

Einstein, Pitágoras y la relatividad del tiempo¹

ANTONIO J. DURÁN GUARDEÑO

Las teorías de la relatividad de Einstein tienen fama de ser difíciles de entender. Ese es el caso de la teoría general, que requiere de un complicado andamiaje matemático. Sin embargo, algunas de las sorprendentes predicciones de la teoría especial son muy fáciles de entender. El propósito de este artículo es mostrar que esa pieza cumbre de la ciencia moderna puede trabajarse con los alumnos de bachillerato en el aula.

Palabras clave: Teoría especial de la relatividad, Teorema de Pitágoras, Relatividad del tiempo, Albert Einstein, Muones.

Einstein, Pythagoras and the relativity of time

Einstein's theories of relativity are known to be extremely difficult to understand. Actually, that is the case of the general theory which requires a complicated mathematical background. However, some of the more surprising predictions of the special theory are easy to understand. The purpose of this paper is to show that this cornerstone of modern science can be work out with secondary school students.

Keywords: Special Theory of Relativity, Pythagorean Theorem, Relativity of Time, Albert Einstein, Muons.

¿Es la relatividad especial tan imposible de entender?

21
suma⁺
84

Que la teoría de la relatividad de Albert Einstein (1879-1955) es difícil de entender se ha convertido en un lugar común de la cultura. Cuando, a partir de 1919, Einstein se transformó en un personaje público, seguido muy de cerca por prensa y radio, los periodistas parecían verse obligados a preguntarle cada vez que se les ponía a tiro si era verdad que solo dos o tres personas en el mundo entendían su teoría de la relatividad. Esa impenetrabilidad se achacaba en buena parte al aparatado matemático necesario para exponer siquiera sus fórmulas más elementales, preñadas de amenazadores tensores de todo tipo en espacios de cuatro dimensiones, de rotacionales, divergencias y vectores covariantes, y otras perversiones parecidas. Y, aunque mayormente los periodistas se referían a la teoría general de la relatividad propuesta por Einstein en 1915, la fama de hermética y oscura también se extendió a la teoría especial de la relatividad de 1905. La diferencia entre ambas es que la especial solo se refiere a sistemas de objetos que se mueven a velocidad constante unos respecto a otros, sin

intervención por lo tanto de fuerzas y, en particular, deja fuera el análisis de los efectos gravitatorios; estos son precisamente el objeto de estudio de la teoría general de la relatividad.

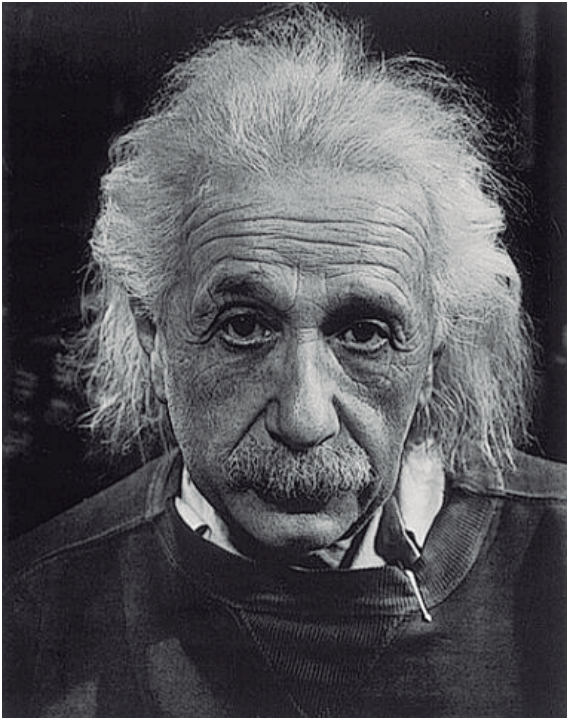


Figura 1. Einstein en los últimos años de su vida

Así que, lamentablemente, la teoría especial de la relatividad, con objetos que se contraen y tiempos que se dilatan, también adquirió en el imaginario colectivo el aura de ser algo imposible de entender para el común de los mortales. Y digo lamentablemente porque la fama de incomprendible que arrastra la teoría especial es absolutamente inmerecida. Einstein hizo pública la teoría especial de la relatividad en 1905 en un artículo de treinta páginas. En la primera mitad de ese artículo, Einstein presenta los postulados físicos de la teoría y deduce de ellos algunas consecuencias para el espacio y el tiempo. Sin exageración alguna, podemos afirmar que un alumno de bachillerato debería entender lo que allí se hace. Desde el punto de vista matemático, solo se usa la representación de puntos en el espacio mediante coordenadas, el teorema de Pitágoras y alguna derivada elemental y, desde el punto de vista de la física, que la velocidad de un cuerpo es el espacio recorrido por unidad de tiempo.

