento y la *variación* de la gravedad con la altura resulta en una deformación de la esfera hacia una forma oblonga (o elipsoidal). Como veremos ahora, ésa es la razón por la que hay dos mareas por día.

Si bien sabemos que la Luna gira alrededor de la Tierra, en realidad lo cierto es que la Luna y la Tierra giran alrededor de un punto común. Dado que la Tierra es mucho más pesada que la Luna, dicho punto está dentro de la Tierra, a unos mil kilómetros de la superficie. Ese punto sería una especie de centro de equilibrio si pusiéramos a la Luna y a la Tierra en los extremos de una “balanza”.



En términos más técnicos, ese punto es el centro de gravedad del conjunto Tierra-Luna. Del mismo modo que las tres esferas de la boleadora giran alrededor de un punto medio, la Tierra y la Luna giran alrededor de su centro de gravedad. Lo importante de este comentario es que la Tierra en realidad está girando en el campo gravitatorio de la Luna y tiende, por lo tanto, a deformarse como un elipsoide. El efecto es evidente sobre el agua, pero también la parte sólida de la Tierra se deforma un poco. A medida que la Tierra gira *sobre su eje* los puntos de la

superficie pasan por lugares de mayor o menor deformación del elipsoide de agua. Ésos son los puntos de marea baja y alta y, como vemos en la figura, hay dos de cada una por día.



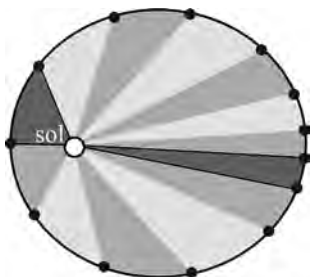
El dibujo está muy exagerado, ya que las mareas cambian el nivel del mar en unos dos metros. Las mareas altas ocurren cada 12 horas y 25 minutos, no exactamente cada 12 horas, ya que la Luna también se mueve. El efecto de la fuerza de marea por parte del Sol es un poco más chico que el de la Luna pero también es apreciable.⁵ Por eso, en Luna nueva y Luna llena, cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados, los efectos se suman y las mareas son más altas. En cuarto creciente y cuarto menguante, cuando la Luna, la Tierra y el Sol forman un ángulo recto, los efectos tienden a cancelarse y las mareas son más bajas.

⁵ Para intrépidos: Si bien la atracción gravitatoria que el Sol ejerce sobre la Tierra es proporcional a su masa e inversa con el cuadrado de la distancia, la fuerza de marea corresponde a la *variación* de la fuerza gravitatoria y depende sólo de la *densidad* del Sol y del tamaño aparente del disco del Sol en el cielo. Lo mismo se aplica a la Luna. Los discos de la Luna y el Sol tienen el mismo tamaño en el cielo (como ya dijimos, esta coincidencia implica que la Luna cubre al Sol en los eclipses) de modo que la relación entre las fuerzas de marea depende de la densidad del Sol respecto de la densidad de la Luna. Como el Sol es menos denso que la Luna, su efecto es menor.

La pirueta de la bailarina y las órbitas planetarias

Habrán visto la famosa *pirouette* de las bailarinas de ballet, en la que al acercar las piernas y los brazos al cuerpo aumentan su velocidad de rotación. La explicación de este fenómeno, y de otros efectos de rotación de nuestra experiencia diaria es análoga a la de una de las leyes del movimiento planetario descubiertas por Iohannes Kepler, que Newton usó para deducir sus leyes de la mecánica. Reaparece la unidad de las leyes newtonianas, que se aplican a escalas diversas, que van desde las moléculas de aire hasta las galaxias, pasando por el tamaño de Paloma Herrera y de Julio Bocca.

Kepler observó que las órbitas planetarias no eran círculos perfectos sino elipses (círculos estirados en una dirección). Además, descubrió que, al describir la elipse, la velocidad de un planeta es mayor cuando está más cerca del Sol, de modo que a intervalos iguales de tiempo recorre áreas iguales.



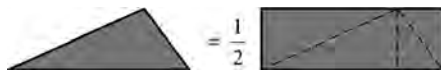
Algo que me resulta fascinante de esta historia es que Newton dedujo esta ley usando argumentos puramente geométricos. Hoy esos argumentos se enseñan poco y fueron reemplazados por artificios muy poderosos del llamado análisis mate-

mático. La versión del análisis que aprendemos hoy es la desarrollada por Gottfried Leibniz (contemporáneo de Newton). Sobre esto, el matemático ruso Vladimir Arnol'd dice, sarcásticamente: “Es una forma especialmente adaptada para enseñar análisis por gente que no lo entiende a gente que nunca lo entenderá”. Leibniz ilustra lo poderoso de su método equiparándolo a una línea recta que, trazada por un niño usando una regla, siempre será más precisa que la dibujada por un gran maestro a mano alzada. Para mí, las soluciones geométricas tienen un valor estético, no sólo por su contenido gráfico, sino porque cada una es distinta, cada una requiere un tratamiento propio, menos rutinario que los métodos analíticos, y es lo que les otorga cierta identidad y carácter.

En 1610, Galileo dijo que las matemáticas eran el lenguaje de la naturaleza, y que sus letras eran triángulos, círculos y otras formas geométricas. Claro que, en 1726, Jonathan Swift se burlaba de esto en el viaje de Gulliver a Laputa, la isla flotante cuyos habitantes “alababan la belleza de una mujer usando rombos, círculos, elipses y otras formas geométricas”.

Con este preámbulo, quisiera mostrarles cómo esta ley de Kepler emerge de las leyes de Newton aplicadas a propiedades sencillas de los triángulos.

En primer lugar, el área de todo triángulo es la mitad de un rectángulo, como en la figura.



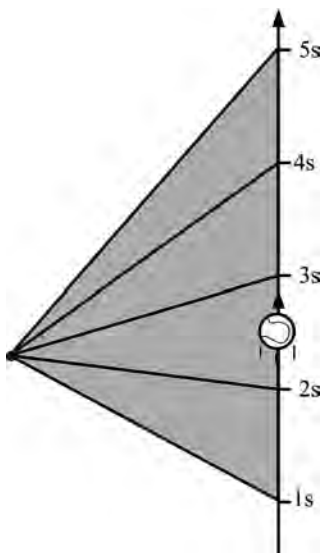
Esto quiere decir que, si trasladamos un vértice en dirección paralela a un lado, el área no cambia, ya que ambos corresponden al mismo rectángulo.



Lo mismo se aplica, claro, si el vértice se desplaza de modo que “vuele” encima del lado:

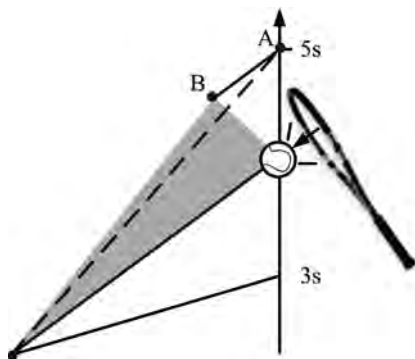


Ahora consideremos una pelota de tenis que se mueve en línea recta a velocidad constante y, por lo tanto, recorre distancias iguales en iguales intervalos de tiempo. Esto significa que las áreas de los triángulos que cada uno de estos lados forma con un punto fijo cualquiera son iguales.



Éste es el caso más sencillo de áreas iguales trazadas en tiempos iguales.

Ahora digamos que, en el cuarto segundo de su trayectoria, le pegamos un raquetazo que le imprime un *cambio* de velocidad en la dirección que apunta al punto fijo. Como la pelota cambia su velocidad, al cabo del segundo siguiente, en lugar de estar en A estará en B.



Ahora bien, como el *cambio* de velocidad está en la dirección que apunta al punto fijo, la recta AB es paralela a dicha dirección.⁶ Esto significa que el triángulo sombreado tiene *la misma área* que la que la pelota habría trazado en caso de no recibir el raquetazo. Esto es, la misma área que el triángulo trazado en el segundo anterior. Repitiendo ese procedimiento para sucesivos golpes, concluimos que si la fuerza que actúa sobre una partí-

⁶ Si no están convencidos, piensen que, después del raquetazo, la velocidad de la pelota es la combinación de dos velocidades: la que traía antes, más el cambio de velocidad. Esto significa que el desplazamiento es, a su vez, la combinación de dos desplazamientos: el que haría en ausencia de raquetazo (que la llevaría a A) y el debido sólo al raquetazo (que la llevaría de A a B).

cula apunta siempre hacia el mismo punto, la partícula describe áreas iguales en tiempos iguales.

El siguiente experimento, sencillísimo, ilustra este efecto. Aten un objeto pequeño (una piedrita o un pedazo de tiza) a un piolín y háganlo rotar. Luego estiren las manos y verán que empieza a rotar más rápido.

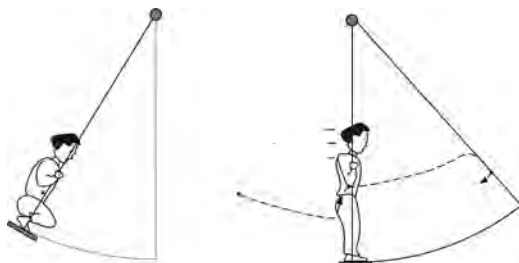


Al extender las manos, las fuerzas del piolín de cada lado de la piedra la empujan hacia el centro de giro, aumentando su velocidad. Como la fuerza neta sobre la piedra apunta hacia un punto fijo, al disminuir el radio del círculo tiene que aumentar su velocidad, ya que debe cubrir iguales áreas en el mismo tiempo. Pequeños juguetes improvisados contienen secretos universales.

