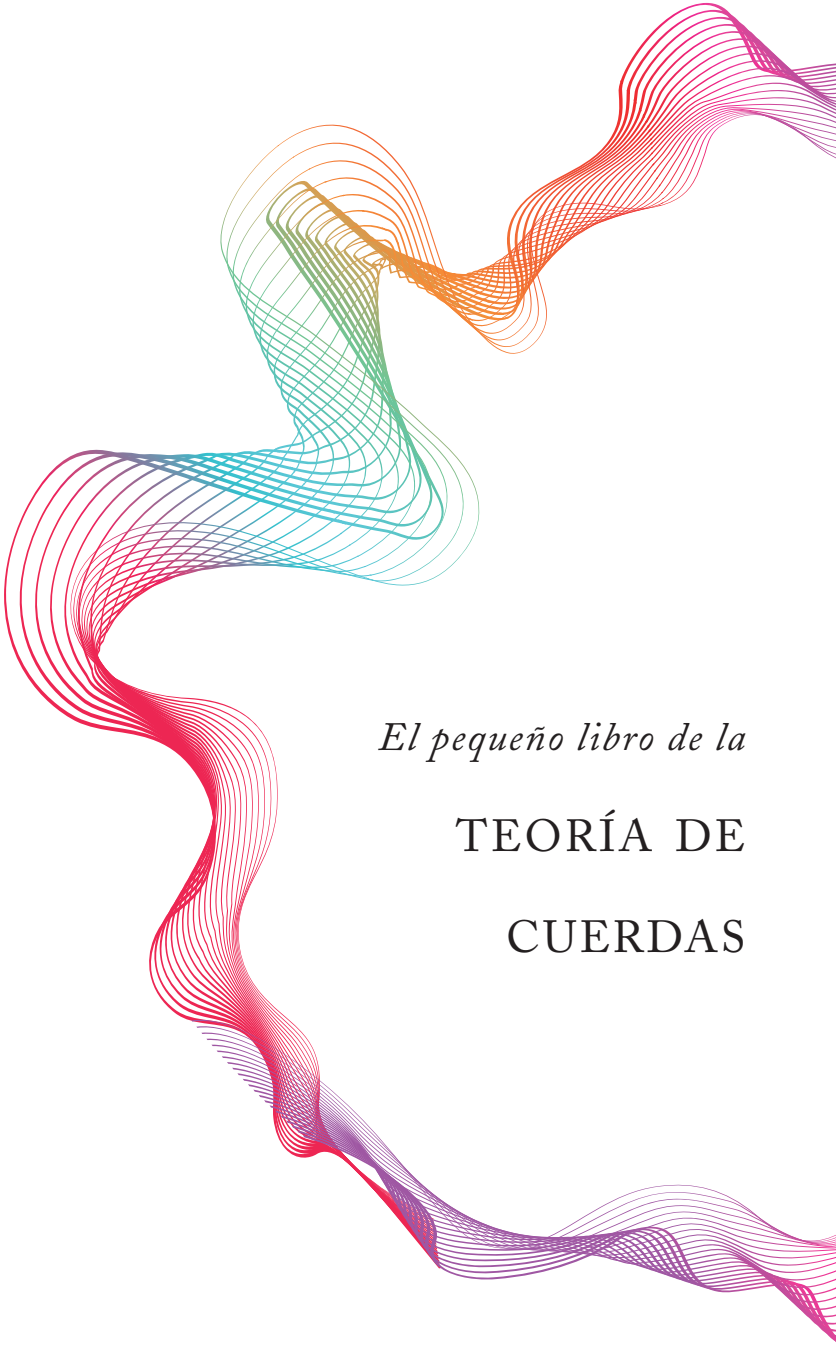

El pequeño libro de la

TEORÍA DE CUERDAS

STEVEN S. GUBSER

CRÍTICA

El pequeño libro de la teoría de cuerdas

Steven S. Gubser

Traducción castellana de
Javier Sampedro

CRÍTICA
BARCELONA

Primera edición: febrero de 2019

El pequeño libro de la teoría de cuerdas
Steven S. Gubser

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Título original: *The Little Book of String Theory*

© Steven S. Gubser, 2010 y 2019

© de la traducción, Javier Sampedro, 2019

© Editorial Planeta S. A., 2019
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es

ISBN: 978-84-9199-068-0
Depósito legal: B. 1018 - 2019
2019. Impreso y encuadernado en España

El papel utilizado para la impresión de este libro es 100% libre de cloro y está calificado como papel ecológico.

