

# Einstein y el Tiempo

Alberto Galindo Tixaire

## 1. Introducción

Un viejo amigo bromeaba diciendo que el Andante en do menor de la Sinfonía Concertante de Mozart conseguía devolverle a su intimidad anímica de partida, y que por eso, en su opinión, plasmaba de modo inefable el tiempo cíclico, o mejor aún, una CTC (“curva de género tiempo cerrada”). Y transcurridos los doce minutos que dura ese movimiento, volvíamos a escucharlo una vez más. Mientras, discutíamos sin cesar sobre el tiempo.

Hay un tiempo para cada cosa. Un tiempo para soñar, incommensurable, un tiempo para vivir, siempre corto, un tiempo para filosofar, misterioso,..., y un tiempo para la ciencia, sujeto a número. De algunos aspectos de este último vamos a ocuparnos, remitiendo al lector interesado en otros detalles a (10; 26; 31; 33; 36; 61; 75).

Me gustaría empezar definiendo el tiempo, pero no sé. Sesudos pensadores, como Platón y Aristóteles, lo ensayaron con brillantez. *El tiempo es una imagen móvil de la eternidad. Esta imagen es eterna, pero se mueve según número*, dirá Platón en el *TIMEO*. *El tiempo es el número del movimiento según el antes y el después. ... El tiempo no es movimiento, sino movimiento en tanto en cuanto admite enumeración. El tiempo es una especie de número. El tiempo es obviamente aquello que se cuenta, no aquello con lo cual contamos*, escribirá Aristóteles en su *FÍSICA*.

Son definiciones muy sugestivas, aunque teñidas de circularidad: movimiento en el tiempo, tiempo a través del movimiento. Agustín de Hipona vio esto claramente. Célebre es asimismo su declaración: *Si nemo a me quaerat, scio; si quaerenti explicari velim, nescio* (CONFESIONES). En uno de los análisis más penetrantes del tema, sugirió Agustín la mente como fuente del tiempo: *En ti es, mente mía, donde mido los tiempos*.<sup>1</sup>

*Time is what happens when nothing else happens*, afirma Feynman (20); para a continuación advertir que toda definición del tiempo es necesariamente circular, y que lo importante no es decir qué es el tiempo, sino decir cómo se mide lo que llamamos tiempo. En su enciclopédico tratado sobre la gravitación, Misner, Thorne y Wheeler (50) nos recuerdan de forma sencilla y profunda lo que toda medida del tiempo físico debe cumplir: *Time is defined so that motion looks simple*.

El tiempo es un concepto inventado por el hombre para ordenar, primero, sus sensaciones y actos, y luego, los fenómenos. Decían los escolásticos: *Tempus est ens rationis cum*

*fundamento in re*. La primera unidad natural debió ser el día, por la ciclicidad conspicua de las salidas del Sol. Los grandes avances científicos y tecnológicos a lo largo de los siglos han estado vinculados a los adelantos en la precisión con que se ha ido midiendo el tiempo. Hoy disponemos de relojes que aseguran un segundo en 20 millones de años, y el paso de la femtoquímica a la attofísica empieza a ser una realidad.<sup>2</sup>

## 2. El tiempo antes de Einstein

La física nació en torno al tiempo. Las regularidades en los ciclos astrales permitieron el acierto en las predicciones apoyadas en esta periodicidad, y con ello despertó sin duda la confianza del hombre en la racionalidad, inclinándole a escoger el cosmos frente al caos.

### A. Breve historia de la medida del tiempo

La longitud de las sombras fue uno de los primeros métodos usados para fijar las horas. En el Museo Egipcio de Berlín hay un fragmento de piedra que posiblemente sea de un reloj de sol de alrededor del 1500 a.C. Los babilonios desarrollaron los relojes de sol, y se dice que el astrónomo Anaximandro de Mileto los introdujo en Grecia en el siglo VI a.C.

Aparte de relojes de sol, en la antigüedad se usaron también relojes de arena, de agua, cirios y lámparas de aceite graduadas.

En la segunda mitad del siglo XIII aparecen los primeros relojes mecánicos. Su precisión era muy baja (10-20%). En el XIV se mejoran, con el invento del escape de rueda catalina, y ya se alcanzan precisiones de 20 a 30 minutos por día (1-2%). Por allá al año 1345 se empieza a dividir las horas en minutos y segundos.

El tiempo físico asoma en el siglo XIV, en el Merton College de Oxford y luego en la Universidad de París, con Oresme (27). Se representa en una línea horizontal, mientras en vertical se disponen las cualidades variables. Son los primeros gráficos de función (en este caso, función del tiempo).

La cinemática celeste brinda un buen reloj a través de la segunda ley de Kepler (40), midiendo tiempos mediante áreas. La ley armónica de Kepler (41) permitirá medirlos a través de longitudes. Galileo (24) desarrolló la cinemática terrestre, y sugirió el reloj de péndulo. A Huygens (39) debemos la técnica de medida del tiempo que ha llegado a nues-

<sup>1</sup>Supone, por ejemplo, la medida del tiempo que dura un sonido. Antes de que empiece, no puede medir su duración, y cuando ha terminado tampoco, porque ya no está. Ni puede hacerse en el presente, mientras dura, pues el presente es instantáneo, sin duración. La solución la halla Agustín en la mente, que es capaz de conservar la impresión que le ha producido el sonido, incluso después de su cese. *Esto es lo que mido cuando mido los tiempos. O esto es el tiempo, o no mido tiempos*. Sobre el “ahora”, Carnap (8) recuerda esto: *Einstein said that the problem of the now worried him seriously. He explained that the experience of the now means something special for man, something essentially different from the past and the future, but that this important difference does not and cannot occur within physics. That this experience cannot be grasped by science seemed to him a matter of painful but inevitable resignation*.

<sup>2</sup>Recordemos que  $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ . El período del electrón en la órbita fundamental del átomo de hidrógeno es  $T = 152 \text{ as}$ .

tros días, y que suministró relojes más precisos y transportables mediante volantes oscilatorios acoplados a resortes de calidad.

La importancia, no sólo científica sino económica, de disponer de relojes precisos y estables, queda reflejada en el premio ofrecido por el gobierno inglés de la reina Ana en 1714, que dispuso *that a reward be settled by Parliament upon such person or persons as shall discover a more certain and practicable method of ascertaining longitude that any yet in practice*. La recompensa era de 20,000 libras<sup>3</sup> para el que presentara un cronómetro capaz de determinar la longitud con error menor de 30' de arco al término de un viaje a las Indias occidentales, equivalente a mantener el tiempo con error menor de 2 minutos tras seis semanas de viaje. Se la llevó casi medio siglo después el relojero británico John Harrison (1693-1776), con un reloj, conocido como H4, que incorporaba correcciones por variación en la temperatura, y que en un primer viaje de 81 días desde Porstmouth a Puerto Real (Jamaica) en 1761-62 se retrasó 5 s, esto es, de precisión  $10^{-6}$  (10; 44).<sup>4</sup>

Después se pasó a los de diapasón, de aquí a los de cuarzo, y hoy los atómicos ofrecen precisiones desde  $10^{-12}$  –  $10^{-15}$  (Cs) hasta  $10^{-16}$  (máser de H).



Figura 1. Reloj atómico de cesio NIST-F1, de tipo fuente

Una red de relojes atómicos de cesio, sincronizados mediante ondas de radio, velan actualmente por la exactitud de la hora sobre el planeta. Como señala Davies (10), ya no nos sirve como cronómetro el giro de la Tierra alrededor de su eje. Aunque durante siglos ha sido este viejo trompo un magnífico reloj de referencia, la falta de uniformidad de su giro (las mareas, por ejemplo, lo frenan incesantemente y alargan con ello el día en un par de milésimas de segundo por siglo, perceptible para los finos cronómetros actuales), y otras desviaciones estacionales, cuantitativamente similares a estos retrasos seculares, pero irregulares y de signo variable, son circunstancias que en conjunto obligan a añadir al tiempo civil un segundo intercalar cada uno o dos años (el último lo fue el 1 de enero de 1999, a las 0 horas) con el fin de remediar la asincronía entre los tiempos atómicos y los días astronómicos. El día no tiene 86 400 s justos (donde el segundo se define como la duración de 9 192 631 770 períodos de una determinada vibración de los átomos de <sup>133</sup>Cs). Hoy la tecnología alcanza precisiones fabulosas: relojes que en treinta millones de años se desviarían a lo sumo en un diminuto segundo, como el NIST-F1 (Boulder, Colorado).

