

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XIV JORNADAS

VOLUMEN 10 (2004), Nº10

Pío García

Patricia Morey

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



## El carácter dependiente del tiempo y las condiciones de su existencia en la Teoría de la Relatividad General

Marcelo Leonardo Levinas\*

En la Mecánica Clásica (MC), la posición de un cuerpo y el tiempo transcurrido en dos sistemas de referencia inerciales se vinculan de acuerdo con las transformaciones de Galileo: la distancia entre dos puntos y los intervalos de tiempo entre dos instantes diferentes son supuestos invariantes en el sentido de que su valor es idéntico en cualquier de estos sistemas. En 1908, Minkowski afirmó que, en adelante, el espacio solo o el tiempo solo estaban condenados a desvanecerse en meras sombras y que únicamente una especie de unión entre ellos salvaría su existencia. Así, en la Relatividad Especial (RE), se trabaja en un espacio-tiempo caracterizado por cuatro números (tres para el espacio y uno para el tiempo) y el término empleado para denotar cualquiera de sus puntos es el de *evento*. Esta diferencia es fundamental. La nueva magnitud invariante es ahora el elemento diferencial de *intervalo*  $ds$  entre dos eventos que reemplaza a la distancia y al intervalo de tiempo combinando a ambos, y se lo define como  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$  ( $c$ = velocidad de la luz). Esta expresión, constituye un nuevo teorema de Pitágoras, donde el cuadrado del "cateto" referido a la coordenada tiempo, en lugar de sumarse, se resta y una consecuencia es que, -a diferencia de una geometría euclídeana-  $s$  asume su máximo valor entre dos puntos, cuando se lo calcula a lo largo de la línea recta que los une. A partir de la invariancia de  $ds$  se obtienen las leyes de transformación de las longitudes y los intervalos de tiempo (transformaciones de Lorentz), de las que se obtiene, en particular, la dilatación del tiempo: un reloj que se compare con diferentes relojes de otro sistema en movimiento respecto de él, siempre atrasa. En particular, los intervalos de tiempo para un fotón resultan nulos, lo que implica que su tiempo propio es también nulo; esto es: para la luz no existen intervalos de tiempo y la dilatación del tiempo es total.

Una diferencia mucho más drástica del carácter de las nociones de espacio y tiempo, la encontramos en la Relatividad General (RG). En ella, ambas magnitudes dejan de constituir o bien el escenario en el que se desarrollan los fenómenos físicos o coordenadas de un sistema de referencia que sólo depende de su velocidad relativa constante respecto de otros sistemas inerciales, para pasar a conformar una variedad diferenciable que o bien debe ser determinada a partir de la distribución de materia y/o radiación, o imponiendo condiciones *a priori*, como por ejemplo la homogeneidad e isotropía, productos, también, en última instancia, de distribuciones de energía y materia. En otras palabras, a las magnitudes que caracterizan a una variedad espacio-temporal, se las debe considerar dependientes. ¿En qué consiste una *variedad diferenciable*? Se trata de un concepto más primitivo que el de geometría. Una variedad diferenciable de  $n$  dimensiones es un conjunto continuo de puntos diferenciable, de forma tal que, en cualquier re-

\* CONICET, Instituto de Astronomía y Física del Espacio. Universidad de Buenos Aires.

