

Introducción

Con más de 300 libros publicados en mi haber, he tenido que aceptar el hecho de que soy «un autor prolífico». Así es como, invariablemente, me llaman.

No estoy seguro de que, si me diesen a elegir, quisiese verme bendecido por esa casi inevitable combinación de dos palabras. Supongo que resultaría más agradable si, de una forma rutinaria, me llamasen, por ejemplo, «autor dotado» o «estupendo escritor», o incluso «genio de la pluma». Desgraciadamente, todo tiene el aspecto de que habrá una larga y fría espera antes de que se produzca esa relación, por lo que aceptaré lo de «escritor prolífico».

Pero si pienso en ello, compruebo que existen ventajas en eso de ser un «escritor prolífico». Para empezar, si eres un escritor prolífico, es inevitable que te resulte fácil escribir. No se puede sufrir una agonía al ir eligiendo cada palabra a cuentagotas y ser prolífico. Al mismo tiempo no existen suficientes minutos en una hora para esto, ni tampoco el alma humana puede aguantar tanto.

En realidad, escribir me es fácil, y disfruto también con ello. Disfruto increíblemente, por lo que soy un hombre afortunado.

Y lo que es más, si eres un escritor prolífico, eres capaz de escribir con rapidez. No tienes elección. Si lo deseas puedes escribir despacio. O puedes dejar listos veintiún libros en un año (incluyendo, como es natural, algunos relativamente pequeños), como hice en 1983. Lo que no se puede hacer es escribir despacio veintiún libros en un año.

Pues sí, puedo escribir con rapidez, con mucha rapidez. Escribo tan rápidamente como tecleo y, con el procesador de texto, hago un centenar de palabras por minuto (si no contamos el tiempo perdido en hacer correcciones). Escribir deprisa es la mayor de mis ventajas.

Esto me lleva al aspecto sórdido de ser prolífico puesto que también tiene sus desventajas, y su inconveniente mayor es que escribo muy deprisa. Sí, también constituye una desventaja.

Como podrán ver por este libro que tienen en las manos (o por lo menos, después de que hayan terminado de leerlo), escribo con aparente autoridad sobre una

amplia variedad de temas. Y si ha leído las más de dos docenas de otros libros de ensayos científicos (por no mencionar los libros que he escrito acerca de otros temas, desde comentarios a la Biblia a libros de humor), el ámbito aún parecerá más asombroso.

Pues bien, si quiero librarme de esa aura de que lo sé todo, que cierto modo he formado a mi alrededor, resulta absolutamente necesario que evite cometer errores tontos. Y lo haría también, si fuera por el inconveniente de mi gran velocidad al escribir. Accidentalmente, puedo decir algo ridículo y luego, antes de que tenga oportunidad de verlo y decir: « ¡Eh, esto está equivocado!», me encuentro en el párrafo siguiente con mi mente ocupada por completo en otra cosa.

En el capítulo «Brazo del gigante» de este libro, calculé cuidadosamente el tamaño de la estrella Betelgeuse por trigonometría, y debí de confundir el radio con el diámetro, y acabé por hacer la estrella exactamente con un diámetro el doble del que debería ser.

Envié «Brazo del gigante» a The Magazine of Fantasy and Science Fiction, que imprimió estos artículos por primera vez, y luego, un mes más tarde, escribí una continuación del tema, el capítulo titulado «El mundo del Sol Rojo».

Necesité de nuevo el tamaño de Betelgeuse, y me dio demasiada pereza mirar el ensayo anterior. Simplemente, volví a calcularlo, y a vez no cometí el error y obtuve la cifra exacta. Advertí que las dos cifras en los dos artículos no coincidían. Naturalmente que no.

¿Cómo lo averigüé (dado que obviamente ahora lo sé)? ¡Muy fácil! En cuanto apareció el primer ensayo en la revista, Mr. Jogn (sic) Fortier, descrito por sí mismo como «un devoto y adicto lector», cogió la máquina de escribir para señalar el error. Ni siquiera usó la trigonometría para este fin, sino unos ordinarios cálculos aritméticos. (Yo hubiera podido hacer lo mismo, de haber sido lo suficientemente listo.)

Y lo que es más, señaló algo todavía más ridículo que aparecía el mismo artículo. Las cosas fueron así...

Yo deseaba mencionar el tamaño aparente de Júpiter, su «diámetro angular», tal y como se ve desde la Tierra. Realmente no tenía la menor importancia para el artículo, era sólo algo accesorio, cogido por los pelos. Comprobé el diámetro angular

de Júpiter, y el valor máximo, cuando se encuentra más cerca de la Tierra, es de 50 segundos de arco.

¡Correcto! ¡Muy bien! Excepto que de alguna manera, durante el tiempo transcurrido entre que mis ojos abandonaron el libro de referencia y el momento en que enfocaron la máquina de escribir, una extraña mutación cambió la frase en mi cabeza por «50 minutos de arco»... Pero yo deseaba segundos de arco, y sabía muy bien que cada minuto de arco equivale a 60 segundos de arco, por lo que multipliqué 50 por 60 y, concienzudamente, mecanografié la afirmación que el diámetro angular de Júpiter era de 3.000 segundos de arco.

Y así fue también como apareció en la revista. De haber dejado de escribir a toda velocidad el tiempo suficiente para pensar durante un quinto de segundo, hubiera recordado que la Luna tenía un diámetro angular de 30 minutos de arco, o 1.800 segundos de arco, y que, por lo tanto, estaba proporcionando al firmamento de la Tierra un Júpiter mucho más grande en apariencia que la Luna.

Mi rostro se tiñó del más bonito rojo cereza cuando Mr. Fortier lo indicó. Naturalmente, eliminé al instante esta afirmación errónea, y en este libro aparecen las cifras correctas.

O, también, en el capítulo titulado «Donde todo el firmamento es sol», al principio hice la afirmación gratuita de que el oro, salvo por el valor artificial que le concede la gente a causa de su belleza y rareza, era inútil, que no tenía ningún uso que valiera la pena mencionar.

Al instante, dos queridos amigos míos, Lester del Rey (que se menciona en la introducción del último capítulo) y Jay Kay Klein, me escribieron unas largas cartas, haciendo una lista de toda clase de usos que tendría el oro en el caso de que fuese más abundante y barato. Para este libro, eliminé esa ofensiva frase como si se hubiera convertido en hierro candente en mis manos. Que en cierto modo, era lo que había ocurrido.

Y así son las cosas. Puedo escribir con la rapidez con que lo hago porque tengo unos lectores con vista de lince que comprueban cada una de las observaciones que realizo y me informan de cada error y desliz al instante, para que pueda corregirlo y aprender de mis errores.

¿Qué haría sin ellos? ¿Puedo aprovechar esta oportunidad para dar las gracias a

todos –a todos – quienes me han enviado una carta para corregirme y me han ayudado a aprender? Déjenme también decir que todas las cartas de esta clase que he recibido han sido, sin excepciones, redactadas en un tono de lo más agradable y educado. Y también les doy a ustedes humildemente las gracias por ello.

Capítulo 1

El Monstruo Subatómico

De vez en cuando me dicen que me he «equivocado de vocación». Naturalmente, esto me lo dicen, como broma sin mala intención, y por lo general cuando he dado una charla divertida o he cantado alguna canción cómica. Así pues, la idea es que debería haber sido comediante o cantante, quizás.

Sin embargo, no puedo dejar pasar por alto esta observación, y, con la experiencia, he descubierto que la respuesta más efectiva a ese «Has equivocado tu vocación, Isaac», es:

–Lo sé, amigo mío, ¿pero quién quiere un viejo semental de cabello gris?

Pero nadie está a prueba de tonterías. He empleado esta réplica por lo menos cincuenta veces con el mayor de los éxitos, pero hace unos cuantos días, al intentarlo de nuevo, me llegó esta instantánea respuesta:

– ¡Una vieja ninfomaniaca de cabello gris!

Y con esto me devolvieron la pelota elegantemente, y tuve que aguardar un buen rato hasta que cesaron las risas. (Incluidas las mías).

Pero, en realidad, no he errado mi vocación, y todo el mundo lo sabe. Mi vocación es ser escritor, y eso es lo que soy. En particular, mi vocación es explicar, y eso es lo que hago también. Por lo tanto, si no les importa, proseguiré con mi vocación.

Por ejemplo: ¿cómo se mide la energía?

Verán, el trabajo significa un gasto de energía, y, por así decirlo, no es otra cosa que energía en acción. Una forma de definir el trabajo es decir que implica el vencimiento de una resistencia a cierta distancia en particular. Se vence la resistencia ejerciendo fuerza.

Por ejemplo, la atracción gravitatoria de la Tierra tiende a tener un objeto sobre el suelo. Para levantarlo, hay que ejercer una fuerza que venza la resistencia gravitatoria.

Cuanto mayor sea el peso del objeto a levantar, mayor será la fuerza que se habrá de hacer y mayor el trabajo que se realiza. Cuanto más larga sea la distancia en la que se alce el peso, más trabajo se efectuará. Así pues, el trabajo (y la energía

consumida), es igual a la fuerza por la distancia.

Si usted levanta un peso de 1 libra en una distancia de un pie (453,6 g x 30,48 cm), ha hecho 1 «pie-libra» de trabajo. (Observe se pone primero la distancia en esta unidad de trabajo. No existe razón para no colocar primero el peso y llamarlo 1 «libra-pie» pero nadie lo hace y en todos los idiomas y culturas la explicación de «nadie lo hace» es la frase más sin respuesta que hay.)

Entonces, si usted pesa 150 libras y sube un tramo de escaleras que le hace ascender 8 pies, habrá realizado 150×8 , o 1.200 pies de trabajo. Dado que he observado que, con frecuencia, un tramo de escaleras tiene 13 escalones, el trabajo efectuado por alguien que pese 150 libras al subir un escalón es de $1.200/13$, o sea 92,3 pies-libras.

Pero «pies» y «libras» son unidades del sistema común que los físicos miran con desprecio. El sistema métrico decimal es utilizado universalmente fuera de Estados Unidos, y los científicos lo emplean incluso en los Estados Unidos. La unidad de distancia del sistema métrico es el metro, que equivale a 3,281 pies; el kilogramo, que equivale a 2,2046 libras, se usa para el peso.

Una unidad de energía en el sistema métrico sería, pues, 1 «kilográmetro» (aquí el peso está primero, y usted no dirá «metro-kilogramo» porque –todos a la vez – «nadie lo hace»). Un kilográmetro es igual a 2,2046 libras por 3,281 pies, o 7,233 pies-libras. Por lo tanto, para una persona de 150 libras de peso, subir un escalón de un tramo de escaleras significa efectuar 12,76 kilográmetros de trabajo.

El empleo del peso como parte de una unidad de trabajo no es lo ideal. No es erróneo hacerlo así, puesto que el peso es una fuerza, pero ése es precisamente el problema. Las unidades empleadas popularmente para el peso (libras o kilogramos) no son, estrictamente hablando, unidades de fuerza, sino unidades de masa. La confusión surge porque el peso ha sido comprendido desde los tiempos prehistóricos, en tanto que el concepto de masa fue aclarado por vez primera por Isaac Newton y la masa es tan similar al peso en circunstancias ordinarias, que incluso los científicos caen en la trampa de emplear las unidades de peso, establecidas hace tanto tiempo, también como masa, creando con ello la confusión.

Si nos olvidamos del peso y tratamos sólo con la masa, la definición de fuerza (que surge de la segunda ley del movimiento de Newton) es la de masa multiplicada por

aceleración. Supongamos que imaginamos una fuerza capaz de acelerar una masa de 1 kilogramo por una cantidad igual a 1 metro por segundo cada segundo. Esa fuerza es igual a 1 kilográmetro por segundo cada segundo, o (empleando abreviaciones) 1 kgm/seg^2 . Para mayor brevedad, a 1 kgm/seg^2 se le llama «1 newton» en honor del gran científico. Por lo tanto, la fuerza requerida para levantar un peso de 1 kilogramo es de 9,8 newtons. Inversamente, 1 newton es la fuerza requerida para levantar un peso de 0,102 kilogramos.

Dado que trabajo es fuerza por distancia, la unidad de trabajo debería ser 1 newton de fuerza consumida en una distancia de 1 metro. Esto sería 1 newton–metro. Al newton–metro se le suele denominar «julio», por el físico inglés James Prescott Joule, que realizó importantes trabajos sobre energía. Por tanto, la unidad de trabajo es 1 julio, y puesto que el newton equivale a un peso de 0,102 kilogramos, 1 julio es igual a 0,102 kilográmetros. Por consiguiente, levantar 150 libras sobre un escalón de un tramo de escaleras representa una cantidad de trabajo igual a 125 julios.

Como ven, el julio es una buena unidad de energía para la vida cotidiana, dado que una acción corriente representa un número pequeño que se maneja con facilidad.

Sin embargo, supongamos que se quiere tratar con cantidades de trabajo o de energía mucho más pequeñas. Entonces se tendrían que utilizar diminutas fracciones de un julio. Sería útil tener una unidad más pequeña.

En vez de una fuerza que imparte a un kilogramo una aceleración de 1 metro por segundo cada segundo, imaginemos una fuerza que imparte a 1 gramo una aceleración de 1 centímetro por segundo cada segundo. En ese caso se tendrá una fuerza de 1 gramo–centímetro por segundo cada segundo, o 1 g-cm/seg^2 , que puede definirse como «1 dina» (la primera sílaba de una palabra griega que significa «poder»).