Incluso hay relojes de pulsera comerciales (receptores de señales de radio) con precisión de un segundo por millón de años garantizada por un reloj atómico en una lejana estación.

La naturaleza nos obsequia además con relojes naturales de altísima precisión: la estabilidad del púlsar binario B1855+09 puede ser de unas partes en  $10^{15}$  o incluso mejor (69).

## B. El tiempo en Newton

En los PRINCIPIA, Newton (54) empieza con una renuncia a definir el tiempo: *El tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento son de todos bien conocidos. Y no los defino. Pero digo que el vulgo no concibe esas cantidades más que por su relación a cosas sensibles. Para evitar ciertos prejuicios que de aquí se originan, es conveniente distinguirlas en absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y vulgares*.

A continuación, sin embargo, Newton se arrepiente de su primer impulso y aclara: *El tiempo absoluto, verdadero y matemático, de suyo y por su propia naturaleza fluye uniformemente sin relación a nada externo y se llama también duración: el tiempo relativo, aparente y vulgar es cualquier medida sensible y externa (exacta o no uniforme) de la duración por medio del movimiento y se usa vulgarmente en lugar del tiempo verdadero: tal como la hora, el día, el mes, el año*.

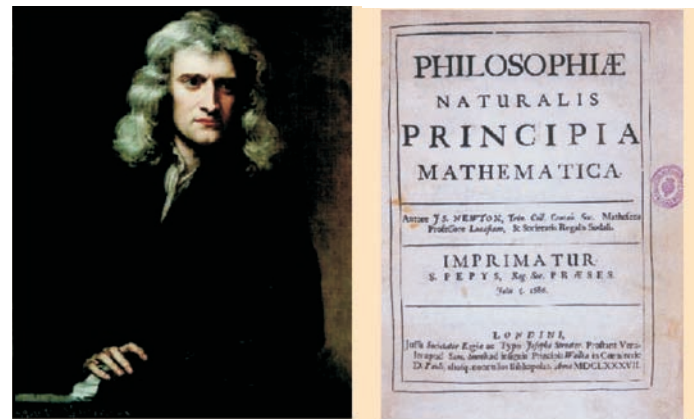


Figura 2. Newton (1642-1727) en 1689, y portada de la segunda edición de los PRINCIPIA (1713).

¿Qué significa que el tiempo fluye? ¿Que el tiempo “se mueve en el tiempo”? De nuevo la pescadilla mordiendo la cola (77). El absolutismo del tiempo newtoniano recibió encendidas críticas. Leibniz (45) opuso su idea de espacio y tiempo puramente relativos, el primero como un orden de coexistencia, el segundo como un orden de sucesiones de las cosas; ambos, espacio y tiempo, son *phænomena bene fundata*. Los argumentos dinámicos<sup>5</sup> con que Newton arropa su tesis de la naturaleza absoluta de la rotación y con ello la de un espacio absoluto, apoyo posterior para el tiempo absoluto, también hallan fuertes objeciones. Para Berkeley (7) esas

<sup>3</sup>Suma suculenta de verdad, equivalente a unos 2 M€ de 1996. En el comité evaluador se hallaban Newton y Halley (4, 45, 65).

<sup>4</sup>No le resultó fácil a Harrison cobrar las últimas 8750£ del premio. Tuvo que intervenir para ello el propio rey Jorge III.

<sup>5</sup>Es el famoso experimento del pozal en rotación.

razones de Newton lo único que muestran es la importancia del giro respecto de las masas lejanas del Universo y no respecto de un espacio absoluto, que él no acepta. Ernst Mach (48), en la segunda mitad del XIX, insistirá decididamente en este punto de vista, y desde su positivismo acosará los absolutos newtonianos. De “medieval”, “no científico”, “metafísico”, tilda Mach a Newton: *No tenemos derecho a hablar de un tiempo “absoluto”: de un tiempo independiente de todo cambio. Tal tiempo absoluto no puede medirse por comparación con ningún movimiento; por tanto no tiene valor práctico ni científico, y nadie tiene derecho a decir que sabe algo de él. Es una concepción metafísica vana.*

### 3. El tiempo en Einstein

El tiempo newtoniano, absoluto, el que nos es familiar, tuvo que dejar paso al tiempo einsteiniano (13), mutable y relativo, con tantos “ahora” por suceso cuantos estados de movimiento mutuo imaginemos.

El tercero de los trabajos enviados por Albert Einstein (AE) en su *Annus Mirabilis* de 1905 a *Annalen der Physik* lleva por título “*Zur Elektrodynamik Bewegter Körper*” (“Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”). Junto con el quinto, titulado “*Ist der Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*” (“¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?”), constituyen lo que hoy se llama TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD.<sup>6</sup>

Da AE un par de razones para justificar su tercer trabajo:

1. La insatisfacción que le produce la asimetría en la descripción maxwelliana de los fenómenos electromagnéticos: la acción entre un conductor y un imán depende solo del movimiento relativo entre ambos, pero la teoría de Maxwell distingue entre el caso de conductor en reposo y el caso de imán en reposo: a) En el primer caso el campo magnético móvil engendra un campo eléctrico, con una energía determinada, que a su vez produce corrientes en el conductor en reposo. b) En el segundo caso, no se produce ningún campo eléctrico, sino una fuerza electromotriz en el conductor, sin energía asociada, que engendra una corriente como en el caso anterior.
2. La incapacidad de la óptica y del electromagnetismo (EM) para detectar el movimiento respecto del *lichtmedium*,<sup>7</sup> es decir, de un inercial privilegiado. Esto le sugiere que la óptica y el EM tienen las mismas ecuaciones en todos los inerciales (sistemas en los que las leyes de la mecánica de Newton son las mismas). Y AE eleva esto a un principio, que llama “*Prinzip der Relativität*”, y le

añade un compañero, aparentemente incompatible con él: “La velocidad de la luz en vacío es siempre la misma, con independencia del estado de movimiento del cuerpo emisor”.<sup>8</sup>

Siendo todavía muy joven, en 1895-1896, ya le preocupaba el EM y la luz, como recordaba en 1955: “Si persiguiéramos a la velocidad de la luz un rayo de luz, veríamos una onda independiente del tiempo. ¡Tal cosa, sin embargo, no existe! Este fue el primer experimento mental, infantil,<sup>9</sup> en relación con la teoría especial de la relatividad.”

Este tercer trabajo de Einstein en 1905 no contiene ninguna referencia a otros trabajos, ni suyos ni de otros (como Lorentz o Poincaré).<sup>10</sup>

#### A. Simultaneidad

Consciente de que su postulado de la constancia de la velocidad de la luz choca frontalmente con la ley galileana de adición de velocidades, AE revisa los cimientos de la física, empezando por definir físicamente y con sumo cuidado el concepto de *Gleichzeitigkeit* o simultaneidad entre sucesos. Considera un sistema inercial, para el que supone válida la geometría euclidiana para calcular la distancia entre objetos estacionarios a través de sus coordenadas respecto de unos ejes cartesianos. Si *A*, *B* son dos observadores estacionarios, provistos de relojes iguales, y *A* (*B*) manda una señal luminosa a *B* (*A*), quien la devuelve sin tardanza a *A* (*B*), diremos que el reloj de *A* está sincronizado con el reloj de *B* si

$$t(B) - t(A) = t'(A) - t(B),$$

donde *t*(*A*) es el tiempo marcado por el reloj de *A* cuando envía la señal a *B*, *t*(*B*) lo que marca el reloj de *B* al llegarle la señal de *A* y reemitirla, y *t'*(*A*) la lectura del reloj de *A* al recibir la devolución de *B*.

Supone AE que esta definición no lleva a contradicciones, que es en principio posible entre cualquier par de observadores estacionarios en el inercial, y que la relación de sincronización anterior es de equivalencia: si *A* está sincronizado con *B*, también *B* lo está con *A*, y si además *B* lo está con *C*, también *A* y *C* lo están.

Finalmente, AE postula, de acuerdo con la experiencia, que cualquiera que sea el inercial la cantidad

$$c := \frac{2 \text{dist}(A, B)}{t'(A) - t(A)},$$

<sup>6</sup>AE utiliza el nombre de “RELATIVITÄTSTHEORIE” por primera vez en un artículo de 1907 (“Bemerkungen zu der Notiz von Hrn. Paul Ehrenfest: *Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz*”, *Annalen der Physik* 23 (1907): 206-208). En su desarrollo de la Teoría General de la Relatividad, AE se referirá, a partir de 1915, a la Relatividad de la primera época como “DIE SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE” para distinguirlas de la “ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE” posterior (“*Zur allgemeinen Relativitätstheorie*”, Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin), Sitzungsberichte (1915): 778-786). La primera vez que alguien habló de “teoría de la relatividad” parece ser que fue Bucherer, en una discusión tras una conferencia de Planck, en 1906.