*Epistemología e Historia de la Ciencia*, Volumen 10 (2004), N° 10

gión suficientemente pequeña, ellos pueden ponerse en correspondencia, uno a uno, con un conjunto de puntos de  $R^n$  (Misner et al., 1973, 241). En RE, el término "evento" -que según vimos sustituía a la de "punto espacial"- poseía, sin embargo, una connotación muy diferente referida a "algo que acontece". Lo equivalente al desplazamiento o a la trayectoria de un cuerpo en el espacio tridimensional, en RE es interpretado como una *línea de mundo* o *línea de universo*. Las líneas de universo que componen los diferentes eventos que provocan o si se quiere padecen distintas partículas, pueden hallarse vinculadas e incluso compartir algunos de sus puntos, como cuando dos partículas colisionan en un evento que les es común. Esto permite caracterizar a los puntos de una variedad espacio-tiempo a partir de lo que acontece en el universo: por ejemplo si existe o no materia o radiación en el punto, su cuantía y su forma de desplazarse o transformarse en energía. Por eso, al espacio-tiempo se lo puede entender como definido -en el sentido fuerte- por eventos, y esto previo a dotarlo de una geometría o, lo que es equivalente, de una métrica: una medida del intervalo entre diferentes puntos. ¿Cómo localizar en una variedad un evento? Lo que uno puede hacer es indicar a qué líneas de universo pertenece el evento; luego uno puede seguir una de esas líneas poniéndole un nombre a los diferentes eventos que ellas recorren. No se requieren coordenadas: un evento, por ejemplo, puede consistir en hallarse en una esquina de las calles San Juan y Boedo. Se dijo "San Juan y Boedo" sencillamente para dar una imagen visual: en Japón, por ejemplo, la mayoría de las calles no poseen nombres y la mayoría de las casas no tienen número, lo que prueba que, a los efectos de la de ubicarse, pueden seguirse "trayectorias" en las que cada uno de sus puntos pueda ser identificado (Misner et al., 1973, 8), o sea siguiendo simplemente una secuencia continua de "actividades" en una línea de universo que alcance determinado evento. Si uno desea ordenar los eventos, ya no de acuerdo con su "posición" en las líneas de universo sino de una manera coordinada, requiere del uso de coordenadas, o sea de cuaternas ordenadas de acuerdo con los números reales.

Ahora bien, en RE, la métrica es algo dado y es la de Minkowski; sus cuatro valores son provistos por el tensor  $\eta_{\alpha\beta}$  cuyos valores diagonales en coordenadas cartesianas valen (1, 1, 1, -1) y son los únicos no nulos. ¿Cómo se dota de una métrica a un conjunto de eventos en RG de forma tal de determinar su "distancias" espacio-temporales? De acuerdo con lo dicho, a partir de la distribución de la materia y la energía. Ellas definen el valor del intervalo  $ds$  entre los infinitos pares de eventos infinitamente cercanos.

La RG consiste, en parte, en una generalización de la RE a sistemas de referencias no inerciales -ya que se trata de un espacio-tiempo "sometido" a fuerzas- y la única condición de validez del pasaje de un sistema de referencia generalizado a otro, lo ofrece ciertas condiciones sobre las transformaciones de coordenadas. El verdadero punto de contacto que permite covariantizar (esto es mantener la forma de las ecuaciones de la RE y generalizarlas a sistemas no inerciales) es el Principio de Equivalencia (PE). Él es válido para espacios reducidos comparados con la intensidad del campo gravitatorio y expresa la equivalencia (a) entre un sistema de referencia solidario a un campo gravitatorio y un sistema acelerado con una aceleración inversa a la de la gravedad en el punto; o la equivalencia (b) entre un siste-

ma de referencia libremente gravitante (sometido a un campo gravitatorio y en caída libre) y un sistema inercial (libre de fuerzas y aislado en el universo). La base de este principio se encuentra en la aparente equivalencia —experimentalmente comprobada hasta un alto grado de precisión— entre la masa gravitatoria y la inercial de un mismo cuerpo. La versión (a) del principio permite entender a la gravedad como una deformación de la geometría plana; la versión (b), tomar localmente un sistema de referencia inercial, esto es, dotado de la métrica de Minkowski.