Dado que un gramo es 1/1.000 de un kilogramo, y un centímetro es 1/100 de un metro, una fuerza de una dina produce 1/100 de la aceleración en 1/1.000 de la masa, en comparación con la fuerza de 1 newton. Por consiguiente, 1 dina es igual a $1/100 \times 1/1.000$, o $1/100.000$ de newton. Es lo mismo que decir que 1 newton = 100.000 dinas.

Si suponemos que se gasta 1 dina en una distancia de 1 centímetro, esto nos da

como unidad de trabajo «1 dina–centímetro», o «ergio» (primera sílaba de una voz griega que significa «trabajo»). Dado que un julio es el resultado de un newton consumido una distancia de 1 metro, mientras que un ergio es el resultado una dina (1/100.000 de un newton) gastada en un a distancia de 1 centímetro (1/100 de un metro), 1 ergio es igual a $1/100.000 \times 1/100$, o $1/10.000.000$ de un julio. Es lo mismo que decir que $1 \text{ julio} = 10.000.000 \text{ ergios}$.

Una persona de 150 libras de peso que suba un escalón de un tramo de escaleras realiza 13.000.000 de ergios de trabajo. Este número muy incómodo para la vida corriente, pero muy manejable para científicos que trabajan con pequeñas cantidades de energía.

Sin embargo, incluso el ergio es con mucho una unidad demasiado grande cuando se tiene que tratar con átomos individuales y partículas subatómicas. Para estas cosas, necesitamos una unidad aún más pequeña.

Así, en vez de emplear una masa de un kilogramo o un gramo, utilicemos la masa más pequeña que definitivamente se sabe que existe. Se trata de la masa de un electrón, que es de 0,000000000000000000000000091095 gramos, o $9,1095 \times 10^{-28}$ gramos. Para evitar todos estos ceros, podemos tomar la masa de un electrón como igual a «1 electrón».

Un electrón lleva una carga eléctrica, y por tanto incluye una aceleración en un campo eléctrico. Esta propiedad del campo eléctrico que induce una aceleración es su voltaje, por lo que podemos suponer que un electrón recibe una aceleración producida por 1 voltio ¹.

Dada la masa y la carga del electrón, el trabajo realizado cuando se le expone a la aceleración producida por 1 voltio es «1 electrón–voltio». En forma abreviada, es «1 eV».

Ésta es una unidad de trabajo verdaderamente muy pequeña.

En realidad, 1 electrón–voltio es igual a sólo un poco más de una billonésima de ergio. Para ser más precisos, $1 \text{ electrón–voltio} = 0,00000000016 \text{ ergios}$, o $1,6 \times 10^{12}$ ergios. (A propósito, recuerden que todas las unidades de trabajo sirven también como unidades de energía.)

Cabe decir que la masa es una forma de energía, una forma muy concentrada. Por

¹ Estoy resistiéndome al impulso de explicar las distintas unidades eléctricas. Eso quedará para otro ensayo en otra ocasión.

lo tanto, la masa puede expresarse en unidades de energía, pero la masa es una energía tan concentrada, que las unidades de energía corrientes son incómodas para emplearlas con respecto a masas ordinarias.

Por ejemplo, tomemos una masa de 1 gramo. No es mucho. Es sólo la masa de un colibrí aún no crecido del todo. La energía equivalente de esta masa, según la célebre ecuación de Albert Einstein, es $E = mc^2$, donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz. Estamos tomando la masa como 1 gramo, y la velocidad de la luz es de 29.980.000.000 centímetros por segundo (una combinación que nos dará la energía equivalente en ergios). La energía contenida en 1 gramo de masa es, pues, $1 \times 29.980.000.000 \times 29.980.000.000 \times 898.800.000.000.000.000$ o bien $8,988 \times 10^{20}$ ergios. Admitirán que es muchísimo más fácil hablar de 1 gramo que de casi un cuatrillón de ergios.

Sin embargo, cuando volvemos al electrón las cosas se invierten. Cuando multiplicamos la pequeña masa de un electrón, $9,1095 \times 10^{-28}$ gramos, por el equivalente en energía de 1 gramo, que es $8,988 \times 10^{20}$ ergios, el resultado es el equivalente en energía de la masa de un electrón de $8,1876 \times 10^{-7}$ ergios. En otras palabras, el equivalente en energía de la masa de un electrón es un poco menor que una millonésima de un ergio, la cual resulta difícil de manejar.

No obstante, si convertimos ese equivalente de energía en electrón-voltios, que son mucho más diminutos que los ergios, el resultado será que el equivalente de energía de la masa de un electrón es igual a, aproximadamente, 511.000 electrón-voltios.

Naturalmente, 511.000 puede aún considerarse un número demasiado grande para resultar cómodo, pero 1.000 electrón-voltios equivalen a 1 kilo-electrón-voltio (keV), y 1.000.000 electrón-voltios es igual a 1 megaelectrón-voltio (MeV), por lo que podemos decir que el equivalente de energía de la masa de un electrón es aproximadamente igual a medio MeV.

El electrón (y su número opuesto, el positrón) posee, como ya he dicho antes, las masas más pequeñas de cualquier objeto que, con certeza, sabemos que tiene masa. Es posible incluso que no pueda existir ninguna masa menor que sea todavía mayor que cero. Existe alguna posibilidad de que los varios neutrinos puedan tener masas aún más pequeñas, masas tan pequeñas como de 40 electrón-voltios, pero

eso hasta ahora no se ha demostrado.

¿Y qué hay de las partículas con más masa?

Los electrones constituyen las regiones exteriores de los átomos, pero protones y neutrones forman los núcleos de los átomos, y los protones y neutrones tienen bastante más masa que los electrones. Un protón posee el equivalente de energía de 938.200.000 electrón-voltios, o 938,2 MeV, y eso es 1.836 veces más masa que un electrón. El neutrón tiene un equivalente de energía de 939.500.000 electrón-voltios, o 939,5 MeV, y así tiene 1.838,5 veces más masa que el electrón y 1,0014 veces más masa que el protón.

Una energía de 1.000.000.000 electrón-voltios es 1 giga-electrón-voltio (1 GeV), por lo que podemos decir que el protón y el neutrón están muy cerca de 1 GeV en equivalente de energía.

Existen partículas subatómicas con más masa que el protón y el neutrón. Por ejemplo, la partícula W (algo de lo que quizás hablaré en un próximo ensayo) ha sido descubierta recientemente y tiene aproximadamente 80 veces más masa que un protón, por lo que su equivalente de energía es de unos 80 GeV, o bien 80.000.000.000 de electrón-voltios. Los núcleos de los elementos con más masa poseen equivalentes de energía de casi 250 GeV, que es aún más de tres veces mayor, pero esos núcleos son conglomerados de más de 250 partículas subatómicas.

Sin embargo, si deseamos un auténtico monstruo subatómico, deberemos realizar primero una digresión.

Electricidad y magnetismo están íntimamente relacionados; en realidad, resultan inseparables. Todo lo que posee un campo eléctrico tiene un campo magnético, y viceversa. De hecho, los científicos normalmente hablan de un campo electromagnético, más que de un campo eléctrico o magnético por separado. Hablan de la luz como de una radiación electromagnética, y de la interacción electromagnética como de una de las cuatro interacciones fundamentales de la Naturaleza.

Naturalmente, pues, no resulta sorprendente que la electricidad y el magnetismo, cuando se consideran por separado, muestren numerosas semejanzas. Así, un imán tiene dos polos, que presentan extremos opuestos, por así decirlo, de propiedades

magnéticas. Les llamamos «polo norte» y «polo sur». Existe una atracción entre los polos norte y sur, y una repulsión entre dos polos norte o entre dos polos sur. De forma semejante, un sistema eléctrico tiene dos extremos opuestos, que llamamos «carga positiva» y «carga negativa». Existe una atracción entre una carga positiva y otra negativa, una repulsión entre dos cargas positivas o entre dos cargas negativas.

En cada caso, la atracción y la repulsión son de intensidades iguales, y tanto la atracción como la repulsión se hallan en proporción inversa al cuadrado de la distancia.

Sin embargo, queda una enorme diferencia de una clase.

Suponga que tiene una varilla de material aislante en la que, de una forma u otra, ha producido en un extremo una carga negativa y en la otra, una carga positiva. Así, pues, si se rompe la varilla por la mitad, una de esas mitades tiene una carga completamente negativa, y la otra mitad es enteramente positiva. Y lo que es más, existen partículas subatómicas, como los electrones, que llevan sólo una carga negativa y otros, como los protones, que llevan sólo una carga positiva.

No obstante, supongamos que tiene un imán largo, con un polo norte en un extremo y un polo sur en el otro. Si lo rompemos por la mitad, ¿existe una mitad enteramente polo norte y otra mitad enteramente polo sur?

¡No! Si se parte un imán en dos, la mitad del polo norte, al instante, desarrolla un polo sur en donde se ha roto, mientras que la mitad del polo sur desarrolla en el punto de ruptura un polo norte. Es imposible hacer nada para que cualquier objeto posea sólo 1 polo magnético; ambos están siempre presentes. Incluso las partículas subatómicas que poseen una carga eléctrica y, por ende, un campo magnético asociado, poseen un polo norte y un polo sur.

Tampoco parece que existan partículas subatómicas concretas que lleven solo polos norte o sólo polos sur, aunque hay incontables partículas subatómicas que llevan sólo cargas positivas o sólo cargas negativas. No parece existir algo, en otras palabras, como un «monopolo magnético».

Hacia 1870, cuando el físico escocés James Clerk Maxwell elaboró por primera vez las relaciones matemáticas que describían el campo electromagnético como un fenómeno unificado, presentó el mundo con cuatro concisas ecuaciones que

parecían totalmente suficientes para el propósito para el que habían sido ideadas. En caso de haber existido monopolos magnéticos, las cuatro ecuaciones hubieran sido bellamente simétricas, con lo que electricidad y magnetismo habrían representado una especie de imagen de espejo uno del otro. Sin embargo, Maxwell dio por supuesto que los polos magnéticos siempre existían por parejas mientras que las cargas eléctricas no, y esto, forzadamente, introducía una asimetría.

A los científicos les disgustan las asimetrías, puesto que ofenden el sentido estético e interfieren en la simplicidad (el desiderátum de la ciencia perfecta), así que ha existido siempre una constante sensación de que el monopolo debería existir; de que su no existencia representa un defecto en el diseño cósmico.

Después de que fuese descubierto el electrón, se llegó a saber finalmente que la carga eléctrica está cuantificada; es decir, que todas las cargas eléctricas son múltiplos exactos de algún valor fundamental más pequeño.

Así, todos los electrones poseen una idéntica carga negativa y todos los protones una carga positiva idéntica, y las dos clases de carga son exactamente iguales la una a la otra en tamaño. Todos los otros objetos con carga conocidos tienen una carga eléctrica que es exactamente igual a la del electrón, o a la del protón, o es un múltiplo exacto de una u otra.

Se cree que los quarks tienen cargas iguales a $1/3$ y $2/3$ de la del electrón o protón, pero los quarks no han sido nunca aislados; e incluso aunque lo fuesen, esto meramente representaría que el valor fundamental más pequeño es un tercio de lo que se creía que era. El principio de la cuantificación permanecería.

¿Por qué la carga eléctrica debe cuantificarse? ¿Por qué no podría existir en un valor desigual, exactamente como lo hace la masa? A fin de cuentas, la masa de un protón es un múltiplo enteramente desigual de la masa de un electrón. ¿Por qué no habría de ocurrir lo mismo con la carga?

En 1931, el físico inglés Paul A. M. Dirac planteó la cuestión de una forma matemática, y llegó a la decisión de que esta cuantificación de la carga sería una necesidad lógica si existiesen los monopolos magnéticos. En realidad, aun cuando hubiese sólo un monopolo en algún lugar del Universo, la cuantificación de la carga sería una necesidad.

Resulta tentador argumentar a la inversa, naturalmente: pues que la carga eléctrica

está cuantificada, los monopolos magnéticos deben existir en algún lugar. Parecía acertado buscarlos.

Pero ¿dónde y cómo pueden encontrarse, si es que existen? Los físicos no lo sabían y, lo que era peor, no estaban seguros de cuáles podrían ser las propiedades de esos monopolos. Parece natural suponer que eran partículas con bastante masa, porque no serlo no serían muy comunes y no podrían producirse con facilidad en el laboratorio; y esto explicaría el por qué nadie había tropezado con ellos de manera accidental.

No existió ninguna guía teórica hasta los años setenta, cuando había gente elaborando algunas grandes teorías unificadas con propósito de combinar las interacciones débiles, fuertes y electromagnéticas, todo ello bajo una simple serie de ecuaciones (véase *Contando los Eones*, del mismo autor.)

En 1974, un físico neerlandés, Gerardt Hooft, y un físico soviético, Alexandr Poliakov, mostraron, de forma independiente, que de las grandes teorías unificadas podía deducirse que monopolos magnéticos debían existir, y que no tienen meramente mucha masa, sino que son unos monstruos.

Aunque un monopolo sería aún más pequeño que un protón, envuelta en su pequeñez podría haber una masa de entre diez trillones y diez cuatrillones de veces la del protón. Si se encontrase en el extremo superior de este ámbito, un monopolo tendría un equivalente en energía de 10.000.000.000.000.000.000.000.000.000 electrón-voltio (10^{28} eV).

¿Y qué cantidad sería eso en masa? Al parecer, un monopolo magnético podría tener una masa de hasta $1,8 \times 10^{-9}$ gramos. Esto equivale a la masa de 20 espermatozoides humanos, todos metidos en una sola partícula subatómica.

