

RELATIVIDAD, TIEMPO Y ASUNTOS DE GRAVEDAD

ALBERTO GALINDO TIXAIRE *

* Departamento de Física Teórica. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense. 28040 MADRID. España.

I. INTRODUCCIÓN

El primer centenario de la Relatividad Especial (RE) de Albert Einstein se cumple el 30 de junio del año 2005. Todo el mundo conoce a este personaje mítico, que cierra con Arquímedes y Newton la trilogía posiblemente más poderosa de creadores científicos. La fama de Einstein contrasta con el escaso conocimiento que el público culto tiene de su obra. A él se deben, entre otras, las siguientes contribuciones revolucionarias: 1) El cambio conceptual de estructura del espacio-tiempo vacío: la simultaneidad no es absoluta, las longitudes se contraen en la dirección del movimiento, los intervalos de tiempo crecen con la velocidad, y la pérdida de masa en una reacción se convierte en energía. 2) La luz se comporta en ocasiones como un colectivo de partículas, conocidas como fotones. 3) La dinamización de la geometría a través de la gravedad: la masa/energía curva el espacio-tiempo, afectando a las distancias y a los intervalos de tiempo.

Casi un siglo después la física continúa considerando válidas las bases del pensamiento de Einstein que rigen su esquema espacio-temporal, a saber, los principios de relatividad y los principios de equivalencia. Numerosos experimentos y observaciones astrofísicas los han reafirmado: 1/ La producción de partículas elementales en los grandes aceleradores y su fenomenología de alta precisión a través del modelo estándar. 2/ La desviación y retraso de la luz en campos gravitatorios. 3/ El avance de periastrós. 4/ La dilatación gravitacional del tiempo. Además, el

Universo es testigo constante de sucesos sumamente violentos (estallidos de rayos gamma, cuásares, supernovas, etc) en cuya explicación interviene la Relatividad General (RG), así como en la geometría a gran escala del cosmos y en la dinámica de su expansión acelerada.

Las teorías de Einstein no sólo son de la máxima importancia para los físicos, sino que también están presentes en nuestra vida. Cuando usamos el GPS (Global Positioning System) para saber en qué lugar e instante precisos nos hallamos, estamos aprovechándonos de una tecnología que no puede ignorar ni la dilatación del tiempo relativista ni la gravitacional. Cuando a un paciente le hacen una tomografía de emisión de positrones, se aprovecha la transformación de masa en energía predicha por la dinámica relativista. Cuando miramos las estrellas, estamos contemplando gigantescos hornos termonucleares en los que un 0.7% de la masa se convierte en energía luminosa; en particular, a estos procesos debe nuestro Sol la energía con que baña la Tierra y energiza la biosfera. Y cuando el hombre sueña con viajar a mundos lejanos, volver al pasado, o visitar el futuro, tarde o temprano termina acudiendo a las deformaciones del espacio-tiempo que le ofrece en principio la teoría einsteniana de la gravedad en condiciones extremas.

Pretendemos con esta charla acercar estas cuestiones al ciudadano curioso. Es el mejor recuerdo a la memoria de quien cambió la física y nos legó, como su obra cumbre, la más bella creación del espíritu científico de todos los tiempos, la teoría einsteniana de la gravitación.

* Este texto fue esencialmente escrito en el primer semestre de 2004. Lo hemos mantenido, con alguna nota de actualización.

II. RELATIVIDAD

La mayoría de los ciudadanos dan por sentado que si dos sucesos son simultáneos para uno, lo son para cualquier otro; que si la longitud de un coche parado es de 4.5 m, también es la misma en movimiento, y que si la duración de un viaje en el AVE entre Madrid y Zaragoza es de 105 minutos para los viajeros, también esta es la diferencia de tiempos entre los relojes de las estaciones de salida y llegada. Estos tres convencimientos son fruto de la experiencia cotidiana —engañosa ahora— en nuestro mundo, un mundo en el que la velocidad de la luz en vacío es enorme, unos 300,000 km/s.

Supongamos, por un momento, que esta velocidad fuera mucho menor, digamos de 1 km/s. Estamos sentados, y en un momento determinado de nuestro reloj, despegue un avión del aeropuerto que se halla a 20 km. Para un caminante que pasa por nuestro lado en ese instante, a una velocidad de paseo de 2 km/hora, ese despegue tuvo lugar una décima de segundo antes. En tal mundo ideal veríamos que la longitud del coche anterior, viajando a 100 km/hora, se recortaba en casi 2 mm, y que los viajeros del AVE, tras su recorrido a 200 km/hora, al llegar a la estación de destino veían como el reloj de la estación estaba irremediamente adelantado, respecto del suyo, en unos 10 s.

A la velocidad real de la luz estos efectos pasan desapercibidos en la práctica, salvo en experimentos físicos de alta energía y tecnologías de gran precisión (como el citado GPS). Las modificaciones en longitudes y tiempos que la relatividad exige depende del cociente de las velocidades de los cuerpos y la velocidad de la luz, y son por tanto imperceptibles para nuestras reglas y relojes habituales, al ser dicho cociente en general muy pequeño.

Pero a principios del siglo XX ninguna de estas tecnologías estaba desarrollada. Aún así, la poderosa mente de un oscuro empleado de la Oficina Suiza de

Patentes en Berna, de nombre Albert Awrohom Einstein, proponía un cambio radical en el espacio-tiempo heredado de Newton, como consecuencia de su convicción en dos principios básicos: el principio de relatividad (la física debe ser la misma en todos los sistemas inerciales), y el principio de constancia de la velocidad de la luz (la velocidad de la luz es isótropa y de igual magnitud en dichos sistemas).¹

Como base experimental de la independencia de la velocidad de la luz respecto de la elección de inercial, se tienen los experimentos del tipo Michelson-Morley (que prueban la isotropía de esa velocidad en cualquier inercial), y los del tipo Kennedy-Thorndike (que demuestran que la velocidad de la luz no depende de la velocidad del inercial). Con la parametrización $c(v)/c = 1 - (A + B \sin^2 \theta)(v/c)^2$, donde v , θ indican la velocidad (del inercial en el que estamos midiendo la velocidad de la luz) con respecto a un sistema de referencia distinguido (generalmente se toma este último como el asociado al fondo cósmico de microondas), y el ángulo de la luz con la dirección de movimiento del inercial, la isotropía ha sido comprobada con notable precisión $\Delta c/c = (2.6 \pm 1.7) \times 10^{-15}$, correspondiente a $B = (-2.2 \pm 1.5) \times 10^{-9}$.² El coeficiente A marca una hipotética falta de invariancia de la velocidad de la luz bajo cambio de inerciales; se conoce con menor precisión que $B: A = (-3.1 \pm 6.9) \times 10^{-7}$.³

A. Simultaneidad

El viejo experimento ideal del tren, presentado por primera vez por Einstein en 1916,⁴ muestra cómo la independencia de la velocidad de la luz al cambiar de inerciales relativiza el concepto de simultaneidad (Fig. 1).

Supongamos un tren que avanza en línea recta a velocidad v constante. En el punto medio de su plataforma central hay un observador inercial B . Al pasar justo por enfrente de otro observador inercial A ,

¹ A. Einstein, *Zur Elektrodynamik Bewegter Körper*, Annalen der Physik **17**, 891-921 (1905).

² H. Müller, S. Herrmann, C. Braxmaier, S. Schiller, A. Peters, *Modern Michelson-Morley Experiment using Cryogenic Optical Resonators*, Phys. Rev. Lett. **91**, 020401 (2003).

³ P. Wolf, S. Bize, A. Clairon, A.N. Luiten, G. Santarelli, M.E. Tobar, *Tests of Lorentz Invariance using a Microwave Resonator*, Phys. Rev. Lett. **90**, 060402 (2003).

⁴ A. Einstein, *ÜBER DIE SPEZIELLE UND DIE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE (GEMEINVERSTÄNDLICH)*, Braunschweig, Berlin 1917.

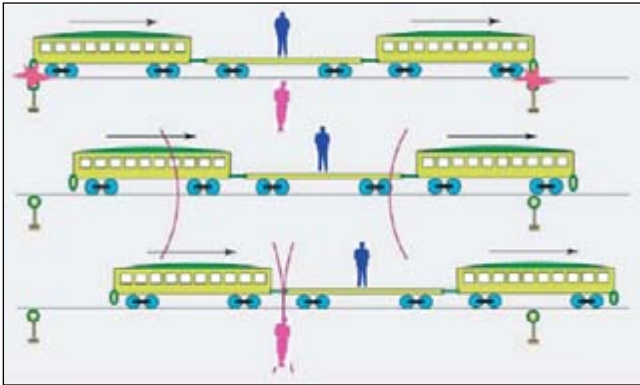


Figura 1. Experimento mental de Einstein.