Las explicaciones de Einstein son por lo demás claras. Esas quince páginas son también pura magia, pues de unos supuestos físicos aparentemente inocentes se concluye de forma inapelable que no hay un espacio y un tiempo absolutos, que tales conceptos fundamentales cambian de un lugar a otro dependiendo del estado de movimiento del observador. Leyendo esas líneas asistimos literalmente al proceso por el que un sólido reloj de acero se convierte en uno de esos relojes flácidos que tanto le gustaba pintar a Salvador Dalí.

Precisamente el propósito de este artículo es ilustrar cómo la relatividad del tiempo es consecuencia inmediata, usando el teorema de Pitágoras, de los postulados físicos elegidos por Einstein, y que, por tanto, esa pieza cumbre de la ciencia moderna puede trabajarse con los alumnos de bachillerato en el aula.

Los dos postulados físicos de la relatividad especial

El primer principio general que Einstein consideró para desarrollar su teoría de la relatividad especial es un principio de invariancia que se remontaba a Galileo y a Newton: Si dos sistemas se mueven con velocidad constante uno respecto de otro y en direcciones paralelas, entonces las leyes de la física son las mismas en ambos sistemas.

Galileo describió este principio con excelente prosa en su *Diálogo*, el libro que lo llevó ante la Inquisición:

Encerraos con algún amigo en la mayor estancia que esté bajo cubierta de algún gran navío, y meted en ella moscas, mariposas y animalillos voladores parecidos. Haya también un recipiente grande de agua con pececillos dentro. Además manténgase en alto un cubo, que gota a gota vaya dejando caer el agua en otro recipiente de boca estrecha, situado debajo. Cuando la nave está quieta, observad atentamente que los animalillos volantes se mueven en todas las direcciones de la estancia con igual velocidad. Veréis que los peces nadan indistintamente hacia todos los lados. Las gotas que caen entrarán todas en la vasija situada debajo. Y vos, a un tirar algo al amigo, si las distancias son iguales no ten-

dréis que lanzarlo con más fuerza hacia una parte que hacia otra. Y si saltáis, como suele decirse, con los pies juntos, os desplazaráis igual espacio con independencia de la dirección. Una vez que hayáis observado diligentemente todas estas cosas aunque no haya ninguna duda de que mientras el bajel está parado tienen que suceder así, haced mover la nave con la velocidad que sea. Veréis que —con tal que el movimiento sea uniforme y no fluctuante hacia aquí y hacia allá— no observaréis el más mínimo cambio en ninguno de los efectos mencionados y que, a partir de ellos, no podréis determinar si la nave avanza o está quieta. Al saltar, os desplazaráis en el entablado los mismos espacios que antes y no se dará el caso de que, porque la nave se mueva velocísimamente, daréis mayores saltos hacia popa que hacia proa aunque en el tiempo que estáis en el aire el entablado que está debajo de vos se desplace hacia la parte contraria a vuestro salto. Y al lanzar alguna cosa al compañero, no necesitaréis tirarla con más fuerza para que le llegue, si él está hacia la proa y vos hacia la popa, que si estuviésteis al revés. Las gotas caerán como antes en el vaso inferior, sin que ni siquiera una caiga hacia popa por más que, mientras la gota está en el aire, la nave se desplace muchos palmos. Los peces en su agua no requerirán mayor esfuerzo para nadar hacia la parte delantera del recipiente que hacia la posterior, sino que llegarán con igual facilidad a la comida puesta sobre cualquier lugar del borde del recipiente. Finalmente, las mariposas y las moscas continuarán su vuelo indistintamente hacia cualquier lado, y en ningún caso sucederá que se queden hacia la pared que mira a popa como si estuvieran fatigadas de seguir la veloz carrera de la nave, de la que habrán estado separadas por mucho tiempo, al mantenerse en el aire. Y si quemáis una lágrima de incienso se formará una nubecilla totalmente indiferente al movimiento hacia uno u otro lado.

Este principio, relacionado con el de inercia, lo usó Galileo para justificar por qué no sentimos el movimiento de la Tierra, y de Galileo pasó a Newton. Aunque es un principio de invariancia, se le acabó llamando de relatividad porque en cierta forma nos viene a decir que el movimiento a velocidad constante no es absoluto sino necesariamente relativo a algún otro objeto que no se mueva con nosotros —por eso en el interior del barco de Galileo, sin referencias exteriores, no percibimos su movimiento—. Este principio fue el que daría nombre a la teoría de Einstein.