¿Cómo pueden formarse estos monstruos subatómicos? No existe modo alguno de que los seres humanos puedan encerrar tanta energía en un volumen subatómico de espacio, ni en actualidad ni en un futuro previsible. En realidad, no existe ningún proceso natural que tenga lugar en alguna parte del Universo ahora (por lo que sabemos) que pudiera crear una partícula con una masa tan monstruosa.

La única posibilidad es volver al Big Bang, o gran explosión inicial, cuando las temperaturas eran increíblemente elevadas y las energías estaban increíblemente concentradas (véase también el libro citado de *Contando los Eones*). Se calcula que

los monopolos debieron formarse sólo 10^{-34} segundos después del Big Bang. Después, el Universo habría sido demasiado frío y demasiado grande para este propósito.

Probablemente, se formaron los monopolos norte y sur, quizás en cantidades enormes. Probablemente, un gran número de ellos se aniquilaron los unos a los otros, pero cierto número debió de sobrevivir, simplemente porque, por pura casualidad, no llegaron a encontrar otros del tipo opuesto. Después de que los monopolos sobrevivieran cierto tiempo, la firme expansión del Universo hizo cada vez menos probable que se produjesen colisiones, y esto aseguró su ulterior supervivencia. Por lo tanto, hoy existe cierto número de ellos flotando en torno del Universo.

¿Cuántos? No demasiados, pues por encima de cierto número el efecto gravitatorio de esas monstruosas partículas hubiera asegurado que el Universo, antes de ahora, alcanzase un tamaño máximo y se derrumbase de nuevo por su propio impulso gravitatorio. En otras palabras, podemos calcular una densidad máxima de monopolos en el Universo simplemente reconociendo el hecho de que nosotros mismos existimos.

Sin embargo, aunque en escaso número, un monopolito debería, de vez en cuando, moverse en las proximidades de un aparato de grabación. ¿Cómo podría detectarse?

En un principio, los científicos, suponían que los monopolos se movían a casi la velocidad de la luz, como lo hacen las partículas de rayos cósmicos; y como las partículas de rayos cósmicos, los monopolos deberían estrellarse contra otras partículas en su camino y producir una lluvia de radiación secundaria que se podría detectar con facilidad, y a partir de la cual el mismo monopolito se podría identificar. Ahora que se cree que el monopolito es de una masa monstruosa, las cosas han cambiado. Estos enormes monopolos no podrían acumular suficiente energía para moverse muy rápidamente, y se estima que deben de viajar a una velocidad de un par de centenares de kilómetros por segundo; es decir, menos de una milésima parte de la velocidad de la luz. A tan bajas velocidades, los monopolos simplemente se deslizarían al lado y a través de la materia, sin dejar ninguna señal de la que hablar. Es posible que esto explique el que hasta aquí no se hubieran descubierto

los monopolos.

Bueno, entonces, ¿qué debe hacerse?

Un físico de la Universidad de Stanford, Blas Cabrera, tuvo una idea. Un imán que impulse energía a través de una bobina de cable enviará una oleada de corriente eléctrica a través de ese cable. (Esto se conoce desde hace un siglo y medio.) ¿Por qué no instalar una bobina así y esperar? Tal vez pasaría un monopolito magnético a través de la bobina y señalaría su paso mediante una corriente eléctrica. Cabrera calculó las posibilidades de que esto sucediera basándose en la densidad más alta del monopolito dado el hecho de que el Universo existe, y decidió que semejante eventualidad podía ocurrir como promedio, cada seis meses.

Por lo tanto, Cabrera instaló una bobina de metal de niobio, y la mantuvo a una temperatura cercana al cero absoluto. En esas condiciones, el niobio es superconductor y posee una resistencia cero ante una corriente eléctrica. Esto significa que si de alguna forma comienza a fluir por el mismo una corriente, esa corriente fluirá de manera indefinida. Un monopolito que pase a través de la bobina no dará lugar a una oleada instantánea de corriente, sino una corriente continua. Naturalmente, una corriente podría ser iniciada por cualquier viejo campo magnético que se encontrase cerca; el propio campo magnético de la Tierra, los que son establecidos por cualquiera de los mecanismos técnicos que le rodean, incluso por pedazos de metal que se estén moviendo porque se encuentran en el bolsillo de alguien.

Por tanto, Cabrera colocó el carrito dentro de un globo de plomo superconductor, el cual estaba dentro de un segundo globo plomo superconductor. Los campos magnéticos ordinarios no traspasarían el plomo superconductor, pero un monopolito magnético lo haría.

Aguardó durante cuatro meses y no sucedió nada. El nivel corriente, señalado en un rollo móvil de papel, permaneció durante todo ese tiempo cerca de cero. Esto en sí era bueno. Demostraba que había excluido con éxito los campos magnéticos al azar. Luego, a la 1:53 de la tarde del 14 de febrero de 1982, se produjo un flujo repentino de electricidad, y en la cantidad exacta que cabría esperar si hubiese pasado a través de allí un monopolito magnético.

Cabrera comprobó todas las posibles eventualidades que podían haber iniciado la

corriente sin la ayuda de un monopolio, y no pudo encontrar nada. El monopolio parecía la única alternativa posible.

Así pues, ¿se ha detectado el esquivo monopolio? En este caso se trata de una notable proeza y de un fuerte apoyo a la gran teoría unificada.

Sin embargo, el problema es que no se repitió ese suceso único, y resulta difícil basar algo en un solo caso.

Asimismo, la estimación de Cabrera del número de monopolos que están flotando por ahí se basaba en el hecho de que el Universo se encuentra aún en expansión. Algunas personas creen que existe una restricción más fuerte derivada de la posibilidad de que esos monopolos que flotan por la galaxia borren el campo magnético galáctico general. Puesto que el campo magnético galáctico aún existe (aunque sea muy débil), esto podría establecer un valor máximo de la densidad del monopolio aún mucho más bajo, tan bajo tal vez como 1/10.000 de la cifra de Cabrera.

Si eso fuese así, cabría esperar que pasase un monopolio a través de su carrete una vez cada 5.000 años como promedio. Y en este caso que hubiese pasado uno después de esperar sólo cuatro meses es pedir una suerte excesiva, y se hace difícil creer que se tratase de un monopolio.

Sólo se puede hacer una cosa, y los físicos lo están haciendo. Continúan sus investigaciones. Cabrera está construyendo una versión mayor y mejor de su mecanismo, lo cual incrementará en cincuenta veces sus posibilidades de hallar un monopolio. Otros físicos están ideando otras formas de abordar su descubrimiento.

En los próximos años, la búsqueda del monopolio aumentará enormemente en intensidad, porque hay mucho en juego. Su descubrimiento definitivo nos proporcionará una indicación de las propiedades del monstruo subatómico y de sus números. Y a partir de ello, podemos aprender cosas acerca del principio del Universo, por no hablar de su presente y de su futuro, algo que, en caso contrario, tal vez jamás averiguaríamos.

Y, naturalmente, hay un Premio Nobel que está esperando a alguien.

Capítulo 2

E Pluribus Unum

Mi querida esposa, Janet, es una auténtica escritora, que ya había vendido bastante antes de conocerme. En la actualidad, ha publicado dos novelas (The Second Experiment y The Last Immortal), bajo su nombre de soltera, J. O. Jeppson, y ha colaborado conmigo en la antología de ciencia ficción humorística (incluyendo versos y chistes) titulada "Laughing Space". Los tres libros han sido publicados por Houghton Mifflin. Además, Doubleday ha publicado un libro de sus relatos cortos. Y lo que es mejor aún, ha publicado un alegre libro de ciencia ficción juvenil que lleva el título de "Norby, the Mixed-up Robot" (Walker, 1983), en colaboración conmigo, y la autoría incluso reconoce nuestro matrimonio. El nombre de los autores es el de «Janet e Isaac Asimov». Es el primero de una serie, y el segundo, "Norby's Other Secret", se editó en 1984. Es agradable vernos unidos así, en letras de molde.

En realidad, la unificación es muy agradable en numerosos campos. Los norteamericanos están sin duda contentos que trece Estados independientes decidieran unirse en un solo Gobierno federal. Esto es lo que ha hecho de "E pluribus unum" (en latín, «De muchos, uno») una frase tan asociada con los Estados Unidos. Y a los científicos les gusta también la unidad, y les complace mostrar que sucesos que pueden parecer totalmente distintos son, en realidad, aspectos diferentes de un solo fenómeno.

Empecemos con la «acción a distancia».

Normalmente, si se quiere conseguir alguna acción como impartir movimiento a un objeto que está en reposo, debe establecerse un contacto físico con el mismo, directa o indirectamente. Se le puede golpear con la mano o con el pie, o con un palo o una maza que se sostenga. Se puede sujetarlo en la mano mientras uno hace que la mano se mueva, y luego soltarlo. Se puede arrojar un objeto de esta manera y hacerlo chocar contra un segundo objeto, al que de este modo imparte movimiento. En realidad, es posible mover un objeto y lograr que ese movimiento se transmita, poco a poco, a numerosos objetos (como al caer una hilera de fichas de dominó). Se puede también soplar, consiguiendo que el aire se mueva y, gracias

a su impacto, que se desplace otra cosa.

Sin embargo, ¿podría conseguirse que un objeto distante se moviera sin tocarlo, y sin permitir que algo que usted haya tocado previamente lo toque? En ese caso, tendríamos una acción a distancia.

Por ejemplo, supongamos que usted sostiene una bola de billar a la altura de los ojos sobre el suelo. Usted la sujeta bien para que esté perfectamente inmóvil y luego, de repente, la suelta. Usted la ha estado tocando, ciertamente, pero al soltarla ha dejado de tocarla. Sólo después de dejar de tocarla cae al suelo. Ha sido movida sin que hubiera ningún contacto físico.

La Tierra atrae la bola, y a esto le llamamos «gravitación». La gravitación parece ser un ejemplo de acción a distancia.

O pensemos en la Luz. Si sale el Sol, o se enciende una lámpara, una habitación queda iluminada al instante. El sol o la lámpara originan la iluminación sin que nada material parezca intervenir en el proceso. Y esto también parece una acción a distancia. Digamos de paso que la sensación de calor que producen el Sol o la lámpara puede sentirse a cierta distancia. Y éste es otro ejemplo.

También se cree que hacia el año 600 a. de C., el filósofo griego Tales (624-546 a. de C.) estudió, por primera vez, una piedra negra que poseía la capacidad de atraer objetos de hierro a distancia. Dado que la piedra en cuestión procedía de los alrededores de la ciudad griega de Magnesia, en la costa de Asia Menor, Tales la llamó "ho magnetes lithos" («la piedra magnética») y el efecto se ha llamado desde entonces «magnetismo».

Tales descubrió asimismo que si se frota una varilla de ámbar, ésta puede atraer objetos ligeros a distancia. La varilla de ámbar atrae objetos que no se ven afectados por un imán, por lo que constituye un fenómeno diferente. Dado que la voz griega para ámbar es elektron, el efecto ha sido denominado desde entonces «electricidad». El magnetismo y la electricidad parecen representar, también, acciones a distancia.

Finalmente, tenemos el sonido y el olor. Si una campana suena a distancia, usted la oye aunque no exista contacto físico entre la campana y usted. O coloque un bistec encima de una llama y lo olerá a distancia.

Tenemos, pues, siete de estos fenómenos: gravitación, luz, calor, magnetismo,

electricidad, sonido y olor.

En realidad, los científicos se sienten incómodos con la noción de acción a distancia.

Existen tantos ejemplos de efectos que sólo pueden producirse con alguna clase de contacto, que los pocos ejemplos que parecen omitir el contacto suenan a falsos.

Tal vez haya contacto, pero de una forma tan sutil que no lo notamos.

El olor es el fenómeno de este tipo más fácil de explicar. El filete encima del fuego chisporrotea y humea. Resulta obvio que se sueltan pequeñas partículas y flotan en el aire. Cuando alcanzan la nariz de alguien, entran en acción con sus membranas y son interpretadas como olor. Con el tiempo, esto se vio confirmado por entero. El olor es un fenómeno que implica contacto, y no es una acción a distancia.

En cuanto al sonido, el filósofo griego Aristóteles (384-322 a. de C.), hacia el año 350 a. de C., tras haber observado que los objetos que emitían sonidos vibraban, sugirió que las vibraciones golpean el aire que está inmediatamente a su alrededor y lo hacen vibrar; este aire hace vibrar el aire que le rodea y así sucesivamente, como una serie de invisibles fichas de dominó. Al final, la vibración progresiva alcanza el oído y lo hace vibrar, y así oímos el sonido.

En esto, como en realidad sucedió, Aristóteles estaba perfectamente en lo cierto: pero ¿cómo podía probarse su sugerencia? Si el sonido es conducido por el aire, no debería transmitirse en el caso que no hubiera ya aire. Si una campana suena en el vacío, no debería emitir ningún sonido. El problema era que ni Aristóteles ni nadie más de su tiempo, ni durante casi dos mil años después, pudo producir el vacío y probar el asunto.

En 1644, el físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) puso un largo tubo lleno de mercurio en posición vertical en un plato con mercurio, y vio que se derramaba un poco del mismo. El peso de la atmósfera de la Tierra sólo sostenía 76 cm de mercurio. Cuando el mercurio se derramó, dejó detrás, entre el nivel sumergido y el extremo cerrado del tubo, un espacio que no contenía nada, ni siquiera aire; por lo menos, nada excepto algunas pequeñas trazas de vapor de mercurio. De esta forma, los seres humanos consiguieron el primer vacío decente, pero se trataba de uno muy pequeño, cerrado y no demasiado útil para la experimentación.