<sup>7</sup>Sorprendentemente, no cita el experimento de Michelson y Morley ni en este ni en ningún otro de sus trabajos sobre relatividad especial. Sí lo hace en su puesta a punto de la relatividad de 1907, en su relato semipopular de 1915, y en su libro EL SIGNIFICADO DE LA RELATIVIDAD de 1921 en que recoge sus cuatro conferencias en Princeton de ese mismo año. Sin embargo, parece ser que con anterioridad a 1905 AE conocía ya, quizás a través de los trabajos de Lorentz, el experimento de Michelson-Morley. Nunca admitió, sin embargo, que jugara un papel directo sobre su propio trabajo. (Ver (55), Cap. 6.)

<sup>8</sup>Años después, AE reconocerá que el postulado de constancia de la velocidad de la luz es consecuencia del principio de relatividad, pues es la única manera de asegurar la covariancia de las ecuaciones de Maxwell.

<sup>9</sup>... *das erste kindliche Gedanken-Experiment*, ...

<sup>10</sup>¿Desconocía las contribuciones de estos otros científicos, o no le parecieron suficientemente relevantes?

donde  $\text{dist}(A,B)$  es la distancia entre  $A$  y  $B$ , es una constante universal –la velocidad de la luz en el vacío.<sup>11</sup>

Supondremos de ahora en adelante que los relojes estacionarios en un sistema inercial cualquiera están sincronizados entre sí.

## B. No existe “el” presente

Pasa AE a enunciar con precisión el principio de relatividad y el postulado de constancia de la velocidad de la luz en el vacío:

1. Las leyes que rigen los cambios de los sistemas físicos son las mismas en todos los inerciales.
2. Todo rayo de luz se mueve en cualquier inercial con una misma velocidad,  $c$ , independiente del movimiento de su fuente.

Como consecuencia, demuestra que el concepto de sincronía, y por ende el de simultaneidad, es relativo, no absoluto. La noción de “presente”, “ahora” o cualquier instante determinado depende del referencial inercial. En efecto: si tenemos una barra rígida y quieta sobre el eje  $Ox$  en un sistema inercial, de longitud  $\ell_0 := |\mathbf{r}(B) - \mathbf{r}(A)|$  dada por la distancia entre sus extremos  $\mathbf{r}(A)$ ,  $\mathbf{r}(B)$ , es claro que si un rayo de luz sale de  $\mathbf{r}(A)$  en el instante  $t(A)$ , llega a  $\mathbf{r}(B)$  en el instante  $t(B)$  y rebotando aquí vuelve a  $\mathbf{r}(A)$  en el instante  $t'(A)$ , se tiene que

$$t(B) - t(A) = \frac{\ell_0}{c}, \quad t'(A) - t(B) = \frac{\ell_0}{c},$$

porque los relojes del inercial en los extremos  $\mathbf{r}(A)$ ,  $\mathbf{r}(B)$  de la barra quieta están sincronizados en este sistema inercial. Supongamos ahora otro inercial (coordenadas  $O \bar{x} \bar{y} \bar{z} \bar{t}$ ) moviéndose con velocidad uniforme  $-v$  sobre el eje  $Ox$ . Desde este referencial se ve la barra moviéndose con velocidad  $v$  a lo largo de  $O\bar{x}$ , y

$$\bar{t}(B) - \bar{t}(A) = \frac{\ell(v)}{c-v}, \quad \bar{t}'(A) - \bar{t}(B) = \frac{\ell(v)}{c+v},$$

siendo  $\ell(v)$  ( $\ell(0) = \ell_0$ ) la longitud de la barra móvil medida desde el segundo inercial, es decir, la distancia que media entre posiciones simultáneas, en este inercial, de los extremos de la barra. Es evidente, por tanto, que  $\bar{t}(B) - \bar{t}(A) \neq \bar{t}'(A) - \bar{t}(B)$ , y en consecuencia, los relojes del nuevo referencial no están sincronizados con los del antiguo inercial. Es decir, cada inercial tiene su familia de “presentes” o

hipersuperficies de simultaneidad, sin que estos “ahora” lo sean para otros inerciales.

## C. Dilatación de tiempos

Pasa luego AE a obtener las ecuaciones de cambio entre inerciales, conocidas como transformaciones de Lorentz.<sup>12</sup> Con ellas deduce que las longitudes de las barras se acortan en sentido del movimiento (contracción de longitudes), y dualmente, AE prueba también que los relojes en movimiento retrasan con respecto a los relojes quietos (ver, por ejemplo, la contribución de P. Pascual y J.I. Latorre en este volumen). El lapso de tiempo  $\Delta t$  que según los relojes del sistema  $S$  media entre dos sucesos que ocurren en el mismo lugar según  $S$ , está relacionado con el lapso de tiempo  $\Delta t_0$  que según los relojes del sistema  $S_0$  media entre esos dos sucesos (que ya no ocurren en el mismo lugar según  $S_0$ ) como sigue:

$$\Delta t_0 = \gamma(v)\Delta t, \quad \text{donde } \gamma(v) := 1/\sqrt{1-(v/c)^2}.$$

Por tanto, el movimiento dilata el tiempo, y en particular, aumenta el lapso de tiempo (visto desde  $S_0$ ) entre tics consecutivos de un reloj en movimiento, por lo que éste retrasa con respecto a los relojes quietos. De igual modo,  $\ell(v) = \ell_0/\gamma(v)$ .

Einstein acepta que este resultado sobre el tiempo es válido no solo para movimientos uniformes sino también para cualquier forma de movimiento del reloj, y concluye que si el reloj móvil se mueve con celeridad constante y regresa al punto de partida, sigue cumpliéndose la relación anterior.<sup>13</sup> Esto llevaría luego a la “paradoja del reloj”, que más tarde (46) se convertiría en la “paradoja de los gemelos”.

El tiempo de la relatividad nos confunde con rompecabezas como el de los gemelos. ¿Paradoja? ¿Lo es acaso el que el cuentakilómetros de un coche marque distinto cuando se va de Madrid a Barcelona via Zaragoza que cuando se hace via Valencia? No, porque estamos familiarizados con que la distancia entre dos puntos depende del camino recorrido para ir de uno al otro. De igual modo hay que mirar al tiempo, como una variable anholónoma, una distancia a lo largo de un camino en un espacio más amplio llamado espacio-tiempo (ET).

## D. Un nuevo absoluto

El matemático ruso Minkowski, poco antes de morir en 1909, decía en una famosa conferencia pronunciada en Colonia en 1908 (49): *Señores: Las consideraciones sobre*

<sup>11</sup>AE denota por  $V$  a la velocidad  $c$  a lo largo de todo este trabajo. Aquí usaremos siempre  $c$ . La notación  $V$  para la velocidad de la luz se remonta a Maxwell, y fue empleada por muchos físicos después. El símbolo  $c$  para esta velocidad fue usado en 1894 por Paul Drude. Einstein pasó de  $V$  a  $c$  en 1907, en el artículo, que luego comentaremos, de revisión del principio de relatividad y sus consecuencias, que le encargó Stark para la revista *JAHRBUCH DER RADIOAKTIVITÄT UND ELEKTRONIK* que éste dirigía. Como razón del uso del símbolo  $c$ , podemos ir desde “constante” hasta *celeritas*. En este segundo sentido había aparecido ya en la literatura científica con Jacob Hermann, en su libro “Phoronomia” o “Ciencia del movimiento” (1716), y usado por matemáticos como Euler (1759) y otros (Lagrange, Fourier, Laplace, Bernoulli). Lord Rayleigh denotó por  $c$  la velocidad del sonido en su clásico texto *THEORY OF SOUND*.