El pozo, el péndulo y el columpio

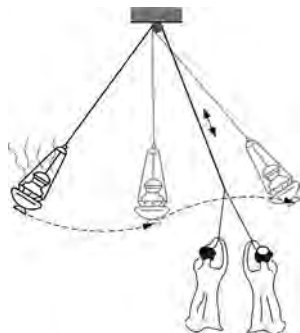
El balanceo de parado en un columpio es una interesante aplicación de la idea de áreas iguales en tiempos iguales. Supongamos que empiezan sentados en el columpio, en el momento de máximo desplazamiento. El columpio comienza a moverse hasta que llega al momento de máxima velocidad, cuando el cable del columpio está vertical. En ese instante, ustedes se paran. Como la fuerza de sus piernas es vertical y apunta al centro de giro, en ese punto se aplica el argumento de que se cubren áreas iguales en tiempos iguales. Entonces, como se están acercando al centro de

giro, la velocidad aumenta. Al aumentar la velocidad, la amplitud de la oscilación hacia la derecha será mayor. En el momento de llegar al punto más alto, se vuelven a sentar. Ahí, como la velocidad es cero, no cambia al sentarse (en ese punto se cubre un área casi igual a cero en un brevísimo instante de tiempo).



Al repetir ese ciclo de sentarse y pararse, la amplitud de la oscilación aumenta mucho y pueden columpiarse a grandes alturas sin que los empujen.

Un péndulo que funciona con este mismo principio es el Botafumeiro, en la catedral de Santiago de Compostela. Un grupo de voluntarios, los “tiraboleiros”, acortan y alargan el péndulo, en cuyo extremo hay un incensario. Al cabo de unas pocas oscilaciones la amplitud del péndulo aumenta hasta cubrir un semicírculo.



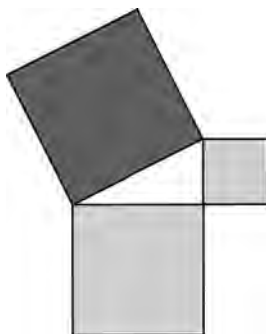
El péndulo más famoso de la literatura es el del cuento de Edgar Allan Poe, “El pozo y el péndulo”. El protagonista está tumbado y atado, con un péndulo afilado que baja poco a poco para cortarlo en dos. Lo interesante es que el péndulo, al bajar, aumenta de amplitud. En el ejemplo del columpio y el Botafumeiro, el péndulo se acorta en su punto de máxima velocidad. En cambio, en el cuento de Poe (aunque el autor no lo especifica), para que la amplitud aumente mientras el péndulo se alarga, hay que bajarlo cuando está en el punto de máximo desplazamiento (y mínima velocidad).

Para concluir este paseo por la mecánica y la geometría, les muestro dos divertimentos geométricos que tienen que ver con calcular magnitudes grandes de nuestra experiencia cotidiana, midiendo magnitudes pequeñas, un recurso muy frecuente en la física.

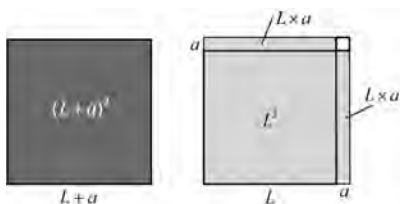
¿A qué distancia está el horizonte?

Un mito que, curiosamente, no termina de extinguirse es que Colón descubrió la redondez de la Tierra. Lo cierto es que, en tiempos de Colón, toda persona educada sabía que la Tierra era redonda. Mucho antes, Aristóteles, en “Sobre los cielos”, había ofrecido dos evidencias: el cambio de posición de las estrellas sobre el horizonte cuando uno se desplaza hacia el norte o hacia el sur, y la sombra circular proyectada por la Tierra sobre la Luna en un eclipse. El consenso entre historiadores es que Colón se confundió al interpretar mediciones antiguas del radio de la Tierra. Sabiendo entonces que la Tierra es redonda, y suponiendo conocido su radio, calculemos a qué distancia está el horizonte.

La idea es aventurarse en algunos caminos de la geometría y usar el concepto de “aproximadamente”. A modo de preámbulo, dejemos entrar al amigo Pitágoras.



El área del cuadrado oscuro es la suma de las áreas de los cuadrados claros.⁷ Ahora bien, si el ángulo menor del triángulo es muy chico, el largo de la hipotenusa será aproximadamente igual al lado mayor. La pregunta que nos hacemos, y que será necesaria para calcular la distancia al horizonte es: si sabemos la magnitud de la hipotenusa y la del lado mayor, ¿cuánto vale el lado menor?

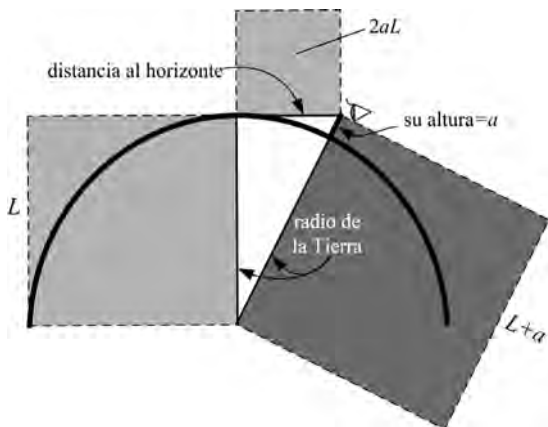


Digamos, entonces, que el ángulo es muy chico, de modo que la hipotenusa es de largo $L+a$, y que a es muchísimo más chico que L . En el caso que estamos analizando, a será la altura de uno

⁷ Éste es el famoso teorema de Pitágoras: el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos. Hay muchísimas formas de demostrarlo. Mi preferida, que no usa ecuaciones, es la que está en las páginas 21-31 del libro *La Matemática como una de las bellas artes*, de esta misma colección.

de ustedes, y L , el radio de la Tierra. ¿Cuánto difieren las áreas de un cuadrado de lado L y la de un cuadrado de lado $L+a$?

De la figura resulta claro que, si aumentamos el lado del cuadrado de lado L en una cantidad a mucho más chica que L , el área del cuadrado aumenta en $2aL$, que es el área de los rectángulos en la figura de la derecha. El error en esta aproximación es el área del cuadradito blanco, que es mucho más chica que el área de los rectángulos. Como (ya dijimos) la suma del área de los cuadrados claros que tocan el triángulo rectángulo es igual a la del cuadrado oscuro, el área del cuadrado más chico es justamente $2aL$. O, lo que es lo mismo, y dicho en lenguaje más matemático (si el doctor Paenza me lo permite), el lado del cuadrado pequeño es la raíz cuadrada de $2aL$.



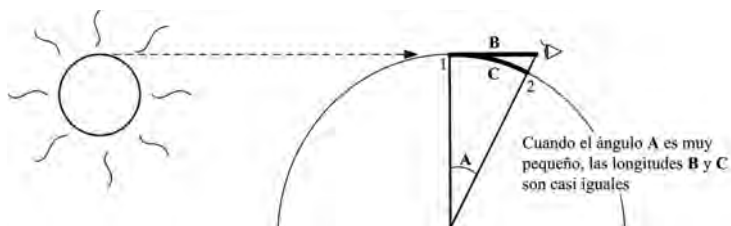
Ahora usemos estas consideraciones para calcular la distancia al horizonte. Cuando ustedes están parados y miran al horizonte, la línea visual es tangente a la Tierra, como se ve en la figura. Esto significa que sus ojos, el centro de la Tierra y el punto de contacto entre la línea visual y la Tierra forman un triángulo

rectángulo cuya hipotenusa es *casi* igual de larga que el lado mayor (el radio de la Tierra). Entonces, la distancia al horizonte no es nada más que el largo del lado menor del triángulo.

Si usan una altura de 1,7 metro (o 0,0017 kilómetro) y el radio de la Tierra es de 6.300 kilómetros, y sacan la raíz cuadrada de $2 \times 0,0017 \times 6.300$, obtendrán unos 4,6 kilómetros. A esa distancia está el horizonte si están parados justo a la orilla del mar o en un desierto perfectamente plano.

Cómo medir el radio de la Tierra con un reloj pulsera

Supongamos que no sabemos el radio de la Tierra. Adaptando el razonamiento anterior pueden calcular su radio si están en la playa y sólo tienen un reloj con ustedes. En un atardecer, siéntense hasta el momento justo en que se pone el Sol. En ese momento párense. Verán entonces algunos rayos de Sol. Midan el tiempo que pasa hasta que el Sol vuelve a ponerse. Con esa información, y su altura pueden calcular el radio de la Tierra. Veamos cómo.



Primero, un poco de geometría sencilla. Si caminaran el perímetro de la Tierra, por el Ecuador digamos, recorrerían una distancia (aproximadamente) 3,14 veces su diámetro, o 6,28 veces

su radio. Tracen una línea imaginaria que vaya desde la posición inicial hasta el centro de la Tierra y, mientras van caminando, otra línea que va desde su posición actual también al centro de la Tierra. A medida que van caminando, el ángulo entre esas dos líneas va aumentando y, cuando regresan al punto de partida, el ángulo será de 360 grados. Si recorren un cuarto del perímetro, el ángulo será $360/4 = 90$ grados, y si recorren la mitad del perímetro será de $360/2 = 180$. El ángulo y la distancia recorrida están entonces en correspondencia, de modo que los cocientes (ángulo “recorrido”)/360 y (distancia recorrida)/(perímetro de la Tierra) son idénticos.

Si tomamos el tiempo que tarda en ponerse el Sol entre nuestra posición de sentados y parados, podemos calcular el ángulo de rotación de la Tierra en ese tiempo. ¿Cómo? Fácil, ya que sabemos que la Tierra completa 360 grados en 24 horas. El cociente entre el tiempo transcurrido y 24 horas es el mismo que el cociente entre el ángulo de rotación y 360 grados, que, a su vez, es el cociente entre la distancia recorrida y el perímetro de la Tierra. Por otra parte, si el ángulo es pequeño (véase la figura de la izquierda), la distancia recorrida (C) es casi igual a la distancia al horizonte (B). El ángulo es pequeño ya que el tiempo que medirán será mucho menor que un día. Tenemos entonces todas las piezas para armar el rompecabezas. Si tienen un poco de paciencia, los invito a convencerse de que

$$\text{radio de la Tierra} = \frac{(\text{la mitad de su altura})}{\left(3,14 \times \frac{\text{tiempo transcurrido}}{24 \text{ horas}}\right)^2}$$

Si su altura es 1,7 metro, el tiempo transcurrido será de unos 10 segundos. Dividan eso en 86.400, que es el número de segundos en un día. El resultado es 0,00011. Multiplíquelo por

3,14 y elévenlo al cuadrado. El resultado es un asombroso 0,00000013. Dividan la mitad de su altura (0,85 metro) por ese número chiquito y obtendrán 6.435.571,2 metros. Esto es, unos 6.400 kilómetros, bastante cercano al radio real de la Tierra, de 6,378 kilómetros.