Unos años más tarde, en 1650, el físico Otto von Guericke (1602-1686) inventó un

artilugio mecánico que, poco a poco, succionaba al exterior el aire de un contenedor. Esto le permitió conseguir un vacío a voluntad. Por primera vez, los físicos fueron capaces de experimentar con vacíos.

En 1657, el físico irlandés Robert Boyle (1627-1691) oyó hablar de la bomba de aire de von Guericke, y consiguió que su ayudante, Robert Hooke (1635-1703), ideara una mejor. En poco tiempo demostró que una campana que se hacía sonar dentro de un contenedor de cristal en el que se había hecho el vacío, no emitía ningún sonido. En cuanto se permitía que el aire entrara en el recipiente, la campana sonaba. Aristóteles tenía razón, y el sonido, al igual que el olor, no representaba una acción a distancia.

(No obstante, tres siglos y cuarto después, los que hacen películas aún permiten a las naves espaciales avanzar a través de l espacio con un zumbido y estallar con estrépito. Supongo que, o bien los que hacen películas son ignorantes, o, más probablemente, dan por supuesto que el público lo es y creen que tienen un derecho divino para proteger y preservar esa ignorancia.)

La cuestión es, por lo tanto qué fenómenos se harán sentir por sí mismos a través de un vacío. El hecho que la presión del aire sólo sostenga una columna de mercurio de 76 cm de altura significa que el aire únicamente puede extenderse unos cuantos kilómetros por encima de la superficie de la Tierra. A partir de una altura de unos 16 kilómetros, sólo quedan unas relativamente delgadas volutas de aire. Esto significa que el espacio de 150.000.000 de kilómetros que hay entre el Sol y la Tierra no es virtualmente, más que, vacío, y sin embargo sentimos el calor del Sol y vemos su luz, mientras que la Tierra responde a la atracción gravitatoria del Sol dando vueltas indefinidamente a su alrededor. Y lo que es más, resultó tan fácil demostrar que un imán o un objeto electrificado ejercía sus efectos a través de un vacío como el demostrar que una campana que sonaba no lo hacía.

Esto nos deja cinco fenómenos que representan acción a distancia: luz, calor, gravitación, magnetismo y electricidad.

No obstante, los científicos, todavía no estaban ansiosos por aceptar la acción a distancia. El científico inglés Isaac Newton (1642-1727) sugirió que la luz consistía en una pulverización de partículas muy finas que se movían rígidamente en líneas rectas. La fuente luminosa emitiría las partículas y los ojos las absorberían, en

medio, la luz podría ser reflejada por algo y los ojos verían ese algo por la luz reflejada. Dado que las partículas tocaban el objeto y luego el ojo, no era una acción a distancia, sino una acción por contacto.

Esta teoría de las partículas de luz explicaba varias cosas, como el hecho que los objetos opacos arrojen sombras bien definidas. Sin embargo, dejaba algunos interrogantes. ¿Por qué, la luz que pasaba a través de un prisma se descomponía en un arco iris de colores? ¿Por qué las partículas de luz roja se refractaban menos que las de la luz violeta? Había explicaciones para ello pero no eran del todo convincentes.

En 1803, el científico inglés Thomas Young (1773-1829) llevó a cabo unos experimentos que mostraban que la luz estaba formada por ondas (véase «X» representa lo desconocido, del mismo autor). Las ondas tenían longitudes muy diferentes; las de la luz roja eran el doble de largas que las de la luz violeta, y la diferencia en la refracción se explicaba con facilidad de este modo. La razón para las sombras bien definidas (las olas del mar y las ondas del sonido no las arrojan) radica en que las longitudes de onda de la luz son muy pequeñas. Incluso así, las sombras no están en realidad, perfectamente definidas. Existe una pequeña borrosidad («difracción») y esto pudo demostrarse.

Las ondas de la luz hicieron volver a los físicos a la acción a distancia con una venganza. Se podía afirmar que las ondas viajaban a través de un vacío... ¿pero cómo? Las ondas del agua se propagan a través del movimiento de las moléculas del agua superficial en ángulos rectos respecto a la dirección de propagación (ondas transversales). Las ondas sonoras se propagan gracias al movimiento de las partículas de aire hacia detrás y hacia delante, en la dirección de propagación (ondas longitudinales). Pero cuando las ondas de la luz viajan por el vacío, no existe material de ninguna clase que se mueva hacia arriba y hacia abajo, hacia atrás o hacia delante. En ese caso, ¿cómo tiene lugar la propagación?

La única conclusión a la que pudieron llegar los científicos fue que un vacío no podía no contener nada; que contenía algo que subía y bajaba (se descubrió que las ondas de la luz eran transversales, al igual que las ondas del agua). Por lo tanto, postularon la existencia del «éter», una palabra pedida prestada a Aristóteles. Se trataba de una sustancia tan fina y sutil que no se podía detectar con los toscos

métodos de la ciencia, sólo podía inferirse del comportamiento de la luz. Permeabilizaba todo el espacio y la materia, reduciendo lo que parecía acción a distancia a una acción por contacto: por contacto etéreo.

(Finalmente se descubrió que el éter era un concepto innecesario, pero ésta es otra historia. Por cuestión de comodidad, hablaré provisionalmente de los diversos efectos que se dejan sentir a través de un vacío como «fenómenos etéreos».)

Existen, pues, los cinco fenómenos etéreos que he mencionado anteriormente, pero, ¿no podría haber más que llegasen a descubrirse, como la electricidad y el magnetismo habían sido descubiertos por Tales? O, a la inversa, ¿no podrían ser menos? ¿Podrían existir fenómenos etéreos que, aun pareciendo realmente distintos, demostrasen ser idénticos al contemplarlos de una forma más fundamental?

Por ejemplo, en 1800 el astrónomo germano británico William Herschel (1738-1822) descubrió la radiación infrarroja: la radiación más allá del extremo rojo del espectro. Los infrarrojos afectaban tan fuertemente a un termómetro que, al principio, Herschel pensó que esa región invisible del espectro consistía en «rayos de calor».

Sin embargo, no pasó mucho antes que la teoría de las ondas de la luz quedase establecida, y se comprendió que existía una extensión de la longitud de onda mucho más amplia que la que el ojo humano estaba equipado para percibir.

Asimismo comenzó a comprenderse mejor el calor. Podía transmitirse por conducción a través de la materia sólida, o por convección en corrientes de líquido o gas en movimiento. Esto es una acción por medio de átomos o moléculas en contacto. Cuando el calor se deja sentir a través de un vacío, no obstante, con lo cual constituye un fenómeno etéreo, lo hace por la radiación de ondas de luz, particularmente en el infrarrojo. Estas radiaciones no son en sí mismas calor pero son únicamente percibidas como tales cuando son absorbidas por la materia, y la energía así absorbida, hace que los átomos y moléculas de esa materia se muevan o vibren con mayor rapidez.

Por lo tanto, podemos ampliar el concepto de luz para que signifique todo el espectro de ondas parecidas a la luz, puedan o no ser percibidas por el ojo, y de

este modo cabe incluir también el calor en su aspecto de radiaciones. La lista de los fenómenos etéreos se reduce, pues, a cuatro: luz, gravitación, magnetismo y electricidad.

¿Existe alguna posibilidad de reducir aún más esta lista? Todos los fenómenos etéreos son similares en que cada uno de ellos tiene su origen en alguna fuente e irradia hacia delante en todas direcciones por igual. Además, la intensidad del fenómeno disminuye, en cada caso, con el cuadrado de la distancia desde el origen. Si uno se encuentra a una distancia dada de una fuente de luz y mide su intensidad (la cantidad de luz que alcanza una unidad de área), y luego se separa hasta que la distancia es de 2,512 veces la distancia original, la nueva intensidad es $1/2,512$, o $1/6,31$ de lo que era la distancia original. Esta regla de «la inversa del cuadrado» puede también demostrar ser cierta en la intensidad de la gravitación, la electricidad y el magnetismo.

Pero esto tal vez no sea tan significativo como parece. Podríamos visualizar cada uno de estos fenómenos como una radiación moviéndose hacia delante con cierta velocidad fija en todas las direcciones por igual. Después de cualquier lapso concreto, el borde delantero de la ola en expansión ocupa todos los puntos en el espacio que están a una distancia concreta de la fuente. Si se conectan todos esos puntos, se hallará que se ha señalado la superficie de una esfera. La superficie de una esfera aumenta con el cuadrado de su radio, es decir, con el cuadrado de su distancia desde el punto central. Si una cantidad fija de luz (o cualquier fenómeno etéreo) se esparce por la superficie de una esfera en expansión, entonces cada vez que la superficie duplique el área, la cantidad de luz disponible por unidad de área en esa superficie se reducirá a la mitad. Puesto que el área superficial aumenta con el cuadrado de la distancia desde la fuente, la intensidad de luz (o cualquier fenómeno etéreo) disminuye con el cuadrado de la distancia desde la fuente.

Esto significa que los diversos fenómenos pueden ser, básicamente, diferentes en propiedades y, sin embargo, parecerse unos a otros al seguir la ley de la inversa del cuadrado. Pero ¿son los diversos fenómenos etéreos básicamente diferentes?

Ciertamente así lo parecen. Gravitación, electricidad y magnetismo, todos se hacen evidentes como una atracción. Esto los diferencia a los tres de la luz, que no parece estar relacionada con la atracción.

En el caso de la gravitación, la atracción es el único efecto que puede observarse. Sin embargo, en la electricidad y el magnetismo existe una repulsión al igual que una atracción. Las cargas eléctricas se repelen mutuamente, y lo mismo sucede con los polos magnéticos. No obstante, electricidad y magnetismo no son tampoco idénticos, dado que el primero parece capaz de atraer toda clase de materia, mientras que la atracción magnética parece, en gran medida, limitarse sólo al hierro.

Así, en los años 1780, el físico francés Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), que ya había mostrado que tanto electricidad como magnetismo seguían la ley de la inversa del cuadrado, argumentó de forma convincente que ambos podrían ser similares en esto, pero que eran fundamentalmente diferentes en lo esencial. Esto se convirtió en la opinión ortodoxa.

Pero incluso mientras Coulomb estaba planteando su ortodoxia, se estaba produciendo una revolución en el estudio de la electricidad.

Hasta entonces se había estado estudiando la «electrostática», la carga eléctrica más o menos inmóvil en el cristal, el azufre, el ámbar y en otros materiales que hoy se conocen como no conductores. Se observaron efectos característicos cuando el contenido eléctrico de tales objetos se descargaba y se hacía pasar toda la carga o a través de una brecha de aire, por ejemplo, para producir una chispa y un crujido, o en un cuerpo humano para producir un choque eléctrico mucho más desagradable.

En 1791, el físico italiano Luigi Galvani (1737-1798) descubrió que los efectos eléctricos podían producirse cuando dos metales diferentes entraban en contacto.

En 1800 este asunto fue llevado más allá por el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827), que utilizó una serie (o «batería») de contactos de dos metales para producir un flujo continuo de electricidad. En un abrir y cerrar de ojos, todos los físicos de Europa se pusieron a estudiar «electrodinámica».

Sin embargo, este descubrimiento hizo que la electricidad y el magnetismo parecieran más diferentes que nunca. Era fácil producir una corriente de cargas eléctricas móviles, pero ningún fenómeno análogo se observaba con los polos magnéticos.

Un físico danés, Hans Christian Oersted (1777-1851), vio las cosas de modo

diferente. Adoptado el punto de vista mino
entre electricidad y magnetismo. Una co
desarrollaba calor; si el cable era delgado,
argumentó Oersted en 1813, que si el cabl
obligada a pasar a través de él produjese efectos magnéticos?

Sin embargo, Oersted pasaba tanto tiempo enseñando en la Universidad de Copenhague, que le quedaba muy poco para experimentar, y en todo caso tampoco estaba particularmente dotado para la experimentación.

No obstante, en la primavera de 1820, se encontraba dando una conferencia sobre electricidad y magnetismo ante un auditorio general, y había un experimento que deseaba realizar pero que no había tenido tiempo de comprobar antes de la conferencia. Siguiendo un impulso, lo intentó en el transcurso de ésta. Colocó un cable delgado de platino encima de una brújula magnética, haciéndolo correr paralelo a la dirección norte-sur de la aguja, y luego hizo fluir una corriente a través del cable. Ante el asombro de Oersted (pue sto que no se trataba precisamente del efecto que esperaba), la aguja de la brújula se movió cuando se conectó la corriente. No fue una gran sacudida, y el público, al parecer, permaneció impassible, pero después de la conferencia, Oersted volvió a experimentar.

Descubrió que, cuando se hacía pasar corriente por el cable en una dirección, la aguja de la brújula giraba en el sentido de las manecillas del reloj; cuando la corriente fluía en la otra dirección, lo ha cía en sentido contrari o a las manecillas del reloj. El 21 de julio de 1820 publicó su descubrimiento, y luego dejó correr el asunto. Pero ya había hecho lo suficiente. Había establecido alguna clase de conexión entre electricidad y magnetismo, y los físicos se precipitaron a investigar más el asunto, con una avidez que no se volvió a ver hasta el descubrimiento de la fisión del uranio, más de un siglo después.

Al cabo de pocos días, el físico francés Dominique F. J. Arago (1786-1853) mostró que un cable que llevase una corriente eléctrica atraía no sólo agujas magnetizadas, sino también a las limaduras de hierro ordinarias no magnetizadas, igual que lo haría un auténtico imán. Se trataba de un efecto magnético, absolutamente indistinguible del de los imanes corrientes, originado en la corriente eléctrica.

