



DIFERENCIA(S)

revista de teoría social contemporánea

DANIELA PEREZ

EL TIEMPO EN LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

EN REVISTA DIFERENCIA(S)

TIEMPO - N°4 - AÑO 3 - MAYO 2017. ARGENTINA.

ISSN 2469-1100

PP. N° 48-64



EL TIEMPO EN LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

DANIELA PÉREZ

RESUMEN

El tema del tiempo ha sido central en el desarrollo de la ciencia y la filosofía en Occidente. Acaso la razón sea, tal como escribía Borges, que nosotros mismos estamos hechos de tiempo, y es el tiempo el que dicta nuestro principio y nuestro fin. Este artículo es un intento de reunir en forma breve y concisa, las distintas concepciones sobre el tiempo en los últimos cuatrocientos años, y presentar la visión actual del mismo. Se comienza presentando las dos principales posturas filosóficas sobre la naturaleza del espacio y el tiempo en el siglo XVII, y cómo estas ideas fueron evolucionando hasta la formulación de la Teoría de la Relatividad Especial y la Relatividad General a principios del siglo XX. Luego, se explica brevemente el núcleo teórico de ambas teorías y los cambios que éstas introducen en la concepción del espacio y el tiempo. Asimismo, se muestra cómo el propio Einstein en el curso de sus investigaciones científicas, fue adoptando distintas posturas respecto a la realidad del espacio-tiempo. Por último, se muestra cómo el conocimiento astrofísico actual, en particular el descubrimiento de las ondas gravitacionales, nos ha permitido comprender un poco más sobre la naturaleza del espacio-tiempo.

PALABRAS CLAVES TIEMPO; ESPACIO-TIEMPO; RELATIVIDAD ESPECIAL;
RELATIVIDAD GENERAL

ABSTRACT

The subject of time has been central for the development of science and philosophy in the West. The reason maybe is, as Borges wrote, that we are made of time, and it is time that dictates our beginning and our end. This article is an attempt to gather in a short and concise way, the different conceptions about time in the last four hundred years, and to present its actual status. We begin by showing the two main philosophical stands about the nature of space and time in the XVII century, and how these ideas have evolved until the formulation of the Special and General Theory of Relativity at the beginning of the XX century. Furthermore, we show how Einstein himself, in the course of his scientific investigations, adopted different views about the reality of spacetime. Finally, we show how the current astrophysical knowledge, in particular the discovery of gravitational waves, has allowed us to understand a bit more about the nature of spacetime.

KEY WORDS TIME; SPACETIME; SPECIAL RELATIVITY; GENERAL RELATIVITY

LA NATURALEZA DEL TIEMPO ANTES DE LA RELATIVIDAD

En el siglo XVII tuvo lugar una de las discusiones más celebres en la historia de la ciencia sobre la naturaleza del espacio y el tiempo. Los protagonistas fueron Gottfried W. Leibniz e Isaac Newton con mediación de Samuel Clarke, quien ofició de representante de las ideas newtonianas y sostuvo el debate con Leibniz a través de correspondencias. Leibniz sostenía que el espacio y el tiempo no son entidades en sí mismas; esto es, no existen en ausencia de objetos que cambien. Para Leibniz, el espacio es solo un sistema de relaciones espaciales entre objetos, y el tiempo, una relación entre objetos que cambian. Si nada cambiara, pensó Leibniz, no habría tiempo. Si existiese una sola cosa sin partes, no habría espacio. Para Newton, en cambio, el espacio y el tiempo eran entidades reales, como las mesas o los planetas. Sin embargo, a diferencia de estos, no están afectados por los demás objetos del universo.

Leibniz desarrolló un ingenioso argumento contra Newton basado en su principio de identidad de los indiscernibles (si dos supuestos objetos son idénticos en cada aspecto, incluidos los relacionales, entonces se trata del mismo objeto). El argumento es el siguiente: imaginemos dos universos conformados por exactamente los mismos objetos relacionados de la misma manera, pero localizados en diferentes posiciones del espacio. Si el espacio es una cosa, las relaciones de estos objetos respecto del espacio serán diferentes y los dos universos serán diferentes. Sin embargo, no hay ninguna propiedad del conjunto espacio + objetos que nos permita diferenciar entre ambos universos. Luego, por el principio de identidad de los indiscernibles, ambos universos son el mismo. Como los universos no pueden ser el mismo y a la vez diferentes, una de las hipótesis debe ser rechazada: 1) El espacio es una cosa; o 2) El principio de identidad de los indiscernibles. Leibniz pensaba que tenemos razones para afirmar la segunda hipótesis, por lo que la primera es falsa.