APÉNDICE PARA INTRÉPIDOS

Dijimos que

$$\frac{\text{ángulo "recorrido"}}{360} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{perímetro de la Tierra}}$$

y que la distancia recorrida, C, es casi igual a la distancia al horizonte B. Esto significa que

$$\frac{\text{ángulo "recorrido"}}{360} = \frac{\text{distancia al horizonte}}{\text{perímetro de la Tierra}}$$

Además, dijimos que

$$\frac{\text{ángulo "recorrido"}}{360} = \frac{\text{tiempo transcurrido}}{24 \text{ horas}}$$

de modo que

$$\frac{\text{tiempo transcurrido}}{24 \text{ horas}} = \frac{\text{distancia al horizonte}}{\text{perímetro de la Tierra}}$$

Ahora, en un raptó de audacia, elevemos al cuadrado los dos lados de esta igualdad:

$$\left(\frac{\text{tiempo transcurrido}}{24 \text{ horas}} \right)^2 = \frac{(\text{distancia al horizonte})^2}{(\text{perímetro de la Tierra})^2}$$

En la sección anterior vimos que el cuadrado de la distancia al horizonte es el doble de su altura multiplicado por el radio de la Tierra (que llamamos L). Y el perímetro de la Tierra es $2 \times 3,14 \times L$. Si usamos estos dos enunciados en la última relación obtenemos:

$$\left(\frac{\text{tiempo transcurrido}}{24 \text{ horas}} \right)^2 = \frac{2 \times a \times L}{(2 \times 3,14 \times L)^2}$$

Y ahora sí, un par de pasos algebraicos nos separa de

$$L = \frac{a/2}{\left(3,14 \times \frac{\text{tiempo transcurrido}}{24 \text{ horas}} \right)^2}$$

que es la relación que usamos para calcular el radio de la Tierra L .

Lo que se atrae y lo que se repele

La electricidad está en todas partes. Es imposible pasar un día sin usar un artefacto eléctrico. Nosotros mismos somos artefactos eléctricos. Los átomos que nos componen están unidos por fuerzas eléctricas. La vida misma, la replicación de las células, los espirales moleculares de ADN que se dividen y se juntan, son parte de una danza microscópica de cargas positivas y negativas coreografiada por fuerzas eléctricas.

¿Qué es la electricidad?

El concepto de electricidad está ligado a una propiedad fundamental de la materia llamada *carga eléctrica*. El problema es que si uno se pregunta el significado preciso del concepto “carga eléctrica”, se encuentra con problemas de definición. Lo mismo pasa con otros términos de la física, como “masa”. Si pensamos en “masa” como la “cantidad de materia” de un objeto, existen ciertas similitudes entre el concepto de masa y de carga eléctrica. Por ejemplo, sabemos que el Sol atrae a la Tierra, y que la Tierra nos atrae a nosotros. Dos objetos se atraen por la fuerza de gravedad, y la fuerza de atracción es mayor cuanto mayores sean las masas de los objetos que se atraen. Algo similar ocurre con

las cargas eléctricas, salvo que, a diferencia de la masa, existen dos tipos de cargas, que Benjamin Franklin llamó positivas y negativas, pero bien podríamos llamarlas azules y rojas, o dulces y saladas. Una de las partículas cargadas que existen en la materia es el electrón, al que Franklin decidió asignar carga negativa. Para muchos, asignarle carga negativa al electrón es un “error” que lleva a confusiones, ya que hoy sabemos que la corriente eléctrica que circula por los cables corresponde al movimiento de electrones. La elección del signo de Franklin implica que, cuando los electrones se mueven de derecha a izquierda, la corriente circula de izquierda a derecha. Si llamáramos positiva a la carga de los electrones, la velocidad y la corriente estarían en la misma dirección y los estudiantes de ingeniería eléctrica tendrían un problema menos. Pero esto no es más que una cuestión de definiciones y no encierra nada profundo.

Las fuerzas que dominan nuestra experiencia cotidiana son la gravedad y la fuerza eléctrica. Ocasionalmente nos cruzamos con fuerzas magnéticas (cuando pegamos el imán de la heladera en la puerta de la heladera, por ejemplo), pero la mayoría de las veces se trata de fuerzas de origen eléctrico. La fricción (la fuerza que hace que un suéter se mantenga tejido y que podamos caminar por el pavimento en lugar de deslizarnos como en una pista de hielo) es una fuerza de origen eléctrico. Como dijimos al comienzo, la fuerza que mantiene unidos los átomos que nos componen también es de origen eléctrico.

Para el físico Richard Feynman, si tuviéramos que reducir la historia de la ciencia a un enunciado, éste sería: “Todo está hecho de átomos”; las paredes, las sillas, las mesas, y el aire que las rodea. Y los átomos son objetos que duran muchísimo tiempo. Cada átomo que nos compone fue parte de estrellas, y de millones de organismos hasta convertirse en parte de nosotros. En la obra de teatro *Hapgood*, de Tom Stoppard (estrenada en

1988), Kerner, un físico y espía ruso, le explica a la mujer que ama: “Podría poner un átomo en tu mano por cada segundo desde que empezó el mundo y te pondrías bizca al ver el punto de átomos en tu palma”. Son tantos los átomos que constituyen un organismo vivo que incluso llegó a decirse que millones de átomos de cada uno de nosotros probablemente pertenecieron a Shakespeare.¹² De modo que todos somos reencarnaciones.

Cada átomo está hecho de tres partículas: protones, que tienen carga positiva; electrones, que tienen carga negativa, y neutrones, que no tienen carga. Los protones y neutrones están empaquetados en el núcleo del átomo y los electrones pasean alrededor.

El número de protones es lo que da a los átomos su identidad química: un átomo con un protón es Hidrógeno, con dos Helio, con tres es Litio y así en adelante. El núcleo del átomo ocupa un fracción pequeñísima del átomo y por lo tanto es extraordinariamente denso, ya que contiene prácticamente toda la masa del átomo (los electrones son mucho más livianos). Según una imagen muy difundida entre físicos, si un átomo se expandiera al tamaño de una catedral, el núcleo sería del tamaño de una mosca (pero una mosca miles de veces más pesada que la catedral). El átomo está hecho esencialmente de espacio vacío, de manera que la solidez de los objetos que nos rodean es una ilusión. Cuando dos objetos, dos bolitas por ejemplo, chocan una con la otra, en realidad no se “tocan”, sino que sus mutuas cargas eléctricas se repelen. Si no fuera por la repulsión eléctrica, las bolitas pasarían indemnes una a través de la otra, como las galaxias. Cuando estamos sentados en una silla, en realidad no es-

¹² Tomé la cita del libro *A short History of Nearly Everything*, de Bill Bryson (Broadway, 2004), pero no hice el cálculo para confirmar la estimación numérica.

tamos sentados sino levitando a una distancia de un \AA ngstrom;¹³ nuestros electrones y los electrones de la silla se oponen a una intimidad mayor.

Algo muy interesante es que la fuerza eléctrica, casi siempre invisible, es inmensamente más grande que la fuerza gravitatoria que nos acompaña todos los días. La carga eléctrica viene en paquetes de tamaño mínimo, que corresponden a la carga del electrón y el protón. El protón y el electrón, constituyentes fundamentales de los átomos, tienen la misma carga eléctrica pero de distinto signo y no existe nada en la naturaleza que tenga una carga eléctrica más chica. (La excepción son las partículas llamadas quarks, pero están confinadas a existir dentro del protón y hasta hoy no se las ha visto dando vueltas solas por ahí.) A su vez, tanto el protón como el electrón tienen masa. El protón es mucho más pesado que el electrón. La atracción gravitatoria entre el protón y el electrón es billones de veces más pequeña que su atracción eléctrica. Sin embargo, la atracción gravitatoria nos es mucho más familiar que la eléctrica. Tenemos miedo de caernos del balcón del décimo piso pero no nos preocupamos por catástrofes eléctricas. La razón es que, si bien la atracción eléctrica es muchísimo más grande que la gravitatoria, existen dos cargas eléctricas que se cancelan entre sí y hacen que la fuerza eléctrica de atracción entre cuerpos sea apreciable sólo en circunstancias especiales. La atracción gravitatoria es siempre atractiva y, cuando bajamos por el tobogán, lo hacemos porque cada átomo de la Tierra está ejerciendo una pequeñísima fuerza de atracción sobre cada átomo de nuestro cuerpo, que sumados dan lugar a la fuerza que nos mantiene unidos al suelo.

¹³ Un \AA ngstrom son 0,0000001 milímetros.

Cuando hablamos de electricidad, entonces, estamos hablando de las cargas que componen la materia. Cuando hablamos de corriente eléctrica estamos hablando del *movimiento* de esas cargas dentro de la materia.

Conductores y aisladores

Ciertas sustancias, como el acero o el cobre, conducen la electricidad con facilidad mientras que otras, como la madera o el vidrio, son casi incapaces de conducir una corriente eléctrica. Son los conductores y los aisladores.