1

Energía

La intención de este capítulo es presentar la ecuación más famosa de la física: $E = mc^2$. Esta ecuación subyace a la energía nuclear y la bomba atómica. Dice que, si conviertes una libra de materia (0,45 kilos) enteramente en energía, podrías iluminar un millón de viviendas durante un año. $E = mc^2$ también subyace a gran parte de la teoría de cuerdas. En concreto, como veremos en el capítulo 4, la masa de una cuerda en vibración recibe contribuciones de su energía de vibración.

Lo que es extraño de la ecuación $E = mc^2$ es que relaciona cosas que normalmente no percibimos como relacionadas. E significa energía, como los kilovatios-hora que pagas cada mes a tu compañía eléctrica; m es la masa, como un kilo de harina; c es la velocidad de la luz, que son 299.792.458 metros por segundo, o aproximadamente 300.000 kilómetros por segundo. Así que la primera tarea es entender lo que los físicos llaman «magnitudes dimensionales», como la longitud, la masa, el tiempo y la velocidad. Luego volveremos a la propia $E = mc^2$. Por el camino, presentaré las unida-

des métricas, como los metros y los kilogramos; la notación científica para los números grandes; y un poco de física nuclear. Aunque no hace falta entender la física nuclear para captar la teoría de cuerdas, sí que aporta un buen contexto para discutir $E = mc^2$. Y, en el capítulo 8, regresaré para explicar los esfuerzos que se están haciendo para usar la teoría de cuerdas a fin de entender mejor algunos aspectos de la física nuclear moderna.

Longitud, masa, tiempo y velocidad

La longitud es la más fácil de todas las magnitudes dimensionales. Es lo que uno mide con una regla. Los físicos suelen insistir en usar el sistema métrico decimal, así que voy a empezar a hacerlo.

El tiempo se considera una dimensión adicional por los físicos. Percibimos cuatro dimensiones en total: tres del espacio y una del tiempo. El tiempo es diferente del espacio. Te puedes mover en cualquier dirección que quieras en el espacio, pero no te puedes mover hacia atrás en el tiempo. De hecho, no te puedes «mover» para nada en el tiempo. Los segundos pasan hagas lo que hagas. Esa es al menos nuestra experiencia cotidiana. Pero las cosas no son tan sencillas. Si corres en círculo muy, muy deprisa mientras un amigo se queda quieto, el tiempo que experimentas pasará más despacio. Si tú y tu amigo lleváis cronómetros, el tuyo mostrará menos tiempo trascurrido que el de tu amigo. Este efecto, llamado dilatación del tiempo, es imperceptiblemente pequeño a menos que la velocidad a la que corres sea comparable a la velocidad de la luz.

La masa mide la cantidad de materia. Solemos pensar que la masa es lo mismo que el peso, pero no lo es. El peso tiene que ver con el tirón gravitatorio. Si estás en el espacio exterior, no pesas nada, pero tu masa no ha cambiado. La mayor parte de la masa de los objetos cotidianos está en los protones y los neutrones, y un poquito en los electrones. Decir la masa de un objeto cotidiano se reduce esencialmente a decir cuántos nucleones tiene. Un nucleón es un protón o un electrón. Mi masa es de unos 75 kilogramos. Redondeando un poco, eso son unos 50.000.000.000.000.000.000.000.000.000 nucleones. Es difícil mantener el registro de unos números tan grandes. Tienen tantos dígitos que no es fácil contarlos. Así que la gente recurre a lo que se llama notación científica: en vez de escribir todos los dígitos como acabo de hacer yo, diremos que mi cuerpo contiene unos 5×10^{28} nucleones. El 28 significa que hay 28 ceros tras el 5. Practiquemos un poco más. Un millón se puede escribir 1×10^6, o simplemente 10^6. La deuda nacional de Estados Unidos, digamos de unos 20.000.000.000.000 dólares, se puede expresar más cómodamente como 2×10^{13} dólares. Vaya, si me dieran diez céntimos por cada nucleón que tengo...

Volvamos a las cantidades dimensionales de la física. La velocidad es un factor de conversión entre la longitud y el tiempo. Supón que puedes correr a 10 metros por segundo. Eso es rápido para una persona, realmente rápido. En 10 segundos recorres 100 metros. No ganarías una medalla de oro con ese registro, pero no estarías muy lejos. Supón que puedes mantener esa velocidad de 10 metros por segundo a lo largo de cualquier distancia. ¿Cuánto te llevaría recorrer un kilómetro? Vamos a verlo. Un kilómetro es diez veces 100 metros.