éste en el suelo y en reposo, de los puntos E_1 , E_2 de la estación que en ese momento (para el observador A) coinciden con los extremos del tren, salen sendos frentes de onda luminosos. Estos destellos se han producido simultáneamente para el observador A, y este los recibe a la vez. Sin embargo, al observador B, que “huye” del foco E_1 dirigiéndose hacia el E_2 , le llega antes el destello de E_2 , y como equidista de los extremos del tren, y la velocidad de la luz proveniente de ambos es la misma (principio de relatividad), concluye que para él se produjo antes el destello de E_2 que el de E_1 , y por tanto que estos destellos no fueron emitidos simultáneamente.

¿Quién tiene razón? Ambos la tienen. La simultaneidad es relativa. *Die Relativität der Gleichzeitigkeit*, escribía Einstein. Si la composición de las velocidades fuera la estipulada por la cinemática de Galileo y Newton, tal desviación de la simultaneidad no hubiera ocurrido, pues si c es la velocidad de avance de los destellos para el observador en reposo A, las velocidades vistas por B hubieran sido, no c , como marca la RE, sino $c+v$ para el destello de E_1 , y $c-v$ para el de E_2 , con lo que B hubiera recibido ambos a la vez.

En resumen, el tiempo newtoniano, el que nos es familiar, tuvo que dejar paso al tiempo einsteiniano, mutable y relativo, con tantos “ahora” cuantos estados de movimiento mutuo imaginemos.

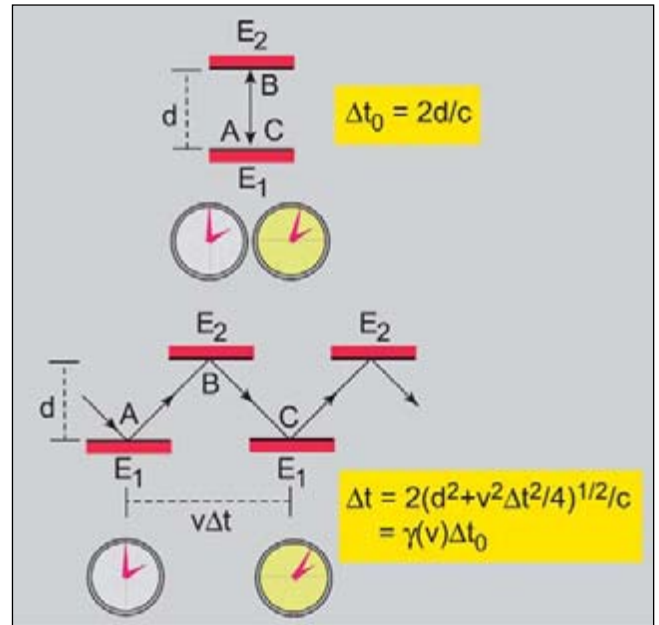


Figura 2. Retraso de los relojes en movimiento.

B. Dilatación de tiempos

No solo la simultaneidad es relativa. También lo es la duración temporal entre sucesos. Sea un reloj de luz, formado por un rayo de luz que rebota entre dos espejos (Fig. 2).

La duración entre tics sucesivos se ve alterada por el movimiento, en la relación mostrada. Al ser más largos los intervalos entre tics, el tiempo marcado en inerciales móviles entre sucesos es menor. En frase de Einstein, *die Uhr geht infolge ihrer Bewegung langsamer als im Zustande der Ruhe* (“como consecuencia de su movimiento, el reloj va más despacio que cuando está en reposo”).

La dilatación relativista del tiempo, expresada a través del factor $\gamma(v) := [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$, se ha medido con una precisión de 2.2×10^{-7} .⁵

El retraso de los relojes en movimiento a bordo de los satélites del sistema de navegación GPS, que tienen una velocidad orbital de 14 000 km/h, es de 7 μ s al día.

⁵ G. Saathoff, S. Karpuk, U. Eisenbarth, G. Huber, S. Krohn, R. Muñoz Horta, S. Reinhardt, D. Schwalm, A. Wolf, G. Gwinner, *Improved Test of Time Dilation in Special Relativity*, Phys. Rev. Lett. **91**, 190403 (2003).

C. Contracción de longitudes

La dilatación de tiempos conlleva una contracción dual en longitudes. La longitud de una barra se define como la distancia entre sus extremos en un mismo instante. Como la simultaneidad depende del inercial, lo mismo pasa con la longitud.

Es fácil ver que la longitud L (que acabamos de definir), medida por un observador móvil M , satisface $L = v\Delta t$, donde v es la velocidad de M a lo largo de la dirección de la barra, y Δt el tiempo que, según el reloj de M , tarda la regla en pasarle por delante. Asimismo, la longitud L_0 de la barra en reposo respecto de otro observador R es igual a $v\Delta t_0$, donde Δt_0 es el tiempo, medido en el inercial en reposo de R , que tarda el observador móvil M en recorrer dicha barra.

Dado el retraso de los relojes móviles, $\Delta t = \Delta t_0/\gamma(v)$, resulta la relación $L = L_0/\gamma(v)$, expresión que muestra *die Relativität des Begriffe der räumlichen Entfernung* (“la relatividad del concepto de distancia espacial”).

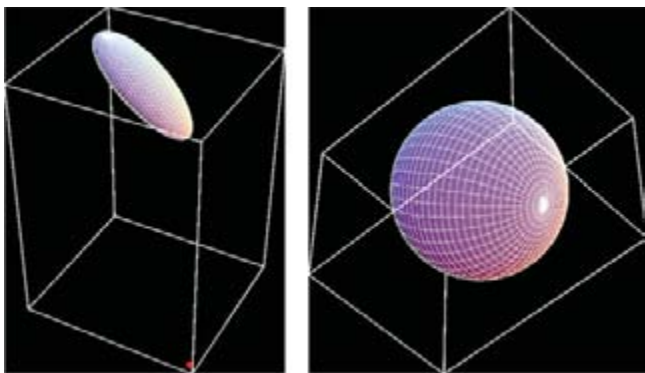


Figura 3. Visión deformada por el movimiento. Lugar geométrico G de aquellos sucesos en la historia de una esfera de radio unidad y centro $(vt, 3+vt, 5+vt)$ moviéndose a velocidad $v = 4/5$ (unidades $c=1$) en la dirección del eje Ox , tales que su luz llega al ojo, sito en el origen $(0; 0; 0)$ de coordenadas (punto rojo), en el mismo instante de tiempo $t=3$. A la derecha, fotografía o visión ocular de G .

1. Sobre la visibilidad de la contracción

Las longitudes se contraen en la dirección del movimiento, pero no en las direcciones transversales. Por eso una “instantánea” de un cuerpo en movimiento respecto de un inercial S , esto es, el conjunto de elementos de ese cuerpo en un mismo instante de tiempo medido con los relojes de ese sistema S , será una deformación de la instantánea en reposo.

Con alguna que otra frecuencia se lee que la relatividad hace que “veamos” las imágenes deformadas, y que, por ejemplo, la imagen de una esfera en movimiento es un elipsoide aplastado en la dirección del movimiento. Durante bastantes años se creyó que la contracción de longitudes era “visible”. Lorentz afirmaba en 1922 que la contracción era fotografiable.⁶ Incluso Einstein lo deja entrever en su trabajo de 1905. Pero una cosa es observar y otra es ver. Observar exige la medición simultánea de las posiciones de todos los puntos de un objeto. La luz debe salir de la superficie del objeto simultáneamente, aunque no llegue a la vez a los ojos del observador. En cambio ver o fotografiar exige que los fotones lleguen todos a la vez a la cámara fotográfica o al ojo del observador. El primero en cuestionar la visibilidad de la contracción de longitudes fue Lampa en 1924.⁷ Su trabajo cayó en el olvido, y varias décadas después Terrell probaba la invisibilidad de la contracción en ciertos límites.⁸ A la vez, Penrose⁹ probaba que la fotografía de una esfera a gran velocidad no aparecía contraída, no era un elipsoide, sino que se veía sin distorsión alguna. Esto es cierto en general para cualquier objeto a velocidad arbitraria, siempre que se vea desde muy lejos (pequeño ángulo sólido). La demostración (Terrell, Weisskopf) se basa en la naturaleza conforme en los ángulos de observación que tiene la proyección sobre una superficie esférica centrada en el observador.¹⁰ En este sentido la contracción de longitudes, que siempre es “observable”, resulta “invisible” en ciertos casos.