Esta simple distinción explica, por ejemplo, que podamos ver a través del vidrio pero no a través de una puerta metálica. El interior de un metal es como un sembrado regular de árboles de naranjas, pero en lugar de árboles hay átomos de hierro o de cobre. Vistos de cerca, los átomos perdieron algunos de los electrones, que flotan sin destino dentro del metal. Cuando la luz entra al metal empuja los electrones de un lado a otro. Con esta frase me estoy adelantando al final de la historia que quiero contarles: la luz es un fenómeno eléctrico y magnético. La luz ejerce fuerzas sobre las cargas eléctricas de toda sustancia y les provoca algún movimiento. En un metal, los que adquieren mucho movimiento son los electrones y así van aumentando su energía a expensas de la energía de la luz. Esto significa que a medida que la luz penetra en el metal, cada vez hay menos intensidad, ya que se fue consumiendo por los electrones. La luz no puede llegar al otro extremo del metal dado que se “va gastando” en el camino. La luz de una lámpara de cocina que incide sobre la superficie metálica de una cuchara es capaz de penetrar apenas a una profundidad de unos 10 o 20 átomos. Por su parte, el camino hacia la superficie opuesta de la cuchara es

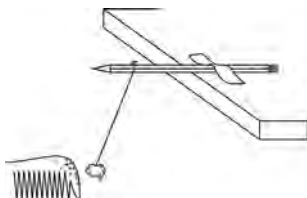
de unos 3 millones de átomos. La luz, en vez de penetrar, se refleja, y por eso las superficies metálicas son espejadas.

En el Apocalipsis (21-22), la calle de Jerusalén “era de oro puro, como vidrio transparente”. Si bien se trata de una metáfora bíblica, el oro en realidad puede ser transparente si se lo fabrica como una película muy delgada de unos 10 o 20 átomos de espesor.

Dentro del vidrio, por otra parte, los átomos se comportan distinto. Los electrones están ligados a los átomos y no tienen ningún interés en andar flotando por ahí. Para la luz, el átomo ahora es un objeto neutro que es casi incapaz de absorberle energía. La luz penetra y sigue de largo y podemos ver a través de un vidrio de la ventana.

El desequilibrio de carga, ¿fricción o realidad?

El siguiente experimento casero ilustra el desequilibrio de carga, y contiene algo de la física de las tormentas eléctricas. Hagan un bollito con el papel metálico de un bombón de chocolate y átenlo a un hilo de modo que cuelgue de un soporte, como en la figura. Froten, con alguna tela, el extremo de una pajita o un peine de plástico. El peine, después de frotarse, queda con carga eléctrica ya que algunas cargas pasaron de la tela al peine. El bollito de papel metálico, por su parte, es eléctricamente neutro.



Sin embargo, si acercan el peine, verán que el papel se desplaza y es atraído hacia el peine. La razón es que las cargas eléctricas negativas dentro del papel metálico pueden moverse de un lado a otro (los electrones son móviles en su interior). Si el peine está cargado positivamente, las cargas negativas del papel tenderán a acercarse, dejando por detrás cargas positivas descompensadas. Como las cargas negativas del papel están más cerca del peine que las positivas, el efecto neto es una atracción. La conclusión interesante de este experimento es que un objeto cargado (el peine) puede atraer a otro eléctricamente neutro debido al acomodamiento de cargas positivas y negativas. A este efecto a veces se lo llama “inducción”. Para la segunda parte del experimento acerquen el peine al papel, hasta tocarlo. Verán que el papel y la pajita se repelen instantáneamente. La razón es que, al tocarse, algunas de las cargas negativas saltan del metal al peine. Ese movimiento de salto de una sustancia a otra no es otra cosa que una minicorriente eléctrica. El papel ya no es eléctricamente neutro, queda cargado en forma positiva, del mismo signo que el peine, y lo repele.

El experimento es más efectivo en los días secos. La razón es la misma por la que, en los días secos, los suéteres hacen chispas a la noche y sentimos un “shock” eléctrico al acercar la llave a la puerta del auto.

No existe una explicación completa de estos efectos, pero la razón central es que, en general, cuando dos materiales distintos se ponen en contacto, los electrones tienden a pasar de un material a otro. Como resultado, uno de los materiales queda cargado positivo y el otro negativo. Algunos llaman a este fenómeno “carga por frotación” o “por fricción” aunque la carga se transfiere no por el frotado mismo sino por el contacto próximo entre dos superficies. La razón detallada de por qué los electrones pasan de una sustancia a otra es un problema abierto. Sin embargo, cualitativamente puede decirse que, dependiendo de la sustancia, los

electrones están más o menos fuertemente ligados a los núcleos de los átomos. Por lo tanto, tienden a pasar de la sustancia en la que están menos ligados a la que están más ligados. Eso es lo que pasa en el contacto entre dos metales, donde el efecto de la transferencia de carga por contacto se entiende muy bien, en el sentido de que la teoría y el experimento coinciden. Pero la transferencia entre dos aislantes consiente algunas incógnitas.

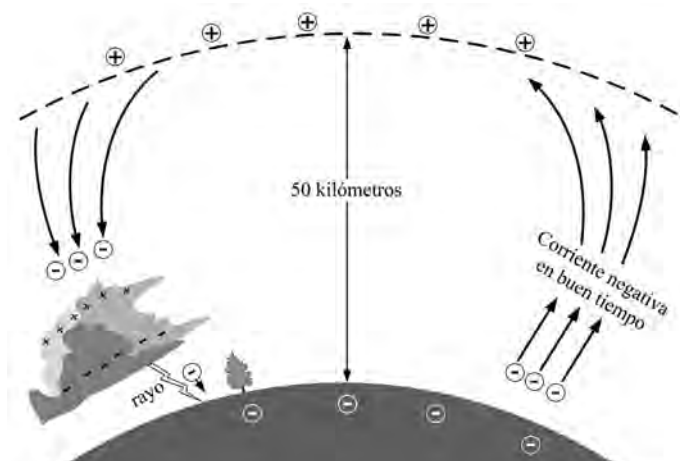
Si estamos parados sobre una alfombra, la base del zapato está en contacto con ella y se transfiere carga de una superficie a la otra. El proceso se incrementa si caminamos, ya que el zapato entra en contacto con nuevas partes de la alfombra. El resultado es que quedamos cargados eléctricamente y, si tocamos un objeto, tendemos a descargarnos (del mismo modo en que el peine se descargó en contacto con el papel metálico) y la corriente que circula por nosotros nos provoca el proverbial shock. En un día húmedo, las pequeñas gotitas de agua adheridas al zapato y a la alfombra son capaces de conducir la electricidad de una superficie a otra, impidiendo que las superficies se carguen. Por eso estos efectos de minielectrocución son más pronunciados en los días secos. Cuando la humedad es superior al 60%, los efectos casi desaparecen.

Las telas para secarropas que “disminuyen la estática” dejan una capa muy fina de jabón sobre la ropa. El jabón atrae la humedad, que conduce la electricidad en la cantidad justa para que se disipe la carga.

Tormentas eléctricas

Los rayos en una tormenta eléctrica son descargas de corriente que pasan entre la nube y el suelo, aunque hay casos de descargas entre nube y nube, e incluso entre la nube y las par-

tes más altas de la atmósfera. En esas descargas eléctricas, una gran cantidad de electrones viaja desde la nube hacia la Tierra. El resultado es que la Tierra queda cargada con carga negativa. Y si consideramos que hay unas cuarenta mil tormentas eléctricas por día, podríamos pensar que la carga negativa de la Tierra está en constante aumento. Sin embargo no es así, ya que las cargas vuelven a subir, pero de modo no tan brusco, en las zonas de buen clima, y el resultado es que la Tierra funciona como una gran batería con corrientes en constante circulación.



Una de las cuestiones más complicadas, y que es un área actual de mucha investigación, es entender por qué las nubes se cargan eléctricamente. Alrededor de la década de 1970 se clarificó que las nubes tienen una capa de cargas negativas en su interior y cargas positivas en la parte superior e inferior. Pero todavía no se entiende bien cómo se establece esa distribución de cargas.

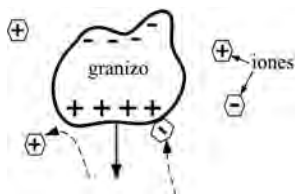
Dentro de la nube hay un gran movimiento de partículas de nieve y granizo; algunas, las más livianas, se mueven de abajo ha-

cia arriba empujadas por las corrientes ascendentes de aire. Otras, las más grandes, tienden a caer y precipitarse por su propio peso. A su vez, dentro de la nube hay partículas cargadas, algunas positivas, otras negativas, llamadas iones (*ion*, en griego, quiere decir viajero). Estos iones son producidos por los llamados rayos cósmicos, que son partículas, la mayoría de ellos protones, que vienen del Sol y de otros lugares de la galaxia. No se sabe muy bien el origen de estos rayos pero lo cierto es que se mueven rapidísimo, a velocidades cercanas a la de la luz, y es parte de la radiación que es peligrosa para los astronautas. Por suerte para los que estamos en la Tierra, cuando estas partículas entran en la atmósfera se frenan de varias formas. Por ejemplo, cuando chocan con otras partículas las rompen, separándolas en partes cargadas negativas y positivas.¹⁴ Un rayo cósmico crea en la nube una sopa de iones. Pero, en principio, pensaríamos que las cargas positivas y negativas van cada una por su lado y están distribuidas más o menos uniformemente dentro de la nube, es decir, en el mecanismo de la producción de iones no hay nada que nos diga que la nube deba estar cargada negativa en la parte inferior y positiva en la superior. Sin embargo, en una tormenta eléctrica se ve que la carga dentro de la nube está separada de esa forma. ¿Por qué se separa la carga dentro de una nube?

La hipótesis más aceptada (no es la única) es una idea muy ingeniosa que debemos al físico escocés Charles Thomson Wilson, inventor de la llamada cámara de nubes, usada para estudiar

¹⁴ En 1912, Victor Hess descubrió, usando globos, que en la parte superior la atmósfera estaba ionizada, es decir que no estaba hecha de átomos neutros sino de electrones que andaban sueltos por un lado y átomos cargados con carga positiva por otro. Como la cantidad de iones aumentaba con la altura propuso que algún tipo de radiación que venía desde arriba de la atmósfera era la responsable de arrancar los electrones de los átomos. Hess recibió el Premio Nobel en 1936 por el descubrimiento de los rayos cósmicos.

los rayos cósmicos. Para Wilson, las partículas de granizo más grandes, al caer, tienden a cargarse negativamente al chocar con partículas más chicas que se mueven en sentido contrario. Y la razón es muy similar



a la del experimento con el papel de aluminio. La Tierra, con carga negativa, tiende a reacomodar las cargas de las partículas de granizo del mismo modo que el peine cargado reacomodó las cargas del papel metálico. La partícula grande, al caer, encuentra en su camino iones positivos y negativos. Como su parte inferior está cargada positivamente, repele a los iones positivos pero atrae a los negativos, que tienden a pegársele, cargándola negativamente. Algunos experimentos de laboratorio con partículas de hielo apoyan esta teoría. Sin embargo, la caída del rayo está llena de complejidades que indican que la teoría no es del todo completa.