<sup>12</sup>Denominación esta que sería pronto propuesta por Poincaré en 1905 (“*Sur la dynamique de l’électron*”, Académie des Sciences (Paris), *Comptes Rendus* **140** (1905): 1504-1508. Leyes de transformación matemáticamente análogas aparecen ya en Joseph Larmor, *AETHER AND MATTER*, Cambridge Univ. Press, (1900), y Hendrik Antoon Lorentz, *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Smaller Than That of Light*, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam. Section of Sciences. *Proceedings* **6** (1904): 809-831. AE notó que sus transformaciones a los largo de un eje forman grupo, *wie dies sein muss*. Poincaré observará que todas las transformaciones de Lorentz junto con las rotaciones forman un grupo, que hoy se conoce como grupo de Lorentz.

En trabajos posteriores, AE dará otras deducciones más simples de las transformaciones de Lorentz.

<sup>13</sup>AE ignora aquí el efecto de las aceleraciones sobre la marcha de los relojes. Prestará atención a este asunto en trabajos posteriores (1907).

espacio y tiempo que quisiera desarrollar para ustedes, han crecido sobre un terreno físico-experimental. En esto está su fuerza. Su tendencia es radical. A partir de ahora, el espacio solo y el tiempo solo han de sumergirse totalmente en las tinieblas, y únicamente un tipo de unión de ambos ha de conservar su autonomía.

El principio de relatividad y la finitud e invariancia de la velocidad de la luz bajo cambio de inerciales son los responsables de este matrimonio.

La finitud de la velocidad de la luz repercute de modo fundamental en la estructura geométrica del espacio-tiempo, relativizándolo. El tiempo y el espacio han perdido su individualidad y se han integrado diluidos en una unidad superior, el espacio-tiempo, un ruedo que premia la tardanza: el camino “recto” entre dos sucesos es el que más tiempo consume en recorrerse. ¡Abreviar exige la acción de fuerzas! Ahí reside el origen de que tras un viaje de ida y vuelta encuentres a un hermano gemelo más envejecido.

### E. ¿Más rápidos que la luz?

¿Existen partículas que se muevan con velocidad superior a la de la luz? Sí; por ejemplo, cualquier partícula que lleve en agua, a temperatura entre 0 y 50 °C, una velocidad  $v > c/n$ ,  $n = 1.3$ , irá más deprisa en ese medio que los fotones del espectro visible. Lo mismo ocurre con la mayoría de rayos cósmicos que llegan a la atmósfera; son superlumínicos en relación con la velocidad de la luz en el aire.<sup>14</sup> Precisamente en esta posibilidad de rebasar la velocidad de la luz en un medio reside el efecto “erenkov”.

Lo que no se conocen son *taquiones*, o partículas que se muevan más deprisa que la luz en vacío (19). Si existieran, podrían utilizarse para mandar información al pasado, violando el orden causa-efecto. Por ello se “decreta” su inexistencia.

### F. Juntos, pero no revueltos

Como bien advierte Atkins (5), el tiempo no es como el espacio, aunque se hable de una cuarta dimensión.<sup>15</sup>

El tiempo se amalgama al espacio de modo para que la velocidad de la luz sea igual para todos los inerciales. Aparece en la geometría con signo opuesto a las coordenadas espaciales, lo que evita –o al menos dificulta– que el pasado y el futuro se entremezclen. Vivimos en un Universo en que hay arriba y abajo, derecha e izquierda, delante y detrás. Un Universo con espacio tridimensional. ¿Por qué 3 y no otro número? ¿Por qué el tiempo es unidimensional? ¿Por qué los periódicos tienen sólo una fecha y no dos o más? Se ha argüido que nuestro Universo con 3+1 es la única posibilidad de que pudiera sobrevivir a su propia creación, y de que generara la capacidad de llegar a darse cuenta de esto. Con tiempos de más de una dimensión, en que pudiéramos “darnos la vuelta”, la energía no se conservaría y por tanto tampoco la materia (12); y siendo la materia fuente de la geometría, también el propio espacio-tiempo sería inestable.

<sup>14</sup>Para  $\lambda = 589 \text{ nm}$ ,  $n = 1.000293$ .

<sup>15</sup>El tiempo como cuarta dimensión fué sugerido por vez primera por Lagrange, quien también se aperció de la reversibilidad del tiempo en la mecánica. El tiempo como sucesión de presentes, de hechos que van ocurriendo, fue dejando paso al tiempo que es, al tiempo que existe como un bloque pasado+presente+futuro (38).

## G. Un tiempo deformable

Mientras en la relatividad especial el nuevo marco espacio-tiempo es tan absoluto e inmutable como lo fuera el tiempo newtoniano, la gravitación viene a perturbarlo, dinamizándolo (14-16). Las fuerzas gravitatorias distorsionan el espacio-tiempo, y lo hacen de modo que la nueva geometría que éste adopta las trivializa localmente. El nuevo tiempo ya no fluye por igual para relojes idénticos sin movimiento relativo; los relojes en pozos gravitatorios se atrasan.

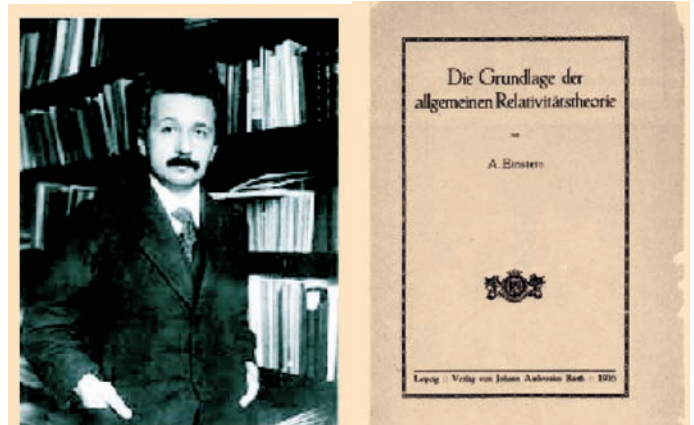


Figura 3. Einstein (1879-1955) en 1916, y portada de la primera edición de DIE GRUNDLAGE DER ALLGEMEINEN RELATIVITÄTSTHEORIE (1916).

En (14) Einstein recoge, mejora y extiende sus trabajos anteriores sobre relatividad, esforzándose por conseguir una exposición pedagógica. Trata de la cinemática relativista, del electromagnetismo, y además de la dinámica relativista y la termodinámica (siguiendo para éstas el formalismo de Planck). Especial mención merece la sección V y última de este trabajo, titulada *Relativitätsprinzip und Gravitation*. Aquí se plantea AE si tal vez el principio de relatividad será también aplicable a sistemas con aceleración relativa entre sí. Es una cuestión natural para cualquiera interesado en la relatividad, y cuya respuesta no quiere AE eludir. Considera dos sistemas, uno  $\Sigma_1$  que se mueve con aceleración  $a$  según  $Ox$ , y otro  $\Sigma_2$  en reposo, en el que hay un campo gravitatorio que acelera a los graves con aceleración  $-a$  a lo largo de su eje  $Ox$ . Por lo que sabemos (*Soweit wir wissen*), dice, las leyes físicas son iguales en ambos sistemas, pues todos los graves caen con igual aceleración en ese campo gravitatorio. Experimentalmente no existe razón para suponer que los sistemas  $\Sigma_1$  y  $\Sigma_2$  difieran en ningún sentido, y supondremos por tanto la equivalencia física completa del campo gravitatorio y de la correspondiente aceleración del sistema de referencia (... *vollen ... die völlige physikalische Gleichwertigkeit von Gravitationsfeld und entsprechender Beschleunigung der Bezugssysteme annehmen*). Esta es la primera formulación einsteiniana del Principio de Equivalencia (aunque como tal aparecerá más tarde).