⁶ H. A. Lorentz, LECTURES ON THEORETICAL PHYSICS, Macmillan and Company, Ltd., London 1931; translated from Dutch edition of 1922, Vol. 3, p. 203.

⁷ A. Lampa, *Wie erscheint nach der Relativitätstheorie ein bewegter Stab einem ruhenden Beobachter?*, Z. Physik **27**, 138-148 (1924).

⁸ J. Terrell, *Invisibility of the Lorentz Contraction*, Phys. Rev. **116**, 1041-1045 (1959).

⁹ R. Penrose, *The Apparent Shape of a Relativistically Moving Sphere*, Proc. Cambridge Phil. Soc. **55**, 137-140 (1959).

¹⁰ J. Terrell, *loc. cit.*

V. F. Weisskopf, *The visual appearance of rapidly moving objects*, Phys. Today **13**(9), 2427 (1960).



Figura 4. Submarino relativista (Royal Navy, Crown Copyright).

2. La paradoja del submarino relativista

Imaginemos un submarino tal que, inmerso en un fluido, permanece en equilibrio. Se pone en movimiento, paralelamente a la superficie del fluido, a velocidad constante. Entonces se presenta este dilema:¹¹

1. Visto desde el fluido en reposo, la contracción longitudinal hace que el volumen de fluido desalojado sea menor que cuando estaba en equilibrio, y por tanto, la fuerza ascensional también. Como el peso del submarino no cambia con el movimiento, el ingenio se irá al fondo.
2. Visto desde el interior del submarino, será el líquido exterior el que se contrae, aumentando su densidad, y por tanto también la fuerza ascensional. En consecuencia, el submarino emergerá.

¿Quién tiene razón? Supplee arguyó, con Relatividad Especial, y un tratamiento un tanto artificial de

cómo debía transformarse el campo gravitatorio bajo cambio de inerciales, que el submarino debía hundirse, cualquiera que fuera el punto de vista adoptado para la descripción. Más recientemente, un estudio sólidamente elaborado sobre el principio de Arquímedes en Relatividad General ha llegado a la misma conclusión.¹²

III. TIEMPO

Dice Feynman en uno de sus famosos libros sobre Física, que lo importante no es cómo se define el tiempo, sino cómo se mide.¹³ Los intentos por definirlo le llevan a uno irremediamente a compartir la frustración agustiniana: *Quid est ergo tempus? si nemo ex me quaerat, scio; si quaerenti explicare velim, nescio.* (Confessiones, Liber XI, Caput 14). Newton también renunció a definir el tiempo: *Nam tempus, spatium, locum et motum ut omnibus notissima non definio.*¹⁴

En la actualidad disponemos de relojes atómicos de gran exactitud, como el NIST-F1 de Cs, tipo surtidor.¹⁵ Es por hoy el reloj más exacto del mundo. Su inexactitud está acotada por 1×10^{-16} , de modo que no perderá ni ganará más de 1 s en 30 millones de años.^{16,17}

A. Viajes al futuro (I)

El retraso de los relojes debido al movimiento no solo es válido para movimientos uniformes, sino también para cualquier forma de movimiento del reloj. En particular, el tiempo medido por un reloj comóvil a lo largo de cualquier viaje entre dos sucesos es menor que el tiempo transcurrido en un inercial para el que esos dos sucesos ocurran en el mismo punto. En pocas palabras: el movimiento inercial maximiza el tiempo.

¹¹ J.M. Supplee, *Relativistic buoyancy*, Am. J. Phys. **57**, 75-77 (1989).

¹² G.E.A. Matsas, *Relativistic Archimedes law for fast moving bodies and the general-relativistic resolution of the "submarine paradox"*, Phys. Rev. D **68**, 027701 (2003).

¹³ R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS*, Addison-Wesley, Reading 1963.

¹⁴ I. Newton, *PHILOSOPHIAE NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA*, Streater, London 1687.

¹⁵ Ver, por ejemplo, <http://tf.nist.gov/cesium/fountain.htm>

¹⁶ En 2005 se ha mejorado a 5×10^{-16} , equivalente a 1 s en 60 millones de años.

¹⁷ Para la próxima década se espera una gran revolución tecnológica en la medida del tiempo, con el uso de relojes atómicos ópticos. Los peines de frecuencias van a hacer posible mejorar la exactitud de los relojes atómicos en tres órdenes de magnitud, pasando de la actual a 1×10^{-18} . Este espectacular avance se basa en el uso de las transiciones ópticas ($\sim 10^{15}$ Hz) en átomos excitados, frente a las frecuencias de



Figura 5. Reloj NIST-F1.

1. Los gemelos de Langevin

Esto conduce a la “paradoja del reloj”, que más tarde se convertiría en la famosa “paradoja de los gemelos”.¹⁸ tenemos dos hermanos gemelos, *A* y *B*, y uno de ellos, digamos el *B*, sale en una nave espacial rumbo a una estrella próxima. Tan pronto llega allí, inicia su regreso a la misma velocidad. Desde el punto de vista del *A*, los relojes de *B* han retrasado, y *A* encuentra a *B* más joven. Pero como también los relojes de *A* se han movido respecto de *B*, podríamos pensar que los relojes de *A* han retrasado respecto de los de *B*, y que este encuentra a *A* más joven. Esta es la (aparente) paradoja.

Veamos que no es tal, pues la situación entre ambos gemelos no es simétrica: el gemelo *A* que se queda en tierra no va y vuelve, siendo su velocidad prácticamente constante (despreciando la de la Tierra en torno al Sol). Por contra, el gemelo *B* que vuela a α Centauri, por ejemplo, tiene que regresar a la Tierra, lo que supone una inversión en su gran velocidad relativa, esto es, su necesidad de fuerte aceleración.

Consideremos el ejemplo de la Fig. 6, con el viaje de ida y regreso de *B* a α Centauri, sita a 4 años luz, moviéndose a una velocidad v , relativa a la Tierra,

que escogemos como $4c/5$, para que los números salgan sencillos. Ignoraremos los tiempos de aceleración y deceleración, y el de estancia sobre la estrella. Su efecto, en cualquier caso, podría minimizarse yendo a estrellas más lejanas.

Con estos datos, $\gamma(v) = 5/3$. De acuerdo con la RE de Einstein, el gemelo *B* llegará a la estrella cuando su reloj marque $t'_* = 3$ años, y para el gemelo *A*, ese suceso de llegada será simultáneo con sucesos que en la Tierra ocurren cuando el reloj de *A* indica $t_* = 5$ años (el tiempo que a la velocidad de la nave se tarda en llegar a la estrella). Por eso concluye *A* que el reloj de *B* retrasa respecto del suyo con un factor $\gamma^{-1} = 3/5$. Desde el referente *B*, ocurre lo mismo; ve alejarse de él a la Tierra con una velocidad $v = 4c/5$, y como tarda sólo 3 años en llegar a la estrella, es como si la distancia Tierra-estrella hubiese encogido pasando a ser $3v = 12/5$ años luz (contracción de longitudes); e infiere, por las fórmulas de la RE, que el tiempo en la Tierra simultáneo (para él) con su llegada es $3\gamma^{-1} = 9/5$ años. También *B* concluye en esta primera

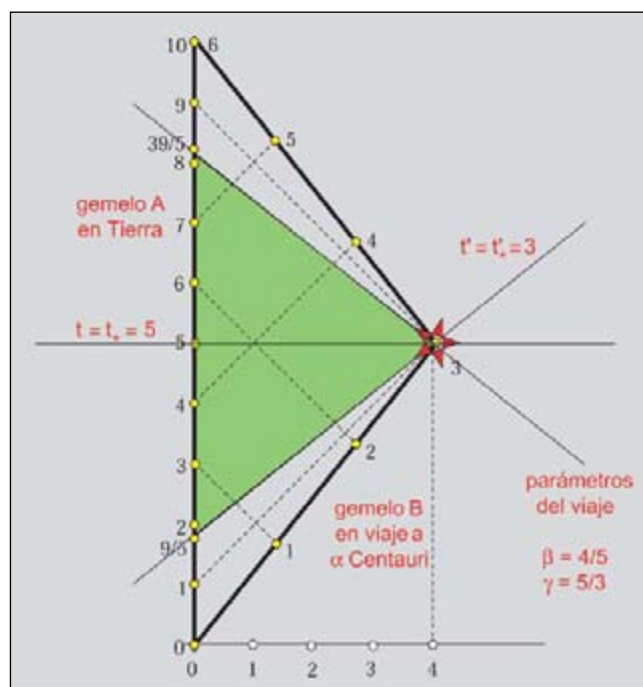


Figura 6. Gráfico para la paradoja de los gemelos.

microondas ($\sim 10^{10}$ Hz) típicas de los relojes como el NIST-F1. Las consecuencias de este gran salto en la medida del tiempo abre inmensos horizontes, no solo tecnológicos (mejoras substanciales en la precisión del GPS o del sistema Galileo), sino también básicos, como el control de posibles variaciones en el tiempo de las constantes físicas fundamentales, medidas de efectos relativistas de órdenes superiores, etc.