Antes que acabase el año, otro físico francés, André Mari e Ampère (1775-1836),

mostró que dos cables paralelos que estuviesen unidos a dos baterías separadas, de tal modo que la corriente fluyese a través de cada una en la misma dirección, se atraían mutuamente. Si la corriente fluía en direcciones opuestas, se repelían uno a otro. En otras palabras, las corrientes podían actuar como polos magnéticos.

Ampere enrolló un hilo en forma de solenoide, o hélice (como un muelle de colchón) y descubrió que la corriente al fluir en la misma dirección en cada vuelta, producía un refuerzo. El efecto magnético era más fuerte que si se hubiese producido en un hilo recto, y el solenoide actuaba exactamente igual que un imán de barra, con un polo norte y un polo sur.

En 1823, un experimentador inglés, William Sturgeon (1783-1850), colocó dieciocho vueltas de cobre simple en torno de una barra de hierro en forma de U, sin permitir que, en realidad, el hierro tocase la barra. Esto concentraba el efecto magnético aún más, hasta el punto que consiguió un «electroimán». Con la corriente dada, el electroimán de Sturgeon podía alzar veinte veces su propio peso en hierro. Con la corriente desconectada, ya no era un imán y no podía levantar nada.

En 1829, el físico estadounidense Joseph Henry (1797-1878) empleó cable aislado y enrolló innumerables vueltas en torno de una barra de hierro para producir un electroimán aún más potente. Hacia 1831, había conseguido un electroimán de no gran tamaño que podía levantar más de una tonelada de hierro.

Entonces se planteó la pregunta: dado que la electricidad produce magnetismo, ¿puede el magnetismo producir también electricidad?

El científico inglés Michael Faraday (1791-1867) demostró que la respuesta era afirmativa. En 1831 colocó un imán de barra dentro de un solenoide de cable en el que no había conectada ninguna batería. Cuando metió el imán, se produjo una descarga de corriente eléctrica en una dirección (esto se observó con facilidad con un galvanómetro, que había sido inventado en 1820, empleando el descubrimiento de Oersted que una corriente eléctrica haría mover una aguja magnetizada). Cuando retiró el imán, se produjo una descarga de electricidad en la dirección opuesta.

Entonces Faraday siguió con la construcción de un mecanismo en el que se hacía girar continuamente un disco de cobre entre los polos de un imán. Se estableció así una corriente continua en el cobre, y ésta podía extraerse. Esto constituyó el primer

generador eléctrico. Henry invirtió las cosas haciendo que una corriente eléctrica hiciera girar una rueda, y esto fue el primer motor eléctrico.

Faraday y Henry, conjuntamente, iniciaron la era de la electricidad, y todo ello derivó de la observación inicial de Oersted.

Era ahora cierto que la electricidad y el magnetismo constituían fenómenos íntimamente relacionados, que la electricidad producía magnetismo y viceversa. El interrogante era si podían existir también por separado; si había condiciones en las que la electricidad no produjese magnetismo, y viceversa.

En 1864, el matemático escocés James Clerk Maxwell imaginó una serie de cuatro ecuaciones relativamente simples, que ya hemos mencionado en el capítulo 1. Describían la naturaleza de las interrelaciones de la electricidad y el magnetismo. Se hizo evidente pronto que las ecuaciones de Maxwell se cumplían en todas las condiciones y que explicaban la conducta electromagnética. Incluso la revolución de la relatividad introducida por Albert Einstein (1879-1955) en las primeras décadas del siglo XX, una revolución que modificó las leyes de Newton del movimiento y de la gravitación universal, dejó intactas las ecuaciones de Maxwell.

Si las ecuaciones de Maxwell eran válidas ni los efectos eléctricos ni los magnéticos podían existir aislados. Los dos estaban siempre presentes juntos, y sólo existía electromagnetismo, en el que los componentes eléctricos y magnéticos eran dirigidos en ángulos rectos uno a otro.

Además, al considerar las implicaciones de sus ecuaciones, Maxwell descubrió que un campo eléctrico cambiante tenía que inducir un campo magnético cambiante, que, a su vez, tenía que inducir un campo eléctrico cambiante, y así sucesivamente.

Por así decirlo, ambos saltaban por encima, por lo que el campo progresaba hacia afuera en todas direcciones en forma de una onda transversal que se movía a una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo. Esto era la «radiación electromagnética». Pero la luz es una onda transversal que se mueve a una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo, y la conclusión irresistible fue que la luz en todas las longitudes de onda, desde los rayos gamma hasta las ondas radio, era una radiación electromagnética. El conjunto formaba un espectro electromagnético.

Luz, electricidad y magnetismo se mezclaban en un solo fenómeno descrito por una

sola serie de relaciones matemáticas: $e = mc^2$ y $E = hf$. Ahora sólo quedaban dos formas de acción a distancia: gravitación y electromagnetismo. Al desaparecer el concepto del éter, hablamos de «campos»; de un «campo gravitatorio» y de un «campo electromagnético», consistiendo cada uno de ellos en una fuente y una radiación que se expande indefinidamente desde esta fuente, moviéndose hacia afuera a la velocidad de la luz.

Habiendo reducido los cinco a dos, ¿no deberíamos buscar alguna serie de relaciones matemáticas aún más general que se refiera a un solo «campo electromagneto-gravitatorio», con la gravitación y el electromagnetismo meramente como dos aspectos del mismo fenómeno?

Einstein trató durante treinta años de elaborar semejante «teoría del campo unificado», y fracasó. Mientras lo intentaba, se descubrieron dos nuevos campos, disminuyendo cada uno en intensidad con la distancia con tanta rapidez, que mostraban su efecto sólo a distancias comparables al diámetro de un núcleo atómico o menos (de ahí que se descubrieran tan tarde). Se trata del «campo nuclear fuerte» y del «campo nuclear débil».

En los años 1970 el físico estadounidense Steven Weinberg (n. 1933) y el físico paquistaní británico Abdus Salam (n. 1926), independientemente elaboraron un tratamiento matemático que mostraba que los campos electromagnéticos y nucleares débiles eran aspectos diferentes de un único campo, y probablemente puede lograrse también que este nuevo tratamiento incluya el campo nuclear fuerte. Sin embargo, hasta hoy la gravitación sigue estando tozudamente fuera de la puerta, tan recalcitrante como siempre.

Así pues, lo que cuenta es que ahora existen dos grandes descripciones del mundo: la teoría de la relatividad, que trata de la gravedad y el macrocosmos, y la teoría cuántica, que trata del campo electromagnético débil fuerte y el microcosmos.

Aún no se ha encontrado la manera de combinar los dos, es decir ninguna manera de «cuantificar» la gravitación. No creo que exista ningún modo más seguro de conseguir un premio Nobel dentro de un año que el de realizar esta tarea.

Capítulo 3

Las Dos Masas

Vi a Albert Einstein en una ocasión.

Fue el 10 de abril de 1935. Yo regresaba de una entrevista en el Columbia College, una entrevista de la que dependía mi permiso para entrar en el mismo. (Resultó desastrosa, puesto que yo era un muchacho de quince años totalmente inexpresivo, y no entré.)

Me detuve en un museo para recuperarme, puesto que no me hacía ilusiones en cuanto a mis posibilidades después de aquella entrevista, y me encontraba tan confuso y alterado que nunca he sido capaz de recordar de qué museo se trataba. Pero al pasear en un estado semiconsciente por sus salas, vi a Albert Einstein, y no estaba tan sordo y ciego al mundo que me rodeaba para no reconocerle al instante. A partir de ese momento, durante media hora, le seguí con paciencia de una sala a otra, sin mirar nada más, simplemente contemplándole. No estaba solo, puesto que había otros que hacían lo mismo. Nadie pronunciaba una palabra, nadie se le acercó para pedirle un autógrafo o con cualquier otro propósito; todos, simplemente, se limitaban a mirarle. De todos modos Einstein tampoco prestaba la menor atención; supongo que estaba acostumbrado a ello.

A fin de cuentas, ningún otro científico, excepto Isaac Newton, fue tan reverenciado en vida, incluso por otros grandes científicos y también por los profanos y por los adolescentes. Y no se trata sólo que sus logros fuesen enormes, sino que son, en ciertos aspectos, casi demasiado refinados para describirlos, especialmente en relación con lo que se considera en general como su descubrimiento más importante: la relatividad general.

Sin duda es también algo demasiado sutil para mí, puesto que sólo soy bioquímico (en cierto modo) y no un físico teórico, pero en el papel que he asumido de entrometido que lo sabe todo, supongo que, de todos modos, debo intentarlo.

En 1905, Einstein había formulado su teoría especial de la relatividad (o relatividad especial, para abreviar), que es la parte más familiar de su trabajo. La relatividad especial comienza suponiendo que la velocidad de la luz en un vacío se medirá siempre con el mismo valor constante, sin tener en cuenta la velocidad de la fuente

de luz respecto del observador.

A partir de aquí, una línea ineludible de deducciones nos dice que la velocidad de la luz representa la velocidad límite de cualquier cosa de nuestro Universo; es decir, que si observamos un objeto en movimiento, descubriremos que su longitud en la dirección del movimiento y el índice de paso del tiempo por él se ve disminuido y su masa aumentada, en comparación con lo que sería si el objeto estuviese en reposo. Estas propiedades varían con la velocidad de una manera fija tal, que a la velocidad de la luz, la longitud y el tiempo podrían medirse como cero mientras la masa se haría infinita. Además, la relatividad especial nos dice que energía y masa están relacionadas, según la actual y muy famosa ecuación $e = mc^2$.

Sin embargo, supongamos que la velocidad de la luz en un vacío no es inmutable en todas las condiciones. En ese caso, ninguna de las deducciones es válida. ¿Cómo, pues, podemos decidir acerca de este asunto de la constancia de la velocidad de la luz?

En realidad, el experimento de Michelson-Morley (véase «The Light That Failed», en *Adding a dimension*, Doubleday, 1964) indicó que la velocidad de la luz no cambiaba con el movimiento de la Tierra, es decir, que era la misma tanto si la luz se movía en la dirección de las vueltas de la Tierra en torno del Sol, o en ángulos rectos respecto del mismo. Se podría extrapolar el principio general a partir de esto, pero el experimento de Michelson-Morley es susceptible de otras interpretaciones. (Llegando hasta un extremo, podría indicar que la Tierra no se movía, y que Copérnico estaba equivocado.)

En cualquier caso, Einstein insistió más tarde en que no había tenido noticia del experimento de Michelson-Morley en la época en que concibió la relatividad especial, y que le parecía que la velocidad de la luz debía ser constante porque se encontraba envuelto en contradicciones si no era así.

En realidad, la mejor manera de comprobar el supuesto de Einstein sería comprobar si las deducciones de tal presunción se observan en el Universo real. Si es así, entonces nos vemos obligados a llegar a la conclusión que el supuesto básico debe ser cierto, porque entonces no conoceríamos otra forma de explicar la verdad de las deducciones. (Las deducciones no proceden del anterior punto de vista newtoniano del Universo, ni de ningún otro punto de vista no einsteiniano, o no relativista.)

Hubiera sido en extremo difícil comprobar la relatividad especial si el estado de los conocimientos físicos hubiera sido el de 1895, diez años antes que Einstein formulase su teoría. Los desconcertantes cambios que predijo en el caso de la longitud, la masa y el tiempo con la velocidad sólo son perceptibles a grandes velocidades, mucho más que las que encontramos en la vida cotidiana. No obstante, por un golpe de suerte, el mundo de las partículas subatómicas se había abierto en la década previa a los enunciados de Einstein. Estas partículas se mueven a velocidades de 15.000 kilómetros por segundo y más, y a esas velocidades los efectos relativísticos son apreciables.

Se demostró que las deducciones de la relatividad especial estaban todas allí, todas ellas; no sólo cualitativamente sino también cuantitativamente. No sólo un electrón ganaba masa si se aceleraba a los nueve décimos de la velocidad de la luz, sino que la masa se multiplicaba $3 \frac{1}{6}$ veces, tal y como había predicho la teoría.

La relatividad especial ha sido verificada un increíble número de veces en las últimas ocho décadas, y ha pasado todas las pruebas. Los grandes aceleradores de partículas construidos desde la Segunda Guerra Mundial no funcionarían si no tuviesen en cuenta los efectos de la relatividad, exactamente del modo requerido por las ecuaciones de Einstein. Sin la ecuación $E = mc^2$, no existe explicación para los efectos energéticos de las interacciones subatómicas, el funcionamiento de las centrales de energía nuclear, el brillo del Sol. Por consiguiente, ningún físico que se halle mínimamente cuerdo duda de la validez de la relatividad especial.

Esto no quiere decir que la relatividad especial represente necesariamente la verdad definitiva. Es muy posible que algún día pueda proponerse una teoría más amplia para explicar todo lo que la relatividad especial hace, y más incluso. Por otra parte, no ha surgido hasta ahora nada que parezca requerir tal explicación excepto la llamada aparente separación de los componentes del quasar a más de la velocidad de la luz, y la apuesta es que probablemente se trata de una ilusión óptica que puede explicarse dentro de los límites de la relatividad especial.

Pero aunque esta teoría más amplia se desarrollara, debería llegar hasta la relatividad especial dentro de los límites de la experimentación actual, igual que la relatividad especial llega hasta las leyes del movimiento ordinarias de Newton, si uno se atiene a las bajas velocidades que empleamos en la vida cotidiana.