AE procede a comparar espacios y tiempos entre un sistema inercial en reposo  $S_0$  y otro  $\Sigma$  uniformemente acelera-

do, que coinciden inicialmente (esto es, para  $t = \tau = 0$ ), instante a partir del cual empieza  $\Sigma$  a moverse con la aceleración  $a$ . Para ello introduce un sistema inercial auxiliar,  $S'_t$ , con origen coincidente con el de  $\Sigma$  en ese instante  $t$  (medido en  $S_0$ ), velocidad  $v_t = a t$ , y relojes coincidentes en ese instante con los de  $\Sigma$ . El sistema  $S'_t$  coincide, pues, “instantáneamente” con  $\Sigma$ . AE supone que no hay diferencia entre las coordenadas espaciotemporales de  $\Sigma$  y  $S'_t$ , y que esto sigue siendo cierto durante un lapso de tiempo (en  $S_0$ ) suficientemente corto. En particular, los relojes de  $\Sigma$  retrasarán (igual que los de  $S'_t$ ) respecto de los de  $S_0$ . Sean ahora dos puntos distintos de  $\Sigma$ , digamos  $(0, 0, 0)$  y  $(\xi, 0, 0)$ , con sus relojes del sistema  $\Sigma$ . Estos dos relojes estaban sincronizados entre sí y con los de  $S_0$  al principio, cuando  $t = 0 = \tau$ . Como ambos relojes se mueven de igual modo respecto de  $S_0$ , se mantendrán sincronizados entre sí vistos desde  $S_0$ , y por tanto no lo estarán bajo el inercial  $S'_t$  ni, por ende, bajo  $\Sigma$ . Y viceversa, dos sucesos simultáneos bajo  $\Sigma$ , esto es, bajo  $S'_t$ , no lo serán bajo  $S_0$ . Concretamente, dados dos sucesos  $(x'_1, t'_1)$ ,  $(x'_2, t'_2)$  simultáneos en  $S'_t$ , esto es, tales que  $t'_1 = t'_2$ , su diferencia de tiempos bajo  $S_0$  satisface

$$\Delta t = \gamma(v_t)[\Delta t' + (v_t/c^2)\Delta x'] = \gamma(v_t)(v_t/c^2)\Delta x',$$

pues  $\Delta t' = 0$ . Pero, por igual razón,  $\Delta x = \gamma(v_t)\Delta x'$ , y por tanto

$$\Delta t = (v_t/c^2)\Delta x.$$

Supongamos que  $|at| \ll c$  y que  $\xi$ ,  $\tau$  también son muy pequeños, de modo que podemos desprestigiar términos de segundo orden en  $v_t/c$  y en  $\xi$ ,  $\tau$ . Entonces  $v_t \approx at$ ,  $\tau \approx t$ , y

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} \approx \frac{a\xi}{c^2}.$$

En virtud del principio de equivalencia, la relación anterior es válida para un sistema estático  $\Sigma$  con un campo gravitatorio de aceleración  $g = -a$  a lo largo de  $O\xi$ :

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} \approx -\frac{g\xi}{c^2} \approx \frac{\Delta \Phi}{c^2},$$

donde  $\Delta \Phi$  es la diferencia de potencial gravitatorio entre los puntos  $(\xi, 0, 0)$  y  $(0, 0, 0)$ .<sup>16</sup>

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  $\mu$ s por siglo. Un reloj atómico en el National Bureau of Standards, Boulder, a 1650 m de altitud, adelanta 6  $\mu$ s al año en relación con otro reloj idéntico en el Royal Greenwich Observatory, a 25 m de altitud. Aún así, en 1959 Pound y Rebka consiguieron medir el desplazamiento gravitacional hacia el azul de fotones en caña 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.

En 1972 se comprobó esto por vez primera de forma directa. Hafele y Keating (32) 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.

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 (2; 3).<sup>17</sup> 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).<sup>18</sup> Experimentos más sofisticados (73; 74) han permitido comprobar estos efectos gravitacionales sobre el tiempo con precisión del orden de  $10^{-4}$ .

El conocido sistema GPS (Global Positioning System) para localizar sucesos pone a prueba constantemente la maleabilidad del tiempo. El éxito de su funcionamiento (precisiones en posición de unos 15 m para uso civil, de unos 2 m en práctica militar) reside en las correcciones relativistas (tanto por velocidad como por situación en campo gravitatorio) de los tiempos marcados por los relojes. Los 24 satélites que integran ese sistema giran alrededor de la Tierra repartidos en 6 órbitas excéntricas, a una altitud media de unos 20200 km y a una velocidad media de unos 14000 km/hora. Comparado con un reloj igual en tierra, el reloj atómico de uno de esos satélites que pase por el cenit retrasa, debido a su movimiento, en  $\tau_{RE}/\tau \approx -1/2(v/c)^2 = -0.84 \times 10^{-10}$ , equivalente a  $-7.3 \mu$ s/día, mientras que adelanta, por razón de la menor atracción gravitatoria que sufre, en  $\tau_{RG}/\tau \approx (G_N M_\oplus/c^2)(R_\oplus^{-1} - R_{GPS}^{-1}) = 5.3 \times 10^{-10}$ , equivalente a 46  $\mu$ s/día. Hay un adelanto neto por día de 38  $\mu$ s/día. De no corregirse esta falta de sincronía, el error asignado para una posición por el sistema GPS sería intolerable (del orden de varios km) al cabo de unas horas de funcionamiento.

## H. Viaje a las galaxias

Se estima (6) que la tecnología actual, con cohetes de combustible químico, permitiría en principio el envío de sondas interestelares a estrellas cercanas con velocidades de crucero de unos 100 km/s, un coste de unos 10 G\$ (similar al del telescopio espacial Hubble), y tiempos de vuelo de unos  $10^4 - 10^5$  años. Para ir más lejos (por ejemplo, atravesar nuestra Galaxia, o ir a otra), y llegar antes (digamos, dentro de una vida humana), el método es claramente insuficiente.

<sup>16</sup>Este resultado es un caso particular de otro más general que sobre la dilatación gravitacional del tiempo ofrece la Relatividad General de AE.

<sup>17</sup>Este retraso es  $[\gamma^{-1} - 1]\Delta t$ , donde  $\Delta t$  es el tiempo de vuelo y  $\gamma := [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$ , siendo  $v$  la velocidad del avión relativa al suelo.

Es un tanto sorprendente que hasta el año 1941 no se sometiera a comprobación experimental directa la dilatación relativista del tiempo. Lo hicieron Rossi y Hall (58) viendo que la vida media de los muones procedentes de la radiación cósmica crecía con su velocidad (registraron muones con  $\gamma \approx 3$ ). En 1964 se realizó en el CERN una nueva medida del efecto, bajo condiciones controlables y precisión de un 2%, con muones de  $\gamma \approx 12$ .

<sup>18</sup>Como resulta de la expresión  $-(G_N M_\oplus/c^2)[1/(R_\oplus + h) - 1/R_\oplus]\Delta t$ , donde  $R_\oplus$ ,  $M_\oplus$  son el radio y masa de la Tierra, y  $h$  la altitud media del vuelo.

La dilatación del tiempo y la contracción de longitudes ponen, en principio, el Universo al alcance del hombre. Viajando a velocidades próximas a la de la luz las más lejanas distancias quedan drásticamente encogidas; se han detectado protones en la radiación cósmica con energías tan altas ( $\sim 10^{20}$  eV) que atraviesan nuestra galaxia (cuyo diámetro es de unos  $10^5$  años luz) en medio minuto de “su reloj”.<sup>19</sup>

Si dispusiéramos de una nave espacial con aceleración propia  $g$  constante e igual a la de la gravedad en la superficie terrestre (para sentirse como en casa), las cuentas de este viaje “hiperbólico” indican que podríamos llegar a Andrómeda (distancia 0.73 Mpc, o 2.4 Mal)<sup>20</sup> en 15 años, y a los confines del Universo visible (3-6 Gpc, o 10-20 Gal) en 23-24 años.

¿Por qué no hay excursiones de éstas? Sencillamente, porque el gasto energético es prohibitivo; incluso con los cohetes más eficientes,<sup>21</sup> esos paseos a Andrómeda o al “cinturón” del Universo exigirían unas cargas iniciales de  $4 \times 10^6$  [respectivamente,  $(2-4) \times 10^{10}$ ] veces la carga útil (26). Al desafío tecnológico de mantener en compartimentos aislados estas ingentes cantidades de materia y antimateria únase la necesidad de protegerse radiológicamente contra el inevitable choque de la nave con el material interestelar o intergaláctico, lo que aumentaría considerablemente la masa no combustible, haciendo aún más inviable esta clase de viajes por el cosmos (67).

Aunque el mercado dispusiera de recursos energéticos suficientes, una estimación, a ojo de buen cubero, del coste del billete a Andrómeda, contando a un trillón de dólares por cada kilogramo de antimateria consumida,<sup>22</sup> arroja la friolera de 10 mil cuatrillones de dólares en energía, y eso sin protección radiológica alguna y con una nave de unas pocas toneladas de peso. Por esto la idea de buscar alcorces en la distancia es especialmente atractiva.