¹⁸ P. Langevin, *L'évolution de l'espace et du temps*, Scientia **10**, 31-54 (1911).

mitad del viaje que el reloj de A atrasa respecto del suyo en un factor $3/5$.

El viaje de vuelta es análogo, por lo que en el reencontro para el reloj de la nave habrán transcurrido 6 años desde la partida S_{in} , y para el reloj de la Tierra el tiempo habrá sido de 10 años.

Y surge una contradicción (aparente al menos): cada reloj retrasa respecto del otro y sin embargo afirmamos que para el reloj del gemelo B sólo han transcurrido 6 años, frente a los 10 años que pasan para el reloj de A . ¿Cómo es posible? ¿Dónde se esconde el error? Sencillamente, en que los retrasos sólo hemos podido constatarlos en tramos uniformes del movimiento del reloj con respecto al cual afirmamos el retraso; y mientras esto vale para toda la historia del reloj de A , sólo rige en cada uno de los tramos rectilíneos del viaje de B , pero no durante el tiempo de inversión del movimiento. Este tiempo, que para B es despreciable en nuestro ejemplo ($\Delta t' = 0$), no lo es para A : $\Delta t = 10 - 2 \times (9/5) = 32/5$ (zona verde en la figura). Durante un brevísimo instante de su tiempo en torno a t'_* , para el gemelo B el reloj de A adelanta $32/5$ años. Pero ¿por qué? La explicación usual, dentro de la RE, es que en ese cambio brusco de inercial, B pasa de tener en su pasado solo el periodo de 0 a $9/5$ años de la historia de A (a partir de la separación inicial), a tener el tramo 0- $41/5$ años, pues el “ahora” de B ha cambiado. Basta que B vaya preguntando a cada uno de toda una colección infinita de observadores intermedios inerciales, con velocidades cubriendo desde v hasta $-v$, qué lapso de tiempo infinitesimal ha pasado para A según cada uno ellos, y luego haga la suma de los mismos.

El tiempo de la relatividad nos confunde a menudo con rompecabezas como este, cuyo sentido paradójico se desvanece cuando nos damos cuenta de que el tiempo depende del camino.

El viaje al futuro es por tanto posible. Hasta la fecha, quien más al futuro ha ido ha sido el astronauta

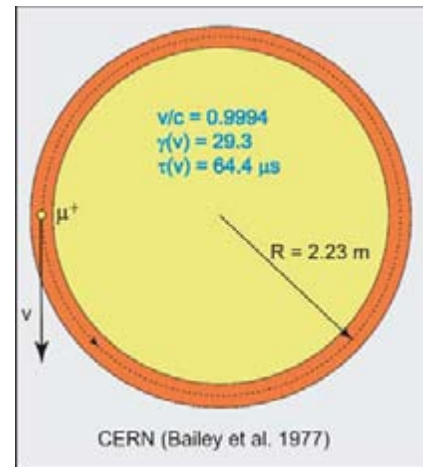


Figura 7. Dilatación de la vida de los muones en el Anillo de Almacenamiento de Muones del CERN.

ruso Sergei Krikalev, que en su estancia de 748 días a bordo de la Estación Espacial Internacional ha conseguido viajar ¡1/50 s! hacia el futuro.

2. Estirando el tiempo

Gracias a la dilatación del tiempo podemos observar muones cósmicos en la superficie de la Tierra.¹⁹ Los muones son la componente primaria de la radiación cósmica a nivel del mar, pero si no fuera por la dilatación de sus vidas, incluso a la velocidad de la luz recorrerían tan solo unos 2/3 de km antes de desintegrarse. Pero con una velocidad típica de $0.994c$, su vida (que en reposo es $\tau_{\mu,0} = 2.197 \mu s$) aumenta en un factor 9 y por tanto también su recorrido, haciendo posible que lleguen abundantemente al suelo.

En experimentos con aceleradores se consigue alargar la vida $\tau_{\mu}(v) = \gamma(v)\tau_{\mu,0}$ de los muones con factores de dilatación más altos. En 1966 se hizo un experimento en el CERN con muones de $v/c = 0.997$ $\gamma(v) = 12$, que confirmó la dilatación con un 2% de precisión,²⁰ mejorada años después hasta el 2×10^{-3} (95% N.C.) con muones de $\gamma = 29.33$, para los que $\tau_{\mu} = 64.4 \mu s$ (ver Fig. 7).²¹

¹⁹ B. Rossi, D.B. Hall, *Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum*, Phys. Rev. **59**, 223228 (1941).

²⁰ F.J.M. Farley, J. Bailey, R.C.A. Brown, M. Giesch, H. Jostlein, S. van der Meer, E. Picasso, M. Tannenbaum, *The anomalous magnetic moment of the negative muon*, Nuovo Cimento **45**, 281-286 (1966).

²¹ Bailey, K. Borer, F. Combley, H. Drumm, F. Krienen, F. Lange, E. Picasso, W. von Ruden, F.J.M. Farley, J.H. Field, W. Flegel, P. M. Hattersley, *Measurements of relativistic time dilatation for positive and negative muons in a circular orbit*, Nature **268**, 301-305 (1977).

El efecto dilatador puede ser fabulosamente grande. Existen protones en la radiación cósmica de energía altísima (10^{20} eV). Su velocidad es $v/c = 0.99999\ 99999\ 99999\ 99999\ 996 = 1 - 4 \times 10^{-23}$. A esa marcha, $\gamma(v) \approx 10^{11}$, y “su tiempo” para cruzar la Galaxia (diámetro $D \sim 50$ kpc) es $\tau \sim D/(\gamma(v)v) \sim 1$ min. La contracción de longitudes reduce el diámetro de la galaxia, para el protón viajero, a $D_c \sim 0.1$ UA.

B. Viajes al pasado (I)

Si progresar en el tiempo no parece difícil (de hecho, lo hacemos todos al ritmo ordinario de 1 s/s, y acabamos de ver cómo la RE permite rezagarnos en edad respecto de otros), el viaje al pasado es otro cantar.

No se conocen *taquiones*, o partículas que se muevan más deprisa que la luz en vacío.²² Si existieran, podrían utilizarse para mandar información al pasado, violando el orden causa-efecto; precisamente por ello se “decreta” su inexistencia.

Ilustremos ésto con el ejemplo de los gemelos (Fig. 8). Supongamos que cuando $t = 4$ el gemelo A en la Tierra manda un taquión a B a velocidad $v = 4c$. Justo lo recibirá B al posarse sobre la estrella. Supongamos ahora que, tan pronto B lo recibe, envía hacia A otro taquión con velocidad (relativa a B) $v' = 4c$. Las fórmulas relativistas de cambio de inerciales muestran que ese taquión alcanza a A para $t = 9/4 < 4$; es decir, llega ¡antes de haber salido! Ha logrado volver a su pasado, abriendo con ello la caja de Pandora de violaciones de causalidad.