Si el espacio no es una entidad física como pensaba Newton, ¿qué es entonces? Leibniz responde: es un sistema de relaciones entre las cosas. No hay espacio, hay relaciones espaciales entre los existentes. Si no hubiese cosas, no habría espacio. Si no hubiese cambios, no habría tiempo. Newton estaba en desacuerdo. Para mostrar que el espacio es algo, propuso su famoso experimento del balde con agua sujeto por una soga al techo. Si se hace rotar el balde, enroscando la cuerda y luego se deja al sistema libre, el balde comenzará girar. Al principio el agua estará en reposo. Luego, el balde irá transmitiendo su movimiento de rotación al agua por fricción y esta adquirirá momento angular. A medida que el momento aumente, la superficie del agua se transformará en un paraboloides debido a las fuerzas centrífugas.

gas. Si detenemos el balde, el agua continuará rotando y manteniendo su superficie parabólica hasta que el rozamiento la vuelva al reposo. ¿Respecto a qué está acelerada el agua? No puede serlo respecto al balde, ya que la superficie es parabólica cuando este rota y cuando no lo hace. Newton responde que debe estar acelerada respecto al espacio absoluto. Luego el espacio absoluto es «algo». Tiene entidad ontológica. Nada puede acelerarse respecto de lo que no existe. Leibniz murió en el año 1716, en pleno debate y jamás pudo responder a este argumento.

En las décadas siguientes, algunos filósofos pre-relativistas tales como George Berkeley, John. B. Stallo, y Ernst Mach respondieron en forma crítica al experimento de Newton.

Berkeley rechazó la reificación newtoniana del espacio absoluto desde un punto de vista epistemológico y metafísico: sólo percibimos *posiciones relativas* y *movimientos relativos*; posiciones y movimientos absolutos sin referencia a cuerpos físicos concretos son imperceptibles y por lo tanto irreales. Berkeley agregó que el experimento de Newton del balde de agua no es respecto al espacio absoluto imperceptible sino con respecto al '*cielo de estrellas fijas*' (1721: 271); ésta es la primera referencia a las 'grandes masas estelares' que reaparecería 100 años después en las críticas de Mach y Stallo.

Jonh Bernhard Stallo fue un académico, jurista, filósofo y embajador germano-americano del siglo XIX. Los argumentos de Stallo contra el espacio absoluto de Newton estaban basados en consideraciones estrictamente cinemáticas. Éste no sólo afirmaba, al igual que Berkeley, que la posición y el movimiento de los cuerpos son propiedades relacionales, sino también que la propia existencia de un cuerpo es relacional; en otras palabras, todas las propiedades físicas de un cuerpo, incluyendo su masa inercial sólo puede existir en interacción dinámica con otras masas. Esto resulta evidente en la tercera ley de Newton tal como señaló James Clerk Maxwell; dado que la inercia se manifiesta en la resistencia contra una fuerza y dado que esta fuerza está acompañada por una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta que tiene su punto de aplicación en otra masa, se necesitan al menos dos masas para que éstas interactúen. En cierta forma, Stallo anticipó la frase famosa de Mach de que en el principio de inercia 'hay una referencia abreviada a todo el universo'.

Las líneas de mundo de Mach y Stallo coincidieron brevemente. Mach supo de la existencia y obra de Stallo leyendo *An Essay on the Foundations of Geometry* en donde Bertrand Russell menciona a Stallo en tres notas al pie de página. Gratamente sorprendido por las ideas de Stallo, Mach inicia una correspondencia que se vio al poco tiempo interrumpida por la muerte del jurista. En forma inmediata, Mach lleva a cabo una traducción al alemán de la obra más famosa de Stallo '*The Concepts and Theories of Modern Physics*', y le dedica una extensa introducción.

Acaso '*Die Mechanik in Ihrer Entwicklung, Historisch-Kritisch Dargestellt*' traducido como '*La Ciencia de la Mecánica*' sea el libro más importante escrito por Ernst Mach. En el obituario escrito por Albert Einstein para *Naturwissenschaften* en ocasión de la muerte de Mach, Einstein menciona la profunda influencia que tuvo dicha obra en la formación de su pensamiento científico en sus días de estudiante, y en la época de Berna durante las discusiones en la Academia Olímpica. La innovación central en la mecánica de Mach es la abolición del espacio absoluto en la formulación de la ley de inercia. En palabras del propio Mach: 'Cuando decimos que un cuerpo mantiene sin cambio su dirección y velocidad *en el espacio*, nuestra afirmación no es más ni menos que una referencia abreviada a *todo el universo*' (1883: 313). Éste además argumentó que la referencia a todo el universo podría restringirse a los cuerpos pesados a grandes distancias que idealizan las estrellas fijas como sistemas rígidos, dado que el movimiento relativo de un cuerpo con respecto a otros cuerpos cercanos es en promedio cero. En el *Principio de Mach*, así llamado por Einstein, se conjetura que la inercia de un cuerpo se debe a su interacción con todo el resto de la materia del universo. Éste principio, junto con el Principio de Equivalencia y el Principio de Covarianza, guiarían a Einstein en la construcción de la teoría de la Relatividad General.

LA CONCEPCIÓN DEL ESPACIO-TIEMPO

Nuestra visión actual sobre la naturaleza del espacio y el tiempo nace con la teoría de la Relatividad Especial, formulada por Albert Einstein en 1905. La nueva teoría surgió esencialmente del abandono de la mecánica clásica en la descripción de los fenómenos electromagnéticos.