Toda la mecánica newtoniana respetaba este principio de relatividad de Galileo y Newton, pero no así otras teorías físicas como óptica o electromagnetismo. Se conocía a finales del siglo

XIX, que si suponemos que el tiempo transcurre igual sea cual sea el lugar del espacio donde lo midamos, las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo se alteran al sustituir las coordenadas de un sistema por las de otro; es decir, no verifican el principio de relatividad de Galileo y Newton. Más todavía, lo que aparece alterado es la

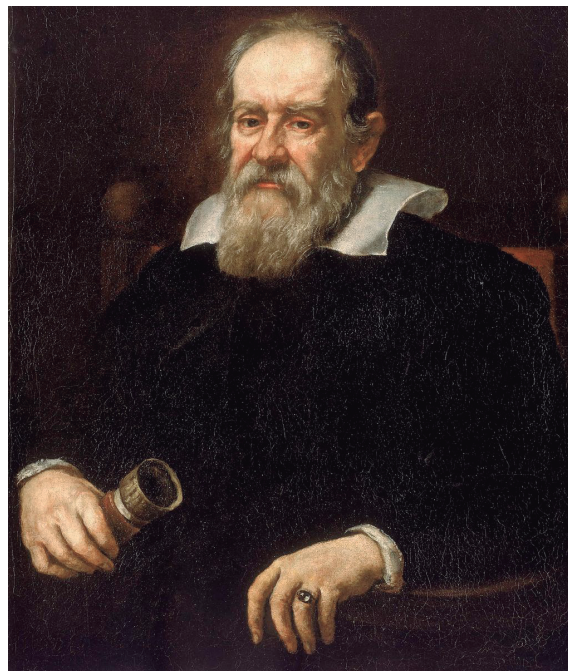


Figura 2. Galileo Galilei

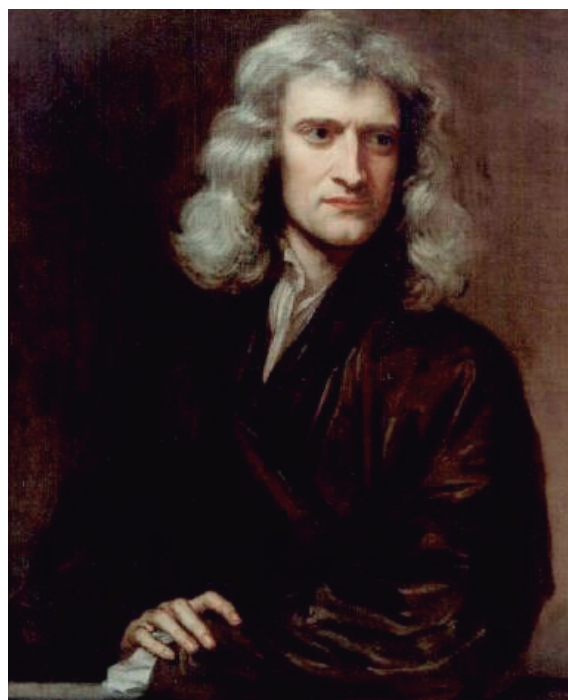


Figura 3. Isaac Newton

velocidad con que se mueven las ondas electromagnéticas —ejemplos de ondas electromagnéticas son la luz, las ondas de radio, los rayos X, etc.—: ya no lo hacen a la velocidad de la luz, sino a la velocidad de la luz más la velocidad con que se mueve un sistema con respecto a otro. Pero esto era intolerable para Einstein, porque, tal y como había calculado Maxwell, la velocidad de la luz era una constante de sus ecuaciones que correspondía a características de la carga eléctrica y magnética independientes del tiempo y del espacio. Había pues que optar entre Newton o Maxwell, o dicho de otra forma, entre un tiempo absoluto o una velocidad absoluta para la luz. Einstein se inclinó por esta segunda posibilidad, que eligió como el segundo de sus principios básicos:

Todo rayo luminoso se mueve con una velocidad fija independientemente de si este rayo luminoso es emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento.

Como se ve, los dos principios de partida son principios de invariancia o constancia de ciertas leyes físicas, a pesar de lo cual la teoría fue finalmente bautizada con el nombre de relatividad especial —especial, porque solo consideraba movimientos con velocidad constante—. Como veremos en un momento, de ambos principios de invariancia Einstein deducirá la relatividad del tiempo y el espacio, pero dado que esto son consecuencias, hubiera sido más apropiado llamar a su teoría de la invariancia especial y no de la relatividad especial, porque este último apelativo induce erróneamente a pensar que es la relatividad del tiempo y del espacio el punto de partida en vez del de llegada. De hecho, en los primeros años Einstein se refería a su teoría como «invariantentheorie», teoría de invariancia; tan solo en 1911, y cuando ya otros científicos venían usando el nombre de teoría de la relatividad, Einstein incluyó ese apelativo en el título de uno de sus artículos. Años después, alguien le planteó cambiar el nombre de la teoría, a lo que Einstein respondió:

Vayamos ahora al nombre teoría de la relatividad. Admito que es desafortunado, y ha dado ocasión a malentendidos filosóficos. La descripción que usted propone quizá sería mejor; pero creo que produciría

confusión cambiar el nombre generalmente aceptado después de todo este tiempo.