IV. ASUNTOS DE GRAVEDAD

En la RE el marco espacio-tiempo es tan absoluto e inmutable como lo fuera el tiempo newtoniano. La

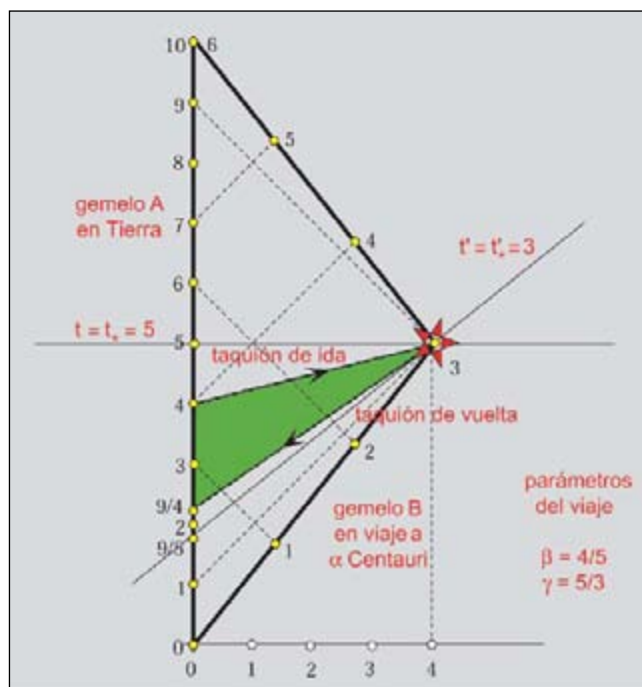


Figura 8. Gráfico mostrando el viaje taquiónico al pasado.

gravitación viene a perturbarlo, dinamizándolo. Las fuerzas gravitatorias distorsionan el espacio-tiempo, y lo hacen de modo que la nueva geometría que éste adopta las trivializa localmente. El principio de equivalencia entre campos de aceleraciones y campos gravitatorios es fundamental en este programa. Según este principio, enunciado por Einstein, no es posible distinguir físicamente entre los efectos de la gravedad y los efectos de la aceleración. ¿No “sentimos” esta equivalencia cuando aceleramos o frenamos un coche? A esta hipótesis fundacional de su teoría de la gravitación la bautizó Einstein como *Äquivalenzhypothese* o *Äquivalenzprinzip* en 1912.²³

Tras ocho años de penoso trabajo, de andar y desandar muchos caminos, Einstein produjo su obra cumbre: la Relatividad General (RG). El 25 de noviembre de 1915 presentaba, por fin, sus ecuaciones de campo definitivas (si interpretamos el término cosmológico, añadido en 1917, como una contribución

²² Ya Lucrecio consideró su posibilidad en el siglo I a.C. También Thomson, Heaviside, y sobre todo A. Sommerfeld en K. Akad. Wet. Amsterdam Proc. **8**, 346 (1904); Nachr. Ges. Wiss. Gottingen, Feb. **25**, 201 (1905). En la era relativista, fueron pioneros O.M.P. Bilaniuk, V.K. Deshpande, E.C.G. Sudarshan, “Meta” Relativity, Am. J. Phys. **30**, 718-723 (1962), y G. Feinberg, Possibility of Faster-than-light Particles, Physical Review **159**, 1089-1105 (1967), quien acuñó el término taquión.

²³ A. Einstein, Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes, Annalen der Physik **38**, 355-369 (1912).

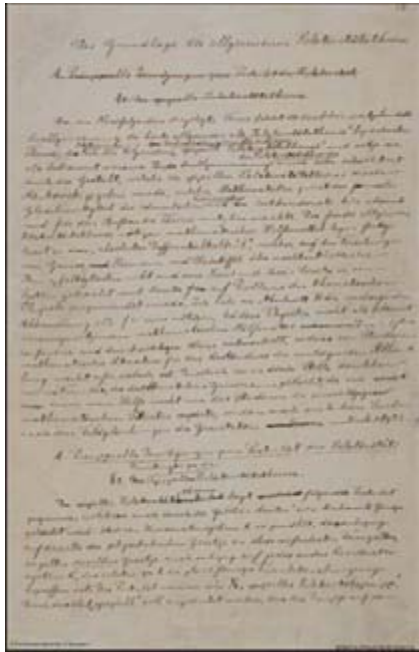


Figura 9. Manuscrito de Einstein.

más a la energía/materia, como fuente de la geometría, que a la propia expresión de esta).^{24,25}

Al año siguiente, Einstein publicaba un trabajo de exposición de su nueva teoría.²⁶ Donó su valioso manuscrito a la Universidad Hebrea en 1925, con motivo de su fundación (Fig. 9).

En su teoría de la gravitación, Einstein cambia radicalmente la visión de este fenómeno. En lugar de atraerse los cuerpos entre sí por la fuerza gravitatoria, como decía Newton, ahora los cuerpos curvan el espacio-tiempo a su alrededor, y los otros cuerpos se mueven simplemente por esta geometría deformada de la forma más natural imaginable, a lo largo de sus geodésicas. Así que, en célebre frase de Wheeler, *Space-Time tells matter how to move. Matter tells space-time how to curve.*²⁷

A. Dilatación gravitacional del tiempo

Entre las consecuencias directas de la RG, o si se prefiere, del principio de equivalencia, está la pesantez de la luz, y de aquí la dilatación gravitacional del tiempo. El nuevo tiempo ya no fluye por igual para relojes idénticos sin movimiento relativo. El tiempo fluye más lentamente en los campos gravitatorios, tanto más, cuanto más intensos sean éstos. En otras palabras, los relojes en campos gravitatorios intensos van más despacio.

¡La gravedad frena el paso del tiempo! Supongamos que tenemos en un cierto lugar dos relojes, 1 y 2, iguales, en sincronía, y que llevamos uno de ellos, el 2 por ejemplo, a otro sitio donde la atracción de la Tierra sea menor (mayor). Allí el ritmo del 2 se avivará (lentificará), y cuando, después de un tiempo, lo llevemos de nuevo junto al 1, podremos observar que el reloj 2 ha adelantado (atrasado) frente al 1. Los efectos del transporte pueden minimizarse respecto del retraso total, dejando que este último sea suficientemente grande.

Así, en una estrella de neutrones (EN), los relojes retrasan, y mucho, en relación con los que haya sobre la Tierra. Los intervalos de tiempo están en la relación $\Delta t_{\oplus}/\Delta t_{\text{EN}} \sim 1.2$ (para una EN de masa solar y radio 10 km).

Este efecto es muy pequeño en entornos normales. Vivir en una planta baja retrasa nuestro reloj frente al del vecino del séptimo en tan sólo $7 \mu\text{s}$ por siglo. Aun así, en 1959 Pound y Rebka consiguieron medir el desplazamiento gravitacional hacia el azul de fotones en caída libre desde una altura de 22.6 m en la torre del laboratorio Jefferson de física en Harvard; esta comprobación del principio de equivalencia implica indirectamente la validez de la dilatación gravitacional del tiempo.²⁸

²⁴ A. Einstein, *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Preuss. Akad. Wiss. Berlin, Sitzber. **2**, 844-847 (1915).

²⁵ A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte 142-152 (1917).

²⁶ A. Einstein, *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Ann. Phys. **49**, 769-822 (1916).

²⁷ C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, *GRAVITATION*, Freeman, San Francisco 1973.

²⁸ R.V. Pound, G.A. Rebka, *Apparent Weight of Photons*, Phys. Rev. Lett. **4**, 337-341 (1960). R.V. Pound and J.L. Snider, *Effect of Gravity on Gamma Radiation*, Phys. Rev. **140**, B788-B803 (1965).

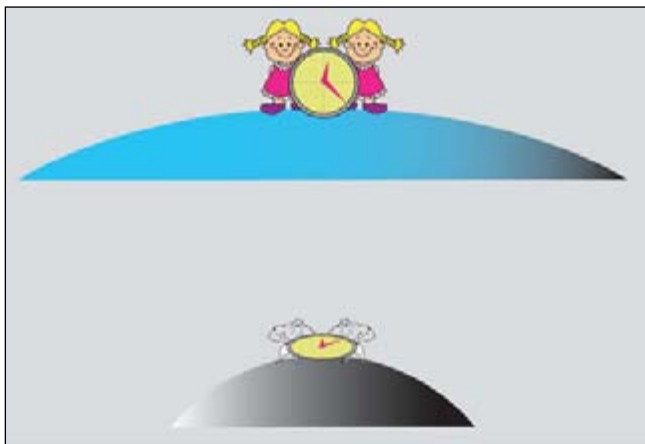


Figura 10. Relojes sobre la Tierra y sobre una estrella de neutrones.

