



Einstein y el tiempo

Alonso Sepúlveda S.



I

El tiempo ha sido tratado a través de la historia en diversidad de formas: desde argumento de filósofos, hasta motivo de artistas, poetas y escritores. En su elucidación trabajó Newton en sus escritos teológicos y en las primeras páginas de sus *Principia*, donde propone las ideas sobre espacio, tiempo y movimiento que persistieron hasta el siglo xx, aunque fueron criticadas por algunos de sus grandes contemporáneos como Berkeley y Leibniz, y por uno de los más agudos entre los filósofos modernos, Ernst Mach, uno de los fundadores del positivismo lógico, quien fue contemporáneo de Einstein y uno de los filósofos leídos por él en su juventud.

En los *Principia* escribe Newton:

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, sin relación a algo exterior, discurre uniformemente y se llama *duración*. El tiempo relativo, aparente y vulgar, es esa medida sensible y externa de una parte de duración cualquiera (igual o desigual), tomada del movimiento: tales son las medidas de horas, de días, de meses, etc., que se usan ordinariamente en lugar del tiempo verdadero. [...] Puede ser que no exista movimiento regular (completamente periódico) por el cual el tiempo pueda ser exactamente medido. Todos los movimientos pueden ser acelerados y retardados. Pero el flujo del tiempo absoluto no puede ser cambiado. La duración o existencia persistente de las cosas es siempre la misma, ya sean los movimientos rápidos o nulos.

El tiempo, según Newton, es unidireccional y apunta siempre al futuro; es homogéneo, es decir, uniforme —por lo cual cada uno de sus intervalos tiene igual duración para todos los observadores—, y es continuo, esto es, divisible hasta el infinito. Es además infinito en su duración y, por tanto, eterno, por lo que no hay un instante inicial en el pasado, ni un instante final en el futuro.

El ritmo del tiempo es independiente del contenido material del universo, por lo cual nada puede afectar su fluir continuo y uniforme. Por lo demás, del mismo modo que la existencia del espacio no implica la existencia de la materia, la

del tiempo no implica cambios ni movimientos. El tiempo y el espacio, como entes, preceden lógica y ontológicamente al mundo.

Las anteriores cualidades hacen que sea suficiente un solo reloj que marque el tiempo universal, reloj que sería utilizable por todos los observadores, cualquiera sea su movimiento, ya sea uniforme o acelerado.

Estas ideas, cuya influencia en la física y en el pensamiento de Occidente se prolongó por más de doscientos años, habrían de ser reformuladas a raíz de una notable sospecha de finales del siglo xix: la indicación de que la velocidad de la luz en el vacío podría ser la misma para todos los observadores. Así lo entendió Einstein, aunque los físicos de la época, renuentes a abandonar las ideas vigentes sobre el espacio y el tiempo —que suponían que *toda* velocidad depende del movimiento del observador— prefirieron buscar una explicación a este hecho simple de la experiencia.

II

Las ideas iniciales de Einstein y su actitud de tono positivista están conectadas con sus lecturas de juventud en la Academia Olympia, un grupo conformado por Einstein, Maurice Solovine y Conrad Habicht, cuyas reuniones dedicaban a leer y explorar, entre otros, a los grandes filósofos. En sus lecturas estuvieron las obras de Pearson, Mach (fue Michele Besso quien introdujo a Einstein a su obra), Poincaré, Stuart Mill, Hume y Spinoza.

Tal vez de allí surgió el interés de Einstein por la ciencia positiva, vale decir, su actitud que exige aceptar y proponer sólo conceptos arraigados en el suelo firme de lo experimental.

El trabajo de Einstein de 1905, consignado en su artículo *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, se dedica en primer lugar a una revisión de la noción newtoniana de tiempo, al descubrir que los experimentos obligan a abandonar la idea de que el tiempo es universal y transcurre del mismo modo para todos los observadores en movimiento. Años después, escribe Einstein:

La única justificación para nuestros conceptos y sistemas de conceptos es que ellos sirven para representar la complejidad de nuestras experiencias; fuera de esto no tienen legitimidad.