De los dos principios de invariancia, el segundo es el verdaderamente revolucionario —en relación a la física newtoniana—, y es ciertamente incompatible con la cinemática clásica pues contradice la forma en que se componen velocidades. Imaginemos un tren de alta velocidad en marcha hacia la derecha del observador a 0,1 km/s —esto es, 360 km/h—; en la plataforma de cola hay un revisor con una ballesta que dispara flechas a 150 km/h. Supongamos que el revisor dispara una flecha en dirección contraria a la marcha del tren. La cinemática clásica establece que la flecha saldrá impulsada por la ballesta a una velocidad de 150 km/h hacia la izquierda a la que habrá que restar los 360 km/h con que el tren arrastra a la ballesta; lo que da un total de 210 km/h en el sentido de la dirección del tren. Si efectuamos el experimento veremos que, efectivamente, la flecha acaba cayendo en dirección contraria a su lanzamiento. Si en vez de apuntar en dirección contraria a la de marcha del tren, el revisor apunta en la dirección del tren, la flecha sumará la velocidad del tren a la velocidad con que la impulsa la ballesta, y saldrá con una velocidad de 510 km/h.

Lo que dice Einstein con el principio de constancia de la velocidad de la luz es que esta ley de composición de velocidades no vale, pues falla para la luz: si el revisor en vez de lanzar una flecha enciende una linterna que apunta en dirección contraria al de la marcha del tren, la luz de la linterna marchará a 300 000 km/s en esa dirección —por ponerlo en números redondos—, en vez de a 299 999,9 km/s como se deduciría de la ley clásica de composición de velocidades —habría que restar los 0,1 km/s con que avanza el tren—. Y si en vez de en dirección contraria apunta en la dirección del tren, la luz de la linterna marchará igualmente a 300 000 km/s en vez de a 300 000,1 km/s. O sea, la velocidad de la luz no se ve influida por la velocidad del tren desde el que se enciende la linterna. Como Einstein le reconoció a un amigo, asimilar esta aparente incoherencia le costó un año.

La constancia de la velocidad de la luz es la que va a introducir todos los aspectos aparente-

mente paradójicos en la teoría de la relatividad especial. Teniendo esto en cuenta, sorprende las pocas molestias que se tomó Einstein en justificar ese principio en su artículo de 1905. Sorprende, por ejemplo, que no mencionara los experimentos de Michelson-Morley de 1887, que no habían sido capaces de detectar diferencias en la velocidad de la luz debidos al movimiento de la Tierra.

El teorema de Pitágoras y la relatividad del tiempo

Como entrevió Einstein un hermoso día de primavera en Berna —según afirmación propia—, la constancia de la velocidad de la luz junto con la invariancia de las leyes de la física en sistemas que se mueven a velocidad constante implica automáticamente que el paso del tiempo no es absoluto. Y una vez que se intuye esa posibilidad, es insultantemente fácil deducirlo, pues no se requiere otra cosa que un sencillo uso del teorema de Pitágoras. Pensemos en un andén donde hay un observador que, por simplicidad, suponemos que está inmóvil, y en un tren que avanza hacia la derecha del observador con velocidad v res-

pecto a este. En el tren viaja una persona sentada de espaldas a la ventana, de manera que no aprecia el movimiento del tren al carecer de referencias exteriores: según el principio de relatividad, para el viajero es como si el tren estuviera inmóvil. El viajero enciende una linterna y un rayo de luz sale en vertical hasta incidir en un espejo situado a una altura b . Llamemos c a la velocidad de la luz; dado que es constante, el tiempo que medirá el viajero en el tren desde que la luz sale de la linterna hasta que incide en el espejo es $t_0 = b/c$ —el tiempo es igual al espacio dividido por la velocidad—.

Veamos ahora qué ocurre con el observador que observa el tren desde el andén: él verá encenderse la linterna y tras un tiempo, que vamos a llamar t_1 , verá cómo el rayo incide en el espejo; pero, para el observador, el espejo no estará sobre la vertical del punto desde donde salió el rayo de luz, pues el tren se está desplazando hacia la derecha: para el observador el espejo estará sobre la vertical de un punto situado a distancia del primero —pues ha transcurrido un tiempo t_1 y como el tren va a velocidad v , habrá recorrido un espacio igual a la velocidad por el tiempo—. Por lo tanto, para el observador situado fuera del tren, el rayo de luz habrá recorrido la hipote-