Einstein creía en la validez de las ecuaciones de Maxwell. Éstas, sin embargo, no son invariantes bajo las transformaciones de Galileo, esto es, cambian de forma respecto a diferentes sistemas de referencia. El gran paso que dio Einstein para resolver el problema fue mantener la electrodinámica de Maxwell y modificar la mecánica de Newton para que satisfaga la invariancia de Lorentz. La nueva teoría fue relativista, ya que contrariamente a la teoría absoluta de Newton, ciertos parámetros como la masa del cuerpo, pasaban a depender de la velocidad del cuerpo relativa a un cierto sistema de referencia. El concepto mismo de simultaneidad de dos eventos se vuelve relativo al sistema de referencia utilizado para describir los eventos. La Teoría de la Relatividad Especial implicó una nueva forma de pensar en física, ya que los conceptos más esenciales en nuestra descripción del mundo, tales como el espacio y el tiempo, perdían su carácter 'absoluto'.

El núcleo de la formulación de la nueva teoría está contenido en dos postulados:

1. El Principio de Relatividad: la formulación de las leyes de la física debe ser invariante bajo transformaciones de coordenadas entre sistemas inerciales.
2. El Principio de Constancia de la Velocidad de la Luz: la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales.

Un sistema inercial es un cuerpo cuya velocidad es constante respecto a todos los sistemas de la misma clase. Dado que la velocidad relativa entre todos estos sistemas no cambia, están libres de aceleración, y por lo tanto de las llamadas ‘fuerzas no inerciales’; la teoría se llamó ‘especial’ ya que está restringida a sistemas de referencias inerciales.

El aspecto más revolucionario de la teoría fue la desaparición de la simultaneidad absoluta. La duración de un intervalo de tiempo para un observador inercial (en movimiento rectilíneo y uniforme) no tiene por qué coincidir con la duración del mismo intervalo para otro observador. El tiempo se vuelve relativo al sistema de referencia y por lo tanto al estado de movimiento del sistema. Estos efectos relativistas comienzan a ser significativos para velocidades mayores a 100000 km/s, esto es para velocidades comparables con la velocidad de la luz. Es por ello que en nuestra vida cotidiana aquí en la Tierra, dichos efectos son imperceptibles.

La desaparición de la simultaneidad absoluta implica que para objetos que se mueven a velocidad muy altas, comparables a la de la luz, el tiempo se dilata respecto a objetos que permanecen en reposo. El tiempo medido por el reloj de un dado observador se llama ‘tiempo propio’ de ese observador. A un lapso de tiempo propio breve, puede corresponder un lapso de tiempo externo largo si el observador se mueve a velocidades comparables a la velocidad de la luz (denotada por el símbolo c). La relación entre el tiempo propio t y el tiempo externo t se expresa en forma matemática como:

$$t = \tau \gamma,$$

donde γ es el llamado factor de Lorentz, un número mayor a 1, que depende de la velocidad. A medida que la velocidad aumenta, a igual tiempo propio corresponden tiempos externos cada vez mayores.

La verificación del fenómeno de ‘dilatación temporal’ implica la observación y medición de objetos con velocidades cercanas a la de la luz. Hasta el momento no se han podido construir vehículos que se muevan a esas velocidades; el universo, sin embargo, es el mejor laboratorio para testear muchas teorías de la física y en particular ha posibilitado verificar el fenómeno de dilatación temporal mediante la observación de partículas sub-atómicas relativistas. La existencia de dichas partí-

culas se conoce desde la década de 1910 cuando en una serie de vuelos en globo, Victor Hess descubrió que la Tierra se encuentra inmersa en un mar de radiación cósmica. Esta radiación está mayormente formada por partículas llamadas muones creadas por la interacción de rayos cósmicos (partículas muy energéticas provenientes del espacio) con los átomos de la alta atmósfera. En el sistema de referencia propio del muon, sin embargo, éstos sólo viven alrededor de dos microsegundos. La razón por la cual estas partículas llegan a la superficie del planeta es la dilatación del tiempo predicha por la Relatividad Especial: el tiempo de vida de los muones aumenta cuando es medido desde un sistema de referencia terrestre.

Varios científicos hicieron importantes aportes a la teoría de la relatividad especial luego de la publicación del artículo fundacional de Einstein “*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*” de 1905. Hermann Minkowski fue quien introdujo los conceptos de espacio-tiempo, cono de luz, línea de mundo, además de formular la teoría en lenguaje tensorial. Las primeras reacciones de Einstein frente a este nuevo formalismo matemático fueron de completo rechazo: llegó a calificar el trabajo de Minkowski como “erudición superflua”. Más tarde su opinión cambiaría drásticamente: en 1912 adoptó el método tensorial y en 1916 reconoció que gracias a Minkowski, fue mucho más fácil la transición de la Relatividad Especial a la Relatividad General.

Minkowski presentó el resultado de sus trabajos en un coloquio sobre relatividad el 7 de noviembre de 1907. Con estas palabras comenzó su conferencia (1907:339):

La visión del espacio y del tiempo que deseo exponer ante Uds. ha surgido del terreno de la física experimental, y de allí reside su fuerza. Son radicales. De aquí en adelante el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están condenados a desaparecer en sombras, y sólo una especie de unión de los dos preservará una realidad independiente.