Es importante hacer notar que en la física newtoniana se halla implícito el PE en lo que hace a la equivalencia de un sistema no inercial y un sistema en presencia de un campo gravitatorio; incluso predice la deflexión de la luz aunque con valores inferiores a los de la RG. La verdadera innovación de la RG, consiste en suponer que el mundo puede no ser seudoeuclideo o plano y que el propio sistema de referencia puede suplir efectivamente a un espacio que, en ausencia de gravedad, sería seudoeuclideo. En MC, en cambio, el espacio es siempre euclideo. En RG es la presencia de materia (radiación, campos de materia, campos electromagnéticos, etc.) lo que le da forma al espacio-tiempo; define el carácter de los intervalos y curva el espacio a partir de la existencia del campo gravitatorio que provoca: no es necesario que haya materia en el punto para que el espacio sea curvo, ya que lo que importa es el valor del campo. Se trata de una suerte de campo espacio-temporal, que puede ser entendido en íntima relación con el campo creado por la distribución de energía-impulso, fuente de la ecuación de Einstein y de la que se obtiene la geometría. Al espacio-tiempo se lo podría considerar una entidad física en el sentido de que sólo la posee en la medida en que permite "materializar" las distancias entre objetos o los intervalos de tiempo entre sucesos. No constituye nada en sí mismo, sino tan sólo la estructura de relaciones de "distancias" espacio-temporales entre eventos. Las soluciones de la ecuación de Einstein determinan la geometría del espacio-tiempo y en consecuencia, cómo se desenvuelve la materia representada por un tensor simétrico de 16 componentes denominado de energía-impulso; cómo su movimiento modifica la geometría; cómo la geometría afecta a la dinámica de la materia, radiación, etc. Digamos que la MC no puede considerarse un límite de la RG, a pesar de que, por un lado, una de las 10 ecuaciones de Einstein en principio independientes, en el límite de campo débil conduce a la ley de atracción gravitatoria, y a su vez, a suficiente distancia de la localización de las fuentes, la estructura del espacio se vuelve plana, esto es, euclidea. Aclaremos que en la noción de *partícula de prueba* —que consiste en un cuerpo de masa y dimensiones despreciables respecto de las fuentes y a las modificaciones del campo gravitatorio al que está sometido— encontramos cierta analogía en lo que hace a la caracterización del movimiento de los cuerpos en un espacio-tiempo entendido como algo que conforma un escenario a priori e independiente del fenómeno movimiento de la masa de la partícula de prueba en cuestión. En tal sentido, se puede considerar el movimiento como llevándose a cabo en un espacio-tiempo dado, claro está, por las fuentes del campo gravitatorio que son las que definen la geometría al definir la métrica. Digamos que en este punto sería muy ilustrativo discutir la relación del PE por un lado con la concepción newtoniana de Newton y por el otro con el principio de Mach (Weinberg, 1972, 86). La existencia de espacios-tiempo planos (como por ejemplo muy lejos

de las fuentes, o en rigor, en el infinito) debe entenderse como condición de contorno. En las cercanías de alguna masa o forma de energía, la geometría, más que deformarse respecto del espacio-tiempo plano, se estructura en función de esas masas y cobra sentido en relación con las líneas de universo entre eventos que en ellas es posible establecer. El espacio-tiempo plano sólo cobra entidad en función de su distancia considerable a las fuentes. Dado que para establecer un sistema de coordenadas, se requiere poseer alguna referencia, y esto sólo es posible en virtud de la localización de algún elemento que represente a la energía-impulso, el espacio de Minkowski no debe ser entendido como independiente de aquélla sino como la estructura que debe ser concebida en lejos, en relación con las fuentes de los campos. No discutiremos aquí –aunque también sería ilustrativo del problema– el caso particular del espacio-tiempo de Rindler o el universo de De Sitter (con constante cosmológica no nula) donde el espacio vacío posee curvatura no nula y la materia representada por las galaxias actúa, de hecho, como partículas de prueba.

Detengámonos brevemente en algunas consecuencias del papel que en la RG representa en particular la coordenada correspondiente al tiempo, que podrían servir para comprender su carácter derivado y relacional, a pesar de que no compararemos las nociones de espacio y tiempo con las correspondientes a Leibniz –debido a que deberíamos discutir las diferentes concepciones de coexistencia, simultaneidad, orden y sucesión empleadas por éste (Leibniz, Tercera carta a Clarke, 1956) y a pesar de que el punto de vista aquí planteado se encuentra mucho más cercana a esta posición, que a la de Newton. Sin duda la concepción de Newton que lleva a entender que "cada partícula de espacio es eterna, cada indivisible momento de duración está en todas partes" (Newton, 1993, III, 42), es incompatible con la RG.

