

## *Un acercamiento a la relatividad de Einstein*

ÁLVARO PÉREZ RAPOSO \*

**E**l año 2005 fue convenido como Año Internacional de la Física para aprovechar lo relevante de la fecha en este ámbito: el centenario del annus mirabilis de Einstein. Efectivamente, en 1905 Einstein publicó tres artículos, en temas muy diferentes, que supusieron grandes avances en sus respectivas áreas. El más famoso de los tres contenía la Teoría de la Relatividad.

Por esta razón, la directora de esta publicación me pidió amablemente que escribiera unas páginas acerca de la Teoría de la Relatividad, y me contó la siguiente anécdota que yo no conocía. Unos periodistas piden a Einstein que les explicara la Teoría de la Relatividad en términos que pudieran entender. Einstein les cuenta que, antes de la Relatividad, se pensaba que si del universo se pudiera extraer toda la materia, quedarían el espacio y el tiempo. Sin embargo, tras la Relatividad, se piensa que al extraer toda la materia del universo, el espacio y el tiempo desaparecerían con ella.

La respuesta de Einstein, por supuesto, expone brillantemente, en dos frases, la esencia de una de las teorías más

relevantes, a la par que complicadas, de toda la física. En las próximas páginas me propongo dar una explicación, no tan breve ni tan elegantemente crítica, de las palabras de Einstein.

Comencemos por una nueva lectura de la respuesta de Einstein. Una primera reflexión nos lleva a concluir que lo que quiere decir es que antes se pensaba que el espacio y el tiempo existen independientemente de la existencia de materia. Las propiedades del espacio y del tiempo son las mismas en un universo vacío que en uno lleno, en uno con mucho contenido o con poco. Sin embargo, tras la Relatividad se piensa que el espacio y el tiempo están ligados a la materia, hasta el punto que si ésta desaparece, aquéllos también. Entonces, la siguiente pregunta es: ¿qué tipo de conexión tan fuerte hay entre el espacio, el tiempo y la materia? La respuesta es la ecuación central de la Teoría de la Relatividad que, lógicamente, se denomina ecuación de Einstein.

Lo primero que hay que señalar es que el trabajo de Einstein de 1905 sobre relatividad expone lo que hoy conocemos como Teoría Especial de la Relatividad. Se denomina especial porque es una

\* Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de San Luis de Potosí..

teoría incompleta, que sólo es aplicable a casos especiales, como explicaré más abajo. Einstein era totalmente consciente de ello, por lo cual enseguida se lanzó a buscar la teoría completa. Tardó nada menos que diez años pero, finalmente, en 1915, apareció la Teoría General de la Relatividad. Tal y como los nombres sugieren, la general incluye a la especial como caso particular, pero amplía mucho su horizonte. La explicación de Einstein citada al principio se refiere a la teoría completa, es decir a la Teoría General de la Relatividad, pero seguir el desarrollo histórico es casi obligado así que empezaremos hablando de la especial para llegar luego a la general. Pero antes establezcamos qué visión predominaba en la física prerrelativista.

### *La física prerrelativista*

Podemos pensar que la física, en una simplificación extrema, es la descripción de las partículas que componen la materia y las interacciones que existen entre ellas. Hace un siglo se tenía a los átomos como las partículas elementales que constituyan la materia (de ahí su nombre), ya que aún no se conocía su estructura interna (núcleo y electrones). En cuanto a las interacciones, se conocían dos: la fuerza gravitatoria y la fuerza electromagnética. Estas fuerzas contaban con sendas elegantes teorías para describirlas. La Teoría de la Gravitación Universal de Newton, formulada más de doscientos años antes, daba perfecta cuenta de la interacción gravitatoria y, en particular, del movimiento de los planetas, satélites y otros objetos del Sistema Solar. La Teoría del Campo Electromagnético de Maxwell, terminada apenas tres décadas antes de 1905, describía rigurosamente las fuerzas eléctricas y magnéticas, así como su intrincada interdependencia.