## I. Agujeros de gusano

La deformación originada por la acción gravitatoria sobre la geometría del espacio-tiempo podría propiciar atajos que faciliten tales visitas. En su Teoría General de la Relatividad, Einstein relaciona la geometría del espacio-tiempo con su contenido energético, mediante las famosas ecuaciones

$$G_{\mu\nu} := R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}, \quad \kappa := 8\pi G_N / c^4,$$

donde:  $G_{\mu\nu}$  es el llamado tensor de Einstein,  $R_{\mu\nu}$  es el tensor de Ricci,  $R$  la curvatura escalar,  $g_{\mu\nu}$  el tensor métrico, y  $T_{\mu\nu}$  el tensor de energía-tensiones. La famosa solución de Schwarzschild (63; 64) a las ecuaciones de Einstein contiene un agujero (u hoyo) de gusano (AG), una especie de túnel (21),<sup>23</sup> asa, o garganta estrecha y corta, que puede atajar

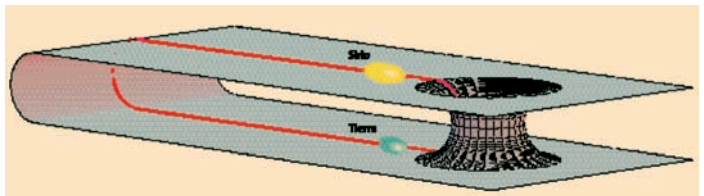


Figura 4. Un AG conectando dos regiones remotas del ET.

entre regiones remotas. Se ha especulado sobre el uso de túneles de este tipo, de tamaño macroscópico, para viajar por el Universo.

Estos AGs tipo Schwarzschild no son atravesables (65):

1) Las fuerzas de marea en su garganta (parte más estrecha del túnel) son similares a las de los agujeros negros (ANs) en su horizonte, y por tanto muy intensas a no ser que la garganta sea de radio  $\geq 10^5$  km; 2) Los AGs sin materia en su estructura son objetos dinámicos, cuya garganta crece desde radio nulo hasta uno máximo, para luego decrecer de nuevo a cero, rompiéndose la conexión que el túnel establece. Todo esto ocurre en un tiempo demasiado corto para atravesar el túnel, aunque se vaya a la velocidad de la luz, por lo que el viajero que osara su tránsito quedaría prisionero y estrujado al límite por fuerzas de marea asesinas. 3) Finalmente, estos AGs poseen también un antihorizonte (como el de un agujero blanco), inestable, y cualquier perturbación externa acelera el sellado del túnel.

El popular Carl Sagan (59) escribió una novela de ciencia ficción en la que consideraba viajes interestelares usando AGs; para darle la máxima enjundia científica, consultó sobre las posibilidades físicas de este procedimiento a uno de los mejores expertos en física de ANs, Thorne, que así motivado ideó con sus colaboradores unos tipos de AG que estarían libres de las objeciones anteriores (51). Pero esto tiene un precio: el material exigido para formar estos túneles debe tener una tensión (presión negativa) radial que supera a la energía en reposo, lo cual viola todas las condiciones sobre la energía que estamos acostumbrados a ver en la relatividad general;<sup>24</sup> en particular, esto hace que un observador moviéndose suficientemente deprisa pueda ver densidades de energía negativas, antigравitantes. Este material exótico podría existir cuánticamente, sin embargo. La cuestión del montaje o preparación de tal artefacto no es trivial, pues requiere modificar la topología del espacio-tiempo.<sup>25</sup>

Un ejemplo típico de AG atravesable es el esquematizado en la Figura 4, que representa la inmersión métrica en  $R^3$  de un corte instantáneo de su geometría ecuatorial, empalmado a dos porciones alejadas de un espacio-tiempo asintóticamente plano (50). Un viajero podría atravesar uno de estos túneles “amistosos” en un tiempo del orden de 1 hora,

<sup>19</sup>Protones cósmicos de tales energías (comparables a la energía cinética de una pelota de tenis a 100 km/h), se ven muy poco afectados por el campo magnético de la Galaxia, y son seguramente de origen extragaláctico.

<sup>20</sup>Usamos el acrónimo “al” :=año luz, y la notación consiguiente 1 kal =  $10^3$  al, 1 Mal :=  $10^6$  al, 1 Gal =  $10^9$  al. En lugar de estas unidades familiares basadas en el tiempo luz, en astronomía y astrofísica se prefiere el uso del parsec y sus múltiplos: 1 pc =  $3.08567758 \times 10^{16}$  m = 3.262 al.

<sup>21</sup>Son los cohetes fotónicos, basados en la aniquilación de materia+antimateria.

<sup>22</sup>Se producen al año en el CERN y en Fermilab unos mil billones de antiprotones, con un costo total, precio de 1993, del orden de un millón de dólares.

<sup>23</sup>Es también conocido este túnel como puente de Einstein-Rosen (17).

<sup>24</sup>Algo parecido a lo que ocurre también en la evaporación Hawking (34, 35).

<sup>25</sup>Una posibilidad imaginable sería hacer crecer un túnel microscópico, formado a nivel cuántico. Pero la discusión de esto deberá esperar a que se consolide una teoría cuántica de la gravitación.

yendo radialmente desde una estación en el universo inferior a otra en el universo superior, ambas a una distancia prudente<sup>26</sup> de la entrada (salida) –para que no se sientan en esas estaciones los efectos de curvatura– con aceleraciones de marea inferiores a la de la gravedad terrestre en la parte media del viaje.<sup>27</sup>

Si dispusiéramos de un AG, digamos AG#1, de estos tipos, es decir, cómodamente atravesable, que conectara regiones muy distantes (como la Tierra y la estrella Sirio) por la parte exterior, pero cuyas bocas estuvieran a corta distancia interior, la entrada y salida de un pasajero por el túnel marcarían dos sucesos que los observadores exteriores tildarían de espacialmente separados,<sup>28</sup> y por ende habría algún inercial  $S$  en el que se vería a ese viajero salir antes de haber entrado. Combinando esta posibilidad con los buenos servicios de un segundo AG#2 en reposo en ese inercial  $S$ , podría el viajero que sale del primer túnel acelerarse hasta llegar a la entrada de AG#2, meterse en éste, salir, y llegar a la entrada de AG#1 ¡antes de haber empezado el viaje! De hecho, bastaría con un sólo AG para poder viajar en el tiempo (52).

## J. Viajes en el tiempo

Viajar por el tiempo es fácil. Lo hacemos constantemente, sin esfuerzo alguno, al ritmo uniforme de un segundo cada segundo. Incluso podríamos hacerlo más aprisa, viajando hacia el futuro: el gemelo que vuelve a la Tierra tras su paseo por el Universo ha viajado hacia el futuro de su hermano, aprovechando la dilatación relativista del tiempo. El efecto retardador de la gravitación sobre los relojes permite visitar el futuro (de otros) sin moverse de “casa”. En (30) nos ofrece Gott una receta para ello: formemos alrededor nuestro una 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  $\gamma \sim [1 - R_S/R]^{-1/2}$ , de modo que un lapso  $\tau$  de nuestro tiempo cubriría un lapso  $\gamma\tau$  del tiempo del observador alejado.

Otra cuestión menos trivial es viajar hacia atrás en el tiempo, esto es, visitar el pasado. Si nos conformamos con verlo, la cosa no es difícil. Al mirarnos en un espejo a unos 150 cm de distancia, nos vemos tal como éramos hace 10 ns. La imagen de Andrómeda en un telescopio nos muestra cómo era esta galaxia hace 2.4 Ma, cuando el *homo habilis* empezaba a caminar sobre la Tierra. Pero si lo que queremos es viajar al pasado, el problema se agrava. ¿Es posible volver al pasado viajando siempre hacia el futuro? En otras palabras: ¿Existen curvas de género tiempo cerradas (CTCs)? Ya hemos visto antes cómo los AGs ayudan a conseguir las. Pero tales AGs requieren para su estabilidad el uso de materiales exóticos que violan la llamada condición débil

sobre la energía (CDE): la densidad de energía debe ser no negativa para todo observador inercial.

Se conocen diversos escenarios espacio-temporales con CTCs: el universo de Gödel (28), el cilindro de van Stockum-Tipler (66; 70), los ANs rotantes, los AGs atravesables, las cuerdas cósmicas de Gott (29; 30), y los motores de propulsión por deformación de Alcubierre (1; 18). Por razones de su cercanía a Einstein, y por limitaciones de espacio, me ceñiré al universo de Gödel.