¿Por qué es especial esa relatividad a la que tildamos de "especial"? Porque trata del caso especial del movimiento constante. La relatividad especial nos dice cuanto se necesita saber si se está tratando con un objeto que se mueve a velocidad constante y en una dirección fija con respecto a uno mismo.

Pero ¿qué ocurre si la velocidad o la dirección de un objeto (o ambas cosas) cambian con respecto a uno? En ese caso, la relatividad especial resulta insuficiente.

Estrictamente hablando, el movimiento nunca es constante. Existen siempre fuerzas que introducen cambios en la velocidad, la dirección, o ambas cosas, en el caso de cualquier objeto que se mueva. Por consiguiente, podríamos argumentar que la relatividad especial es siempre insuficiente.

Así es, pero esa insuficiencia puede ser lo bastante pequeña para no hacerle caso. Las partículas subatómicas que se mueven a enormes velocidades en distancias cortas no tienen tiempo de acelerarse demasiado, y se puede aplicar la relatividad especial.

Sin embargo, por lo general, en el Universo, que implica estrellas y planetas, la relatividad especial es totalmente insuficiente, puesto que allí hay que tratar con grandes aceleraciones y éstas son invariablemente producidas por la existencia de vastos y omnipresentes campos gravitatorios.

A nivel subatómico, la gravitación es tan excesivamente débil en comparación con otras fuerzas, que puede pasarse por alto. A nivel macroscópico de los objetos visibles, sin embargo, no puede pasarse por alto; en realidad, se puede pasar por alto todo menos la gravitación.

Cerca de la superficie de la Tierra, un objeto que cae se acelera mientras un cuerpo que asciende va más despacio, y ambos constituyen ejemplos de aceleraciones causadas enteramente por el avance a través del campo gravitatorio de la Tierra. La Luna viaja en una órbita alrededor de la Tierra, la Tierra alrededor del Sol, el Sol en torno del centro galáctico, la galaxia alrededor del centro del grupo local, y así sucesivamente, y en cada caso el movimiento orbital incluye una aceleración, puesto que existe un cambio continuo en la dirección del movimiento. Estas aceleraciones también son producidas como respuesta a los campos gravitatorios.

Por lo tanto, Einstein se dedicó a aplicar sus nociones de relatividad al caso del

movimiento en general, tanto acelerado como constante; en otras palabras, a todos los movimientos auténticos del Universo. Cuando estuvo elaborado, esto constituyó la teoría general de la relatividad, o relatividad general. Para hacerlo, ante todo y principalmente tuvo que considerar la gravitación.

Existe un misterio acerca de la gravitación que se remonta a Newton. Según la formulación matemática de Newton de las leyes que gobiernan la forma en que los objetos se mueven, la fuerza de la atracción gravitatoria depende de la masa. La atracción de la Tierra sobre un objeto con una masa de 2 kilogramos es, exactamente, el doble de intensa que sobre un objeto que tenga una masa de sólo 1 kilogramo. Además, si la Tierra doblase su propia masa, lo atraería todo con una fuerza exactamente doble a como lo hace ahora. Por tanto, podemos medir la masa de la Tierra midiendo la intensidad de su atracción gravitatoria sobre un objeto dado; o bien podemos medir la masa de un objeto midiendo la fuerza ejercida sobre él por la Tierra.

Una masa determinada así es una «masa gravitatoria».

No obstante, Newton también elaboró las leyes del movimiento y alegó que cualquier fuerza ejercida sobre un objeto hace que dicho objeto sufra una aceleración. La cantidad de aceleración es inversamente proporcional a la masa del objeto. En otras palabras, si se ejerce la misma fuerza sobre dos objetos, uno con una masa de 2 kilogramos y el otro con una de 1 kilogramo, el objeto de 2 kilogramos se acelerará exactamente la mitad que el objeto de 1 kilogramo.

La resistencia a la aceleración se denomina inercia, y podemos afirmar que cuanto mayor sea la masa del objeto, mayor será su inercia; es decir, menos se acelerará bajo el impulso de una fuerza dada. Por lo tanto, podemos medir la masa de un objeto midiendo su inercia; es decir, midiendo la aceleración producida sobre el mismo por una fuerza dada.

Una masa determinada así es una «masa inerte».

Todas las masas que se han determinado han sido medidas o bien a través de los efectos gravitatorios, o bien por los efectos de la inercia. Cada una de estas formas se toma como válida y se consideran intercambiables, aunque las dos masas no tengan una relación aparente. A fin de cuentas, ¿no es posible que existan algunos objetos, hechos con ciertos materiales o mantenidos en ciertas condiciones, que

presenten un intenso campo gravitatorio pero muy poca inercia, o viceversa? ¿Por qué no?

Sin embargo, cuando se mide la masa de un cuerpo gravitatoriamente, y se mide la masa del mismo cuerpo según la inercia, las dos medidas resultan ser iguales. No obstante, esto puede ser sólo apariencia. Pueden existir pequeñas diferencias, tan pequeñas que normalmente no se noten.

En 1909, un importante experimento en relación con esto fue realizado por un físico húngaro, Roland, barón Von Eotvos (1848-1919) (el nombre se pronuncia «ut vush»).

Lo que hizo fue suspender una barra horizontal en una fibra delicada. En un extremo de la barra había una bola de un material, y en el otro extremo una bola de otro material. El Sol atrae ambas bolas y fuerza una aceleración en cada una de ellas. Si las bolas tienen una masa diferente por ejemplo 2 kilogramos y 1 kilogramo, entonces la masa de 2 kilogramos es atraída con el doble de fuerza que la masa de 1 kilogramo y cabría esperar que se acelerase con una fuerza dos veces superior. Sin embargo, la masa de 2 kilogramos posee el doble de inercia que la masa de 1 kilogramo. Por esta razón, la masa de 2 kilogramos se acelera sólo la mitad por kilogramo y acaba por acelerarse sólo con la fuerza de la masa de 1 kilogramo.

Si la masa inerte y la gravitatoria son exactamente iguales, en ese caso las dos bolas son aceleradas de un modo exactamente igual, y la barra horizontal puede ser atraída hacia el Sol en una cantidad inconmensurable, pero eso no la hace rotar. Si la masa inerte y la masa gravitatoria no son del todo iguales, una bola, se acelerará un poco más que la otra y la barra experimentará una leve fuerza giratoria. Esto retorcerá la fibra, la cual resiste hasta cierto punto la torsión y sólo se retorcerá en respuesta a una fuerza dada. Por la extensión de la torsión, es posible calcular la cantidad de diferencia entre la masa inerte y la masa gravitatoria.

La fibra empleada era muy delgada, por lo que su resistencia a la torsión era muy baja, y sin embargo la barra horizontal no presentó ninguna vuelta medible. Eótvós pudo calcular que una diferencia en las dos masas de 1 parte en 200.000.000 habría producido una torsión mensurable, de modo que ambas masas eran idénticas en cantidad dentro de ese límite.

(Desde entonces se han llevado a cabo versiones aún más delicadas del experimento de Eótvós, y ahora estamos seguros, a través de la observación directa, que la masa inerte y la masa gravitatoria son idénticas en cantidad hasta 1 parte en 1.000.000.000.000.)

Einstein, al elaborar la relatividad general, comenzó por suponer que la masa inerte y la masa gravitatoria eran exactamente iguales, porque son, en esencia, la misma cosa. A esto se le denomina «el principio de equivalencia», y desempeña el mismo papel en la relatividad general que la constancia de la velocidad de la luz en la relatividad especial.

Incluso antes de Einstein era posible ver que la aceleración producida inercialmente puede provocar los mismos efectos que la gravitación. Cualquiera de nosotros puede experimentarlo.

Si, por ejemplo, se está en un ascensor que empieza a descender, ganando velocidad al principio, durante ese período de aceleración el suelo del ascensor se separa de los pies de uno, por así decirlo, de manera que se ejerce sobre él menos fuerza. Uno siente disminuir su peso, como si se estuviera yendo hacia arriba. La aceleración hacia abajo es equivalente a una disminución de la atracción gravitatoria.

Naturalmente, una vez que el ascensor alcanza una determinada velocidad y la mantiene, ya no hay más aceleración y uno siente su peso normal. Si el ascensor se está moviendo a una velocidad constante dada, y en una dirección constante, no se nota el efecto de la gravedad. En realidad, si se viaja por un vacío en una caja cerrada por completo, de modo que no se vea moverse el escenario, ni se sienta la vibración de la resistencia del aire, ni se oiga el silbido del viento, no existe ninguna manera de distinguir este movimiento constante de cualquier otro (a diferente velocidad o en una dirección diferente), o del estado de reposo. Ésta es una de las bases de la relatividad especial.

Dado que la Tierra viaja por un vacío a una velocidad casi constante y en una dirección casi constante (en distancias cortas), a la gente le resulta difícil diferenciar esta situación de la de la Tierra estando en reposo.

Por otra parte, si el ascensor siguiera acelerando hacia abajo y se moviera cada vez más aprisa, uno sentiría como si su peso hubiese disminuido de forma permanente.

Si el ascensor acelerara hacia abajo en una proporción considerablemente importante, si cayera a la aceleración natural que la atracción gravitatoria le impondría («caída libre»), en este caso desaparecería toda sensación de peso. Uno se sentiría flotar.

Si el ascensor acelerase hacia abajo en una proporción más rápida que la asociada con la caída libre, se sentiría el equivalente de una atracción gravitatoria hacia arriba, y se encontraría que el techo desempeña para uno las funciones del suelo.

Naturalmente, no se puede esperar que un ascensor se acelere hacia abajo durante mucho tiempo. En primer lugar, se necesitaría un hueco de ascensor extraordinariamente largo para que éste pudiera seguir desplazándose hacia abajo, uno que tuviese años luz de longitud, sí queremos llevar las cosas al extremo. En segundo lugar, aunque se tuviese ese imposiblemente largo hueco de ascensor, un nivel de aceleración constante pronto haría que la velocidad se convirtiese en una fracción respetable de la velocidad de la luz. Eso introduciría efectos relativistas apreciables y complicaría las cosas.

Sin embargo, podemos imaginar otra situación. Si un objeto se encuentra en órbita alrededor de la Tierra, está, en efecto, cayendo constantemente hacia la Tierra con una aceleración impuesta por la atracción gravitatoria de la Tierra. No obstante, se está también moviendo horizontalmente en relación con la superficie de la Tierra y, puesto que la Tierra es esférica, esa superficie se curva alejándose del objeto que está cayendo. De ahí que el objeto esté siempre cayendo, pero nunca llegue a la superficie. Estará cayendo durante miles de millones de años, tal vez. Estará en perpetua caída libre.

Así, una nave espacial que se halle en órbita bordeando la Tierra, se mantiene en esa órbita gracias a la atracción gravitatoria de la Tierra, pero cualquier cosa en la nave espacial cae con ésta y experimenta una gravedad cero, igual que si se encontrase en un ascensor que estuviese cayendo perpetuamente. (En realidad, los astronautas sentirían la atracción gravitatoria de la nave espacial en sí y de cada uno, por no hablar de las atracciones de los otros planetas y de las estrellas distantes, pero se trataría de unas fuerzas pequeñas que serían por completo imperceptibles.) Ésa es la razón que la mismas personas que se encuentran en naves espaciales en órbita floten libremente.

Una vez más, la Tierra se halla sujeta a la atracción gravitatoria del Sol y que la mantiene en órbita alrededor del Sol. Igual que la Luna. La Tierra y la Luna caen juntas, perpetuamente, hacia el Sol y, al encontrarse en caída libre, no sienten la atracción del Sol en lo que se refiere a su relación mutua.

Sin embargo, la Tierra tiene una atracción gravitatoria por sí misma que, aunque es mucho más débil que la del Sol, es bastante fuerte. Por tanto, la Luna, en respuesta a la atracción gravitatoria de la Tierra, gira alrededor de ésta, exactamente como si el Sol no existiese. (Realmente, dado que la Luna se halla un poco apartada de la Tierra, y a veces está un poco más cerca del Sol que la Tierra, y a veces un poco más lejos, la atracción solar es un poco diferente en los dos mundos, y esto introduce ciertos «efectos de marea» menores que ponen de manifiesto la realidad de la existencia del Sol.)

De nuevo, nos encontramos sobre la Tierra y sentimos sólo la atracción de ésta y no la del Sol, puesto que nosotros y la Tierra compartimos la caída libre respecto del Sol, y puesto que el efecto de marea que el Sol ejerce sobre nosotros es demasiado pequeño para que lo percibamos o seamos conscientes del mismo.

A continuación, supongamos que nos encontramos en un ascensor que está acelerando hacia arriba. Esto sucede en un grado muy pequeño cada vez que nos hallamos en un ascensor que se mueve hacia arriba desde el estado de reposo. Si se trata de un ascensor rápido, cuando se pone en marcha hay un momento de aceleración apreciable durante el cual el suelo se mueve hacia arriba, hacia nosotros, y sentimos una presión hacia abajo. La aceleración hacia arriba produce la sensación de una mayor atracción gravitatoria.

También en este caso la sensación es muy breve, puesto que el ascensor alcanza su velocidad máxima y luego la mantiene durante el transcurso de su viaje hasta que llega el momento de detenerse, cuando momentáneamente reduce su velocidad y se tiene la sensación que la atracción gravitatoria decrece. Mientras el ascensor se encontraba a la velocidad máxima, sin acelerar ni ir más despacio, uno se sentía por completo normal.