Conocidas las partículas y las fuerzas que ejercen unas sobre otras, otra teoría, la Mecánica, también de Newton, permite calcular cómo se mueven las partículas bajo sus mutuas interacciones. (En realidad, la mecánica establece las

ecuaciones que hace falta resolver para saber cómo se moverán las partículas, pero llegar a resolverlas es, en muchos casos, una tarea casi imposible). Una muestra, famosa, de la Mecánica de Newton es la ecuación central de la teoría: fuerza igual a masa por aceleración,

$$F = ma.$$

Cada símbolo de esta ecuación representa uno de los conceptos que se han presentado. La  $F$  es la fuerza, por ejemplo la gravitatoria, que sufre una cierta partícula. La  $m$  representa a la partícula en cuestión, pues es su masa. La  $a$  es la aceleración, es decir, el movimiento, de la partícula. Así que, como decía, esta ecuación relaciona la fuerza (causa) con el movimiento (consecuencia) que experimenta la partícula. Para que esta receta tenga sentido hace falta conocer la fuerza previamente. Esto es lo que proporcionan las teorías de Newton y de Maxwell para las fuerzas gravitatoria y electromagnética respectivamente. Con ello el esquema queda completo.

En resumen, la física prerrelativista se apoyaba en tres pilares: la mecánica de Newton, la gravitación de Newton y el electromagnetismo de Maxwell.

Digamos de una vez cómo afectó la Relatividad a esta imagen de la física fundamental. La Relatividad Especial cambió la mecánica. La Relatividad General reformuló la gravitación. El electromagnetismo no sufrió cambio alguno. Newton pereció, Maxwell sobrevivió. Es un hecho curioso a primera vista que el electromagnetismo de Maxwell fuera totalmente compatible con la Relatividad. Es una teoría completamente relativista aunque se formuló tres décadas antes que la propia Relatividad.

Empecemos, pues, con la Relatividad Especial.

### *Relatividad Especial*

La Relatividad Especial nace como solución a una incompatibilidad entre dos de las tres teorías mencionadas. El electromagnetismo de Maxwell es incompatible con la Mecánica de Newton. Pero el problema es sutil, y tardó en ser reconocido. Intentemos describirlo.

La Mecánica de Newton descansa en las ideas de tiempo absoluto y espacio absoluto. El propio Newton trata de describir estos conceptos en sus Principia Mathematica: “El tiempo absoluto, verdadero y matemático fluye en sí y por su naturaleza, sin relación a nada externo de manera uniforme [...] El espacio absoluto permanece por su naturaleza sin relación alguna a algo externo siempre semejante e inmóvil”. Lo que sí es rescatable de estas descripciones es lo que apunta Einstein en su respuesta a los periodistas: el tiempo fluye y el espacio permanece independientemente de la existencia de la materia.

La Mecánica de Newton establece cómo se mueven los objetos tal y como los ve un observador que se encuentra en reposo en este espacio absoluto. Dicho de otro modo, si el observador no se haya en reposo, entonces no se cumple la ley de fuerza igual a masa por aceleración. Un ejemplo permite aclararlo: un observador situado dentro de un vehículo en marcha observa que los ocupantes sufren un desplazamiento hacia delante ante un frenazo brusco; el observador ha constatado una aceleración (los ocupantes repentinamente se mueven hacia delante), sin embargo no hay ninguna fuerza que los haya empujado. No se cumple la relación entre fuerza y aceleración porque el observador no está en reposo en el espacio absoluto; está en reposo respecto al vehículo. Excepcionalmente existen otros observadores para los que la Mecánica de Newton también es válida. Son observadores que sí se mueven respecto al espacio absoluto pero con velocidad

constante. Se llaman observadores iniciales. Por ejemplo, si pensamos que un observador situado en un andén de una estación está en reposo absoluto, un observador situado en un tren que pasa por la estación a velocidad constante sería un observador inercial. Claro que, para comparar lo que ven ambos hay que hacer unos pequeños cambios. Continuando el ejemplo, pongamos que el observador situado en el andén nota que el tren circula a una velocidad de 40 km/h y, a su vez, observa un vehículo que discurre paralelamente a la vía del tren a 100 km/h. El observador del tren también ve el vehículo, pero para sus cuentas se mueve a 60 km/h. A pesar de las diferencias en las medidas de distancias y velocidades, al medir aceleraciones coinciden, y por ello las leyes de la mecánica también funcionan para los observadores iniciales.