El resultado de los experimentos ópticos y el estudio de las asimetrías presentes en la teoría de la electrodinámica, pero no en los fenómenos, conducen a Einstein a aceptar que las ecuaciones de la electrodinámica son las mismas en los sistemas de referencia donde también es válida la mecánica, configurando con ello el primer principio de la *Relatividad especial*, que reza así: las leyes de la física tienen la misma forma matemática en todos los sistemas de referencia inerciales, vale decir, aquellos donde es válida la ley de inercia en ausencia de fuerzas.

El segundo principio, “sólo aparentemente contradictorio con el primero”, establece que la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, vale decir, es una *constante universal* de valor muy cercano a 300.000 km/s.

Mientras el primer principio había sido expresado años antes por otros investigadores en forma independiente para la mecánica y la electrodinámica, ahora se impone para todos los fenómenos físicos, independientemente de su naturaleza. En verdad, es el segundo postulado el que marca el carácter revolucionario de la teoría de Einstein y el que anuncia los nuevos efectos físicos que en ella son novedosos.

Para entrar en sus ideas sobre el tiempo es preciso hacer una pregunta: ¿Qué es un reloj? “Entendemos por un reloj —escribe Einstein— algo que provea una serie de eventos que puedan ser contados”; esto se logra usualmente con un mecanismo periódico al que imponemos la hipótesis cronométrica consistente en afirmar que en un reloj todos los instantes tienen igual duración. Recordemos en este punto a Newton, quien afirma que sólo puede medirse el tiempo relativo, “esa medida sensible y externa de una parte de duración”.

En ningún momento las ideas de Einstein harán referencia al espacio absoluto, y menos aún después de las consideraciones que se harán a continuación. En este sentido, Einstein hace caso omiso de “esa noción metafísica inofensiva”, como llamó Mach al tiempo absoluto newtoniano; vale

decir que la nueva noción de tiempo se fundamentará sobre una definición operacional. Esto significa, como se ha anotado con frecuencia, que la teoría de Einstein se refiere más a los relojes que al tiempo.

De acuerdo con J. Ullmo en su libro *El pensamiento científico moderno* (Taurus, Madrid, 1959), “Una definición operacional entraña la descripción de un procedimiento regular para localizar, medir y, más generalmente, alcanzar e identificar el concepto definido. Es preciso que cualquiera pueda repetir las operaciones incluidas en la definición operatoria y esté seguro entonces de llegar a las mismas constataciones que inicialmente se comprendían en ella”. En lo que sigue veremos este procedimiento en acción.

Para entrar en sus ideas sobre el tiempo es preciso hacer una pregunta: ¿Qué es un reloj? “Entendemos por un reloj —escribe Einstein— algo que provea una serie de eventos que puedan ser contados”.

Los relojes, continúa Einstein, han de ser sincronizados a distancia y sin moverlos de sus posiciones, puesto que el ritmo de los relojes en movimiento podría ser distinto del ritmo de los relojes en reposo del mismo observador. “Podría” significa que no se sabe y que por tanto no deben hacerse suposiciones al respecto. Los desarrollos posteriores demuestran en verdad estos efectos debidos al movimiento y revelan que no hay un “tiempo universal”, sino que cada observador ha de atenerse a las medidas de tiempo obtenidas con sus propios relojes en reposo respecto a él.

Lo que habrá de hacerse a continuación es verificar de modo operacional si las categorías asociadas al tiempo, la *sucesión* y la *simultaneidad*, sufren algún cambio debido al segundo postulado. Resulta, según los análisis de Einstein, que lo simultáneo y lo sucesivo son ahora conceptos convertibles uno en otro cuando son determinados por observadores en movimiento relativo.

Si, por ejemplo, un observador en un vagón en movimiento uniforme enciende una bombilla ubicada en el centro del vagón, la luz llegará a los extremos simultáneamente, pero —como lo demuestra un análisis detallado— un observador en tierra que tome en cuenta que desde su referencial la luz tiene la misma velocidad que la medida dentro del vagón, llegará a la conclusión que la luz alcanza primero el extremo delantero y luego el trasero. *Lo simultáneo deviene en sucesivo.*

Un análisis adicional permite demostrar que los intervalos de tiempo entre la salida y el retorno de la luz al mismo punto —utilizando espejos— dependen del movimiento del observador. Esto constituye la llamada *dilatación temporal*, un efecto que ha sido probado en formas diversas.