1) En la teoría de la RE los intervalos de tiempo resultan diferentes considerados a partir de dos relojes que se mueven uno respecto del otro. En la RG el tiempo propio transcurre de manera diferente *incluso* en puntos diferentes del espacio ligados al mismo sistema de referencia. La simultaneidad se define enviando señales luminosas entre puntos. Sin embargo, la sincronización de relojes a lo largo de un contorno cerrado resulta por lo general imposible, dado que partiendo de un punto y regresando a él se obtendría una diferencia en la coordenada temporal distinta de cero:  $\Delta\tau \neq 0$ . Además, el intervalo de tiempo propio entre dos eventos que ocurren en un mismo punto del espacio y el intervalo de tiempo entre dos eventos que ocurren en *otro* punto del espacio y que son respectivamente *simultáneos*, resultan, por lo general, diferentes entre sí. Esto muestra el carácter de la dependencia de la medida de la coordenada temporal en virtud del valor del campo gravitatorio en cada evento.

2) En RG, la distancia espacial entre dos puntos, por lo general, no puede siquiera definirse. Determinar el elemento  $\Delta l$  de distancia espacial sería análogo a lo que en la RE se define como el intervalo entre dos eventos que ocurren en el mismo instante, o sea cuando la variación de la coordenada temporal es nula:  $\Delta t = 0$ . Ahora bien, en presencia de un campo gravitatorio ¿qué significaría: "dos eventos que ocurren en el mismo instante", cuando es imposible determinar  $\Delta l$  haciendo

simplemente  $\Delta t = 0$ ? Es que la métrica de la parte espacial, que expresaría las distancias espaciales entre eventos, depende por lo general de la coordenada  $x_0$ , o sea es función de ella, de modo tal que la métrica cambia con el tiempo (es función de la coordenada temporal). Carece de sentido calcular la distancia  $l$  entre dos puntos, ya que su cálculo dependería de la línea de universo (que implicaría un "viaje" no sólo por la parte espacial, sino también temporal) elegida como "camino" entre esos dos puntos del espacio-tiempo.

3) Un campo gravitatorio es constante si es posible elegir un sistema de referencia en el que todas las componentes del tensor métrico son independientes de la coordenada temporal  $x_0$ ; en tal caso, a esta coordenada se la denomina tiempo universal. En rigor, un campo gravitatorio constante sólo puede ser producido por una única partícula, ya que en un sistema compuesto por más de un cuerpo la atracción gravitatoria mutua producen movimientos que transforman el campo. De haber un único cuerpo, no es necesario que él se encuentre en reposo: el cuerpo puede presentar una simetría axial y girar uniformemente en torno del eje de simetría. Sin embargo, en este caso, los dos sentidos del tiempo no serán equivalentes ya que si se cambiase el sentido del tiempo, cambiaría el signo de la velocidad angular e inversamente: el sentido de la coordenada temporal viene dado por el sentido del movimiento de los cuerpos, lo que no sucede en MC donde a partir de la definición de velocidad  $v = dx/dt$ , el tiempo siempre avanza.

4) La propia "velocidad" del transcurrir del tiempo es variable debido a las posibles variaciones del campo gravitatorio en cada punto -y en realidad debe entenderse como la variación de la coordenada temporal producto de las variaciones de la métrica-, lo que hace que lo que se denomina tiempo o velocidad de transcurrir del tiempo en cada punto, posea su propia "historia".

¿Cómo vincular, descriptivamente, la dependencia -digamos formal- de la coordenada tiempo con la distribución y movimiento de la materia? Si las estrellas se ubican a diferentes distancias espaciales respecto de nuestra posición, tal como lo ha mostrado la determinación de su paralaje, cuando se observa el cielo se observan acontecimientos que sucedieron a diferentes instantes, vinculados con el tiempo que empleó la luz en recorrer la distancia que nos separa desde que ella fue emitida. Algunos eventos acontecieron algunos años atrás, otros hace miles de años o hace millones de años. Observar el cielo cualquier noche despejada consiste, de hecho, en un conjunto de arqueologías simultáneas; en un mismo lugar e instante -en un mismo evento- se observan acontecimientos que sucedieron en lugares e instantes diferentes, medidos de acuerdo con los valores que hoy asume nuestra coordenada temporal de referencia. Se observan objetos que se suponen a miles de millones de años luz de distancia a punto tal que su luz pudo haber partido de ellos ¡antes mismo de que la Tierra siquiera existiera! Esa luz es real: resulta simultánea con nuestra acción de detectarla, y sin embargo, muestra cosas o representa eventos que, de hecho, acontecieron hace millones de años. No obstante, podemos "ubicar simultáneamente" ambos eventos -partida de la luz, llegada de la luz- en la misma variedad, empleando un único sistema de referen-