Bueno, supongamos que nos encontramos en el hueco de un ascensor de una longitud de años luz y que hay allí un ascensor cerrado que podría acelerarse con suavidad hacia arriba a través de un vacío durante un período indefinido, yendo

cada vez más deprisa. Se sentiría indefinidamente una mayor atracción gravitatoria. (Los astronautas tienen esta sensación durante un período de tiempo cuando un cohete acelera hacia arriba y sienten una incómoda presión hacia abajo. Existe un límite respecto a lo intensa que puede permitirse que sea una aceleración, o la sensación adicional de atracción gravitatoria puede hacerse lo bastante fuerte para que la presión lleve los astronautas a la muerte.)

Pero supongamos que no existe la Tierra, que se trata sólo de un ascensor que acelera hacia arriba. Si el índice de aceleración estuviera en el nivel apropiado, se sentiría el equivalente de una atracción gravitatoria igual que en la superficie de la Tierra. Se podría andar allí con perfecta comodidad e imaginarnos que el ascensor descansa inmóvil en la superficie de la Tierra.

Aquí es donde Einstein realizó el mayor salto en su imaginación. Al suponer que la masa inerte y la masa gravitatoria eran idénticas, también supuso que no existía ninguna manera de poder decir si uno se encontraba en un cubículo cerrado moviéndose hacia arriba con una aceleración regular de 9,8 m por segundo cada segundo, o si uno estaba en ese mismo cubículo cerrado en reposo sobre la superficie de la Tierra.

Esto significa que cualquier cosa que sucediese en el cubículo en aceleración también debe ocurrir en reposo sobre la superficie de la Tierra.

Esto resulta fácil de ver en lo que se refiere a los cuerpos ordinarios que caen. Un objeto que se sostuviera con el brazo extendido en un cubículo acelerado caería cuando se lo soltase, y parecería caer a un índice en constante aceleración porque el suelo del cubículo se desplazaría hacia arriba, para encontrarse con él a un índice en constante aceleración.

Por tanto, un objeto que se sostuviera en la Tierra caería de la misma forma. Esto no significa que la Tierra se esté acelerando hacia arriba, hacia el objeto. Significa simplemente que la atracción gravitatoria produce un efecto que no se puede distinguir del de una aceleración hacia arriba.

Sin embargo, Einstein insistió en que esto lo incluye todo. Si un rayo de luz fuera enviado horizontalmente a través de un ascensor que acelerase hacia arriba, el ascensor estaría un poco más arriba cuando el rayo de luz acabase su viaje, y por lo tanto éste parecería curvarse hacia abajo al cruzar el cubículo. En realidad, la luz

viaja con tanta rapidez, que en el tiempo que tardase en cruzar el cubículo, éste se habría desplazado hacia abajo sólo de modo imperceptible, pero se curvaría igualmente; no hay duda respecto a eso.

Por tanto, decía Einstein, un rayo de luz sujeta al campo gravitatorio de la Tierra (o a cualquier campo gravitatorio) debe también viajar en una trayectoria curva. Cuanto más intenso sea el campo gravitatorio y más larga la trayectoria por la que ha viajado el rayo de luz, más perceptible será la curva. Éste es un ejemplo de una deducción que puede extraerse del principio de equivalencia que no podía extraerse de las teorías anteriores de la estructura del Universo. Todas las deducciones reunidas constituyen la relatividad general.

Otras deducciones incluyen la sugerencia que la luz debería tardar un poco más de tiempo en viajar de A a B cuando se hallase sujeta a un campo gravitatorio, porque sigue una trayectoria curva; que la luz pierde energía cuando se desplaza contra la atracción de un campo gravitatorio y, por lo tanto, muestra un desplazamiento hacia el rojo, etcétera.

Una vez más, examinando todas las deducciones, parece acertado considerar curvado el espacio-tiempo. Todo sigue la curva, de modo que los efectos gravitatorios se deben a la geometría del espacio-tiempo más que a una «atracción».

Es posible elaborar una simple analogía de los efectos gravitatorios imaginando una lámina indefinidamente grande de una goma infinitamente ampliable que se extendiese muy por encima de la superficie de la Tierra. El peso de cualquier masa que descansa sobre la lámina empuja la goma hacia abajo hasta el punto de crear un «pozo de gravedad». Cuanto mayor sea la masa y más comprimida se encuentre, más profundo será el pozo y más empinados los lados. Un objeto que rueda a través de la lámina puede rozar un borde del pozo de gravedad, hundiéndose en el somero reborde del pozo y salir de nuevo. De este modo se verá forzado a seguir una trayectoria curvada como si hubiese sufrido una atracción gravitatoria.

Si el objeto rodante siguiese una trayectoria que lo llevase a más profundidad en el pozo, podría quedar atrapado allí y tendría que seguir una trayectoria oblicua elíptica por las paredes del pozo. Si existe fricción entre el objeto en movimiento y

las paredes, la órbita decaerá y el objeto, finalmente, caerá en el objeto mayor del fondo del pozo.

En resumen: utilizando la relatividad general, Einstein pudo establecer ciertas «ecuaciones de campo», que son aplicables al Universo en conjunto. Esas ecuaciones de campo fundaron la ciencia de la cosmología (el estudio de las propiedades del Universo como un todo).

Einstein anunció la relatividad general en 1916, y la siguiente cuestión fue si podría verificarse por la observación como la relatividad especial lo había sido poco después de su formulación once años antes.

Aquí existe una trampa. Mientras la relatividad especial y la general predecían efectos que diferían del viejo punto de vista newtoniano en tan poco como para no poder observarse, el descubrimiento fortuito de los fenómenos subatómicos hizo posible estudiar versiones muy pronunciadas de los efectos de la relatividad especial.

La relatividad general no tuvo tanta suerte. Durante medio siglo después de haberlo sugerido Einstein, sólo se podía contar con efectos muy pequeños para distinguir la relatividad general del anterior tratamiento newtoniano.

Las observaciones que pudieron realizarse tendían a ser favorables a la relatividad general, pero no abrumadoramente favorables. Por lo tanto, la teoría de la relatividad general siguió siendo objeto de discusión durante mucho tiempo (pero no la relatividad especial, que es una cuestión ya establecida).

Y lo que es más, dado que la versión de Einstein no fue firmemente confirmada, otros científicos trataron de elaborar formulaciones matemáticas alternativas, basadas en el principio de equivalencia, por lo que existe cierto número de diferentes relatividades generales.

De todas las distintas relatividades generales, la de Einstein resultó ser la más simple y la que podía ser expresada de forma más nítida en ecuaciones matemáticas. Era la más «elegante».

La elegancia resulta poderosamente atractiva para los matemáticos y los científicos, pero no es una garantía absoluta de la verdad. Por lo tanto, era necesario encontrar pruebas (si era posible) que distinguieran la relatividad general de Einstein no sólo del punto de vista newtoniano del Universo, sino también de todas las relatividades

generales que competían con ella.
Trataremos de esto en el capítulo siguiente.

Capítulo 4

El General Victorioso

Carol Brener, la ingeniosa propietaria de «Murder Ink», una librería especializada en novelas de misterio, me telefoneó el otro día para preguntar si podría enviar a alguien con un ejemplar de mi libro “The Robots of Dawn”, para que se lo firmase para un cliente especial. Naturalmente, accedí enseguida.

Ese «alguien» llegó, y, más bien ante mi asombro, resultó ser una joven dama de considerable belleza. Al instante me convertí en todo suavidad (como suele ser mi costumbre). La invité a entrar y le firmé el libro.

–No me diga –le dije, exudando encanto – que Carol la ha enviado a mi casa sin prevenirla acerca de mí.

–Oh, me previno –respondió la joven dama con calma –. Me dijo que me relajase, porque en el fondo usted es inofensivo.

...Y ésa es, confío, la actitud apropiada que debe tomarse respecto de este segundo ensayo que estoy escribiendo acerca de la relatividad general. El tema puede parecer formidable pero (con los dedos cruzados) espero que demuestre ser, en el fondo algo inofensivo.

En el capítulo precedente he explicado que la relatividad general se basaba en el supuesto que la masa gravitatoria era idéntica a la masa inerte, y que, por tanto, se podían considerar los efectos gravitatorios como idénticos a los efectos que se observarían en un sistema en aceleración infinita.

La pregunta es: ¿Cómo puede demostrarse que este punto de vista de la gravitación es más correcto que el de Newton?

Para empezar, existe lo que se ha denominado «las tres pruebas clásicas».

La primera de ellas surgió del hecho que, en la época en que Einstein formuló la teoría de la relatividad general, en 1916, seguía existiendo un enigma con respecto al Sistema Solar. Cada vez que Mercurio giraba alrededor del Sol en su órbita elíptica, pasaba por ese punto en que estaba más cerca del Sol («perihelio»). La posición de este perihelio no era fija en relación con el fondo de estrellas, sino que

avanzaba un poco en cada vuelta. Se suponía que lo hacía así a causa de los efectos menores («perturbaciones») de las atracciones gravitatorias de otros planetas. Sin embargo, cuando se tuvieron en cuenta todas esas perturbaciones, se vio que había un ligero avance del perihelio anterior, que ascendía a cuarenta y tres segundos de arco por siglo.

Se trataba de un movimiento muy pequeño (asciende sólo a la anchura aparente de nuestra Luna después de 4.337 años), pero se podía descubrir y era preocupante. La mejor explicación que podía darse era que existía un planeta aún no descubierto en la órbita de Mercurio, y esta fuerza gravitatoria que no se tenía en cuenta era la razón de ese avance, de otro modo inexplicable, del perihelio. El único problema era que semejante planeta no podía hallarse. (Véase «The Planet That Wasn't» en *The Planet That Wasn't*, Doubleday, 1976.)

Sin embargo, para Einstein el campo gravitatorio era una forma de energía, y esa energía era equivalente a una masa pequeña, la cual, a su vez, producía un poco más de campo gravitatorio. Por lo tanto, el Sol poseía un poco más de gravitación de la que le habían atribuido las matemáticas newtonianas, y eso, y no otro planeta, era lo que explicaba el avance del perihelio de Mercurio.

Esto constituyó una instantánea e impresionante victoria para la relatividad general, aunque esa victoria demostró tener limitaciones. Todos los cálculos que trataban de la posición del perihelio de Mercurio incluían el supuesto que el Sol era una esfera perfecta. Dado que el Sol es una bola de gas con un campo gravitatorio muy intenso, esto parecía una suposición razonable.

Sin embargo, el Sol giraba y, como resultado, debería ser un esferoide achatado. Una protuberancia ecuatorial, incluso pequeña, podría producir un efecto que explicaría parte o todo el avance, y esto plantearía dudas acerca de la relatividad general.

En 1967, el físico estadounidense Robert Henry Dicke realizó unas cuidadosas mediciones del tamaño del disco solar e informó de un leve achatamiento que era suficiente para ser el responsable de tres de los cuarenta y tres segundos de arco de avance por siglo. Esto supuso grandes titulares científicos como un posible golpe a la relatividad general de Einstein.

No obstante, desde entonces se han dado a conocer valores más pequeños del

achatamiento solar y el asunto sigue aún sometido a discusión. Mi opinión es que, al final, se demostrará que el Sol es sólo insignificamente achatado, pero por el momento el avance del perihelio de Mercurio no se considera una buena prueba para la relatividad general de Einstein.

Pero ¿qué hay de las otras dos pruebas clásicas?

Una de ellas implicaba el asunto de la curvatura de un campo gravitatorio, algo que ya he mencionado en el capítulo 3. Si esto realmente tenía lugar en la cantidad predicha por la relatividad general, sería algo mucho más impresionante que el asunto del perihelio de Mercurio. A fin de cuentas, el movimiento del perihelio de Mercurio se conocía, y se puede imaginar que las matemáticas einsteinianas podían haber sido realizadas para adecuarse a ello. Por otra parte, nadie había pensado jamás en poner a prueba la curva gravitatoria de la luz porque, ante todo, nadie había soñado que pudiese existir un fenómeno así. Si se predijera un fenómeno tan improbable y luego resultara existir, eso constituiría un triunfo increíble para la teoría.

¿Cómo probarlo? Sí una estrella estuviese situada muy cerca de la posición del Sol en el firmamento, su luz, al pasar rozando el Sol, se curvaría de tal forma que la estrella parecería estar situada un poco más lejos de la posición del Sol de lo que realmente estuviese. La relatividad general mostró que una estrella cuya luz simplemente rozase el borde solar estaría desplazada en 1,75 segundos de arco, es decir, una milésima de la anchura aparente del Sol. Esto no es mucho, pero es medible, salvo porque esas estrellas que se encuentran tan cercanas a la posición aparente del Sol en el firmamento normalmente no son visibles.

Durante un eclipse total de Sol, no obstante, sí lo serían, y estaba previsto un eclipse así para el 29 de mayo de 1919. Cuando se produjese, el oscurecido Sol estaría situado en medio de un grupo de brillantes estrellas. El astrónomo británico Arthur Stanley Eddington, que había conseguido una copia del ensayo de Einstein acerca de la relatividad general, por medio de los neutrales Países Bajos durante los oscuros días de la Primera Guerra Mundial, quedó impresionado por la misma y organizó una expedición para realizar las mediciones necesarias de las posiciones de aquellas estrellas unas respecto a otras. Estas mediciones podrían compararse luego con las posiciones conocidas de las mismas estrellas en los momentos en que el Sol

estaba muy alejado en el firmamento.