En 1908, el geómetra Hermann Minkowski inventó el espacio-tiempo, un escenario de cuatro dimensiones donde los tres primeros ejes son espaciales y el cuarto es el tiempo. Esta nueva construcción permite ver más claramente que a los nuevos efectos asociados al tiempo los acompañan otros asociados al espacio y ya previstos por Einstein en su teoría original, uno de los cuales es llamado *contracción de longitud* en movimiento. En la geometría de Minkowski, la transformación de un sistema de referencia a otro puede ser concebida como una rotación en el espacio-tiempo.

Uno de los puntos culminantes de la relatividad especial es el estudio de la conexión entre *causalidad y orden temporal*. Puesto que en la física clásica no existe un límite superior para la propagación de causas, resultará que el ordenamiento antes-después para una pareja de fenómenos es el mismo para todos los observadores sin relación a su propio movimiento. Pero ahora, dado que la relatividad especial ha demostrado que la velocidad de la luz en el vacío es un tope máximo para la propagación de señales físicas, resultará que no sólo hay una relativización de la sucesión y la simultaneidad, sino que además es posible la permanencia o la inversión de la relación antes-después entre eventos, dependiendo de si hay o no relaciones causales presentes.

Un ejemplo simple permitirá exponerlo claramente: supóngase que en el Sol se produce una erupción (E) en su superficie, que usualmente altera luego las telecomunicaciones (T) en la Tierra. La luz producida por la erupción tarda unos

ocho minutos en alcanzar la Tierra. Si la diferencia temporal entre la erupción y la alteración en las telecomunicaciones es de ocho minutos medidos por un observador terrestre, bien pudieron ser las ondas electromagnéticas provenientes de la erupción las responsables de las alteraciones en la Tierra; si la diferencia es mayor de ocho minutos, pudieron ser las partículas emitidas desde el Sol con menor velocidad. Pero si la diferencia de tiempo entre E y T es menor de ocho minutos, no es posible la conexión entre ambos sucesos, pues T debió ser ocasionado por una señal que viaje con una velocidad mayor que la de la luz, lo que no es posible según la teoría.

La relatividad asegura que si hay posibilidad de conexión causal entre dos acontecimientos (pues en el intervalo de tiempo entre ambos la luz podría recorrer la distancia que los separa), el orden temporal verificado por *todos* los observadores es el mismo, aunque puedan diferir en la medida del intervalo temporal y espacial que los separa. Pero si los dos acontecimientos no pueden estar conectados causalmente (pues ni siquiera la luz puede conectarlos) tampoco tienen orden temporal único. Esto significa que si la erupción solar E y la alteración en las telecomunicaciones T están separados, por ejemplo, por cinco minutos, primero E y luego T según un observador terrestre, otro que viaje con alguna alta velocidad podrá encontrar que ocurre primero E y luego T, un observador con otra velocidad podrá certificar que primero ocurre T y luego E, mientras otro más podría encontrar que son simultáneos.

Por tanto, *no hay orden temporal absoluto para eventos no relacionables causalmente*. De acuerdo con la relatividad especial, no hay violación del ordenamiento antes-después entre eventos causales, o al menos si hay la posibilidad de conexión causal. Nunca ocurrirá entonces que un observador con algún tipo de movimiento encuentre que una flecha llegue a la diana antes de ser disparada, pues la secuencia aquí involucrada es causal.

III

Ahora bien, el 24 de noviembre de 1915, Einstein presentó en el seminario de Hilbert en Gotinga su nueva teoría de relatividad, que ahora incluía observadores en movimiento acelerado. En tal versión, Einstein logra identificar los llamados

campos de fuerzas ficticias —los mismos que experimentamos en un vagón acelerado o en un tiovivo rotante— con campos de gravitación, lo que hace que la nueva teoría sea a la vez una teoría de la gravitación que reemplazará la de Newton y proveerá nuevos horizontes y predicciones. Los campos de fuerzas inerciales, tradicionalmente conocidos como fuerzas ficticias (pues pueden desaparecer al cambiar de sistema de referencia), resultan tener la misma naturaleza que los campos de gravitación “genuinos” producidos por masas. A esta conclusión se le conoce como *principio de equivalencia*.