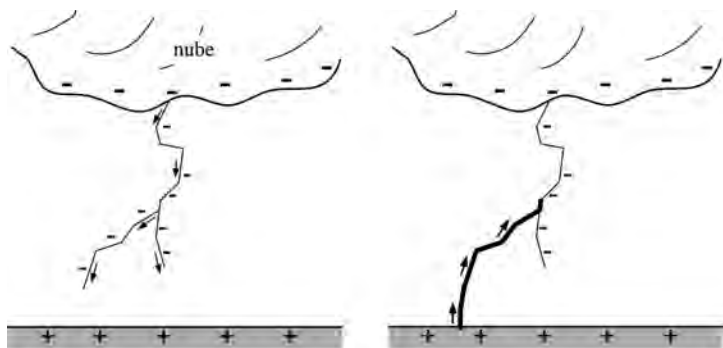
¡Rayos!

Todos hemos sentido alguna emoción en un día de tormenta eléctrica. Alguna vez nos divirtió; alguna vez nos dio miedo. Y las instancias de la naturaleza que nos provocan emociones corresponden a las mayores complejidades y a los misterios. No es de extrañarse entonces que la comprensión de un fenómeno tan familiar como la caída de un rayo sea incompleta.

El rayo es una compleja descarga eléctrica entre la nube y el suelo que ocurre más o menos así: cuando las cargas dentro de la nube se separaron bastante y la parte inferior está con suficiente carga negativa, la fuerza de repulsión empuja las cargas negativas de la Tierra de modo que, debajo de la nube, el suelo tiene carga positiva. La fuerza de atracción entre las cargas positivas de la Tierra y las negativas de la nube hace que un hilo

de corriente, un minirrayo, llamado “líder”, de carga negativa, baje de manera zigzagüeante y un tanto errática. El rayo líder no es tan visible. Al bajar, este primer rayo va creando iones, dejando así un camino de cargas positivas y negativas que luego actuarán como un “cable” que conecta el suelo con la nube. Cuando el líder llega hasta la Tierra, ese cable conecta el suelo con la nube y ahí los electrones regresan bruscamente, desandando el camino trazado a una velocidad de un tercio la velocidad de la luz. Ése es el rayo que vemos en días de tormenta, y que corresponde a una especie de golpe de retorno de los electrones, moviéndose desde el piso a la nube. En realidad, “es la Tierra la que golpea (*strikes*) a las nubes –escribía Benjamin Franklin a su colega inglés Peter Collinson–, y no las nubes a la Tierra”.

En un relámpago típico este proceso de líder y retorno se repite tres o cuatro veces, muy rápidamente.



PARARRAYOS

El rayo suele “caer” (como vimos, la parte más importante del rayo es ascendente) sobre protuberancias del suelo, árboles o edificios. Una corriente grande, al circular por el tronco del ár-

bol, puede vaporizar la savia y hacerlo explotar en pedazos. Si la corriente dura lo suficiente, el calentamiento del árbol puede iniciar un incendio. Lo mismo puede ocurrir si el rayo cae sobre un edificio con una punta, sin un pararrayos, como una iglesia con una cúpula aguda. La corriente puede pulverizar las partes húmedas del edificio, tal como sucede con el árbol, y la madera puede encenderse. Ahí es cuando el pararrayos viene al rescate.

La función del pararrayos es proveerle al rayo de un camino fácil hacia el suelo, siempre que el rayo líder del que hablamos pase cerca del edificio. Para funcionar bien, el pararrayos tiene que estar conectado a las partes húmedas (conductoras) debajo del piso. Mientras el rayo líder no esté cerca del piso, el pararrayos no tiene ningún efecto. Una vez que el rayo líder pasa cerca del edificio, el pararrayos le “tira la mano” y se produce el contacto. Entonces la descarga no pasa por el edificio, donde podría electrocutar a sus ocupantes, sino por un cable que conecta el pararrayos con el piso. Para funcionar bien, por cierto, el pararrayos debe estar encima de la parte más alta del edificio.

El primer diseño de pararrayos es de Benjamin Franklin, uno de los norteamericanos más famosos del siglo XVIII, casi tanto como George Washington. Franklin, además de diplomático e inventor de los anteojos bifocales, hizo investigaciones muy importantes en electricidad. Es suya la idea de que el rayo es una chispa eléctrica idéntica al shock que sentimos después de caminar en la alfombra.

El invento lo hizo famoso en todo el mundo. En Francia lo recibían como a una estrella de rock y lo llamaban *L'Ambassadeur Electrique*. Por esos tiempos se hizo famosa su imagen volando un barrilete en una tormenta, aunque no está claro si en verdad realizó ese experimento. Si bien su invento funcionó, la comprensión que Franklin tenía del fenómeno era errónea. Para

él, el pararrayos descargaba lentamente a la nube, previniendo que se produjera el rayo. Sin embargo, como vimos, hoy se sabe que no es así. El pararrayos provee un camino poco peligroso para la descarga eléctrica, y el rayo se produce igual. En 1766 se instaló un pararrayos arriba del Campanile, la característica torre de más de 100 metros en Venecia, que había sido reducida a cenizas seis veces desde 1388. Nunca más la molestaron los rayos.

¿PUEDE CAER UN RAYO SOBRE UN AVIÓN?

La respuesta es sí. Por eso los pilotos deben mantenerse a distancias de 30 kilómetros de las tormentas eléctricas. El avión puede cargarse eléctricamente por fricción o puede estar en el camino de un rayo. En general no hay mayor daño para los pasajeros ya que, como el avión es metálico, la corriente circula por su exterior. Sin embargo, puede ocurrir que los instrumentos electrónicos se dañen e incluso, si la corriente llega al tanque de combustible, puede hacerlo explotar. En el Apolo 12 se cortó la luz por siete segundos debido a un rayo que le pegó instantes después de despegar. El 24 de junio de 1974, un Boeing 727 con 123 pasajeros cayó incendiado cerca del aeropuerto John F. Kennedy en Nueva York durante una tormenta eléctrica. Hoy los aviones tienen sistemas de protección para las explosiones de los tanques.

Cuatro formas de electrocutarse en la tormenta

1) La más obvia es ser uno mismo un pararrayos. Una corriente pasa por el pecho de la víctima y le para el corazón, le paraliza los músculos y causa quemaduras internas. Si la víctima

está húmeda, la mayoría de la corriente circulará por el exterior del cuerpo y el rayo puede que no sea fatal.

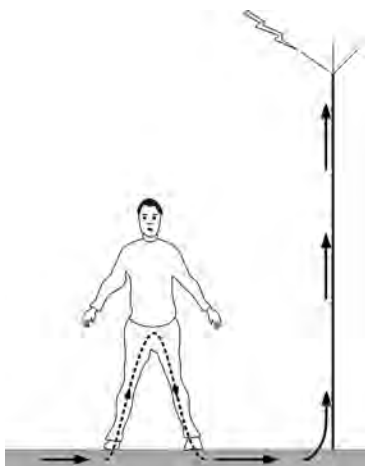
2) Tocar un objeto, un auto por ejemplo, sobre el que cae un rayo es una forma de hacer que parte de la corriente circule por uno mismo.



Las vacas estaban tocando el alambrado
cuando cayó un rayo sobre el cerco.

3) Si uno está cerca de un objeto sobre el que cae un rayo, parte de la corriente puede saltar por el aire. Con suerte, la corriente no será letal.

4) Una forma sutil de electrocutarse es a través de la corriente que circula por el piso durante la caída de un rayo. Si se tiene uno de los pies más cerca del punto del chispazo que el otro, la corriente puede entrar por un pie, hacer una excursión por el torso y luego salir por el otro pie.



Si son sorprendidos al aire libre en una tormenta eléctrica, lo mejor es alejarse de árboles altos u otras estructuras conductoras que puedan atraer un rayo. Busquen puntos bajos, agáchense o pónganse en cuclillas. Correr puede ser una buena opción ya que, si bien la cabeza está en alto, sólo un pie está en contacto con el piso. Las vacas y los caballos están en desventaja ya que tienen las patas separadas y la corriente del piso puede circular con más facilidad a través del cuerpo, aumentando el riesgo. Los humanos podemos juntar los pies; las vacas no.

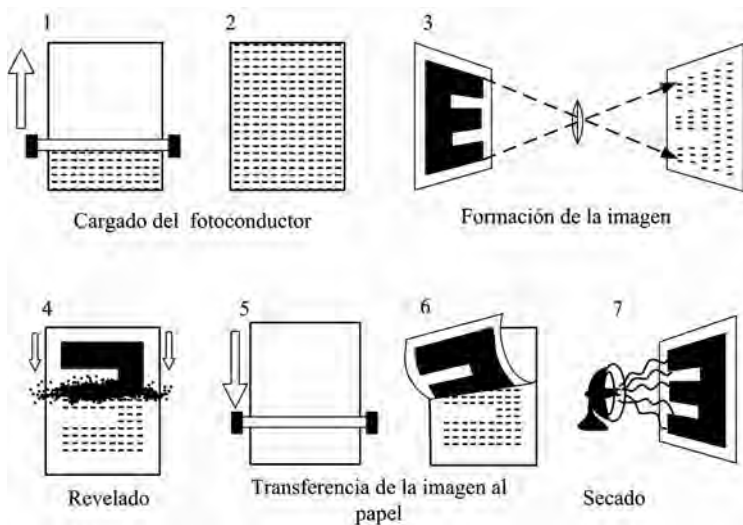
Si están dentro de un auto en la tormenta, quédense adentro. Si un rayo cae sobre el auto, una gran cantidad de cargas queda en la carrocería. Pero como las cargas tienen el mismo signo y están libres para moverse en la superficie metálica, se distribuyen sobre la carrocería y estarán a salvo. Siempre que se queden adentro, claro, y no toquen la carrocería. Por esta razón, en un descapotable (con un techo que no sea metálico) o en un auto con carrocería de plástico estarán muchísimo menos protegidos.