En 1972 se comprobó esto por vez primera de forma directa. Hafele y Keating dieron dos vueltas a la Tierra en un avión comercial (Boeing 747), llevando con ellos cuatro relojes atómicos cuyos registros compararon luego con otros idénticos en el Observatorio Naval de Washington; sus resultados fueron la primera confirmación experimental de la dilatación gravitacional del tiempo. Volaron una vez en dirección Este y sus relojes acumularon un retraso medio de 59 ns; otra vez, volaron hacia el Oeste, y los relojes mostraron un adelanto medio de 273 ns.²⁹ En la Fig. 11 se presenta un esquema del viaje, simplificado a órbita ecuatorial, y se incluye la fórmula que permite en este caso sencillo calcular la variación relativa de tiempos. Con datos $h = 10 \text{ km}$, $v = 300 \text{ m/s}$, resulta $\delta_{\text{Este}} = -1.0 \times 10^{-12}$, $\delta_{\text{Oeste}} = 2.1 \times 10^{-12}$.

En 1975 un avión de la marina estadounidense sobrevoló la bahía de Chesapeake durante 15 horas, a una velocidad media de 500 km/h, y altitud entre 7.6 y 10.7 km, llevando a bordo un reloj atómico. Durante el vuelo, este reloj adelantó un total de 47.2 ns respecto de otro reloj idéntico en el suelo. La velocidad del avión era responsable, sin embargo, de un retraso de

5.8 ns, debido a la dilatación relativista de los tiempos. La diferencia $[47.2 - (-5.8) = 53.0 \text{ ns}]$ tenía su origen en el retraso originado por el campo gravitatorio terrestre, más intenso en la superficie que en las cotas del vuelo (a una altitud media de 9 km, ese retraso es de 52.9 ns).³⁰

Experimentos más sofisticados, como el de Vessot-Levine,³¹ con un reloj de máser de hidrógeno, enviado en un cohete a 10 000 km de altura, y otros posteriores en 1993 y 1995, han permitido comprobar estos efectos gravitacionales sobre el tiempo con precisión de 10^{-4} .

B. Viajes al futuro (II)

La dilatación gravitacional del tiempo hace posible ir al futuro de otros sin moverse de “casa”. He aquí una receta para ello:³² formemos alrededor nuestro una

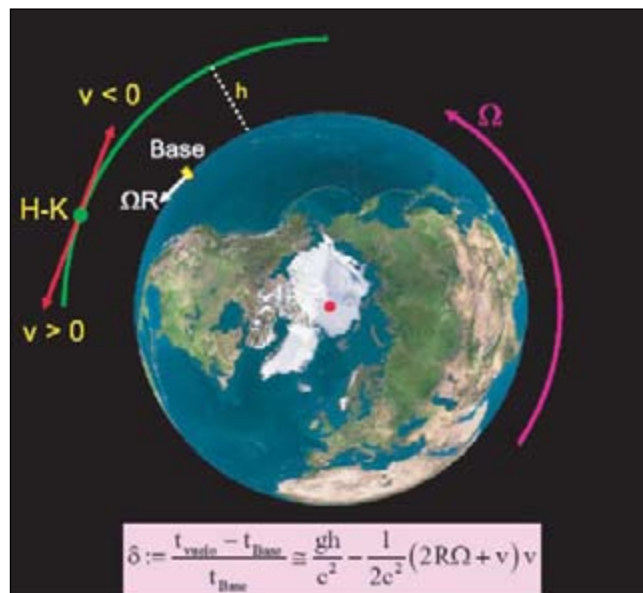


Figura 11. Viaje alrededor del mundo.

²⁹ J.C. Hafele, R.E. Keating, *Around-the-world atomic clocks: Observed relativistic time gains*, Science **177**, 166-168, **177**, 168-170(1972).

³⁰ C.O. Alley, 1979. Proc. of the 33RD ANNUAL SYMPOSIUM ON FREQUENCY CONTROL, p. 4; *Quantum optics, experimental gravity, and measurement theory*, eds. P. Meystre, M. O. Scully. Plenum Press, New York.

³¹ R.F.C. Vessot, M.W. Levine, *A test of the equivalence principle using a space-borne clock*, Gen. Rel. and Grav. **10**, 181-204 (1979).
R.F.C. Vessot, M.W. Levine, E.M. Mattison, E.L. Blomberg, T.E. Hoffman, G.U. Nystrom, B.F. Farrell, R. Decher, P.B. Eby, C.R. Baugher, J.W. Watts, D.L. Tueber, F.O. Williams, *Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser*, Phys. Rev. Lett. **45**, 2081-2084 (1980).

³² J.R. Gott, *TIME TRAVEL IN EINSTEIN'S UNIVERSE*, Mariner Books. Houghton Mifflin Company, Boston 2002.

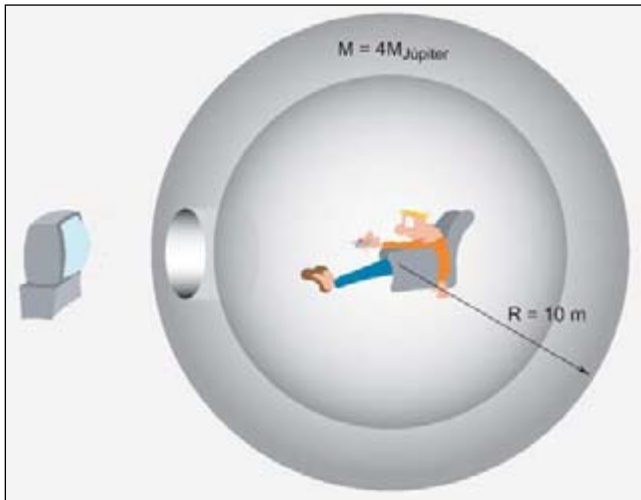


Figura 12. Viaje al futuro sin moverse de la butaca.

capa esférica de masa M , con radio interior R mayor que el radio de Schwarzschild $R_s := 2G_N M / c^2$ asociado a esa masa. En su interior el potencial gravitatorio es constante y menor que en el exterior, por lo que los relojes del interior retrasan con respecto a los relojes de fuera. A través de una ventana en esa capa esférica veríamos desarrollarse la evolución temporal de un observador exterior lejano y de su entorno a un ritmo superior al nuestro del interior en un factor $\gamma \approx [1 - R_s/R]^{-1/2}$, de modo que un lapso τ de nuestro tiempo cubriría un lapso $\gamma\tau$ del tiempo del observador alejado.

Supongamos, por ejemplo, que queremos realizar en un día un cálculo que exige normalmente 100 años, o ver en un día todos los programas de televisión de los próximos 100 años.³³ Metámonos para ello dentro de una capa de materia de masa M y radio exterior R , dejando fuera, y muy lejos, el ordenador o el receptor de TV. Como en el interior el campo es nulo, y en la superficie $g_{00} = (1 - R_s/R)$, basta que $(1 - R_s/R)^{1/2} = 1/(100 \times 365) = 3 \times 10^{-5}$. Luego R debe ser muy poco mayor que el radio de Schwarzschild R_s asociado a la masa M . Para que el espacio interior sea confortable, al menos R debe ser de unos 10 m, y por tanto $M \geq 5m = M_\odot/500 = 4M_{\text{Júpiter}}$. Pero tal masa en tan poco espacio produciría unas tensiones insoportables que la materia ordinaria no resiste. Deberíamos tomar un radio R , y por tanto una masa M , mucho mayores de lo que hemos dicho.

C. Viajes al pasado (II)

Hemos hablado de adelantar al tiempo, viajando al futuro. Nos bastaba para ello viajar muy deprisa, o permanecer algún tiempo en un campo gravitatorio intenso.

Discutamos ahora, aunque sea con cierta aprensión y bastante prisa, la cuestión de retroceder en el tiempo visitando el pasado, ayudados de adecuadas “máquinas del tiempo”. La reacción natural ante un tema de estos es fruncir el ceño, y tajar *in pectore* al conferenciante de estrafalario o de incompetente. Vaya en mi descargo que, primero, existe una general curiosidad por este asunto, y segundo, que no solo este modesto autor, sino personajes muy ilustres, como el gran matemático Kurt Gödel, o los físicos Kip Thorne, Stephen Hawking e Igor Novikov, por citar solo algunos, han prestado bastante atención al problema. Por supuesto, a nadie escapa que los viajes al pasado podrían desatar groseras transgresiones de la causalidad. De ahí el rechazo instintivo que la mera consideración de su posibilidad suscita. Pero la física es impersonal, y algo puede decir al respecto.