## 1. Universo de Gödel

Con motivo del 70 cumpleaños de AE, Gödel (28) presentó en 1949 un modelo cosmológico homogéneo y anisótropo, con una constante cosmológica atractiva y una densidad constante de materia sin presión. Este universo gödeliano contiene CTC's, y su autor fue el primero en comentar sobre sus extrañas consecuencias. 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.*<sup>29</sup>

El universo de Gödel es homogéneo, rotante y estacionario, con densidad de materia uniforme y constante cosmológica atractiva. En él es imposible definir un tiempo cósmico. Las líneas de universo de los observadores fundamentales son abiertas, pero existen movimientos con líneas de universo cerradas; más aún, dados dos instantes  $A$  y  $B$  de un mismo observador fundamental, con  $A$  anterior a  $B$  en la trayectoria fundamental, es posible hallar una trayectoria de género tiempo que parte de  $B$  para llegar a  $A$ , y orientada en todo punto al ¡futuro! Luego este universo admite los viajes en el tiempo.

En la Fig. 5 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 tras un cierto tiempo, estas geodésicas alabeadas empiezan a reconverger hasta focalizarse de nuevo, para repetir 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).

Finalmente, advertimos que el cosmos rotante y estacionario de Gödel queda muy lejos de representar a nuestro Universo en expansión y sin rotación global ostensible.

## 2. Protección de la cronología

La presencia de circuitos espaciotemporales que se muerden la cola, las CTC's, plantean problemas de nuevo estilo, al posibilitar violaciones de la causalidad: si se puede volver al pasado, ¿podemos actuar en él para modificar el presente

<sup>26</sup>Del orden de  $10^4 r_0$ , siendo  $r_0$  el radio de la garganta.

<sup>27</sup>Podría pensarse que si  $r_0$  es pequeño a lo mejor “no cabe” el pasajero por el túnel. Pero obsérvese que nuestro pasajero es 2-dimensional en estos gráficos, ya que falta el ángulo  $\theta$  (¡ecuador!), y por tanto se mueve en ellos como una ameba aplastada sobre la superficie del túnel.

<sup>28</sup>La distancia Tierra-Sirio es 8.6 años luz; pero el tiempo medido desde del exterior entre la entrada y salida del viajero por el túnel podría ser de 1 hora, según lo dicho.

<sup>29</sup>A. Einstein, en ALBERT EINSTEIN: PHILOSOPHER–SCIENTIST, Vol. II, pp 687-688, P. Schilpp, ed. (Harper, New York, 1958).

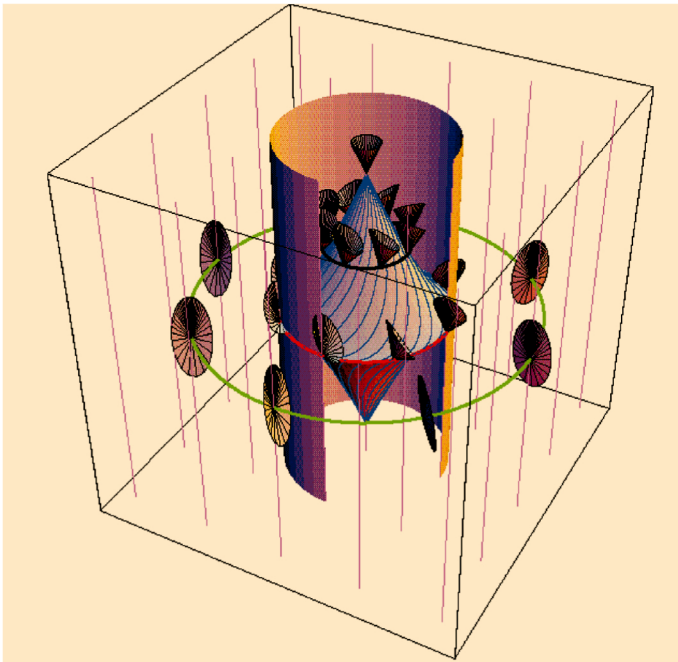


Figura 5. Universo de Gödel.

del que partimos? Las paradojas resultantes serían notorias, y para su solución se han invocado desde principios de auto-consistencia hasta la idea de multiversos *à la* Everett (11; 22). Hawking (37) también ha terciado en el asunto, presentando argumentos en contra de la existencia de CTCs: en el horizonte de Cauchy 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<sup>30</sup> 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.*

#### 4. ¿Qué será del tiempo?

El tiempo en la Mecánica Cuántica (MQ) de Copenhague no es un observable físico, sino un parámetro externo del fondo clásico bohriano que se usa para etiquetar la evolución del sistema. Su papel es muy peculiar (72); no participa en la acción, pero a cambio adquiere relevancia en la interpretación de la teoría (25; 53; 56; 76).

La MQ puede alterar nuestra narración del pasado. Este no es fruto de una sola historia pasada, como sostiene la física clásica. Recordemos la sorprendente descripción cuántica del presente como amalgama híbrida de todos los pasados que le son compatibles; es la llamada suma feynmaniana sobre historias (20). Por el éxito predictivo de esta idea, sabemos que todas las alternativas potenciales intervienen con igual peso pero distintas fases, aunque no podamos testarlo directamente sin destruir su coherencia. En los últimos años se han realizado experimentos cuánticos de elección retardada que nos inclinan a una descripción sesgada del pasado inobservado. No es que cambie tal pasado, sino nuestra lectura del mismo. Tal pasado es siempre un manojito de

potencialidades, y al obtener un resultado concreto en el presente, alguna de ellas se ha hecho realidad y por ello ha focalizado nuestro interés especial. Como broche en este contexto, citemos para terminar los experimentos de borrado cuántico diferido que muestran cómo incluso el futuro puede afectar nuestro relato del pasado (31; 43).

Existen límites cuánticos a la perfección de los relojes (60; 72; 75). El principio de indeterminación y el colapso gravitacional se unen para limitar la precisión de cualquier reloj:

$$\tau_{\text{lim}} \sim t_{\text{Planck}} \equiv \sqrt{G_N \hbar / c^5} \sim 10^{-43} \text{ s}$$

Además los quanta impiden que haya relojes heraclitanos, relojes que siempre avancen, sin que jamás se den la vuelta (71).

Si bien la física del siglo XX nos ha permitido saber más sobre el tiempo, aún es mucho lo ignorado, y posiblemente el debate continúe durante unas décadas en torno a la trilogía tiempo, quanta y gravitación. Penrose (57) augura grandes sorpresas: *It is my opinion that our present picture of physical reality, particularly in relation to the nature of time, is due for a grand shake up – even greater, perhaps, than that which has already been provided by present-day relativity and quantum mechanics.*

Debemos estar preparados para conmociones, si no del todo inesperadas, sí radicales. Quién sabe si herramientas como las geometrías no-conmutativas pueden ayudarnos a prescindir del espacio-tiempo en esa fase cuántica del Universo en que los puntos se desvanecen y los sucesos pierden su identidad (9).

Por ahora nadie sabe qué será del tiempo. Concluiremos el nuestro recordando a Jorge Manrique:

*Y pues vemos lo presente  
como en un punto s'es ido  
e acabado  
si juzgamos sabiamente  
daremos lo nonvenido  
por pasado.*

#### Bibliografía

- [1] ALCUBIERRE, M. 1994. *Class. Quantum Grav.* **11** L73--L77.
- [2] ALLEY, C. O. 1979. "Proc. of the 33rd annual symposium on frequency control", p. 4.
- [3] ALLEY, C. O. 1983. "Quantum optics, experimental gravity, and measurement theory", eds. P. Meystre, M. O. Scully. Plenum Press, New York.
- [4] ANDREWS, W. J. H. (Editor) 1996. "The quest for longitude". Collection of Historical Scientific Instruments, Harvard University.
- [5] ATKINS, P. W. 1981. "The creation". Freeman, New York.
- [6] BARROW, J. D., TIPLER, F. J. 1986. "The anthropic cosmological principle". Clarendon, Oxford.
- [7] BERKELEY, G. 1721. "De motu.
- [8] CARNAP, R. 1963. *Autobiography* en "The Philosophy of Rudolf Carnap", ed. P. A. Schilpp, p. 17. Chicago Library of Living Philosophers.
- [9] CONNES, A. 1994. "Noncommutative geometry". Academic Press, San Diego.
- [10] DAVIES, P. C. W. 1995. "About time. Einstein's unfinished revolution". Viking, Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex.
- [11] DEUTSCH, D. 1991. *Phys. Rev. D* **44** 3197-3217.
- [12] DORLING, J. 1970. *Am. J. Phys.* **38** 539-540.
- [13] EINSTEIN, A. 1905. *Ann. d. Phys.* **17** 891-921.

