



Tiempo e interpretación en la teoría de la relatividad*

Martín Simesen de Bielke**
IMIT-CONICET/HUSSERL-ARCHIV/ICALA
Buenos Aires-Argentina

Para citar este artículo: Simesen de Bielke, Martín. «Tiempo e interpretación en la teoría de la relatividad». *Franciscanum* 170, Vol. LX (2018): 47-79.

Resumen

En la teoría de la relatividad se presenta el problema de la realidad o irrealidad de los fenómenos relativistas relacionados con el espacio-tiempo (dilatación de la duración, contracción de la longitud, quiebre de la simultaneidad provocada por el movimiento de escalas y relojes). En la primera parte de este artículo se esboza el marco de la discusión en relación con este punto de controversia. Luego de que el marco ha quedado establecido, se toman en consideración algunos experimentos mentales de Einstein para demostrar por qué

El presente escrito surge en el marco de una investigación postdoctoral sobre el concepto de espacio-tiempo en la teoría de la relatividad y en los escritos posteriores al «*Kehre*» de Martin Heidegger. La investigación se ha llevado a cabo en distintos centros de estudio, fundamentalmente en el Instituto de modelado e innovación tecnológica (IMIT), unidad ejecutora del Consejo nacional de investigaciones científicas y técnicas (CONICET, Argentina) –organismo que financia la investigación de postdoctorado (2016-2018)– y en el Husserl-Archiv de la Universidad Albert-Ludwig (Friburgo de Brisgovia) (abril-octubre de 2017). La estadia en el Husserl-Archiv se financia con el apoyo económico de *Stipendienwerk Lateinamerika Deutschland/ICALA* (Alemania).

** Doctor en filosofía, becario postdoctoral de CONICET (Argentina) y de ICALA (Alemania). Lugares de trabajo: Instituto de modelado e innovación tecnológica, dependiente de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE, Corrientes, Argentina); Husserl-Archiv (Universidad de Friburgo, Alemania). Contacto: martindebielke@gmail.com.

el tiempo relativista no puede ser caracterizado ni como algo real ni como mera apariencia. A lo largo del análisis crítico, la función de la expresión «como si» juega un rol importante en la comprensión de por qué el tiempo es interpretación, antes que una «cosa» real o una «ilusión».

Palabras Clave

Tiempo, relatividad, Einstein, realidad, apariencia.

Time and interpretation within the theory of relativity

Abstract

Within the theory of relativity lies the problem of reality or unreality of relativistic phenomena related to space-time (time dilation, length contraction, break of simultaneity caused by the movement of scales and watches). The first part of this paper will outline the framework related to this controversial issue. After the framework is established some of Einstein's mental experiments are taken into consideration to demonstrate why relativistic time cannot be characterized either as real, or as mere appearance. Throughout this critical analysis the function of the expression «as if» plays an important role in understanding why time can be seen as an interpretation rather than a real «thing» or an «illusion».

Keywords

Time, relativity, Einstein, reality, appearance.

Introducción

Einstein es considerado un físico realista¹. Max Planck afirma que «real es lo que se puede medir»², y los llamados efectos relativistas de contracción de longitud que experimentan los cuerpos en movimiento, así como la dilatación del tiempo de vida de, por ejemplo, partículas que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, se pueden medir y predecir perfectamente mediante las ecuaciones de la relatividad especial. Estos efectos *realmente* suceden, hoy nadie lo pone en duda. John A. Weehler (uno de los últimos colaboradores de Einstein) planteaba que el realismo del tiempo se deja resumir en la frase «el tiempo es el modo como la naturaleza evita que todo suceda a la vez»³. Pero Weehler –gran conocedor y divulgador de la teoría de la relatividad– rechazaba el realismo del tiempo. ¿Acaso también Einstein? Por empezar, ¿qué significa «realidad» y cuál es su relación con lo «relativo»?

El concepto de «realidad» está fuertemente unido al de «ab-soluto», en el sentido etimológico del término: «completamente suelto», independiente, no relativo a nada. Por «real» se ha entendido tradicionalmente la cosa en sí, la Idea (ἰδέα, εἶδος), el sistema de referencia privilegiado por naturaleza, la perspectiva absoluta, la verdad en el sentido tradicional de adecuación de las descripciones y explicaciones a los hechos, lo objetivo, que existe en sí mismo y es como es independientemente del sujeto que conoce (el observador que en cada caso mide), independiente del tiempo y del espacio. El prisionero que sale de la caverna y ve la luz del día se libera de

1 Un artículo interesante sobre el realismo del espacio (y del tiempo, como se infiere del planteo) en Einstein, en: Germán Guerrero Pino, «Einstein y la realidad del espacio: Realismo y convencionalismo», *Praxis filosófica* 22 (2006), Consultada en agosto 24, 2017, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-46882006000100004.