Puedes recorrer la pista de 100 metros en justo 10 segundos. Así que puedes correr un kilómetro en 100 segundos. Nadie puede hacer eso, porque nadie puede mantener un ritmo de 10 m/s durante tanto tiempo.

Pero supongamos que pudieras. ¿Serías capaz de notar el efecto de dilatación temporal que he descrito antes? Ni de lejos. El tiempo pasaría un poco más lento para ti mientras estás corriendo, pero más lento solo en una parte por 10^{15} (eso es una parte en 1.000.000.000.000.000, o mil billones). Para tener un efecto grande, tendrías que moverte mucho, mucho más deprisa. Las partículas que giran alrededor de los aceleradores modernos experimentan una dilatación del tiempo tremenda. Para ellas, el tiempo pasa unas 1.000 veces más despacio que para un protón en reposo. La cifra exacta depende del tipo de acelerador de partículas de que se trate.

La velocidad de la luz es un factor de conversión muy incómodo para el uso diario, debido a que es tan enorme. La luz puede dar una vuelta completa al ecuador terrestre en unos 0,1 segundos. Por eso, en parte, un americano puede mantener una conversación telefónica con alguien que esté en la India sin apenas notar ningún retraso. La luz es más útil cuando uno piensa en distancias realmente grandes. La distancia a la Luna equivale a unos 1,3 segundos. Podemos decir que la Luna está a 1,3 segundos luz de distancia de nosotros. La distancia al Sol es de unos 500 segundos luz.

Un año luz es una distancia aún mayor: es la distancia que la luz viaja en un año. La Vía Láctea tiene unos 100.000 años luz de diámetro. El universo conocido mide unos 14.000 millones de años luz. Eso equivale a unos $1{,}3 \times 10^{26}$ metros.

$$E = mc^2$$

La fórmula $E = mc^2$ es una conversión entre la masa y la energía. Funciona de manera muy parecida a la conversión entre tiempo y distancia que acabamos de ver. Pero ¿qué es la energía, exactamente? La pregunta es difícil de responder porque hay muchas formas de energía. El movimiento es energía. La luz es energía. La electricidad es energía. El calor es energía. Cualquiera de esas cosas se puede convertir una en la otra. Por ejemplo, una bombilla convierte la electricidad en calor y luz, y un generador eléctrico convierte el movimiento en electricidad. Un principio fundamental de la física es que la energía total se conserva, por mucho que cambie de forma. Para llenar de significado este principio, tenemos que tener maneras de cuantificar distintas formas de energía que se puedan convertir una en otra.

Un buen sitio para empezar es la energía del movimiento, también llamada energía cinética. La fórmula de conversión es $K = ½\ mv^2$, donde K es la energía cinética, m es la masa y v es la velocidad. Vístete otra vez de esprínter olímpico. Con un tremendo esfuerzo físico, puedes correr a $v = 10$ metros por segundo. Pero esto es mucho más despacio que la velocidad de la luz. En consecuencia, tu energía cinética es mucho menor que la energía E en $E = mc^2$. ¿Qué significa esto?

Será de ayuda saber que $E = mc^2$ describe la «energía en reposo». La energía en reposo es la energía de la materia cuando no se está moviendo. Cuando corres, estás convirtiendo un poquito de tu energía en reposo en energía cinética. Un poquito muy pequeño, en realidad: una parte en 10^{15}, más o menos. No es accidental

que este mismo número, una parte en 10^{15}, caracterice la cantidad de dilatación del tiempo que experimentas cuando corres. La relatividad especial incluye una relación precisa entre la dilatación temporal y la energía cinética. Dice, por ejemplo, que, si algo se está moviendo lo bastante deprisa como para doblar su energía, su tiempo corre la mitad de deprisa que si no se está moviendo.

Es frustrante pensar que tienes toda esa energía en reposo dentro de ti, y que todo lo que puedas reclutar con el mejor de tus esfuerzos sea una fracción minúscula, una parte en 10^{15}. ¿Cómo podríamos reclutar una fracción mayor de la energía en reposo que contiene la materia? La mejor respuesta que conocemos es la energía nuclear.