Entonces, la mecánica newtoniana es una teoría que funciona para los observadores en reposo absoluto, y también para los iniciales. Pero, ¿cuál es el reposo absoluto? Newton lo tiene claro: las estrellas fijas del firmamento definen el reposo absoluto; un observador que vea fija la bóveda celeste está en reposo absoluto.

La situación con respecto al tiempo es más sencilla. El tiempo absoluto que describe Newton es percibido de la misma forma por todos los observadores: absolutos, iniciales y no iniciales.

Ahora podemos describir la incompatibilidad mencionada entre la mecánica y el electromagnetismo. Una muestra de ella es el siguiente experimento. En la teoría electromagnética una partícula con carga, por ejemplo un electrón, inmersa en un campo magnético, sólo siente una fuerza magnética si la partícula tiene velocidad; si está quieta no hay fuerza y sigue quieta. Pensemos, pues, en un electrón con cierta velocidad que se adentra en un campo magnético. Bajo ciertas condiciones, ocurre que el electrón se pone a dar vueltas. Pero si este experimento lo analiza un observador inercial, que se mueve a la

misma velocidad que el electrón al principio de su periplo, llega a una contradicción. Para este observador el electrón no se mueve, lo ve quieto, su velocidad es cero. Entonces, según la teoría, no debería experimentar ninguna fuerza y seguir su trayectoria recta, lo cual obviamente no ocurre, pues se pone a dar vueltas. ¿Entonces qué falla? Otro experimento (Michelson-Morley, 1888), esta vez real, no imaginado, muestra otra contradicción. El resultado de este experimento lleva a la conclusión de que la velocidad de la luz es la misma para cualquier observador inercial. Es decir, en el ejemplo de los trenes anteriores, si una señal luminosa se propaga paralelamente al tren (como el vehículo al que aludíamos antes), la velocidad que miden el observador en el andén y el observador en el tren es la misma. Este hecho va contra toda nuestra intuición, que se decanta más por pensar que si el observador del andén mide una velocidad  $c$  de la luz, entonces el del tren debería medir  $c - 40 \text{ km/h}$ , al igual que con el vehículo. Pero el experimento muestra que la realidad no es así y, en física, los experimentos mandan.

Einstein trabaja en intentar resolver estas contradicciones, especialmente animado por la situación del primer ejemplo (de hecho, su famoso artículo de 1905 se titula "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento"). Pero pensemos un momento en el dilema: una teoría cuya formulación se ha terminado apenas treinta años atrás entra en conflicto con otra establecida hace más de doscientos años y corroborada ampliamente desde entonces. La solución de Einstein es, cuando menos, atrevida e irreverente: él se queda con el electromagnetismo y decide reformular la mecánica. Pero no sólo eso, la reformulación que propone va hasta los mismos cimientos de la teoría y del sentido común. Einstein cambia los conceptos de espacio y tiempo. Según él el transcurrir del tiempo no es igual para el observador en reposo que para el observador en movimiento; un observador en movimiento percibe el tiempo dilatado respecto a cómo lo

percibe el que está en reposo. Tampoco son iguales las distancias; un observador en movimiento percibe las distancias contraídas respecto al que está en reposo. Cuanto más rápido se mueva el observador, más se dilata su tiempo y más se contraen las distancias, al punto que si pudiera alcanzar la velocidad de la luz, el tiempo se detendría y las distancias se anularían.

Estas ideas no se quedan sólo como tales, sino que son formuladas rigurosamente obteniendo unas ecuaciones que permiten calcular exactamente en qué medida se dilata el tiempo y en qué medida se contraen las longitudes que percibe un observador en movimiento. Y, por cierto, la deducción de estas ecuaciones no es muy complicada; basta escribir la fórmula que da la velocidad de un rayo de luz (espacio dividido entre tiempo) visto por los dos observadores (en reposo y en movimiento) e igualarlas, pues ambos deben medir la misma velocidad según el mencionado experimento. Estas ecuaciones reciben el nombre de Transformaciones de Lorentz, en honor de otro de los físicos protagonistas de la época que las obtuvo antes que Einstein, aunque no supo interpretarlas.