La fotocopidora

Una de las aplicaciones interesantes del fenómeno de atracción eléctrica es la fotocopidora, que fue inventada por el norteamericano Chester Carlson. Carlson tuvo que trabajar desde los catorce años para mantener a sus padres inválidos y, lavando vidrios y limpiando oficinas, logró costearse los estudios en el California Institute of Technology. Luego obtuvo un trabajo en el departamento de patentes de una compañía electrónica, donde se encontró con la dificultad de copiar los dibujos de las patentes y empezó a buscar una forma rápida de copiar textos y dibujos. Como muchas corporaciones estaban ya trabajando en métodos químicos de copiado, buscó la solución por el lado de la electricidad estática. En cuatro años consiguió fabricar la primera fotocopidora y su primera patente es de 1940. En 1947, la Haloid Company de Nueva York, que luego sería la Xerox, introdujo la primera fotocopidora de oficina. Carlson se hizo multimillonario y regaló la mayor parte de su dinero en donaciones anónimas.

Uno de los puntos clave del invento de Carlson es el uso de un material de los llamados “fotoconductores”, aisladores que se vuelven conductores cuando la luz incide sobre ellos. Su idea fue, entonces, cargar eléctricamente la superficie del material fotoconductor (“frotándolo” con un rodillo) y por debajo adosarle un metal conectado con un cable al suelo, del mismo modo que en el pararrayos. Como el material es aislante, se queda cargado. Luego, con la ayuda de una lente se proyecta la imagen que se quiere copiar en el fotoconductor. Las partes iluminadas se vuelven conductoras y, a través del metal de la parte inferior, se descargan. Lo que queda cargado entonces es “el negativo” de la imagen que quiere copiarse. El siguiente paso es tirar partículas de tinta, que en realidad es polvo muy fino de partículas

de plástico, el tóner, a las que se carga de signo opuesto a la carga del fotoconductor. El tóner se adhiere al fotoconductor en los lugares cargados. Luego se apoya el papel en el fotoconductor. El papel se carga negativamente de modo que atraiga al tóner. Finalmente la copiadora comprime y calienta la copia para que el tóner se adhiera. Un cepillo limpia el fotorreceptor y estamos listos para la próxima copia.



La saliva de Volta

En el siglo XVIII, los inventos de Franklin sugerían que corrientes significativas podrían producirse descargando grandes objetos cargados. Pero en 1800, el italiano Alessandro Volta descubrió una manera de producir corrientes mucho más efectiva que la descarga de objetos que, como el rayo, eran de muy cor-

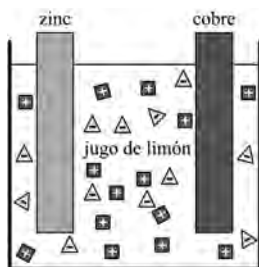
ta duración. Volta encontró que, si apretaba un disco de zinc del tamaño de una moneda de un lado de su lengua y otro idéntico, de cobre, del otro lado y luego ponía en contacto el extremo de las monedas, sentía una sensación de cosquilleo a través de la lengua. Había puesto en funcionamiento, en su propia boca, la primera “batería” del mundo. Si bien Volta nunca tuvo la menor idea de cómo funcionaba su gran invento, razonó que una corriente más grande podría lograrse si se apilaban (de ahí la palabra pila) los metales y el líquido (ya no saliva sino otras sustancias) alternando capas. La batería de Volta no necesitaba ser cargada desde afuera después de cada uso y las propiedades de las corrientes eléctricas podían estudiarse de manera controlada. Su descubrimiento inició una serie de invenciones de aparatos eléctricos que cambiaron nuestra civilización.

Si bien hoy hay muchos tipos de baterías que difieren de la de Volta, veamos el principio básico detrás de su funcionamiento. De paso, les sugiero una manera de fabricar una batería casera.

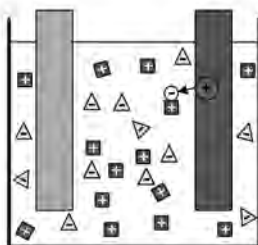
En la batería de Volta se usan dos metales distintos y un líquido que permite el paso de iones disueltos de un metal al otro. Una batería casera muy popular en cursos de física se puede hacer con un limón, un clavo galvanizado (cubierto en zinc) y un alambre de cobre. Aprieten el limón (sin romperlo) para liberar el jugo en su interior e inserten el clavo y el alambre en el limón. La batería está lista.



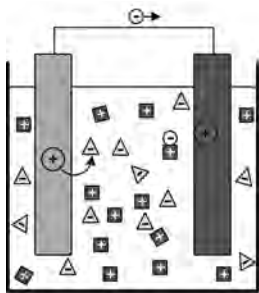
Si bien no podrán conectarla al auto cuando se quedan sin batería, la pila de limón es capaz de generar una pequeña corriente. Si tienen una calculadora pequeña que funcione con una pila, podrán hacerla funcionar con esta sencilla batería con gusto a limón. También se puede probar con un minimotor, conectándolo a distintas “baterías” de frutas para ver cuál funciona mejor.



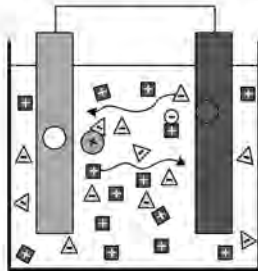
1. El jugo de limón tiene disueltos iones positivos y negativos.



2. Para un átomo de cobre es conveniente donar un electrón a un ión positivo. Igual el átomo se queda “hambriento” de electrones.



3. Si se conectan los metales, el zinc le da al cobre el electrón que necesita. El átomo de zinc se disuelve en el jugo para unirse a un ión negativo.

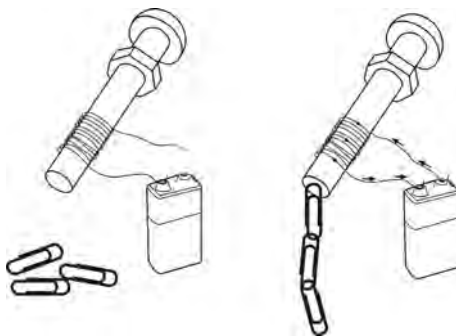


4. Como la reacción produjo un exceso de iones negativos a la derecha y de positivos a la izquierda, éstos migran para equilibrar las cargas. La corriente de iones dentro del jugo completa el circuito. Una vez que se usaron todos los iones, la batería se gastó.

Como ilustro en la figura, la batería de Volta es un mecanismo que usa la reacción química del metal con el jugo de limón para “empujar” los electrones de un metal a otro. Ese empuje, que es análogo a la presión que una bomba de agua ejerce sobre un líquido y que lo hace circular por una manguera, es lo que en honor a Volta se llama voltaje.

Imanes caseros

Para este experimento muchos de ustedes tendrán que ir a la ferretería a conseguir un par de cosas. Pero vale la pena, ya que ilustra un fenómeno de suprema importancia y profundidad: el magnetismo es electricidad en movimiento.



Para el experimento se necesita un bulón, unos clips, un par de metros de alambre de cobre y una batería, preferentemente de 9 voltios para mayor dramatismo. Pelen los extremos del alambre (que está cubierto de un esmalte aislante) y enróllenlo sobre el bulón. La idea es conectar cada extremo del alambre a los bornes de la batería y verificar que, cuando circula corriente, el rollo de cable y el bulón se convierten, mágicamente, en un imán

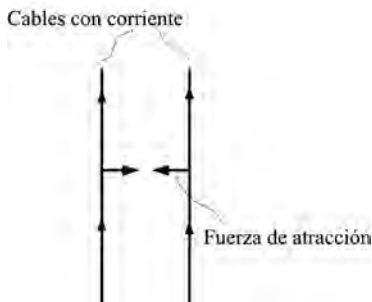
que atrae a los clips. Desconecten los cables y el bulón deja de ser magnético: los clips se caen. Si tienen una brújula en casa, acérquenla y verán que la aguja se orienta hacia el bulón cuando el alambre está conectado y apunta al norte si lo desconectan.

Este sencillo experimento contiene la primera parte de una de las grandes unificaciones de la física: la electricidad y el magnetismo. La batería genera una corriente eléctrica que no es otra cosa que cargas que se mueven por el cable de cobre. Éstas son las mismas cargas que pasan de un material a otro cuando se lo frota. Y cuando esas cargas viajan por un lazo de corriente (esto es, cuando recorren un círculo, un cuadrado o cualquier perímetro que encierre un área), generan magnetismo. El mismo fenómeno de la “piedra imán que enloquece la brújula” (de Borges en “Fundación mítica de Buenos Aires”) y de los “fierros mágicos de Melquíades” (en *Cien años de soledad*) que hacían que las maderas crujieran “por la desesperación de los clavos y los tornillos tratando de desenclavarse”.

La electricidad y el magnetismo son dos fenómenos conocidos desde la Antigüedad. Sin embargo, la conexión entre ellos fue vislumbrada por primera vez sólo en 1820 por el danés Hans Christian Oersted. Lo inspiró, según su propio relato, su convicción metafísica de la unidad de las fuerzas de la naturaleza, una idea que tomó de los filósofos alemanes, en particular de Friedrich Schelling.¹⁵ Quizá la razón de la demora está en que las fuerzas entre corrientes, entre cargas en movimiento, difieren de las fuerzas entre cargas quietas. En primer lugar, no hay una fuerza entre corrientes y cargas quietas. En segundo lugar, la fuerza entre corrientes es *perpendicular* a la dirección de las co-

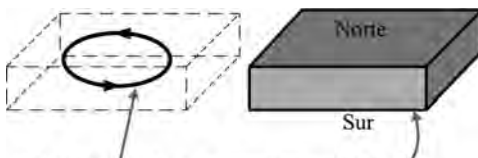
¹⁵ Filósofo alemán (1775-1854) para quien lo natural y lo espiritual emergen de un mismo estado original absoluto. Sus ideas fueron criticadas por su colega Georg Hegel, quien luego tuvo mucha más influencia como filósofo.

rrientes. En el caso del rollo (el lazo de corriente) alrededor del bulón la cosa es medio difícil de visualizar. Pero entre dos corrientes que circulan en cables paralelos, la fuerza de atracción es perpendicular a los cables.