¿Qué es el espacio-tiempo? El espacio-tiempo es la suma física de todos los eventos que suceden a las cosas. Las cosas son individuos dotados de propiedades físicas. Por ejemplo, la carga es una propiedad de los electrones; la temperatura es una propiedad de los cuerpos macroscópicos. Un cambio en el estado de una cosa material es un evento. Las partículas, estrellas, campos electromagnéticos, seres vivos o muertos, por mencionar algunos ejemplos, son cosas materiales, esto es, sus propiedades cambian. El espacio-tiempo, está conformado por todos los eventos que han sucedido, suceden y sucederán a todas las cosas materiales que han existido, existen y existirán.

Cada evento del espacio-tiempo puede especificarse mediante 3 coordenadas espaciales y una temporal. Hasta hace poco más de un siglo, se pensaba que las distancias se medían de acuerdo a la geometría desarrollada por Euclídes; ésta es la geometría que hemos aprendido en el colegio y que usamos en la vida cotidiana; algunos de sus axiomas son: la suma de los ángulos interiores de todo triángulo es 180° o, dos líneas paralelas sólo se intersecan en el infinito. Para poder medir distancias entre dos puntos cualesquiera de este espacio se utiliza el famoso teorema de Pitágoras:

$$x^2 + y^2 = h^2$$

donde h denota la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo y x e y la longitud de los catetos. Un espacio donde se cumple esta relación se llama *euclídeo*.

Como ya hemos visto, antes de la formulación de la Relatividad Especial, se pensaba que espacio y tiempo eran dos entidades completamente independientes: el movimiento en el espacio es tridimensional, y el tiempo “fluye” en una única dirección y sentido, desde el pasado hacia el futuro. La coordenada temporal de un dado evento resulta la misma para todos los observadores, independientemente de su posición y velocidad relativa. Esto cambia luego de la publicación de los trabajos de Einstein en Relatividad Especial; fue Minkowski quien comprendió que la nueva teoría implicaba una reformulación del concepto y de la estructura del espacio y del tiempo. Básicamente, la forma de medir distancias e intervalos de tiempo cambia, ya no es más euclídea.

Minkowski encontró que las distancias (llamadas ‘intervalos’) en el espacio-tiempo de la Relatividad Especial, se miden como:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

En esta expresión ‘ dx ’, ‘ dy ’ y ‘ dz ’ representan distancias arbitrariamente pequeñas en tres direcciones espaciales. La variable t denota al tiempo, y c es una constante con unidades de velocidad (se trata de la velocidad de la luz), de forma que ‘ $c dt$ ’ es una distancia medida según un *eje temporal*. Vemos así que el espacio-tiempo de Minkowski es cuadri-dimensional: se ha incorporado al tiempo como una dimensión más. La forma de medir distancias, o en términos geométricos, la ‘métrica’ de este espacio-tiempo es pseudo-euclídea o minkowskiana.

El espacio-tiempo de Minkowski puede representarse de la siguiente forma. Supongamos que ocurre un evento consistente en la emisión de un pulso de luz. En un espacio-tiempo sin materia, el frente de onda electromagnético se propaga como una esfera centrada en el punto de emisión, cuyo radio crece con el tiempo a la

velocidad de la luz. Si suprimimos una dimensión espacial, podemos representar la esfera de luz como un cono cuyo ápex coincide con el evento inicial. La propagación de la luz divide al espacio-tiempo en tres regiones: aquella por donde viaja la luz (la superficie en forma de cono), el interior del cono, y el exterior del mismo. Sólo en la primera región hay rayos de luz; los sistemas materiales que se mueven a velocidades menores que la velocidad de la luz se encuentran en la segunda región. Por fuera del cono, no puede haber sistemas u objetos físicos que hayan estado en el lugar y momento en que ocurrió el evento; de lo contrario, éstos viajarían más rápido que la luz, lo que no está permitido de acuerdo con la Relatividad Especial. El cono determinado por el evento se llama 'cono de luz'. La estructura causal del espacio-tiempo de Minkowski queda entonces definida por el cono de luz en cada evento.

En el espacio-tiempo, pues, hay algunos eventos que están relacionados entre sí y hay otros que no. Este no es el caso para la estructura casual del espacio y el tiempo que se concebía antes de la Relatividad Especial; la estructura causal del espacio y tiempo de Galileo y Newton puede representarse como una línea infinita que separa el pasado y el futuro. Cada evento P se caracteriza mediante un tiempo universal. Todos aquellos eventos que tienen la misma coordenada temporal y son paralelos a la línea del presente son simultáneos. A diferencia del espacio-tiempo de Minkowski, los sistemas u objetos materiales se mueven del pasado al futuro, sin ninguna restricción. La diferencia fundamental, entonces, entre la estructura causal del espacio-tiempo minkowskiano y newtoniano, es que en el primero existe una velocidad máxima para el movimiento de los sistemas materiales, 300000 km/seg, la velocidad de la luz, mientras que en el segundo no existe tal restricción.