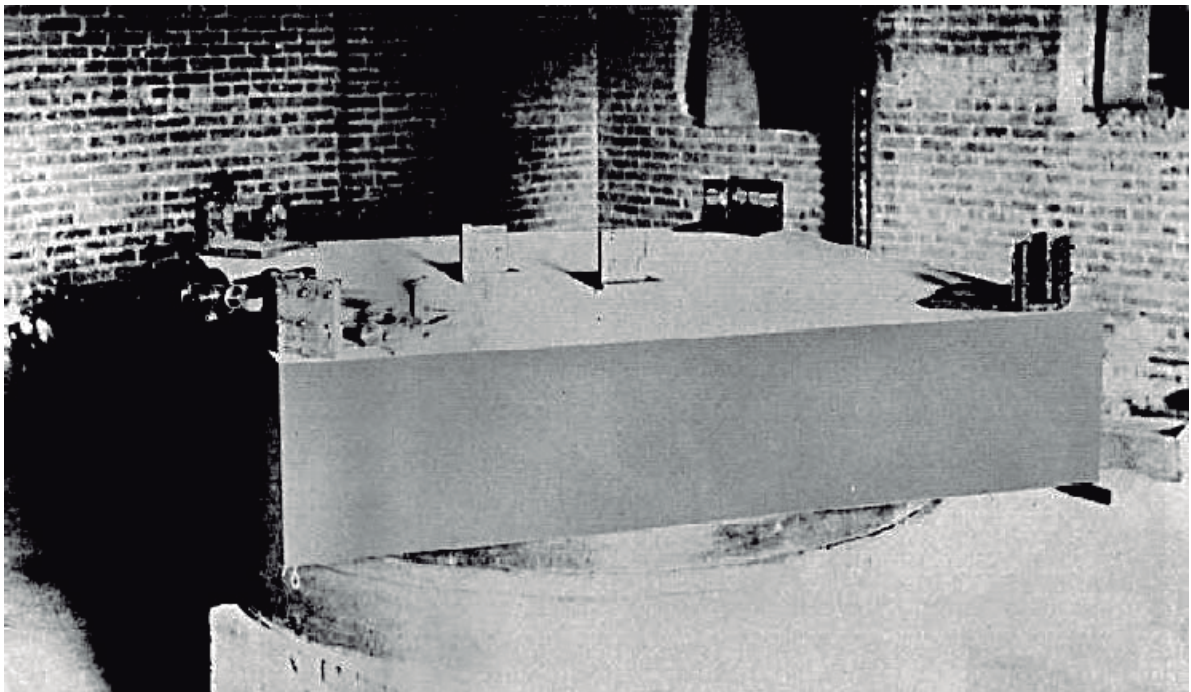


Figura 4. Montaje experimental de Michelson y Morley en Cleveland, Ohio

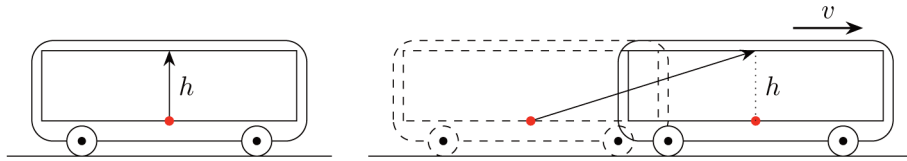


Figura 5. El tren de Einstein. Izquierda: trayectoria del rayo de luz tal y como lo observa el viajero dentro del tren. Derecha: trayectoria del rayo de luz tal y como lo observa el observador fuera del tren

nusa de un triángulo rectángulo de catetos, h y vt_1 según el teorema de Pitágoras, la longitud recorrida por la luz será por tanto igual a

$$\sqrt{h^2 + v^2 t_1^2}$$

Como la velocidad de la luz es constante e igual a c , el tiempo que medirá el observador de fuera, esto es t_1 , es igual a esa longitud dividida por c :

$$t_1 = \frac{\sqrt{h^2 + v^2 t_1^2}}{c}$$

Si en esta sencilla ecuación despejamos el tiempo t_1 obtenemos

$$t_1 = \frac{h}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O lo que es igual,

$$t_1 = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esto nos está diciendo muchas cosas. Primero, que los tiempos medidos por el observador inmóvil fuera del tren y por el viajero dentro del tren son distintos. También nos dice que la velocidad del tren tiene que ser menor que la de la luz, de otra manera estaríamos extrayendo la raíz cuadrada de un número negativo. O sea, nada puede viajar más rápido que la luz. Pero si v es menor que c , el número en el denominador es menor que 1, y por tanto t_1 será mayor que t_0 . Esto es, el observador de fuera mide un tiempo mayor para el mismo suceso que el viajero del

tren. Esta velocidad límite que supone la de la luz la entrevió Einstein con dieciséis años en uno de sus más célebres experimentos mentales; lo contó en los apuntes autobiográficos que escribió en 1949 y en él perseguía a un rayo de luz:

Si corro detrás de un rayo de luz con la velocidad c —la de la luz en el vacío—, debería percibir el rayo luminoso como un campo electromagnético en reposo, aunque espacialmente oscilante, pero esto no parece existir en la experiencia ni resultar de las ecuaciones de Maxwell. De entrada intuí que, juzgada la situación por semejante observador, todo debería desarrollarse según las mismas leyes que para un observador que se hallara en reposo con respecto a la Tierra, pues ¿cómo podría el primer observador saber o constatar que se encuentra en un estado de rápido movimiento uniforme? Como se ve, esta paradoja contiene ya el germen de la teoría especial de la relatividad.