Ante estos fenómenos de dilatación de tiempos y contracción de longitudes surgen situaciones en contra de nuestra intuición. Se suelen llamar paradojas, aunque no son tales, simplemente van contra el sentido común, pero este sentido está basado en la experiencia cotidiana en la cual no se perciben los efectos relativistas. Una de las situaciones extrañas más famosas es la de los gemelos.

Un gemelo se va de viaje espacial dejando a su hermano en La Tierra. Su viaje transcurre a velocidades muy grandes, cercanas a la de la luz. Entonces su tiempo se dilata, lo cual significa que en lo que transcurre un minuto suyo, para su hermano, en reposo, ha transcurrido más de un minuto. El minuto del hermano viajero dura más. Así, al regreso de un largo

viaje, se encuentra que su hermano gemelo, que se quedó en La Tierra, es mucho más viejo que él.

Los conceptos de tiempo y espacio absolutos de Newton parecen, por tanto, desterrados, ya que ahora la percepción del tiempo y del espacio es relativa a cada observador (de aquí el nombre de relatividad).

Con estas nuevas ideas se resuelven las contradicciones antes mencionadas. Pero, si los conceptos de espacio y tiempo han cambiado, entonces la teoría de la mecánica, que no es sino decir cómo se mueven los objetos por el espacio al transcurrir el tiempo, debe cambiar. Efectivamente, al tirar del hilo cuya punta son los nuevos conceptos, Einstein desarrolla toda una nueva teoría de la mecánica, diferente a la newtoniana, que es la Teoría Especial de la Relatividad (pero que también podríamos llamar Mecánica de Einstein). La nueva teoría arroja algunos resultados conocidos y otros realmente sorprendentes (además de los ya mencionados en cuanto a tiempo y espacio).

Los resultados conocidos son casi todos los de la mecánica de Newton. En la mecánica de Einstein, si los objetos se mueven con velocidades pequeñas (comparadas con la de la luz) los resultados son los mismos que con Newton.

Era de esperar; al fin y al cabo, Newton y otros muchos físicos durante los doscientos años posteriores, no eran tontos, simplemente se movían despacio.

El primer nuevo resultado es que la velocidad de la luz es un límite de la naturaleza. Ningún objeto puede ser acelerado hasta alcanzar la velocidad de la luz. Nada puede viajar más rápido que la luz.

Otros dos resultados son consecuencia de una ecuación que creo interesante escribir, por ser una de las más

características de la Relatividad Especial:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

En ella,  $E$  es la energía de una partícula,  $p$  es el llamado momento (o cantidad de movimiento), que prácticamente podemos pensar que es su velocidad, y  $m$  su masa. Por otra parte  $c$  es la velocidad de la luz. Los dos resultados son los siguientes. Primero, si la partícula no se mueve, entonces  $p = 0$  y resulta la archiconocida relación

$E = mc^2$ , que dice que una partícula, aunque no se mueva, tiene una energía acumulada en su masa. Al igual que en otras formas de energía, ésta se puede transformar y aprovechar, que es lo que se hace en los reactores nucleares. El segundo resultado aparece si ahora consideramos la posibilidad de que la masa de la partícula sea nula ( $m = 0$ ). Con Newton esto es absurdo, pues si no hay masa, no hay partícula, ni energía, ni momento. Pero ahora resulta que, aunque  $m$  sea cero, la energía y el momento pueden no ser cero, basta que cumplan  $E = pc$ . Y ocurre que esta idea resulta ser cierta, existen partículas sin masa, pero con energía y con momento y con la peculiaridad de que se mueven siempre a la velocidad de la luz. El primer ejemplo de tales partículas, no el único, es el de los fotones, las partículas de la luz.