El espacio-tiempo de Minkowski es el espacio-tiempo de la Relatividad Especial: todos los sistemas de referencia se mueven con velocidad constante, libres de toda fuerza o aceleración. El espacio-tiempo es plano. La situación cambia si se introduce la gravedad. Al estar los sistemas de referencia acelerados, no hay sistemas de referencia inerciales. La geometría del espacio-tiempo ya no es más plana y la Relatividad Especial deja de ser válida. El Principio de Equivalencia, formulado por Einstein en 1907, le permitió hacer la transición entre la Relatividad Especial y la Relatividad General.

FORMULACIÓN DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

Así recordaba Einstein, en una conferencia dada en Kyoto en 1922, cómo comenzó a gestarse la teoría de la Relatividad General (Ishiwara, 1977)

Estaba sentado en una silla en la oficina de patentes en Berna cuando de pronto me vino el siguiente pensamiento: 'Si una persona cae libremente no sentirá su propio peso'. Estaba sorprendido. Este simple pensamiento me causó una gran impresión. Esto me impulsó hacia una teoría de la gravitación.

En el siglo XVI, Galileo Galilei ya había descubierto que todos los cuerpos, independientemente de su composición y estructura, tienen la misma aceleración en un campo gravitacional constante. Einstein además comprendió que si todos los cuerpos en caída libre se aceleran de igual forma, la aceleración relativa entre estos es nula; localmente, un observador en caída libre podría pensar que está en reposo. No tiene forma de distinguir si está inmerso en un campo gravitacional.

Los efectos de la gravedad pueden, además, reproducirse mediante cualquier tipo de aceleración, verbigracia: en una nave espacial cuya aceleración sea igual a la aceleración de terrestre, no se notará ninguna diferencia entre estar parado en la nave y en la Tierra; o por ejemplo, una persona dentro de un ascensor experimenta la misma sensación de ingravidez que si se encontrara en el espacio, libre de toda influencia del campo gravitatorio terrestre. En ambos casos los efectos de la gravedad han sido removidos mediante la elección de un sistema de referencia acelerado.

Vemos, pues, que existe una gran diferencia entre la gravedad y el resto de las fuerzas de la naturaleza, como por ejemplo la fuerza eléctrica: es imposible simular los efectos de la fuerza eléctrica, dado que no todos los cuerpos en un campo eléctrico se aceleran de la misma forma. ¿Qué es entonces la gravedad y cuál es la relación entre ésta, los sistemas materiales, y el espacio-tiempo? Einstein dedicó 8 años de su vida a responder esta pregunta. Sus esfuerzos culminaron en 1915 con la formulación de las ecuaciones de campo de la Relatividad General.

La Relatividad General es una teoría acerca de la interacción del espacio-tiempo y otros sistemas materiales. Las ecuaciones de campo de Einstein tienen la forma:

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = k T_{ab}$$

R_{ab} es el tensor de Ricci formado con derivadas segundas del tensor métrico g_{ab} , y R es el escalar de Ricci formado con la contracción del tensor anterior. T_{ab} es el 'tensor de energía-impulso' que describe las propiedades físicas de los sistemas materiales no gravitacionales. Las ecuaciones de Einstein son un sistema de 10 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de tipo hiperbólico no-lineales para el tensor métrico g_{ab} . Estas ecuaciones establecen una relación entre la curvatura del espacio-tiempo y las propiedades de la materia (densidad de energía y momento). La gravedad, pues, no es una fuerza ejercida entre los distintos cuerpos, sino la propiedad que tienen los cuerpos materiales de curvar el espacio-tiempo.

En Relatividad General la distribución de los conos de luz ya no es más uniforme, como sucedía en el espacio-tiempo de la Relatividad Especial. De acuerdo a como sea la curvatura del espacio-tiempo, las direcciones temporales de los conos pueden cambiar. Dado que las partículas masivas sólo pueden moverse dentro de su correspondiente cono de luz, sus trayectorias en el espacio-tiempo también se verán afectadas. En otras palabras, tanto las partículas masivas como también la luz, se moverán por una trayectoria dictada por la curvatura del espacio-tiempo.

EINSTEIN DEL RELACIONISMO AL SUBSTANTIVALISMO

La observación fundamental que llevó a Einstein a extender el Principio de Relatividad a movimientos no uniformes es que, localmente, los efectos de la aceleración son indistinguibles de los gravitatorios; como ya mencionamos antes, éste es el llamado Principio de Equivalencia; en otras palabras, este Principio se traduce en que localmente, en el entorno de todo evento, la métrica es aproximadamente minkowskiana, esto es la curvatura del espacio-tiempo se anula a pequeña escala y la Relatividad Especial sigue siendo válida.

El Principio de Equivalencia no garantiza por sí mismo que todo movimiento no uniforme sea relativo; dos condiciones adicionales deben satisfacerse. La primera de éstas es que debería ser posible atribuir el campo gravitacional substituido por la aceleración de un objeto (en base al Principio de Equivalencia) a una fuente material- cualquier cosa que este en las inmediaciones del objeto a las estrellas distantes. Esta condición fue inspirada por las lecturas de Einstein de los trabajos del físico y filósofo austríaco Ernst Mach.