La cuestión es así de simple e inapelable: si suponemos la invariancia de las leyes físicas en sistemas que se mueven con velocidad constante y la invariancia de la velocidad de la luz, es inevitable concluir que el transcurso del tiempo no es absoluto, depende de la velocidad v con que se mueva el sistema en un factor igual a

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Como se ve, la dificultad no reside en los cálculos sino en la elección de los principios a partir de los cuales se van a realizar. Einstein tuvo que tener mucha grandeza, coraje y una cierta predisposición psicológica para entender que un resultado aparentemente tan contradictorio y rupturista con la todopoderosa física newtoniana como es el carácter relativo del tiempo, no es un error fruto de unos principios mal elegidos, sino una característica intrínseca del universo que nos acoge.



Figura 6. Einstein con veintipocos años (la edad con la que desarrolló la teoría de la relatividad especial)

El factor de distorsión del tiempo está muy próximo a 1 para velocidades pequeñas en comparación con la velocidad de la luz, por eso no lo apreciamos en el día a día del mundo que nos rodea. Por ejemplo, la Luna gira alrededor de la Tierra a una velocidad de 3 700 km/h —obviamos el caso de que se mueve en círculos y no de forma lineal—, lo que quiere decir que el tiempo medido en la Tierra sufre en la Luna una dilatación de 1,0000000000059. O sea, que si el paseo espacial de Armstrong y Alvin sobre la Luna duró, según ellos, dos horas y media, ese tiempo medido desde la Tierra hubiera sido de 53 milmillonésimas de segundo más.

Pero no solo el tiempo se ve afectado. También las longitudes de los objetos medidas en el sentido del movimiento. De una forma parecida a lo hecho antes, se puede mostrar que si el viajero coloca un cigarro de longitud d en el sentido del desplazamiento del tren, el observador inmóvil verá que el cigarro mide

$$\frac{d}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

o sea, se produce una distorsión de la longitud del mismo orden que la del tiempo.

De la teoría de la relatividad se deduce también una ley de composición de velocidades distinta a la clásica. Si un sistema A se mueve con respecto a B a una velocidad v y B se mueve con respecto a C a una velocidad w , entonces A se mueve con respecto a C no con la suma de velocidades $v+w$, como establece la cinemática clásica, sino con una velocidad dada por la fórmula

$$\frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}$$

Obsérvese que si una de estas velocidades es la de la luz, por ejemplo $v=c$, entonces

$$\frac{c + w}{1 + \frac{cw}{c^2}} = c$$

lo que es conforme con el principio de constancia de la velocidad de la luz.

En el ejemplo anterior del revisor lanzando una flecha con la ballesta, la cinemática clásica nos daba unas velocidades de 210 y 510 km/h para la flecha, según esta se lanzara en contra o en la dirección del tren. La teoría de la relatividad nos dice que realmente estas velocidades son de, aproximadamente, 209,9999999999 y 509,9999999998 km/h. En ambos casos la discrepancia es prácticamente inapreciable —del orden de -1 y -2 cienmilésimas de milímetro por segundo en cada caso—.

Evidencias experimentales

Hoy día, a más de un siglo de la formulación de la teoría de la relatividad especial, hay una abrumadora evidencia experimental que la apoya. Aquí comentaremos solo uno de estos experimentos: la dilatación del tiempo detectada en los muones producidos por los rayos cósmicos. Es muy apropiada para contarla en el aula a alumnos de bachillerato, pues los conceptos que usa pueden ser entendidos por ellos, y tiene la suficiente dosis de elementos extraterrestres como para encender su imaginación.

Los rayos cósmicos, descubiertos en la primera década del siglo XX, son una fuente de radiactividad natural. Nos vienen de fuera de la Tierra y han sido objeto de un intenso estudio intentado dilucidar su naturaleza, lo que significa indagar sobre qué tipo de partículas los componen. Estudio que todavía hoy continúa, pues hasta muy recientemente no se ha establecido con razonable seguridad que una de las fuentes de rayos cósmicos son las explosiones de supernovas, pero debe haber otras, y no está claro qué proporción de los rayos cósmicos proviene de supernovas ni de dónde provienen los otros.

En 1936 se descubrió una de las partículas producto de los rayos cósmicos: el muón. Es unas doscientas veces más pesado que el electrón, con carga negativa como él, no forma parte de los átomos convencionales y es muy muy efímero: su vida media es de poco más de una millonésima y media de segundo.