Nuestra comprensión de la energía nuclear descansa por entero en $E = mc^2$. Lo que sigue es una breve sinopsis. Los núcleos atómicos están hechos de protones y neutrones. Un núcleo de hidrógeno es simplemente un protón. Un núcleo de helio comprende dos protones y dos neutrones, ligados en estrecha unión. Por «estrecha unión» quiero decir que romper un núcleo de helio lleva mucha energía. Otros núcleos resultan mucho más fáciles de romper. Un ejemplo es el uranio-235, que está hecho de 92 protones y 143 neutrones. Es bastante fácil romper un núcleo de uranio-235 en varios trozos. Por ejemplo, si golpeas un núcleo de uranio-235 con un neutrón, se puede romper en un núcleo de kriptón, un núcleo de bario, tres neutrones y energía. Esto es un ejemplo de fisión. Podemos escribir la reacción así:

$$\mathrm{U} + n \rightarrow \mathrm{Kr} + \mathrm{Ba} + 3n + \text{Energía},$$

donde se entiende que U significa uranio-235, Kr significa kriptón, Ba significa bario y *n* significa neutrón. (Por cierto, tengo cuidado de decir uranio-235 porque hay otro tipo de uranio, hecho de 238 nucleones, que es mucho más común, y también más difícil de romper.)

$E = mc^2$ te permite calcular la cantidad de energía que se libera a partir de la masa de todos los participantes en la reacción de fisión. Resulta que los ingredientes (un núcleo de uranio-235 más un neutrón) superan en masa a los productos (un átomo de kriptón, un átomo de bario y tres neutrones) por una quinta parte de la masa de un protón, más o menos. Es esa minúscula diferencia de masa la que ponemos en $E = mc^2$ para determinar la cantidad de energía liberada. Por minúscula que parezca, una quinta parte de la masa de un protón es casi un décimo de un 1% de la masa de un átomo de uranio-235: una parte en mil. Así que la energía liberada es alrededor de una milésima de la energía en reposo de un núcleo de uranio-235. Esto todavía no parece mucho, pero supone un billón de veces más, como fracción de la energía en reposo, que la fracción que un esprínter olímpico puede reclutar en forma de energía cinética.

Todavía no he explicado de dónde viene la energía liberada en la fisión nuclear. El número de nucleones no cambia: hay 236 antes y después de la fisión. Y, sin embargo, los ingredientes tienen más masa que los productos. Así que esto es una excepción importante a la norma de que la masa es esencialmente una contabilidad de nucleones. La clave es que los nucleones de los núcleos de kriptón y bario están unidos más estrechamente de lo que estaban en el núcleo de uranio-235. Una unión más estrecha significa menos masa. El nú-

cleo de uranio-235, unido con más holgura, tiene un poco de masa extra, allí esperando a ser liberada en forma de energía. Para decirlo en pocas palabras: la fisión nuclear libera energía cuando los protones y los neutrones se asientan en unas estructuras más compactas.

Uno de los proyectos de la física nuclear moderna es averiguar qué pasa cuando los núcleos pesados como el de uranio-235 experimentan reacciones mucho más violentas que la reacción de fisión que acabo de describir. Por razones en las que no voy a entrar, los experimentalistas prefieren trabajar con oro o plomo en vez de uranio. Cuando dos núcleos de estos metales se chocan entre sí a casi la velocidad de la luz, resultan destruidos por completo. Casi todos los nucleones se rompen. En el capítulo 8 hablaré más sobre el estado de la materia denso y caliente que se forma en esa reacción.

En resumen, $E = mc^2$ dice que la cantidad de energía en reposo que tiene algo depende solo de su masa, porque la velocidad de la luz es una constante conocida. Es más fácil conseguir algo de esa energía a partir del uranio-235 que de casi cualquier otra forma de materia. Pero, en un sentido fundamental, la energía en reposo está en todas las formas de materia por igual: rocas, aire, agua, árboles y personas.

Antes de que entremos en la mecánica cuántica, detengámonos un momento para poner $E = mc^2$ en un contexto intelectual más amplio. Es parte de la relatividad especial, que estudia cómo el movimiento afecta a la medida del tiempo y el espacio. La relatividad especial está subsumida en la relatividad general, que también abarca la gravedad y el espacio-tiempo curvo. La teoría de cuerdas subsume tanto la relatividad general como la mecánica cuántica. En concreto, la teoría de

cuerdas incluye la relación $E = mc^2$. Las cuerdas, las branas y los agujeros negros obedecen a esa relación. Por ejemplo, en el capítulo 5 expondré cómo la masa de una brana puede recibir contribuciones de la energía térmica de la brana. No sería correcto decir que $E = mc^2$ se deduce de la teoría de cuerdas. Pero sí que encaja, de forma aparentemente inextricable, con otros aspectos del marco matemático de la teoría de cuerdas.