La segunda condición es que todas las leyes de la física tengan la misma forma para todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento. En particular, esto debería cumplirse para las ecuaciones para el campo gravitacional, esto es, las ecuaciones que establecen que configuración del campo es producida por una dada distribución de fuentes. Esta forma de invarianza se denomina *covarianza general*.

La covarianza general, sin embargo, no garantiza que todos los campos gravitacionales puedan ser atribuidos a fuentes materiales; esto fue reconocido por Einstein en el otoño de 1916, en el curso de una intensa correspondencia con el astrónomo holandés Willem de Sitter. Einstein, pues, modificó sus ecuaciones de campo incluyendo un término adicional con la llamada *constante cosmológica*, manteniendo siempre la condición de covarianza general. Con esta modificación, Einstein esperaba que sus nuevas ecuaciones de campo no permitieran campos gravitacionales sin fuentes materiales, y que su teoría satisficiera el Principio de Mach. En

este mismo trabajo, Einstein aplica su nueva teoría a la cosmología, iniciando así la cosmología relativista moderna. El modelo cosmológico presentado, hoy conocido como universo de Einstein, consiste en un universo estático, con una densidad de masa constante y pequeña. Para evitar el completo colapso del universo estático, es necesario un campo gravitacional repulsivo que está representando por la constante cosmológica.

¿Cuál fue la opinión de de Sitter sobre el modelo cosmológico de Einstein? De Sitter escribe a Einstein (De Sitter a Einstein, marzo 15, 1917, [CPAE 8, Doc. 312]):

Mientras no quiera forzar su concepción a la realidad estamos de acuerdo. Como una cadena de pensamiento consistente, no tengo nada en contra de ésta y la admiro. No puedo darle mi aprobación final antes de poder tener la oportunidad de calcularlo.

Cinco días más tarde, de Sitter había hecho sus cálculos, y posteriormente comunicó sus resultados por carta a Einstein. El modelo cosmológico obtenido por de Sitter es una solución de las ecuaciones de campo de Einstein con constante cosmológica; en este modelo el universo es espacialmente plano y dinámico, a diferencia del universo estático de Einstein. Además, la solución encontrada por de Sitter es una solución de vacío, sin materia ordinaria, pero con curvatura no nula.

Al principio Einstein fue escéptico pero luego terminó admitiendo que su teoría no permitiría explicar el Principio de Mach. En 1920, Einstein ya reconocía que este principio pertenecía a una anticuada ontología de finales de siglo XIX. Vemos, entonces, que la posición filosófica de Einstein respecto a la naturaleza del espacio-tiempo fue cambiando con el curso de los años y sus investigaciones. Einstein estaba inspirado originalmente por las ideas relacionistas de Mach: el espacio-tiempo no es una entidad que puede existir independientemente de los objetos físicos, sino un sistema de relaciones entre las cosas. A principio de la década de 1920, luego del debate con de Sitter, Einstein había cambiado hacia una posición sustantivalista respecto al estatus ontológico del espacio-tiempo: el espacio-tiempo es un entidad dotada de propiedades físicas. Einstein sostuvo esta posición realista respecto al espacio-tiempo durante el resto de su vida.

Podríamos preguntarnos si la teoría de la Relatividad General ha dirimido la vieja disputa sobre si el movimiento es relativo o absoluto, y si, en la terminología de la relatividad, existe el espacio-tiempo absoluto.

Tanto en Relatividad Especial como en Relatividad General podemos referir el movimiento de un dado sistema de referencia respecto a otro; en este sentido podemos

pensar que el movimiento es relativo; por otro lado, en Relatividad General, es también posible distinguir en ciertos casos particulares, si un dado sistema de referencia se está moviendo respecto a una hiper-superficie espacial de 3 dimensiones. Por ejemplo, para ciertos modelos cosmológicos en donde hay presente un campo de radiación térmica homogénea e isotrópica, verbigracia la radiación de fondo cósmica de microondas (CMB, de sus siglas en inglés Cosmic Microwave Background), el espectro del CMB será distinto en un sistema de referencia acelerado respecto a un sistema de referencia que no lo está. Es posible, pues, en Relatividad General el movimiento respecto al espacio tridimensional, esto es, el movimiento absoluto.

¿Cuál es el estatus ontológico actual del espacio-tiempo? ¿Es el espacio-tiempo una entidad? ¿Existe realmente? Estas preguntas que parecen pertenecer al ámbito exclusivo de la filosofía, acaso puedan encontrar respuesta en uno de los más recientes descubrimientos de la astrofísica contemporánea: la detección de ondas gravitacionales.

ONDAS GRAVITACIONALES Y ESPACIO-TIEMPO

¿Qué son las ondas gravitacionales? Las ondas gravitacionales son perturbaciones del campo métrico del espacio-tiempo; éstas perturbaciones se propagan en forma de onda a la velocidad de la luz. Las ondas gravitacionales pueden producirse si se perturba violentamente un cuerpo de gran masa: el campo cercano a la gran masa se ajusta rápidamente a su nueva configuración; el campo lejano, sin embargo, ha de esperar a que la señal de que la masa se ha movido se propague hasta él a una velocidad finita c , la velocidad de la luz. Como la gravitación es el campo métrico que determina la separación de eventos o sucesos en el espacio-tiempo, la onda es una onda de espacio y tiempo que contrae y dilata longitudes e intervalos a su paso.