Los muones se producen al interaccionar las partículas subatómicas que componen los rayos cósmicos con la atmósfera y el campo magnético de la Tierra y, dada la altísima velocidad con que los rayos cósmicos llegan a la Tierra, los muones

se mueven con velocidad muy próxima a la de la luz. Dada la corta vida media de los muones, muy pocos de ellos deberían alcanzar la superficie de la Tierra a pesar de su altísima velocidad..., y sin embargo, tal cosa no sucede. Y ahí es donde entra en juego la dilatación del tiempo relativista.

En 1940, B. Rossi y D.B. Hall llevaron a cabo un experimento en Colorado, USA. Midiéron la desintegración de muones entre el lago Echo, situado a una altitud de 3 240 m., y la cercana ciudad de Denver, a 1 616 m. de altitud. Sus resultados fueron mayormente cualitativos, pero estaban de acuerdo con las predicciones de la relatividad especial. En 1963, D.H. Frinch y J.H. Smith realizaron un experimento mucho más preciso sobre la desintegración de muones. Al igual que Rossi y Hall, usaron dos puestos de observación, uno en el Monte Washington, a 1900 m. de altitud, y otro en Cambridge, Massachusetts, situada 250 km al sur, pegada a Boston, y por lo tanto a nivel del mar. La velocidad con que fueron detectados los muones oscilaba entre una media de 0,9952 de la luz en el monte y 0,9889 en Cambridge. Para un observador en reposo con respecto a los muones, estos tardarían