Los nuevos resultados de la Relatividad Especial han sido ampliamente confirmados por la experiencia. Los reactores nucleares o los aceleradores de partículas muestran a diario que son esencialmente correctos. Sin embargo, como decía al principio, se trata de una teoría incompleta. Veamos a continuación por qué y cómo la Relatividad General la completó.

### *Relatividad General*

La Relatividad Especial es una teoría incompleta en dos aspectos.

En primer lugar porque no logra desterrar los conceptos de espacio y tiempo absolutos, lo cual era un objetivo de

Einstein, a pesar de que aparentemente sí lo hace. En Relatividad Especial, como ya se ha dicho, no hay un sistema de referencia absoluto distinguido de cualquier otro como el sistema de las estrellas fijas de Newton. La conclusión de la nueva mecánica es que todos los sistemas inerciales son totalmente equivalentes hasta el punto de que ninguno de ellos tiene ningún privilegio sobre ningún otro. Por tanto, ninguno puede ser distinguido con el adjetivo de absoluto. Ahora bien, los sistemas no inerciales sí se distinguen bien de los primeros y no alcanzan el rango de sistemas válidos para formular la física (en términos sencillos). Entonces se está concediendo cierto grado de absolutismo no a un sistema de referencia en concreto, pero sí a una familia de ellos. Pero el problema es más profundo. Si hay un observador que se mueve a velocidad no constante respecto a los sistemas inerciales, es decir, él no es inercial, entonces hay toda una familia de observadores, no inerciales, que se mueven a velocidad constante respecto a nuestro primer observador. Esto significa que cada observador define una familia de observadores inerciales respecto a él mismo. Entonces, de todas las familias de observadores inerciales, ¿cuál es la correcta para formular la física? La respuesta es que, o bien hay algún elemento externo que permite decidir cuál de todas es la adecuada (y por lo tanto recaemos en el espacio y tiempo absolutos) o bien que la teoría es incompleta. Una teoría completa sería aquella que se pueda formular del mismo modo en cualquier sistema de referencia, inercial o no, y destierre definitivamente el absolutismo espaciotemporal.

El segundo aspecto en que es incompleta es que la Relatividad Especial es incompatible con la Ley de Gravitación Universal de Newton. Era previsible, ya que Newton diseñó su mecánica y su gravitación totalmente compatibles. Al cambiar la mecánica hay que analizar qué ocurre con las otras dos teorías. El electromagnetismo resulta ser, como ya se mencionó, totalmente compatible con la relatividad. La

gravitación, no. De hecho, hay varios puntos de incompatibilidad. Los dos principales son los siguientes. En Relatividad Especial nada puede viajar más rápido que la luz, pero en la gravitación newtoniana, la señal gravitatoria se propaga instantáneamente. Un ejemplo: la luz del Sol tarda ocho minutos en alcanzar La Tierra, que es el tiempo requerido para recorrer los ciento cincuenta millones de kilómetros que nos separan a la velocidad de la luz; así ocurre la propagación de los fenómenos electromagnéticos (como la luz). Sin embargo, según Newton, los efectos gravitatorios del Sol se sienten instantáneamente en nuestro planeta. Esto significa que si el Sol, pongamos, cambia bruscamente de forma con lo cual su efecto gravitatorio también cambiaría, deberíamos notarlo aquí instantáneamente, y no ocho minutos después. Otra forma de decirlo es que la señal gravitatoria viaja a velocidad infinita. La otra incompatibilidad grave está relacionada con la equivalencia de masa y energía que establece la Relatividad Especial. En la gravedad newtoniana, la masa es la responsable de la atracción gravitatoria: cuerpos con más masa ejercen mayor fuerza y, además, de modo proporcional (doble de masa, doble de fuerza). Pero si la masa y la energía son equivalentes y, de hecho, se pueden transformar una en otra, entonces la energía en otras formas (como calor, luz...) también debería producir (y sufrir) interacción gravitatoria. En la teoría newtoniana esto no es así y, por ende, es incompatible con la Relatividad Especial.