Einstein fue quien, a pocos meses de publicar las ecuaciones básicas de la Relatividad General, mostró en forma teórica la existencia de las ondas gravitacionales. Poco después, en 1918, Einstein pudo calcular la cantidad de energía que pierde un sistema gravitacional por la emisión de ondas. Cuando una masa se acelera, perturba el espacio-tiempo, y esa perturbación se propaga, llevándose energía. Para que la cantidad de energía sea significativa, una masa enorme (del orden de la del Sol o mayor) debe acelerarse en un tiempo muy corto. Eso sólo es posible si el objeto es muy compacto. La emisión de ondas gravitacionales pareció, en principio, indetectable.

El 14 de septiembre de 2015 a las 5:51 am hora del este (09:51 GMT) los detectores de los dos observatorios de ondas gravitacionales Advanced LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) detectaron por primera en la historia ondas gravitacionales. Las ondas detectadas corresponden a la fusión de un siste-

ma binario de agujeros negros; cada uno de ellos tenía aproximadamente 36 y 29 veces la masa del Sol, respectivamente. Tras fundirse en un único agujero negro, el objeto resultante tuvo 62 masas solares y no $36+29 = 65$. Las tres masas solares de diferencia escaparon en forma de ondas gravitacionales, transportando la energía equivalente por todo el universo. Sólo una cantidad extremadamente pequeña de esa energía llegó a la Tierra. Las señales detectadas se compararon con las predicciones de la Relatividad General. La coincidencia fue asombrosa.

El descubrimiento de Advanced LIGO tiene profundas implicaciones científicas; entre éstas podemos mencionar: la contrastación, por primera vez, de la Teoría de la Relatividad General en régimen de campo fuerte; la prueba de la existencia de las ondas gravitacionales; la prueba de la existencia de sistemas binarios de agujeros negros u objetos compactos extremadamente similares a ellos. Además, la detección de ondas gravitacionales nos ha permitido comprender un poco más sobre la naturaleza del espacio-tiempo, tal como mostraron recientemente los científicos y filósofos argentinos Mario Bunge y Gustavo Romero.

Bunge presentó un argumento en el que muestra que la detección de ondas gravitacionales implica la materialidad del espacio-tiempo. El argumento de Bunge puede resumirse de la siguiente forma (Romero 2017:2):

P1. Las ondas gravitacionales activan detectores.

P2. Los detectores sólo reaccionan a estímulos materiales específicos.

P3. LIGO ha detectado ondas gravitacionales.

Luego, las ondas gravitacionales son materiales.

P'1. Las ondas gravitacionales son perturbaciones en el espacio-tiempo.

P'2. Las ondas gravitacionales son materiales.

Luego, el espacio-tiempo es material.

En su artículo, sin embargo, Bunge identifica erróneamente al espacio-tiempo con el campo gravitacional, tal como muestra Gustavo E. Romero en el trabajo recientemente publicado por Foundations of Science que se titula: "Mario Bunge on gravitational waves and the reality of spacetime". De acuerdo a Romero, el espacio-tiempo es una entidad material que puede existir en ausencia de materia. Todas las entidades materiales pueden interactuar con el espacio-tiempo a través de la curvatura y siendo el espacio-tiempo material puede, además, interactuar con si mismo. El descubrimiento de las ondas gravitacionales no sólo nos muestra que el espacio-tiempo existe, sino que éste puede existir en ausencia de materia (Romero 2017:5).

CONCLUSIONES

Hasta hace poco más de un siglo se consideraba que espacio y tiempo eran dos entidades independientes; algunos filósofos y científicos incluso pensaban que espacio y tiempo no tenían una existencia propia sino que emergían como resultado de las relaciones entre las cosas. La Teoría de la Relatividad Especial y posteriormente, la Teoría de la Relatividad General, ambas formuladas a principios de siglo XX por el genial físico alemán Albert Einstein, nos revelaron que espacio y tiempo son parte de una misma entidad, el espacio-tiempo. Todos los eventos que ocurren, ocurren y ocurrirán forman el espacio-tiempo; el espacio-tiempo es una entidad de cuatro dimensiones, siendo el tiempo una de ellas. Las coordenadas de un dado evento, tres espaciales y una temporal, dependen del estado de movimiento del sistema de referencia que las mide. Luego, un mismo evento, para dos observadores diferentes pueden ocurrir en momentos distintos. La Teoría de la Relatividad Especial, luego, implicó una pérdida de la simultaneidad absoluta.

Por otro lado, Einstein descubrió que la forma de medir distancias en el espacio-tiempo cambia de acuerdo al contenido de energía y momento en el mismo. En la Teoría de la Relatividad General el concepto de campo gravitacional desaparece, y es remplazado por la curvatura, que es una propiedad del espacio-tiempo. Las ecuaciones de campo de Einstein establecen, pues, una relación entre algunas propiedades del espacio-tiempo (su curvatura) y las propiedades de la materia (densidad de energía y momento). Si la curvatura es distinta de cero, la trayectoria de las partículas se apartará de la línea recta.