cia. A los efectos de estudiar el universo, podemos preguntarnos si, de hecho, no estaremos representado su totalidad y su historia al urisono.

Tomemos una dimensión espacial y el tiempo. Uno puede representar en un sistema de referencia en un plano los infinitos puntos del espacio-tiempo: el universo entendido como "todos sus eventos", la estructura espacial en simultaneidad con su historia. En algún punto se sitúa el evento "abandono de la luz de la estrella"; en otro punto y en "simultáneo" y en un mismo gráfico, el arribo de la luz a nuestros ojos. ¿No bastaría con indicar en cada punto cómo se ha distribuido la materia y la radiación, o lo que es equivalente, el valor de los intervalos infinitesimales dados por la métrica que de ello se deriva? De acuerdo con la RG, indicando el valor de la curvatura en cada punto espacial y en cada instante, obtenida a partir de la dinámica de la materia, tendríamos un panorama de todo el universo y de toda su historia "observando simultáneamente" todas las trayectorias espacio-temporales -los intervalos que representen el movimiento, la historia, etc. de todas las partículas que compusieron, componen y compondrán el universo-. Y en esta representación del espacio-tiempo, en cada caso, cada cuerpo sería otro y a la vez el mismo cuerpo.

En ciertos textos budistas se dice que todo hombre es una ilusión vertiginosamente obrada por una serie de hombres momentáneos y solos (Borges, 1974, 770). O sea que cada hombre que se supone que persiste en el tiempo, no sería más que un elemento de una serie enorme, infinita, de hombres-punto, imaginándose sucesivamente. A los efectos de la representación, cada uno permanecería tercamente en un punto-evento; se trataría de infinitos presentes; un infinito número de plenitudes humanas en cada instante, pero diferentes, levemente diferentes. Sin embargo, de instante a instante se continuaría el hombre mismo, lo que de él perdura, ya que la materia salta de evento a evento. Nada es brusco, existe un vínculo coordinado, coordinado; existe una permanencia de la materia. La continuidad de su movimiento y su cambio decide el tipo de continuidad de la geometría espacio-temporal. Cada hombre, que se supone el mismo, debido a que los elementos fundamentales de las propiedades que lo definen persisten en el tiempo, no sería sino un elemento de una serie enorme, infinita, de hombres-evento, imaginándose sucesivamente. Si hablamos del tiempo: se trata, entonces, de infinitos presentes. No tiene sentido hablar de una corriente del tiempo, porque eso implicaría su desaparición y aparición permanentemente, y los físicos representan los fenómenos como el fenómeno "ese hombre" en un mapa que es como un papel en el que todos los puntos *permanecen*. ¿Qué sentido tendría preguntar "cuál es la velocidad del tiempo"? Quizás por todas estas razones es que John Archibald Wheeler ha dicho que el tiempo es el modo que tiene la naturaleza de evitar que todo suceda a la vez. Recordemos: la naturaleza son los campos.

### *Bibliografía*

- Borges J. L. (1974), "Nueva refutación del tiempo", *Otras Inquisiciones*, Obras Completas 1923-1972, Buenos Aires, Emecé.
- Landau L. y Lifshitz E. (1973), *Teoría clásica de campos*, Barcelona, Reverté.
- Leibniz G., *Leibniz-Clarke Correspondence* (1956), Manchester, H. G. Alexander.
- Misner C., Thorne K. and Wheeler J. (1973), *Gravitation*, San Francisco, Freeman & Co.
- Newton I. (1993), *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Barcelona, Altaya.
- Weinberg S. (1972), *Gravitation and cosmology*, New York, J Wiley and Sons Inc.