La teoría del tiempo que presenta la Relatividad general parece ser, según algunos, la versión matemática de “La persistencia de la memoria”, el famoso cuadro de Dalí de los relojes blandos, lo que apunta a la idea de que la relatividad general es una teoría surrealista. Ver, por ejemplo, *Art & Physics* de Leonard Shlain (Quill William Morrow, New York, 1991).

La versión general de la relatividad se enmarca en un espacio-tiempo curvado por la materia, lo que de inmediato trae nuevos efectos sobre la geometría y sobre el flujo del tiempo. Resulta así que los relojes en un campo de gravitación se retardan tanto más cuanto más bajos se encuentren en el campo, y también —según la equivalencia entre gravitación y movimiento acelerado— los relojes en sistemas de referencia acelerados retardan su ritmo. En particular, en un sistema rotante los relojes de la periferia marchan más lentos que los relojes cercanos al centro. Los efectos sobre la marcha de los relojes se acentúan a medida que más se acercan los relojes a las masas, o mayores son las masas involucradas, o mayor es la velocidad angular. Así pues, *el ritmo del tiempo depende del lugar*; por ello, en la cercanía de los agujeros negros —objetos exóticos de muy altas masas— los efectos de retardo temporal son tan intensos que en la zona conocida como el “horizonte” el tiempo parece detenerse.

Puesto que la relatividad general tiene como escenario un espacio-tiempo no euclidiano, a los efectos sobre el tiempo van aparejados otros sobre el espacio que revelan la distorsión que las masas o la aceleración traen a la geometría. En particular, en un sistema rotante y en un campo de gravedad genuino, las líneas más cortas entre

dos puntos son curvas, la suma de los ángulos de un triángulo difiere de 180 grados y el valor de π difiere del euclidiano 3.14159... Esto significa que desde Einstein la geometría no es sólo un capítulo de la matemática, sino una teoría sobre la estructura física del mundo. A esto se le ha llamado *fisicalización de la geometría*.

Un efecto final, asociado a la deformación del tiempo anunciado por Einstein, es la existencia de las ondas de gravitación, que resultan tener características inusuales. Una onda electromagnética, por ejemplo, es una ondulación del campo electromagnético que se propaga en el espacio y el tiempo. Las ondas de gravitación, en contraste, son ondas de espacio y tiempo, es decir, son ondulaciones del espacio-tiempo mismo, un tipo de fenómeno nuevo que permite la mutación del escenario en el que ocurren los fenómenos físicos. Una forma simple de verlo es comparar la obra de Newton con el teatro clásico isabelino, en el que el escenario permanece inalterado, y la obra de Einstein con el teatro de Ionesco y Becket, en el que la acción de los actores crea y a la vez modifica el escenario: éste es parte de la acción.

Lo que la teoría de Einstein ha significado ha sido la dinamización del escenario natural de los fenómenos y la consecuente conversión del espacio y el tiempo en objetos con una dinámica propia, de la que carecían en la concepción newtoniana del mundo.

Michele Besso fue amigo de Einstein hasta su muerte. En una nota enviada a la esposa de Michele con ocasión de su funeral en marzo de 1955 —un mes antes de la muerte de Einstein—, éste escribió:

Ahora Besso ha partido de este extraño mundo un poco antes de mí. Eso nada significa. La gente como nosotros, que cree en la física, sabe que la distinción entre pasado, presente y futuro es solo una terca ilusión persistente. ■

Alonso Sepúlveda (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia, con estudios de posgrado en el Hunter College de la Universidad de Nueva York. Ha publicado: *Los conceptos de la física*, *Electromagnetismo*, *Física matemática* y *Estética y simetrías*. Ha participado en proyectos de investigación sobre dinámica de galaxias con el grupo de astrofísica de la Universidad de Roma.