La Teoría de la Relatividad General predice que las perturbaciones en la curvatura del espacio-tiempo se propagan por el mismo en forma de onda. Cien años transcurrieron hasta que ondas gravitacionales fueron por primera vez detectadas. Mil doscientos millones de años estuvieron viajando a través del espacio intergaláctico hasta activar los detectores de Advanced LIGO. Ese mismo período de tiempo transcurrió entre la aparición de los primeros organismos multicelulares en la Tierra hasta la evolución de formas de vida más compleja, culminando con nuestra especie.

Aún quedan importantes aspectos a explorar sobre el espacio-tiempo: la naturaleza de su composición y estructura interna, la descripción del mismo en una teoría cuántica de la gravitación, la emergencia del espacio-tiempo macroscópico a partir de componentes más elementales a nivel cuántico. Algunos de estos interrogantes posiblemente tengan respuesta cuando se logre formular una teoría cuántica de la gravitación. Es imposible predecir el alcance que tenga esta nueva teoría; me atrevo a decir, sin embargo, que cuando esto ocurra una nueva visión sobre el espacio y el tiempo emergerá, y vislumbraremos un nuevo rostro de los posiblemente infinitos del universo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, B. P. et al [LIGO COLLABORATION] (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102
- Berkeley, G. (1721). Criticism of Newton. En M. Capek (ed.), *The Concepts of Space and Time. Their structure and their development.* (ed.) (pp. 52-65). Dordrecht: D. Reidel.
- Bunge, M. (2017). Gravitational waves and spacetime. *Foundations of Science.* 10.1007/s10699-017-9526-y
- de Sitter, W. (1917). Over de relativiteit der traagheid: Beschouwingen naar aanleiding van Einsteins laatste hypothese. Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam. Wis- en Natuurkundige Afdeling. Verslagen van de Gewone Vergaderingen, 25, 1268-76.
- Einstein, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 322(10), 891-921
- Einstein, A. (1916). Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 49, 769-822
- Einstein, A. (1916), *Nature.* 17, 101.
- Einstein, A. (1917). Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Physikalisch-Mathematische Klasse. *Sitzungsberichte:* 142-52.
- Janssen, M. (2014). "No Success Like Failure...": Einstein's Quest for General Relativity, 1907-1920. En M Janssen, C. Lehner (eds.), *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 167.227). New York: Cambridge University Press.
- Hofer, Carl 1994. "Einstein's Struggle for a Machian Gravitational Theory". *Studies in History and Philosophy of Science* 25: 287-335.
- Ishiwara, J. *Einstein Koen-Roku.* Tokyo-Tosho, Tokyo, 1977. I was sitting in a chair in the patent office at Bern when all of a sudden a thought occurred to me: 'If a person falls freely he will not feel his own weight.' I was startled. This simple thought made a deep impression on me. It impelled me toward a theory of gravitation. Traducción mía.
- Mach, E. (1883). *The Science of Mechanics.* En M. Capek (ed.), *The Concepts of Space and Time. Their structure and their development* (pp. 309-315). Dordrecht: D. Reidel.
- Minkowski, H. (1907). Space and Time. En A. Sommerfeld (ed.), *The Principle of Relativity* pp. 75-80. New York: Dover. The views of space and time which I wish to lay before you have sprung from the soil of experimental physics, and therein lies their strength. They are radical. Henceforth space by itself, and time by itself, are doomed to fade away into mere shadows, and only a kind of union of the two will preserve and independent reality. Traducción mía.
- Pais, A. (1997). 'Subtle is the Lord...'. *The Science and the Life of Albert Einstein.* Oxford, New York: Oxford University Press.
- Renn, J. (2007). *The Genesis of General Relativity* (4 vols.). New York, Berlin: Springer.
- Romero, G. E. (2017). Mario Bunge on gravitational waves and the reality of spacetime. *Foundations of Science.* En prensa.
- The Collected Papers of Albert Einstein. Vol 8, *The Berlin Years: Correspondence, 1914- 1918* (Parts A and B), ed. Robert Schulmann, A. J. Kox, Michel Jensen, and József Illy. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998. As long as you do not want to force your conception on reality, we are in agreement. As a consistent train of thought, I have nothing against it and I admire it. I cannot give you my final approval before I have had the chance to calculate with it. Traducción mía.

SOBRE EL AUTOR

Daniela Pérez

Doctora en Astronomía por la Universidad Nacional de La Plata. Ha sido investigadora visitante en el Observatoire de Paris en el grupo de Relatividad y Objetos Compactos (ROC) dirigido por Brandon Carter. Actualmente es becaria postdoctoral de CONICET con lugar de trabajo en el Instituto Argentino de Radioastronomía, y miembro del Grupo de Astrofísica Relativista y Radioastronomía (GARRA). Sus temas de investigación son astrofísica de agujeros negros, gravitación, cosmología, y filosofía de la ciencia.
Email: daniela.perez2812@gmail.com

Artículo

RECIBIDO 27/04/2017

APROBADO 02/05/2017