<sup>30</sup>Parecidos resultados se deben a Frolov (23) y a Kim y Thorne (42).

- [14] EINSTEIN, A. 1907. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* **4** 411-462.
- [15] EINSTEIN, A. 1915. *Preuss. Akad. Wiss. Berlin, Sitzber.* **2** 778-786, **2** 799-801, **2** 831-839, **2** 844-847.
- [16] EINSTEIN, A. 1916. *Ann. d. Phys.* **49** 769-822.
- [17] EINSTEIN, A., ROSEN, N. 1935. *Phys. Rev.* **48** 73-77.
- [18] EVERETT, A. E. 1916. *Phys. Rev. D* **53** 7365-7368.
- [19] FEINBERG, G. 1970. *Scientific American* **222** (2), 68 (1970).
- [20] FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. 1963. "The Feynman lectures on physics". Addison-Wesley, Reading.
- [21] FLAMM, L. 1916. *Physik. Z.* **17** 448-454.
- [22] FRIEDMAN, J., MORRIS, M. S., NOVIKOV, I. D., ECHEVERRIA, F., KLINKHAMMER, G., THORNE, K.S., YURTSEVER, U. 1990. *Phys. Rev. D* **42** 1915-1930.
- [23] FROLOV, V. P. 1991. *Phys. Rev. D* **43** 3878-3894.
- [24] GALILEI, G. 1638. "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali". Elsevir, Leiden.
- [25] GALINDO, A. 1985. ¿Un observable "tiempo"?, en "Algunas cuestiones de física", eds. J. Aporta, D. González, M. Quintanilla, pp. 655-659. Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- [26] GALINDO, A. 1994. "Tras el tiempo", Discurso inaugural del año académico 1994-1995, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid.
- [27] GARCÍA DONCEL, M. 1989. *Enrahonar* **15B** 39-59.
- [28] GÖDEL, K. 1949. *Rev. Mod. Phys.* **21** 447-450.
- [29] GOTT, J. R. 1991. *Phys. Rev. Lett.* **66** 1126-1129.
- [30] GOTT, J. R. 2002. "Time travel in Einstein's Universe". Mariner Books. Houghton Mifflin Company, Boston.
- [31] GREENE, B. 2004. *The Fabric of the Cosmos*. A. A. Knopf, New York.
- [32] HAFELE, J. C., KEATING, R. E. 1972. *Science* **177** 166-168, **177** 168-170.
- [33] HALLIWELL, J. J., PÉREZ-MERCADER, J., ZUREK, W. H. (eds.) 1994. "Physical origins of time asymmetry". Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [34] HAWKING, S. W. 1974. *Nature* **248** 30-31.
- [35] HAWKING, S. W. 1975. *Commun. Math. Phys.* **43** 199-220.
- [36] HAWKING, S. W. 1988. "A brief history of time". Bantam, London.
- [37] HAWKING, S. W. 1992. *Phys. Rev. D* **46** 603-611.
- [38] HINTON, C. H. 1884. *What is the fourth dimension*, en "Scientific romances". Swan Sonnenschein, London, 1884.
- [39] HUYGENS, C. 1673. "Horologium oscillatorium sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometrica".
- [40] KEPLER, J. 1609. "Astronomia nova seu physica cœlestis".
- [41] KEPLER, J. 1619. "Harmonices mundi libri V".
- [42] KIM, S. W., THORNE, K. S. 1991. *Phys. Rev. D* **43** 3929.
- [43] KIM, Y.-H., YU, R., KULIK, S.P., SHIH, Y., SCULLY, M.O. 2000. *Phys. Rev. Lett.* **84** 1-5.
- [44] KING, H. C. 1978. "Geared to the Stars". University of Toronto Press, Toronto.
- [45] KING-HELE, D. 1997. *Nature* **385** 309-310.
- [46] LANGEVIN, P. 1911. *Scientia* **10** 31-54.
- [47] LEIBNIZ, G. W. 1715-16. Ver G. H. Alexander, "The Leibniz-Clarke correspondence", Manchester Univ. Press, 1956.
- [48] MACH, E. 1883 "Die Mechanik in ihrer Entwicklung historischkritisch dargestellt". Brockhaus, Leipzig.
- [49] MINKOWSKI, H. 1909. *Raum und Zeit. Phys. Zeit.* **10** 104-111. Célebre conferencia pronunciada el 21 de Septiembre de 1908 en la 80ª *Versammlung Deutscher Naturforscher*, en Colonia.
- [50] MISNER, C. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A. 1973. "Gravitation". Freeman, San Francisco.
- [51] MORRIS, M. S., THORNE, K. S. 1988. *Am. J. Phys.* **56** 395-412.
- [52] MORRIS, M. S., THORNE, K. S., YURTSEVER, U. 1988. *Phys. Rev. Lett.* **61** 1446-1449.
- [53] MUGA, J. G., SALA MAYATO, R., EGUSQUIZA, I. L. (Eds.) 2002. *Time in Quantum Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin.
- [54] NEWTON, I. 1687. "Philosophiæ naturalis principia mathematica". Streater, London.
- [55] PAIS, A. 1982. "Subtle is the Lord ..." The science and the life of Albert Einstein". Oxford University Press, Oxford.
- [56] PAULI, W. 1958. "Encyclopædia of physics", Vol. 5/1, ed. S. Flügge, p.60. Springer-Verlag, Berlin.
- [57] PENROSE, R. 1990. "The emperor's new mind". Oxford Univ. Press, Oxford.
- [58] ROSSI, B., HALL, D. B. 1941. *Phys. Rev.* **59** 223-228.
- [59] SAGAN, C. 1985. "Contact". Simon & Schuster, New York.
- [60] SALECKER, H., WIGNER, E. P. 1958. *Phys. Rev.* **109** 571-577.
- [61] SÁNCHEZ DEL RÍO, C. 1990. *El tiempo en física*, en "Simposio sobre el tiempo", pp. 21-32. Editorial Universidad Complutense, Madrid.
- [62] SCHÖN, M. 1993. Preprint gr-qc/9304024.
- [63] SCHWARZSCHILD, K. 1916a. Sitzber. Deut. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math.-Phys. Tech. 189-196.
- [64] SCHWARZSCHILD, K. 1916b. Sitzber. Deut. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math.-Phys. Tech. 424-434.
- [65] SOBEL, D. 1996. "Longitude". Penguin.
- [66] STOCKUM, W. J. VAN. 1936/37. *Proc. R. Soc. Edinburgh.* **57** 135-154.
- [67] TAYLOR, E. F., WHEELER, J. A. 1992. "Spacetime physics". Freeman, New York.
- [68] THORNE, K. S. 1994. "Black holes and time warps. Einstein's outrageous legacy". Norton & Company, New York.
- [69] THORSETT, S. E. 1994. *Nature* **367** 684-685.
- [70] TIPLER, F. J. 1974. *Phys. Rev. D* **9** 2203-2206.
- [71] UNRUH, W. G., WALD, R. M. 1989. *Phys. Rev. D* **40** 2598-2614.
- [72] UNRUH, W. G. 1993. Preprint gr-qc 93.12.027.
- [73] VESSOT, R. F. C., LEVINE, M. W. 1979. *J. Gen. Rel. and Grav.* **10** 181-204.
- [74] VESSOT, R. F. C. et al. 1980. *Phys. Rev. Lett.* **45** 2081-2084.
- [75] WHITROW, G. J. 1980. "The natural philosophy of time". Clarendon, Oxford.
- [76] WIGNER, E. P. 1972. *On the time-energy uncertainty relation*, en "Aspects of quantum theory", eds. A. Salam, E. P. Wigner, pp. 237-247. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [77] WILLIAMS, D. C. 1951. *J. Philosophy* **48** 457.

**Alberto Galindo Tixaire**

está en el Dpto. de Física Teórica.

Facultad de Ciencias Físicas.

Universidad Complutense



## 5º CICLO DE INVIERNO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA COMPLUTENSE

*Física, innovación científica y desarrollo profesional de la mujer en la investigación*

Del 19 al 21 de abril

Información y matrículas:

Fundación General de la UCM  
C/ Donoso Cortes, 65 5ª planta 28015 Madrid  
De 8:00 a 15:00 horas  
Tfno: 91 394 64 08  
Programa completo: [fundacionucm.es](http://fundacionucm.es)  
[secretariadealumnos@rect.ucm.es](mailto:secretariadealumnos@rect.ucm.es)