Aquí Einstein se muestra de nuevo atrevido e irreverente pues, ante el dilema entre Relatividad Especial y Ley de Gravitación Universal, esta última debida de nuevo al sacroso Isaac Newton, y con doscientos años de éxitos, se decidió por mantener su relatividad y modificar la gravitación. Comentemos brevemente cómo lo hizo.

Los dos problemas a resolver, repitamos, son los observadores no inerciales e

incluir la gravedad en el esquema. Einstein da un primer paso, brillante, que funde estos dos problemas en uno solo: el Principio de Equivalencia. El Principio de Equivalencia es la idea de que un sistema de referencia acelerado es equivalente a un sistema inercial más una fuerza de gravedad. Los famosos experimentos imaginarios con ascensores de Einstein lo aclaran. Un observador en el interior de un ascensor que no se mueve, en la superficie terrestre, realiza el experimento de soltar una piedra y constata que ésta cae al suelo con la aceleración de la gravedad. Otro observador en el interior de otro ascensor, situado en el espacio, lejos de cualquier planeta, y del cual una fuerza tira hacia arriba con una aceleración igual a la de la gravedad en La Tierra, suelta otra piedra y constata exactamente lo mismo que el primero. Entonces es lo mismo estudiar la física dentro del primer ascensor (inercial pero con un campo gravitatorio) que dentro del segundo (no inercial y sin campo gravitatorio). Dicho de otro modo, basta resolver uno de los dos problemas y se tendrán los dos resueltos. Esto es posible gracias a una propiedad única del campo gravitatorio, que ya observó Galileo allá a principios del siglo XVII: todos los cuerpos sienten el campo gravitatorio igual, independientemente de su masa o su composición. Efectivamente, animo a los lectores a realizar un sencillo experimento: dejen caer desde cierta altura dos cuerpos iguales en forma y tamaño, pero de distinto peso (por ejemplo dos botes iguales, uno vacío y otro lleno). Ambos experimentan la misma aceleración hacia abajo y llegan al suelo al mismo tiempo. Por ello se pueden equiparar aceleraciones y campos gravitatorios. Pero Einstein va más lejos. Le parece que es demasiada casualidad que todos los cuerpos experimenten las mismas aceleraciones bajo un campo gravitatorio (con las fuerzas eléctromagnéticas no ocurre así, dos partículas con diferente carga eléctrica se comportan diferentemente bajo el mismo campo eléctrico). Entonces da el segundo paso clave a la nueva teoría: la

geometrización de la gravedad. En lugar de pensar que las fuerzas gravitatorias afectan a los diferentes cuerpos y se ajusta perfectamente para producir en todos ellos, independientemente de su masa o naturaleza, los mismos efectos, Einstein propone que las fuerzas gravitatorias actúan sobre el espacio y el tiempo y los deforman. Los cuerpos se mueven libremente, no sufren ninguna fuerza gravitatoria, pero lo hacen por un espacio-tiempo deformado en el cual las líneas rectas ya no lo son, sino que aparecen curvas. Un ejemplo puede aclarar esta idea. Supongamos que el espacio-tiempo es una tela elástica tensa, plana, colocada horizontalmente; esto representa el espacio-tiempo vacío, sin campo gravitatorio. En esa tela se pone a rodar una pequeña canica, que representa un objeto que se mueve libremente. La trayectoria de la canica es una recta, como ocurre con los cuerpos que se mueven libremente. Ahora introduzcamos un campo gravitatorio en la tela: una pesada bola que se deposita en el centro. La bola pesada, que representa por ejemplo el Sol, deforma la tela que ya no es plana sino que se curva en las proximidades de la bola. Cuando dejamos rodar la canica por esta tela curvada, ya no sigue una trayectoria recta, sino curva. Pero lo interesante es que la canica no es afectada directamente por la bola pesada, lo único que nota es que la tela está deformada.