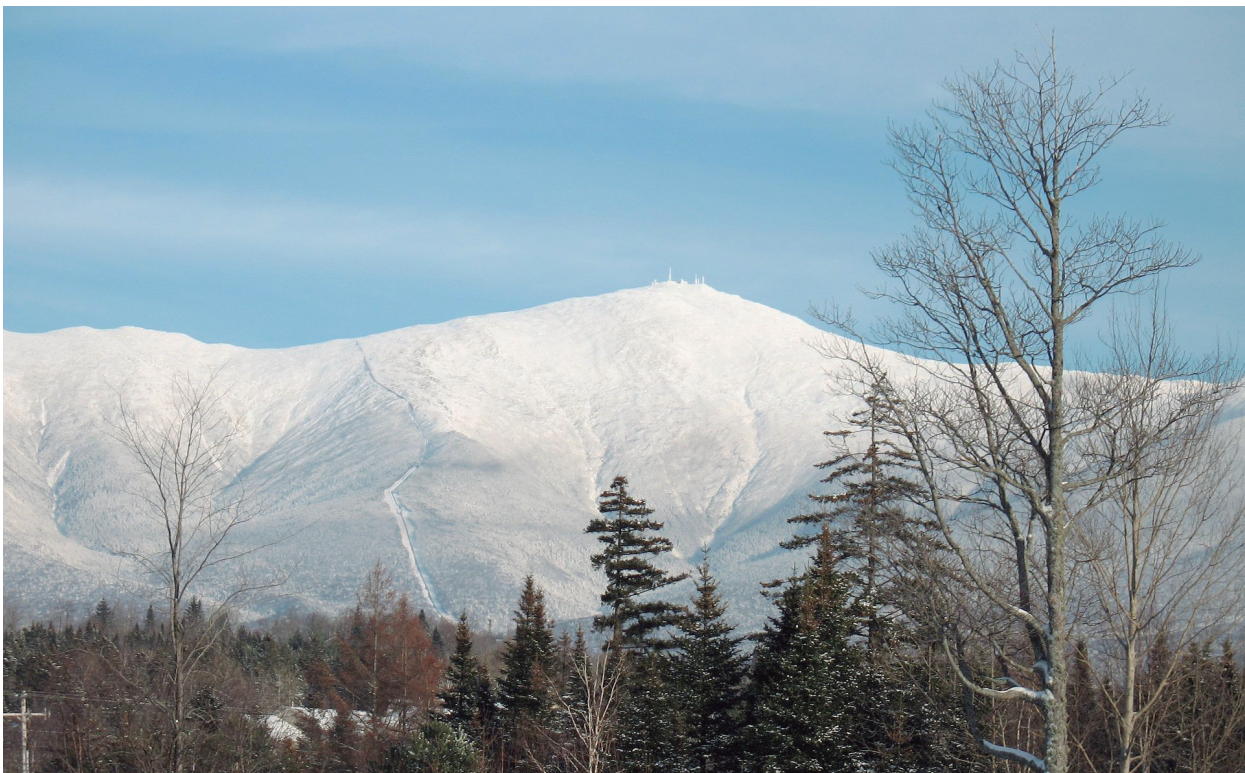


Figura 7. El monte Washington en el estado de New Hampshire

aproximadamente unas 6,4 millonésimas de segundo en recorrer la diferencia de altitud entre los dos lugares de observación. En varias mediciones en las alturas de Monte Washington, midieron una media de 563 muones por hora — con una desviación de diez arriba o abajo de la media—. Según la vida media del muón y teniendo en cuenta el tiempo que necesitan para recorrer la diferencia de altitud, de los 563 muones detectados en el monte deberían de haber sobrevivido al nivel del mar poco más de 30 muones. Y, sin embargo, los investigadores contaron 408 muones por hora en Cambridge — con una desviación de nueve arriba o abajo de la media—. Un simple cálculo estadístico a partir de esta cantidad muestra que la vida media de los muones ha aumentado por un factor de 8,8; considerando los errores estimados para la observación, Frinch y Smith concluyeron que el factor de corrección de la vida media de los muones determinado por su experimento oscilaba de 8 a 9,6. Si se tienen en cuenta las velocidades medidas para los muones tanto en las alturas de Monte Washington como en Cambridge, la relatividad especial da un factor de dilatación para la vida media de los muones que va de 6,5 a 10,4 — suponiendo que hayan visto nociones básicas de probabilidad, todos estos cálculos se podría hacer en segundo de bachillerato—.

Así, nuestro experimento no sólo da evidencia cualitativa directa de la dilatación del tiempo —concluyeron los investigadores—, sino que las cifras obtenidas apoyan las predicciones cuantitativas de la teoría de la relatividad especial.

Gracias a esta dilatación del tiempo, una apreciable cantidad de muones de los rayos cósmicos alcanzan la superficie de la Tierra; son de hecho la componente más abundante de la radiación cósmica detectada al nivel del mar. Y eso ha tenido su importancia en el desarrollo de la vida, pues las colisiones de los muones cósmicos con las moléculas de ADN ocasionan una parte no despreciable de las mutaciones genéticas que acaban generando, por selección natural, la evolución de las especies.

Experimentos del tipo de los llevados a cabo por Rossi-Hall o Frinch-Smith pueden ser hoy

en día realizados por estudiantes de un primer curso de física relativista en la universidad, como pusieron de manifiesto los profesores N. Easwar y D. MacIntire a principios de los 90; tras su experiencia escribieron: «Este significativo experimento puede realizarse en un solo día, si se dispone de una montaña moderadamente alta en los alrededores. El concepto relativista de la dilatación del tiempo es a la vez excitante y difícil para un estudiante en un primer curso de física, y esta experiencia ayuda a convertir escépticos en creyentes. Claramente, el valor pedagógico de este experimento es inmenso, y eso sin contar con la experiencia que adquieren los estudiantes al trabajar con equipo moderno y técnicas de detección de partículas».

La dilatación del tiempo deducida a partir de la observación de la vida media de muones y otras partículas subatómicas de corta vida ha sido comprobada innumerables veces, y con mayor precisión que en los experimentos comentados, en los aceleradores de partículas, donde este tipo de experimentos se ha convertido en estándar.

La relatividad general también predice una dilatación/contracción del tiempo, producida en este caso por el campo gravitatorio. Esta dilatación/contracción del tiempo asociada a ambas relatividades ha sido observada directamente en relojes atómicos viajando en aviones, y es fundamental en el sistema de localización GPS. De hecho, si no se tuviera en cuenta, los errores acumulados por el sistema GPS sobre la posición de un objeto en la Tierra alcanzarían los diez kilómetros por día! De manera que hay que ir ajustando continua y meticulosamente los desfases temporales que las teorías de Einstein predicen, de otra manera los navegadores de los coches o los móviles empezarían a fallar al cabo de unos pocos minutos de uso.

Referencias bibliográficas

- DURÁN, A. J. (2015), *El universo sobre nosotros*, Crítica, Barcelona,
- EASWAR, N. Y D. A. MACINTIRE (1990), «Study of the effect of relativistic time dilation on cosmic

ray muon flux – An undergraduate modern physics experiment», *American Journal of Physics* n.º59, 589–592.

EINSTEIN, A. (1999), *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Altaya, Barcelona.

EINSTEIN, A. (2005), *Obra esencial*, Edición de José Manuel Sánchez Ron, Crítica, Barcelona.

FÖLSING, A. (1997), *Albert Einstein*, Penguin, NY.

FRISCH, D. H. Y J. H. SMITH (1963), «Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons», *American Journal of Physics* n.º 31, 342–355.

ISAACSON, W. (2008), *Einstein, su vida y su universo*, Debate, Madrid.

ROSSI, B. Y D. B. HALL (1941), «Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum», *Physical Review*, n.º59, 223–228.

SCHILPP, P. A. (edt) (1949), *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, Open Court Press, La Salle.

WILL, C.M.(2006), «The Confrontation between General Relativity and Experiment», *Living Rev. Relativity*, n.º 9, 3,. Online Article: <<http://www.livingreviews.org/lrr-2006-3>>.

ANTONIO J. DURÁN GUARDEÑO
Facultad de Matemáticas, Universidad de Sevilla
<duan@us.es>

1 Buena parte del contenido de este artículo ha sido tomada de mi libro *El universo sobre nosotros*, (2015), Crítica, Barcelona.