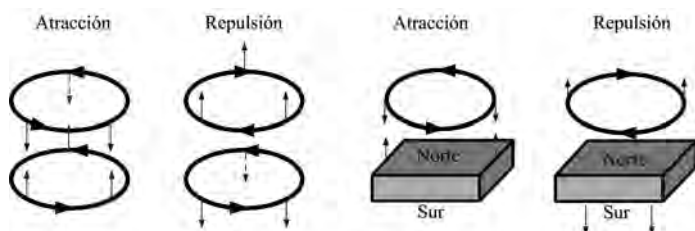
Más de un historiador de la ciencia atribuye el retraso en el descubrimiento de Oersted a un obstáculo psicológico: la presuposición de que todas las fuerzas son como la gravitatoria y la electrostática, que actúa en la dirección que conecta los cuerpos.

La fuerza perpendicular entre corrientes es parte de la equivalencia entre un imán y un lazo de corriente.

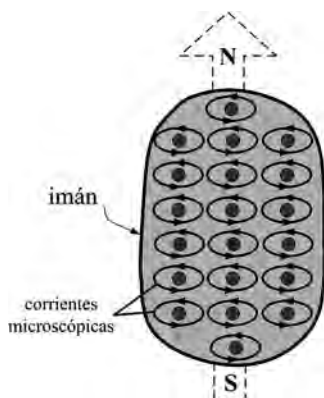


Un **lazo de corriente** es equivalente a un **imán**

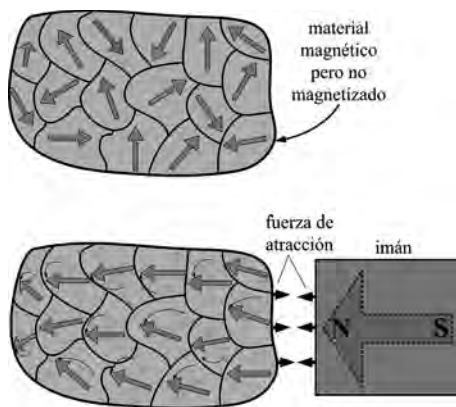
Dos imanes se atraen de modo que el norte de uno y el sur del otro estén alineados. Lo mismo pasa con los lazos de corriente entre sí y entre los lazos de corriente y los imanes.



Si han jugado con imanes habrán notado que hay ciertas orientaciones en las que se atraen y otras en las que se repelen. La atracción corresponde al norte de un imán acercándose al sur del otro. Imaginen a un lazo de corriente como si fuera un círculo sobre una mesa. Si la corriente circula en sentido horario, el “norte” del imán equivalente estaría debajo del lazo y el “sur” encima. La situación opuesta se da si la corriente circula en sentido antihorario. El magnetismo, como vemos, está íntimamente ligado a las corrientes. Más aún, todo imán permanente es un conjunto de innumerables lazos microscópicos de corriente que circulan alrededor de los átomos.



Volvamos al experimento del bulón y de los clips. Dijimos que el lazo de corriente es un imán. Los clips, en cambio, no son imanes, no se atraen ni repelen entre ellos cuando están desparramados en la mesa. Sin embargo, son atraídos por el lazo de corriente. ¿Por qué? La razón es que los clips están hechos de material magnético, pero en vez de ser todo el clip un imán, está subdividido en pequeños imanes, llamados dominios magnéticos. Estos dominios, cada uno de ellos de muchísimos átomos, están orientados al azar y hacen que, en su conjunto, el clip no esté magnetizado. Cuando un imán se acerca al clip trata de orientar los nortes de cada uno de los imanes y consigue que los dominios ya no estén orientados al azar sino que tiendan a alinearse hacia el imán. El resultado es que un material que no está magnetizado se magnetiza (el imán “induce” una magnetización en el material) y es atraído hacia el imán.



Esto es precisamente lo que pasa cuando pegan el imán de la pizzería en la heladera. La puerta de la heladera está hecha de un material magnético pero no está magnetizada. Por eso, si

le acercan unos clips, éstos no se pegarán a la puerta. El imán de la pizzería induce una pequeña magnetización en la puerta, lo que a su vez genera una atracción entre ellos, suficiente para generar una fuerza que los mantiene adheridos.

PREGUNTAS

- ¿Por qué el bulón hace que la atracción entre el lazo de corriente y los clips sea más grande que en el caso de haber usado sólo el lazo?
- ¿Por qué se pegan los clips entre sí al conectar la batería?

El fenómeno de la inducción es análogo a la atracción entre un objeto cargado y otro eléctricamente neutro, como ya experimentamos. Un metal es neutro no porque no tenga cargas sino por una cancelación de cargas positivas y negativas. Al acercar un metal cargado, las cargas se reorientan de modo que el metal es atraído hacia el objeto cargado. Por eso, *todo* material neutro es atraído hacia un objeto cargado, dado que todo material está hecho de protones y electrones, que tienen carga opuesta. Sin embargo, sólo algunos materiales tienen corrientes internas que generan los dominios de que hablamos. Por eso, si en lugar de clips hubiéramos puesto un tenedor o una moneda, ambos metálicos pero no magnetizables, no habríamos detectado ninguna atracción.

El telégrafo

La importancia de la unión matrimonial entre electricidad y magnetismo descubierta por Oersted va más allá de lo conceptual, ya que abrió el camino a innumerables aplicaciones

tecnológicas. La primera verdaderamente revolucionaria fue el telégrafo.

Uno de los primeros en experimentar con el electroimán (nuestro imán casero) con fines prácticos fue el norteamericano Joseph Henry. Hay una cita suya que a mí me invoca “Instantes”, el poema falsamente atribuido a Borges (y que posiblemente sea obra de un caricaturista de *Reader's Digest* llamado Don Herold) que dice: “Si pudiera vivir nuevamente mi vida, en la próxima trataría de cometer más errores”. Henry, por su parte, declara: “Si pudiera vivir mi vida nuevamente, hubiera registrado más patentes”.

Un par de modificaciones sencillas convierten a nuestro imán casero en un telégrafo. Imaginen que Alicia está en Tucumán con la batería y los dos extremos del cable de cobre. El cable se extiende hasta Buenos Aires, donde está María con los clips y el bulón con el cable enrollado. Cada vez que Alicia conecta los cables de la batería, los clips se pegan al bulón, y cada vez que lo suelta, se despegan. El clip pegándose al imán corresponde a un “clic”. Con un poco de imaginación ustedes podrían diseñar algún sistema que haga algún ruidito cuando el clip es atraído por el bulón. Éste es el razonamiento que siguió Henry, y así concibió la idea del telégrafo. Pero el que se hizo millonario con la invención del artefacto fue Samuel Morse, un profesor de pintura y escultura que patentó el útil diseño, empleando el famoso código de puntos y rayas que permiten convertir una serie de clics en letras y palabras. El primer telégrafo entró en funcionamiento en 1844.

El telégrafo cambió el mundo. Con raras excepciones, la información, hasta principios del siglo XIX, viajaba a la misma velocidad que en tiempos de los sumerios, cuatro mil años antes de Cristo. Las noticias financieras empezaron a viajar instantáneamente de ciudad en ciudad. Las redes de trenes se hicieron más

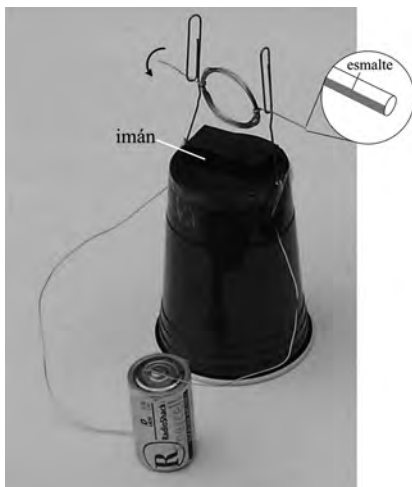
complejas ya que las llegadas y partidas podían sincronizarse a través de países. El tiempo, que antes era algo local y personal se convirtió en algo global. Antes del telégrafo, por ejemplo, Nueva York y Baltimore tenían tiempos que diferían en unos minutos porque estaban en longitudes ligeramente distintas. Cuando el telégrafo se extendió hasta Europa del Este, millones de campesinos fueron forzados a adoptar apellidos para facilitar el tratamiento burocrático de la educación y la recolección de impuestos. Fue una forma temprana de la globalización.

El motor eléctrico, el teléfono, el parlante

El experimento del electroimán muestra, como ya dijimos, la equivalencia entre la electricidad y el magnetismo: un lazo de corriente es equivalente a un imán.

Pero como la corriente sobre un cable puede controlarse (conectándole o no una batería), el lazo es un imán que puede activarse y desactivarse. Los otros imanes, los que vienen con la propaganda de la pizzería y que se pegan a la heladera, son permanentes, al menos hasta que se desmagnetizan. La idea de que un imán puede prenderse y apagarse inspiró la invención del motor eléctrico. Les sugiero cómo construir uno en el siguiente experimento casero. Se necesita una batería, alambre de cobre, un imán permanente y dos clips. También necesitan cinta adhesiva y un soporte; yo uso un vaso de plástico (como el de la foto) pero ustedes pueden usar el ingenio para inventar su propio diseño. Los clips (que son metálicos) van conectados con cables al + y al - de la batería. Para el lazo de corriente, usen el alambre de cobre (yo lo enrolló sobre la batería y la uso de carretel) y, aquí viene lo importante, saquen el esmalte (usando papel de lija o

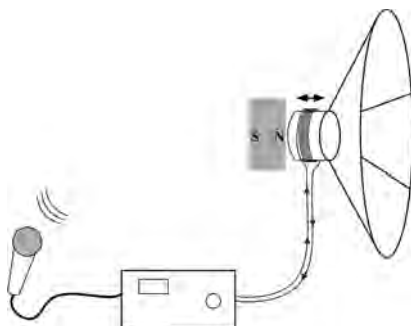
una lima de uñas) de los extremos del lazo, pero *sólo en la mitad del diámetro del alambre*.