Se realizaron las mediciones y, ante la creciente excitación de los astrónomos, estrella tras estrella mostraron el desplazamiento pronosticado. La relatividad general quedó demostrada de una manera que fue increíblemente dramática, y el resultado llenó las primeras páginas de los periódicos. De una sola tacada, Einstein se convirtió en lo que ya sería durante el resto de su vida: el científico más famoso del mundo.

Y, sin embargo, aunque se supone (en la mitología popular de la ciencia) que el eclipse de 1919 dejó zanjado el asunto, y aunque yo también lo he considerado siempre de este modo, en realidad no estableció la relatividad general.

Las mediciones resultaron necesariamente poco claras, las comparaciones entre estas mediciones y las posiciones en otros momentos del año fueron difíciles de fijar con precisión, y apareció una incertidumbre adicional debida al hecho de que, en las diferentes épocas del año, se emplearon distintos telescopios en diferentes condiciones climáticas, y, en conjunto, como apoyo de la relatividad general, los datos eran poco consistentes. Ciertamente no servían para distinguir la variedad de Einstein de las otras variedades en competencia que al final se ofrecieron.

Y lo que es más, mediciones posteriores en sucesivos eclipses no parecieron mejorar la situación.

¿Y la tercera de las pruebas clásicas?

Ya mencioné en el capítulo 3 que la luz que sube contra la atracción de la gravedad debería perder energía, según la relatividad general, dado que la luz sin duda lo haría si se elevase contra una aceleración hacia arriba de la fuente. La pérdida de energía significaba que cualquier línea espectral que se hallase en una longitud de onda dada en ausencia de un campo gravitatorio importante se desviaría hacia el rojo si la luz que lo contuviese se moviese contra la atracción gravitatoria. Esto era el «desplazamiento hacia el rojo gravitacional» o «el desplazamiento hacia el rojo de Einstein».

Sin embargo, un desplazamiento hacia el rojo de este tipo era asimismo muy pequeño y haría falta un campo gravitatorio enormemente intenso para producir uno que pudiera medirse de manera inconfundible.

En la época en que Einstein presentó su teoría de la relatividad general, el campo

gravitatorio más intenso que podía estudiarse fácilmente parecía ser el del Sol, y éste, por intenso que fuese, era demasiado débil para resultar útil como prueba del desplazamiento hacia el rojo de Einstein.

Pese a todo, sólo unos meses antes del ensayo de Einstein, el astrónomo estadounidense Walter Sydney Adams había presentado pruebas que el oscuro compañero de Sirio («Sirio B») era en realidad una estrella con la masa del Sol, pero con el volumen de un pequeño planeta. (Véase «El sol brilla luminoso».) Esto resultó un poco difícil de creer al principio, y durante algún tiempo no se hizo caso de la «enana blanca».

Sin embargo, fue Eddington quien vio, con toda claridad, que si Sirio B era muy pequeño tenía que ser asimismo muy denso, y que poseería un campo gravitatorio enormemente intenso. Su luz, por lo tanto, mostraría un desplazamiento hacia el rojo de Einstein claramente perceptible si la relatividad general fuera correcta. Adams continuó estudiando el espectro de Sirio B con detalle, y en 1925 informó que el desplazamiento hacia el rojo de Einstein se encontraba allí, y bastante cerca de lo pronosticado por la relatividad general.

Una vez más aquello fue considerado como un triunfo, pero, de nuevo, pasado el período de euforia, pareció que el resultado no era del todo claro. La medida del desplazamiento no era muy exacta por cierto número de razones (por ejemplo, el movimiento de Sirio B a través del espacio introducía un desplazamiento de la línea espectral que no estaba relacionado con la relatividad general, y que introducía una enojosa incertidumbre). Como resultado de todo ello, la prueba ciertamente no podía emplearse para distinguir la relatividad general de Einstein de otras teorías que competían con ella, y el estudio de la luz procedente de otras enanas blancas tampoco mejoró las cosas.

Todavía en 1960, es decir, cuarenta y cuatro años después que se introdujera la relatividad general y cinco años después de la muerte de Einstein, la teoría aún descansaba sobre las tres pruebas clásicas que eran, simplemente, inadecuadas para esta tarea. Y lo que es más, parecía como si no existiese ninguna otra comprobación que pudiera siquiera empezar a dejar zanjado el asunto.

Daba la impresión que los astrónomos tendrían, simplemente, que vivir sin tener una descripción adecuada del Universo en conjunto, y discutir eternamente acerca

de las diferentes posibilidades de la relatividad general, como los escolásticos al debatir el número de ángeles que podrían bailar encima de la cabeza de un alfiler. La única cosa que se podía afirmar, de un modo constructivo, era que la versión de Einstein era la más sencilla de explicar matemáticamente y, por tanto, también la más elegante. Pero eso tampoco era una prueba segura de la verdad.

Luego, a partir de 1960, todo cambió.

El físico alemán Rudolf Ludwig Mössbauer recibió su doctorado en 1958, a la edad de veintinueve años, y el mismo año anunció lo que habría de llamarse «el efecto Mössbauer», por el que recibió el premio Nobel de Física en 1961.

El efecto Mössbauer implica la emisión de rayos gamma por ciertos átomos radiactivos. Los rayos gamma consisten en fotones de energía, y su emisión induce un retroceso en el átomo que realiza la emisión. El retroceso hace disminuir un poco la energía del fotón del rayo gamma. Normalmente, la cantidad de retroceso varía de un átomo a otro por varias razones, y el resultado es que cuando los fotones se emiten en cantidad por una colección de átomos, son aptos para tener una amplia extensión de contenido energético.

Sin embargo, hay condiciones en las que los átomos, cuando existen en un cristal algo grande y ordenado, emitirán fotones de rayos gamma experimentando el retroceso todo el cristal como una unidad. Dado que el cristal tiene una masa enorme en comparación con un solo átomo, el retroceso que sufre es insignificamente pequeño. Todos los fotones se emiten con toda la energía, por lo que el rayo posee una extensión de energía de prácticamente cero. Esto es el efecto Mössbauer.

Los fotones de rayos gamma de exactamente el contenido de energía emitido por un cristal en estas condiciones serán absorbidos con fuerza por otro cristal del mismo tipo. Si el contenido energético es incluso muy ligeramente distinto en una u otra dirección, la absorción por un cristal similar quedará en extremo reducida.

Pues bien, supongamos entonces que un cristal está emitiendo fotones de rayos gamma en el sótano de un edificio, y una corriente de fotones se dispara hacia arriba, hacia un cristal absorbente que está en el tejado, 20 metros más arriba.

Según la relatividad general, los fotones que suben contra la atracción de la

gravidad de la Tierra perderían energía. La cantidad de energía que perderían sería en extremo pequeña, pero suficiente para impedir que el cristal del tejado la absorbiera.

El 6 de marzo de 1960, dos físicos estadounidenses, Robert Vivian Pound y Glen Rebka, Jr., informaron que habían llevado a cabo este experimento y descubierto que los fotones no eran absorbidos. Y lo que es más, luego movieron hacia abajo el cristal receptor muy despacio, para que su movimiento incrementase muy levemente la energía de colisión con los fotones que entraban. Midieron la proporción de movimiento descendente que originaría el suficiente incremento de energía para producirse la pérdida de relatividad general y para permitir que los fotones fuesen absorbidos con fuerza. De esta manera determinaron exactamente cuanta energía perdían los rayos gamma al ascender contra la atracción gravitatoria de la Tierra, y descubrieron que el resultado coincidía con la predicción de Einstein hasta el 1 por 100. Ésta fue la primera demostración real e indiscutible que la relatividad general era correcta, y fue la primera demostración llevada a cabo por completo en un laboratorio. Hasta entonces, las tres pruebas clásicas habían sido siempre de tipo astronómico y habían requerido mediciones con algunas inexactitudes que habían sido casi imposibles de reducir. En el laboratorio, todo podía ser perfectamente controlado, y la precisión era mucho más elevada. De forma también asombrosa, el efecto Móssbauer no requería una enana blanca, ni siquiera el Sol. El comparativamente débil campo gravitatorio de la Tierra era suficiente, y en una diferencia de altura no mayor que la distancia entre el sótano y el tejado de un edificio de seis pisos.

Sin embargo, aunque podría considerarse que el efecto Móssbauer había asentado por fin la relatividad general, y dejado atrás definitivamente la gravedad newtoniana, las demás variedades de relatividad general (que, en realidad, habían sido introducidas a partir de 1960), no quedaban eliminadas por este experimento.

El 14 de septiembre de 1959, se recibió un eco de radar, por primera vez, desde un objeto externo al sistema Tierra-Luna: desde el planeta Venus.

Los ecos de radar se producen por un rayo de microondas (ondas de radio de muy alta frecuencia), que viajan a la velocidad de la luz, una cifra que conocemos con

considerable precisión. Un rayo de microondas puede viajar rápidamente hasta Venus, chocar contra su superficie y reflejarse, y a continuación regresar a la Tierra en 2 1/4 a 25 minutos, según donde se encuentren la Tierra y Venus en sus respectivas órbitas. A partir del tiempo realmente consumido por el eco al regresar, puede determinarse la distancia de Venus en un momento dado con una precisión mayor que la que cualquier otro método anterior había hecho posible. La órbita de Venus, por lo tanto, puede calcularse con gran exactitud.

Esto invirtió la situación. Se hizo posible predecir cuánto tiempo tardaría exactamente un rayo de microondas en chocar con Venus y regresar cuando el planeta se encontrase en cualquier posición concreta de su órbita en relación con nosotros mismos. Hasta las menores diferencias de la predicha extensión de tiempo podían determinarse sin ninguna seria incertidumbre.

La importancia de esto radica en que Venus, con intervalos de 584 días, estará casi exactamente en el lado opuesto al Sol desde nuestra posición, de manera que la luz que se dirija de Venus a la Tierra debe rozar el borde del Sol durante su camino.

Según la relatividad general, esa luz seguiría una trayectoria curvada y la posición aparente de Venus se desplazaría alejándose ligeramente del Sol. Pero Venus no puede observarse cuando se encuentra tan cerca del Sol, y aunque pudiese hacerse, el ligero desplazamiento de su posición sería casi imposible de medir con seguridad.

Sin embargo, debido a que la luz sigue una trayectoria levemente curvada al rozar la superficie del Sol, tarda más en llegar a nosotros que si hubiese seguido la habitual línea recta. No podemos medir el tiempo que tarda la luz de Venus en llegar hasta nosotros, pero podemos enviar un rayo de microondas a Venus y aguardar el eco. El rayo pasará cerca del Sol cuando se desplace en cada dirección, y podemos medir el tiempo que se tarda en recibir el eco.

Si sabemos cuán cerca el rayo de microondas se aproxima al Sol, conoceremos, por la matemática de la relatividad general, exactamente cuánto debería tardar. La tardanza real y la teórica pueden compararse con mayor exactitud de lo que podemos medir el desplazamiento de las estrellas en un eclipse total.

Luego, también nuestras sondas planetarias emiten pulsaciones de microondas y éstas pueden descubrirse. Cuando se sabe con exactitud la distancia de la sonda en cualquier momento, el tiempo que tardan las pulsaciones en viajar hasta la Tierra

mirada del omnívoro Zeus. La escondió bajo tierra para impedir que fuese descubierta por la celosa Hera (Juno), que nunca llegó a acostumbrarse a las propensiones amorosas de su todopoderoso marido, y que practicaba su venganza persiguiendo a cualquiera que pareciese gustarle.

Según algunos relatos, Elara fue la madre de Titius, un enorme monstruo nacido en la Tierra (recuerden que Elara se encontraba bajo tierra), que fue muerto por las flechas de Apolo y que, cuando fue tendido en el Tártaro, ocupó cuatro hectáreas de terreno.

Pasifae fue una nuera de Zeus, por estar casada con su hijo, el rey Minos de Creta. Pasifae es sobre todo conocida por haberse enamorado apasionadamente de un toro de gran belleza. (Sobre gustos no hay nada escrito.) Construyó un armazón, y lo cubrió con un pellejo de vaca. Pasifae se metió dentro y muy pronto el toro se montó obedientemente encima de la estructura. A su debido tiempo, Pasifae dio a luz un niño con cabeza de toro, que se convirtió en el famoso Minotauro.

Sinope era otra joven dama que fue abordada por el insaciable Zeus. Él le ofreció cualquier cosa que deseara a cambio de su sumisión, y la mujer solicitó una virginidad perpetua. (Ya he dicho que sobre gustos no hay nada escrito.)

Carme fue también otra beneficiaria de Zeus, y la madre de Britomarte, una diosa cretense de la pesca y de la caza.

Ananke difiere del resto. Es la personificación divina del Hado o Necesidad: el desarrollo ordenado de los acontecimientos que ni siquiera los dioses pueden alterar, por lo que Ananke es la única divinidad superior a Zeus.

Himalia y Lisitea son unas figuras por completo oscuras, que he logrado descubrir sólo gracias a la amabilidad de algunos de mis lectores. (Los astrónomos o bien son muy versados en mitología, o están lo suficientemente desesperados para rebuscar en grandes compendios de la misma.)

En cualquier caso, Himalia era una ninfa de Rodas, que gobernaba las buenas cosechas, y que proporcionó al bueno de Zeus otra buena cosecha: tres hijos.

Lisitea es una ninfa que, en algunos mitos, se identifica como la madre de Dionisos, el dios del vino. Por lo general, la madre que se le atribuye es Semele.

Los ocho pequeños satélites de Júpiter fueron descubiertos por orden de brillo decreciente, como parece razonable. Dado que todos ellos se encuentran a la