1. Viendo el ayer

Empecemos por algo fácil, como es ver el pasado. Esto está al alcance de cualquiera:

- Al mirarnos en un espejo a 30 cm, vemos nuestro pasado de hace 2 ns.
- Al contemplar la Luna, la vemos como era hace 1 s.
- Vemos la Estrella Polar (α UMi) como realmente era cuando la batalla de Lepanto.
- La luz que nos llega de Andrómeda salió de allá cuando el *homo habilis* evolucionaba a *homo erectus*.
- Las imágenes del Cúmulo Coma están producidas por fotones que abandonaron este sistema cuando los anfibios empezaban a reptar sobre la Tierra.

³³ J.B. Hartle, GRAVITY. AN INTRODUCTION TO EINSTEIN'S GENERAL RELATIVITY, p 192, Addison-Wesley, San Francisco 2003

- La radiación proveniente del cuásar 3C273 salió de allí cuando las únicas formas de vida en nuestro planeta eran las bacterias.
- Cuando los fotones que captamos del Fondo Cósmico de Microondas empezaron su recorrido por el Universo aún faltaban 8 millardos de años para formarse el Sistema Solar.

2. Visitando el pasado

a. Un extraño universo El famoso matemático Kurt Gödel, el que había conmocionado los cimientos de las matemáticas con su célebre teorema de indecidibilidad, contribuyó al homenaje ofrecido en 1949 a Einstein con motivo de su 70 cumpleaños mediante un trabajo en el que presentaba un modelo cosmológico homogéneo y anisótropo, rotante y estacionario, con una constante cosmológica atractiva y una densidad constante de materia sin presión.³⁴ Este universo gödeliano sobresale por contener curvas de género tiempo cerradas (CTCs); es decir, historias de observadores que progresando siempre hacia el futuro regresan a su pasado. Su autor fue el primero en comentar sobre sus extrañas consecuencias.

En la Figura 13 se muestra el cono de luz completo desde un punto arbitrario, con unas cuantas geodésicas luz que emanan de él. Tras llegar a una cáustica, estas geodésicas alabeadas empiezan a reconverger hasta concentrarse de nuevo, y desde aquí reanudar el ciclo. En consecuencia, un observador fundamental (líneas de materia) en este universo ve confinada su visión al interior de un cilindro, en torno a su línea de universo. En la figura se han recogido también tres líneas cerradas de género espacio (negra), luz (roja) y tiempo (verde).

Desde el punto de vista estrictamente práctico, tales CTCs no deben preocuparnos demasiado, pues el cosmos, rotante y estacionario, de Gödel queda muy lejos

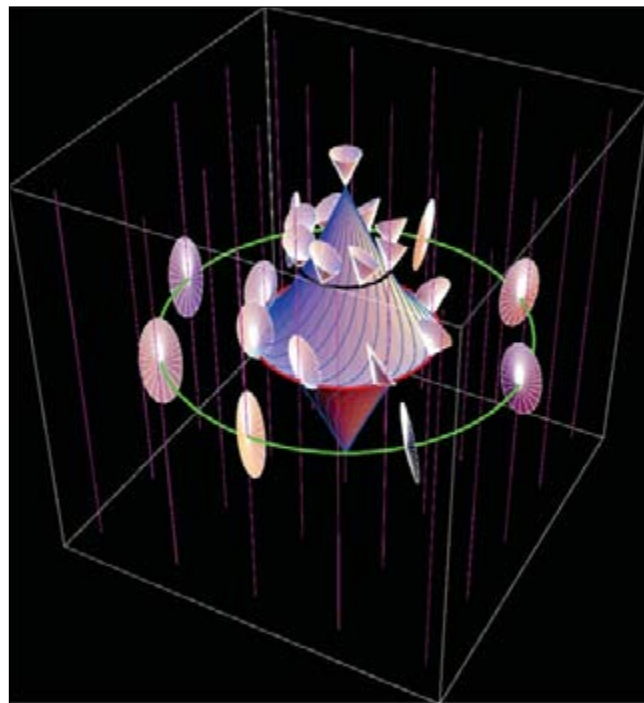


Figura 13. Universo de Gödel.

de representar a nuestro Universo, en expansión y sin rotación global ostensible.

Einstein, refiriéndose al problema sobre el tiempo planteado por la solución de Gödel, reconocía que esa cuestión *disturbed me already at the time of the building up of the general theory of relativity, without my having succeeded in clarifying it. It will be interesting to weigh whether these [cosmological solutions] are not to be excluded on physical grounds.*³⁵

b. Ingenios para viajar en el tiempo Hay muchas “máquinas” ideadas para visitar otros tiempos. Destacan las siguientes:

1. Un cilindro de materia infinito y rotante, analizado por Frank Tipler³⁶ a partir de una vieja idea de van Stockum.³⁷

³⁴ K. Gödel, *An example of a new type of cosmological solution of Einstein's field equations of gravitation*, Rev. Mod. Phys. **21**, 447-450 (1949).

³⁵ A. Einstein, en ALBERT EINSTEIN: PHILOSOPHERSCIENTIST, Vol. II, pp 687-688, P. Schilpp, ed. Harper, New York 1958.

³⁶ F.J. Tipler, *Rotating cylinders and the possibility of global causality violation*, Phys. Rev. D **9**, 2203-2206 (1974); *Singularities and causality violation*, Ann. Phys. **108**, 1-36 (1977).

³⁷ W.J. van Stockum, *The gravitational field of a distribution of particles rotating about an axis of symmetry*, Proc. R. Soc. Edinburgh. **57**, 135-154 (1936/37).

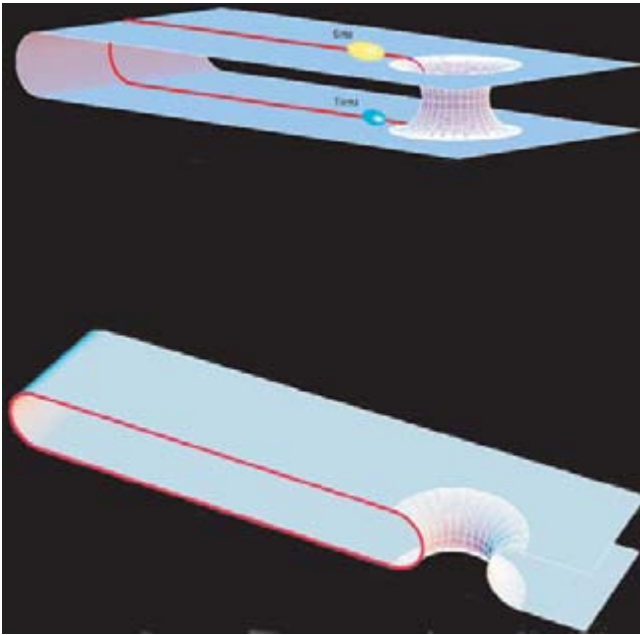


Figura 14. Un agujero de gusano y su corte transversal.

2. Un agujero de gusano debidamente “cargado” para actuar como máquina, sugerido por Morris, Thorne y Yurtsever.³⁸
3. Un par de cuerdas cósmicas paralelas, moviéndose relativamente a gran velocidad, constituyen la máquina de Gott.³⁹
4. Un motor de propulsión por deformación, como el propuesto por Alcubierre,⁴⁰ y ampliado por Everett.⁴¹

Todos estos escenarios presentan CTCs que propician los viajes en el tiempo. El problema es que existen graves impedimentos para la realización práctica de tales artilugios. En primer lugar, los 1/ y 3/ exigen objetos (cilindro, cuerdas cósmicas) de tamaño y masa infinitos, que nos deben ser graciosamente dados desde el infinito remoto, sin intervención nuestra. En segundo lugar, los 2/ y 4/ requieren para su estabilidad

el uso de material exótico, material que viola las condiciones usuales para la energía/materia, tal como la que se denomina condición débil sobre la energía, que exige que la densidad de energía/materia sea positiva para cualquier observador inercial. Esta condición no se cumple, por ejemplo, en los campos cuánticos, pero nadie sabe cómo fabricar material exótico en cantidades macroscópicas.

1. Un agujero de gusano “preparado” Recordamos que un agujero de gusano (AG) es una especie de atajo en el espacio-tiempo que comunica, a través de un corto pasadizo, regiones que de lo contrario estarían muy distantes entre sí. Vemos esquematizado un AG en la Fig. 14, conectando un entorno de la Tierra y otro de la estrella Sirio. La distancia Tierra-Sirio por el exterior es de 8.6 años luz; pero por el interior, la distancia entre ambas bocas del AG podría ser muy corta, de modo que una persona la pudiera recorrer en un tiempo prudencial (del orden de una hora).