El lazo enrollado va apoyado sobre los clips. En nuestro motor eléctrico el lazo girará. Veamos por qué. Pero antes pensemos qué pasaría si hubiéramos pelado el cable en todo el perímetro. En ese caso, por todas las orientaciones del lazo circulará una corriente. Se convertirá, por lo tanto, en un imán que se orientará de modo de que su sur quede alineado con el norte del imán en el vaso de plástico. El lazo, en este caso, luego de algunas oscilaciones, se quedará fijo en esa posición. Si, en cambio, el alambre está pelado en la mitad de su perímetro, la corriente circulará sólo en la mitad de las orientaciones del lazo. Esto significa que sólo en algunas posiciones el lazo tratará de orientarse hacia el imán. Cuando circula corriente, el lazo se mueve, tratando de orientarse. Al moverse llega a una posición en la que no circula corriente. El lazo sigue moviéndose por efecto de su

propia inercia hasta llegar a la posición inicial, en la que circula corriente, y trata de orientarse de nuevo, recibiendo un impulso que lo hace girar *siempre en la misma dirección*. El ciclo se repite y el motor eléctrico está funcionando.

Este sencillo experimento, ampliado a mayor escala, también tuvo un gran impacto tecnológico y social. Una vez inventado el motor, viene el ascensor, y con el ascensor vinieron los rascacielos. Imagínense subiendo ochenta pisos con la bolsa del supermercado por la escalera. Quizás en algún corte de luz lo hicieron y valoraron, sin mencionarlo, la importancia del motor eléctrico.



Otras aplicaciones que usan el principio del electroimán son el teléfono y el parlante. Un micrófono convierte las oscilaciones del sonido en corrientes que oscilan y circulan, yendo y viniendo, por un cable enrollado a un parlante. La corriente a veces induce atracción y otras repulsión con un imán permanente (que habrán visto en los parlantes): la corriente se traduce en vibraciones y la vibración en sonido. La magia del teléfono es convertir las vibraciones del sonido en electricidad y permitir comunicaciones sonoras a distancia. Se dice que la ceguera nos separa de las cosas, y la sordera nos separa de la gente. El telé-

fono se convirtió rápidamente en un artefacto de uso masivo que promueve la comunicación y el contacto humano; a pesar de la frase de un ejecutivo según quien los norteamericanos se convirtieron en los primeros en interrumpir el acto sexual para atender una llamada telefónica.

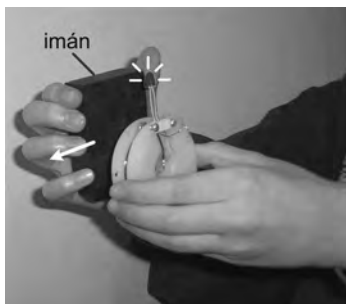
Se cierra un círculo: imanes que se mueven generan corrientes

Otro gran momento del desarrollo de la electricidad y su matrimonio con el magnetismo es el descubrimiento, en 1831, de que, así como el magnetismo es electricidad en movimiento, el magnetismo en movimiento puede generar corrientes. Como ocurrió más de una vez en la historia de la ciencia, dos investigadores llegaron al descubrimiento casi simultáneamente. El norteamericano Joseph Henry, profesor de matemática y filosofía en una academia de Nueva York, lo descubrió primero pero no publicó sus resultados sino hasta el año siguiente. En esos tiempos la investigación no tenía gran reputación en las universidades norteamericanas y los profesores tenían cargas docentes que les consumían el tiempo. El inglés Michael Faraday, si bien llegó al fenómeno un poco después, publicó sus resultados antes y realizó experimentos exhaustivos, cosa que le terminó dando la merecida fama de uno de los científicos más importantes del siglo XIX. Algo muy interesante es que Faraday era un experimentador brillante e imaginativo, pero no tenía ningún conocimiento matemático. Sus cuadernos de notas están llenos de dibujos con flechitas e imanes, pero ninguna ecuación.

Además de abrir la puerta a la invención del generador eléctrico, de un impacto social gigantesco, el descubrimiento es de una profunda importancia conceptual y filosófica ya que indica

la preferencia de la Naturaleza por las simetrías. La idea de que la simetría, un concepto de valor estético, actúa como principio rector de leyes naturales, jugó un papel fundamental en la física del siglo xx, sobre todo en la llamada física de partículas elementales.

Volviendo a Faraday, la idea de que el magnetismo en movimiento genera corrientes puede visualizarse en un experimento casi casero. Y digo casi casero porque se necesita, además de un imán y una bobina de alambre de cobre, una lamparita que pueda iluminarse con poca corriente. Yo uso un LED (diodo emisor de luz), una lamparita que puede conseguirse en casas de electrónica.



El lazo de corriente está conectado a la lamparita, *sin batería alguna*. Si se mueve el imán, la lamparita se enciende! Mientras el imán esté quieto respecto del lazo con la lamparita, no hay corriente: el magnetismo en movimiento genera corriente.

Las grandes turbinas de generación eléctrica usan este principio. El movimiento del agua de una represa hace girar a grandes lazos de alambre cerca de imanes enormes. Se generan así grandes corrientes que van por las líneas de alta tensión, o alto voltaje, hasta llegar a nuestras casas. Pero ¿por qué alta tensión? Veamos...

Corriente alterna o corriente continua

Cuando la corriente eléctrica circula por un cable produce un efecto de fricción que calienta el cable. Eso hace perder energía, por lo que resulta muy caro transportar mucha corriente a largas distancias. Una analogía de la corriente por los cables y el agua por las cañerías de agua ayuda a entender la razón de la alta tensión. Supongamos que en nuestra casa tenemos un aparato que usa la fuerza del agua para funcionar. Cuanto mayor sea la presión del agua que viene de las cañerías menos flujo de agua necesitaremos para hacer funcionar el aparato. Al disminuir el flujo de agua, disminuyen las pérdidas por fricción. Pero ahora aparece un problema, ya que si usamos dentro de nuestra casa cañerías de altísima presión, una pérdida de agua podría perforarnos la piel. Lo conveniente entonces es el uso de cañerías de alta presión para distancias largas hasta llegar cerca de casa, y alguna “estación transformadora” que convierta la alta presión en baja presión, conveniente para el uso doméstico. Si traducimos presión a voltaje vemos que es conveniente usar cables de alta tensión para transportar la energía eléctrica desde las represas hasta las casas. Y por la misma razón necesitamos estaciones transformadoras. Ahora bien, para convertir voltajes altos en voltajes pequeños se usa el principio de que el magnetismo en movimiento genera corrientes. Lo que esto implica es que para que funcionen las estaciones transformadoras es necesario usar corrientes que varían en el tiempo, las llamadas corrientes alternas, en oposición a las corrientes continuas que generan las baterías.

Al principio del desarrollo de las líneas de electricidad hubo una gran discusión sobre si usar corriente continua o corriente alterna. Thomas Edison, el famoso inventor, era uno de los principales propulsores de la corriente continua, por considerar a la

corriente alterna innecesaria y muy peligrosa. En el otro campo estaba George Westinghouse, que impulsaba la aplicación de la corriente alterna. La economía del uso de líneas de alta tensión y plantas transformadoras es lo que declaró ganador a Westinghouse y hoy los enchufes de todas las casas nos alimentan de corriente alterna.

Lo que se ve y lo que se oculta 17

Los rayos de luz. Sombra y penumbra. Crepúsculo y anticrepúsculo. La luz azul del aire. Rayos que se quiebran. ¿Cómo se refleja la luz? La cáustica. Otra reflexión sobre espejos. Más rayos que se quiebran.

Lo que se frena, lo que gira y lo que se acelera . . 37

Relatividad sin Einstein. El truco de las dos pelotas. Fuerzas como flechas. La venganza de las fuerzas. Navegando en contra del viento. ¿Por qué no se cae la Luna? Yendo en círculos. Charly García, Galileo y la parábola del chorro de agua. ¿Por qué hay dos mareas por día? La pirueta de la bailarina y las órbitas planetarias. El pozo, el péndulo y el columpio. ¿A qué distancia está el horizonte? Cómo medir el radio de la Tierra con un reloj pulsera.

Lo que flota, lo que vuela y lo que se hunde 79

La presión de la sangre y los oídos que “se tapan”. ¿Por qué flotan las nubes? Fuerza y presión. Tomando gaseosa con una pajita. Experimento con bolsas de basura. El freno del auto. Líquidos y gases en movimiento. El oboe, la arterioesclerosis y el aneurisma. El vaporizador. Líquidos que rotan, Einstein, las hojas de té y los meandros. La comba y el vuelo de los aviones.

Lo que suena y lo que calla 109

Una onda es una perturbación que se propaga. Del ruido a la música. La sirena. La voz. Sonido más sonido puede ser silencio. El sonido dobla la es-

quina. La sirena de la ambulancia y el efecto Doppler. Consonancias y escalas musicales. La escala pentatónica y el arpa correspondiente.

Lo que se atrae y lo que se repele 141

¿Qué es la electricidad? Conductores y aisladores. El desequilibrio de carga, ¿fricción o realidad? Tormentas eléctricas. ¡Rayos! La fotocopidora. La saliva de Volta. Imanes caseros. El telégrafo. El motor eléctrico, el teléfono, el parlante. Se cierra un círculo: imanes que se mueven generan corrientes. Corriente alterna o corriente continua.

Lo frío y lo caliente 175

Ramas de pimienta. La Biblia y el calefón. Conductores y aisladores (segunda parte). La dilatación de los cuerpos. Soplando la sopa. Cocinando bajo presión. La heladera. Biografía de un copo de nieve. Una vela en el ascensor y por qué los beduinos se visten de negro. La temperatura del vacío. El invernadero global.

Epílogo 209

Bibliografía comentada 211