Afortunadamente para Einstein, cincuenta años antes de la elaboración de la Relatividad, un matemático, Riemann, había desarrollado la teoría de la geometría diferencial, que es la herramienta perfecta para formular rigurosamente las ideas de Einstein. En esta teoría matemática se describe cómo hacer geometría en espacios curvados y, además, de cualquier dimensión (el espacio-tiempo, matemáticamente, es un objeto de cuatro dimensiones). En el momento en que se elaboró dicha teoría parecía simplemente una elucubración mental de los matemáticos, una abstracción de la mente sin ninguna utilidad práctica. Sin embargo resultó ser

la base matemática imprescindible para formular la Teoría General de la Relatividad. Al mismo tiempo, es la causa de la complejidad de la misma y la que le ha dado la fama de ser una teoría incomprensible e inasequible. Esta teoría permite calcular la curvatura de un espacio (es decir, la medida de su deformación) así como las curvas que hacen el papel de rectas en un espacio no plano: las geodésicas. Se llaman así por las geodésicas del globo terrestre: la superficie terrestre no es plana, así que la distancia más corta entre dos puntos no es la recta, sino la geodésica (como bien saben los pilotos de aviones transcontinentales).

Algunas consecuencias de esta visión son los sorprendentes resultados que arroja la Relatividad General. Uno de ellos, por mencionar el más llamativo, es la curvatura de la luz: puesto que el espacio-tiempo está deformado, lo está para todo el mundo, y la luz también ha de ceñirse a la geometría curvada. Entonces la luz ya no sigue trayectorias rectas, sino que se curva cerca de grandes objetos como el Sol. Y esto lleva a uno de los temas más interesantes, los agujeros negros, pues si la gravedad puede curvar la luz, ¿existirán objetos con un campo gravitatorio tan intenso que la luz (y por tanto tampoco ninguna otra cosa) pueda escapar de él?

El último paso para completar la teoría es especificar concretamente en qué medida la materia que llena el espacio-tiempo lo deforma. Esto es lo que dice la ecuación de Einstein que a continuación transcribo:

$$G = 8\pi k T.$$

c<sup>2</sup>

En ella,  $G$  es el llamado tensor de Einstein, y mide la curvatura del espacio-tiempo. A la derecha aparecen el número  $\pi$ , la constante de gravitación universal  $k$  (la misma que también aparece en la ley de Newton), la velocidad de la luz  $c$ , y el llamado tensor de energía-momento,  $T$ , que mide el contenido de energía (incluida la masa) del espacio.

Esta ecuación, en apariencia simple (en realidad son diez ecuaciones escritas de manera condensada), contiene la esencia de la Relatividad General. A la izquierda está la geometría. A la derecha la materia. La materia es la causa de la geometría, y la geometría es la causa del comportamiento de la materia. La interdependencia es total.

### *A modo de resumen*

En la visión de Newton, el tiempo y el espacio son absolutos y existen con sus propiedades independientemente de la materia que llena el universo o los observadores que lo describen.

En Relatividad Especial, existe un tiempo y un espacio absolutos, independientes de la materia, pero percibidos de diferente forma por diferentes observadores.

En Relatividad General, finalmente, no existen un tiempo ni un espacio absolutos sin relación a nada externo, pues las propiedades del espacio-tiempo están determinadas por el contenido de materia del universo, materia que, a su vez, se mueve guiada por dicho espacio-tiempo.

Ahora queda claro por qué piensa Einstein que si extraemos la materia del universo, el espacio y el tiempo desaparecerían con ella: espacio-tiempo y materia están unidos por la ecuación de Einstein y, por ello, comparten el mismo destino.

Sin embargo, y tras todas estas páginas escritas para justificar a Einstein, permítanme un último apunte crítico con sus palabras. Sí hay espacio-tiempo en ausencia de materia, al menos matemáticamente. Existe una solución a la ecuación de Einstein en la que el tensor  $T$  es nulo (es decir, no hay materia): se llama espacio-tiempo de Minkowski y no es otra cosa que la Relatividad Especial (pues al no haber materia no hay gravedad, y si no hay gravedad no hay conflicto con la Relatividad Especial). La cuestión es que,

de existir un universo así, no habría nadie para contarla, pues vacío significa vacío, completamente vacío. A no ser que pensemos en mecánica cuántica...