La posibilidad dentro de la gravitación einsteiniana de estos alcorces espacio-temporales se conoce de antaño,⁴² pero solo recubriendo las paredes del túnel de material exótico podemos conseguir un AG transitable, evitando su colapso al intentar atravesarlo.

Este es el procedimiento práctico sugerido por Morris, Thorne, Yurtsever para transformar luego un AG transitable en una máquina del tiempo. Inicialmente las dos bocas F y M del túnel están en reposo relativo en un inercial; en ese momento, digamos día 1 de noviembre del año 3000, una de las bocas, pongamos la inferior M , se acelera hasta alcanzar una velocidad $v = 4c/5$ ($\gamma(v) = 5/3$), para luego frenar, y regresar de igual modo a donde estaba. Esto puede conseguirse en principio tirando de esa boca móvil M gravitacional o eléctricamente. Como al moverse retrasan los relojes, si el viaje para los habitantes de la zona donde estaba inicialmente la boca M ha sido de 20 días, según los relojes del AG habrá sido

³⁸ M.S. Morris, K.S. Thorne, U. Yurtsever, *Wormholes, time machines, and the weak energy condition*, Phys. Rev. Lett. **61**, 1446-1449 (1988).

³⁹ J.R. Gott, *Closed timelike curves produced by pairs of moving cosmic strings: exact solutions*, Phys. Rev. Lett. **66**, 1126-1129 (1991); *TIME TRAVEL IN EINSTEIN'S UNIVERSE*, Mariner Books. Houghton Mifflin Company, Boston 2002.

⁴⁰ M. Alcubierre, *The warp drive: hyper-fast travel within general relativity*, Class. Quantum Grav. **11**, L73-L77 (1994).

⁴¹ A.E. Everett, *Warp drive and causality*, Phys. Rev. D **53**, 7365-7368 (1996).

⁴² L. Flamm, 1916. *Beitrage zur Einsteinschen Gravitationstheorie*. Physik. Z. **17**, 448-454 (1917).

A. Einstein, N. Rosen, *The particle problem in the general theory of relativity*, Phys. Rev. **48**, 73-77 (1935).

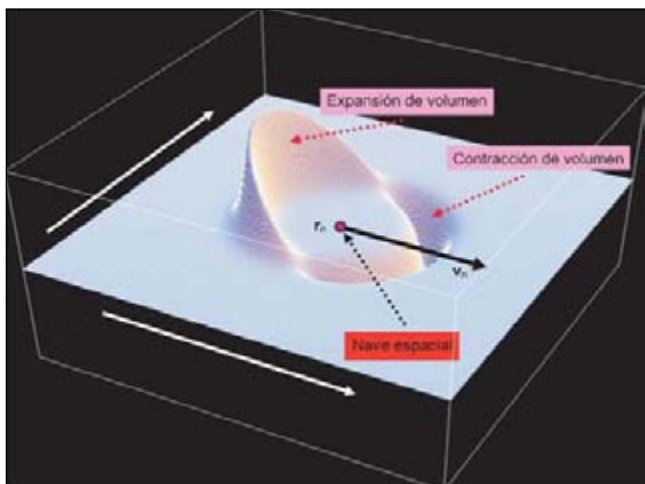


Figura 15. Propulsor por deformación.

solo de $20/\gamma(v) = 12$ días. Si el proceso de “recarga” empezó el 1 de noviembre y terminó el 21 de noviembre, según los habitantes de dicha zona inicial y final de M , según los relojes del AG empezó el 1 de noviembre pero terminó el 13 de ese mes. Podemos decir que hemos recargado el AG con una “carga de tiempo” de $20 - 12 = 8$ días.

Pero los relojes en ambas bocas del AG están siempre sincronizados entre sí, pues el AG ni se alarga ni cambia en su distribución material. Por otro lado, los relojes del entorno de F y los de la boca F también están sincronizados, pues esa boca no se ha movido para nada. Mas, como hemos dicho, cuando la boca M termina el viaje, sus relojes están atrasados respecto de los de su entorno.

Por tanto, cruzando el AG de F a M , pasamos del día $13+n$ de noviembre al $21+n$ de noviembre ($n \geq 0$), y viceversa. Si salimos desde F el día 13, y vamos al futuro día 21 atravesando el túnel, a la salida podremos mirar la combinación de la primitiva ganadora del pasado día 17, y tras atravesar de nuevo el túnel hacia F ese mismo día 21, llegar a F el día 13, y allí echar la primitiva para el día 17 con la combinación ganadora. ¿A que no estaría mal?

Este artilugio funcionará como máquina del tiempo desde su instalación el 13 de noviembre del año 3000. Si queremos “apagarla”, bastará con hacer con la boca F lo que se hizo con la M , pues así resincronizaremos los entornos de las bocas, y “descargaremos” el tiempo que antes habíamos “cargado”.

Nótese que esta máquina del tiempo sólo actuará como tal entre las fechas de creación y destrucción, de carga y descarga.

2. Motor de curvatura El propulsor por deformación de Miguel Alcubierre Moya utiliza una arruga del espacio-tiempo para alcanzar velocidades superlumínicas arbitrarias y así viajar en principio a cualquier punto del universo en tiempos cortos. En Relatividad General las velocidades superlumínicas entre observadores distantes, que no caben en el mismo inercial, son posibles.

La métrica del espacio-tiempo elegida por Alcubierre tiene secciones espaciales planas, pero con curvatura extrínseca que propicia un estiramiento o expansión del espacio por detrás de la zona $r_n(t)$ ocupada por una nave espacial, y un encogimiento o contracción por su parte delantera. De este modo la nave se ve impelida por el propio espacio-tiempo, a la velocidad arbitrariamente grande que estipulemos mediante la elección de $r_n(t)$. Así que tal ingenio podría llevarnos a cualquier punto del universo en un tiempo arbitrariamente pequeño.

La trayectoria de la nave es geodésica, y su tiempo propio coincide con el tiempo coordenado. Aunque las aceleraciones coordenadas pueden ser muy grandes, la aceleración propia de la nave es nula (caída libre). En la nave y entorno no hay fuerzas de marea, pero sí las hay, y pueden ser muy grandes, en las zonas de deformación.

Tiene una enorme pega esta propuesta. Su métrica subyacente viola todas las condiciones usuales sobre la energía. Recordemos que, genéricamente, estas condiciones exigen que, si ρ, p_1, p_2, p_3 son los autovalores del tensor de energía-tensiones, entonces: 1/ $\rho \geq 0$ y $\rho + p_i \geq 0$ (condición débil ya citada), 2/ $\rho \geq |p_i|$ (condición dominante, equivalente a decir que el flujo de energía/materia no puede ser superlumínico); y 3/ $\rho + p_i \geq 0$ y $\rho + \sum_i p_i \geq 0$ (condición fuerte).

Debidamente extendido por Allen Everett, la idea de Alcubierre lleva a modelos con CTCs.

3. Principio de “salvación”

La presencia de circuitos espaciotemporales que se muerden la cola, las CTCs, plantean problemas de nue-

vo estilo, al posibilitar violaciones de la causalidad: si se puede volver al pasado, ¿podemos actuar en él para modificar el presente del que partimos? Las paradojas resultantes serían notorias, y para su solución se han invocado desde principios de autoconsistencia hasta la idea de multiversos *à la* Everett.⁴³

Hawking⁴⁴ también ha terciado en el asunto, presentando argumentos en contra de la existencia de

CTCs: en el horizonte de Cauchy (superficie que separa la zona causal de la acausal) la magnitud de las fluctuaciones cuánticas de vacío serían tan grandes que inducirían un tensor de energía-tensiones con acción, sobre la geometría, nociva para tales curvas. Esta conclusión le lleva a proponer una conjetura de protección de la cronología, capaz de tranquilizar a los historiadores: *The laws of physics prevent closed timelike curves from appearing.*

⁴³ J. Friedman, M.S. Morris, I.D. Novikov, F. Echeverria, G. Klinkhammer, K.S. Thorne, U. Yurtsever, *Cauchy problem in spacetimes with closed timelike curves*, Phys. Rev. D **42**, 1915-1930 (1990).

D. Deutsch, *Quantum mechanics near closed timelike curves*, Phys. Rev. D **44**, 3197-3217 (1991).

⁴⁴ S.W. Hawking, *Chronology protection conjecture*, Phys. Rev. D **46**, 603-611 (1992)