2 Citado por Martin Heidegger, *Vorträge und Aufsätze (Ga 7). Wissenschaft und Besinnung* (Frankfurt a. M.: Klostermann, 2000), 52.

3 Cf. John Weehler, «Information, physics, quantum: The search for links», 315, consultada en enero 16, 2017, <http://cqj.inf.usi.ch/qic/wheeler.pdf>. Para una buena introducción de Weehler a la teoría de la relatividad: Edwin Taylor & John Wheeler, *Spacetime physics* (San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1966).

las opiniones y contempla el mundo verdadero, cuenta a partir de entonces con un parámetro de lo real, lo visto, el mundo iluminado por la Idea del Bien, la medida del «ojo solar» que juzga verazmente, la perspectiva que se pensaba (antes de la relatividad) podría tener un hipotético observador situado en el éter luminífero. Dios representa el ideal de observador objetivo, el ojo omnisciente, poseedor de la verdad inmutable, el garante de la realidad matemática solo accesible al ojo (también inmutable) del alma; es la mirada omnipresente que trasciende todo «sistema de referencia» humano, o sea, las percepciones y concepciones finitas del mundo, la historia en devenir permanente, las tablas de valores. Realidad significa verdad, sustrato. Realidad es unidad e identidad. Si real es absoluto, la afirmación «el tiempo es relativo» lo dice todo acerca del realismo del tiempo en relatividad.

Por otra parte, Einstein afirmó en una oportunidad que el tiempo y el espacio «son creaciones libres de la inteligencia humana, herramientas del pensamiento que deben servir para relacionar vivencias y comprenderlas así mejor»⁴. Además, es muy conocida la anécdota del funeral de Besso, donde dice que la sucesión de pasado, presente y futuro es solo una «ilusión persistente» (*hartnäckige Illusion*)⁵. Así mismo, Cassirer señala como un hecho relevante para la teoría del conocimiento el que Einstein viera el mayor mérito de la relatividad en haber librado al tiempo y al espacio del «último resto de objetividad física», según palabras del propio Einstein⁶, lo cual es otro modo de expresar la irreductibilidad de las magnitudes relativas a la dicotomía «real-irreal».

En vez de distinguir entre «real» y «no real» hay que distinguir más rigurosamente las magnitudes que corresponden al sistema físico como

4 Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* (Madrid: Alianza, 1998), 75. Cf. John Weehler, «Information, physics, quantum: The search for links», 315.

5 Cf. Der Spiegel online, «Eine hartnäckige Illusion. Das Zeitbild der modernen Physik», consultada en agosto 25, 2017, <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13494900.html>.

6 Ernst Cassirer, *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie* (Hamburg: Felix Meiner Verlag, 2001), 6.

tal (independientemente de la elección del sistema de coordenadas) de las magnitudes que dependen del sistema de coordenadas⁷.

La relatividad del tiempo se entiende a partir de la relatividad de reposo y movimiento de relojes. El sistema de referencia temporal de un observador es un reloj en reposo. Podemos tomar como ejemplo dos relojes A y B. Medimos el intervalo entre el tic-tac del reloj B con el reloj A: mide un segundo. Luego medimos el tic-tac del reloj A con el reloj B: mide un segundo. Esta sincronía –como un juego especular de mediciones mutuas– solo se mantiene en tanto los relojes permanecen en reposo relativo; pero si el reloj A se mueve relativamente a B, el tic-tac de A ya no durará un segundo, sino un tiempo mayor, y tanto más cuanto más rápido se mueva, tomando la velocidad de la luz como unidad de medida ($c = 100\%$) y límite inalcanzable para cuerpos con masa, como relojes. Ahora bien, el movimiento es relativo. Por eso, si se invierte la perspectiva, B –el parámetro del segundo– aparece en movimiento y su tic-tac dura más que un segundo de A, puesto en reposo por el observador. La relatividad es como un juego de espejos enfrentados. Los «ahoras» que indican y numeran, respectivamente, A y B no son uno y el mismo, como cuando están en reposo relativo. Einstein diría que no son instantes simultáneos, sino «coordinados» por una transformación de Lorentz si los relojes se mueven con velocidad uniforme (velocidad relativa). Hay que agregar a esto que ningún reloj señala «ahoras» en una serie de sucesos, numerándolos; una indicación de reloj remite simplemente a otra y esta a aquella, nuevamente el juego de espejos de A y B. En un sentido se podría decir que Einstein es incluso anti-realista: no hay Tiempo, lo que los relojes miden no es un sustrato temporal en el que se despliega la «naturaleza».

El reposo es relativo. Ningún reloj reposa absolutamente, sino solo para el observador que lo usa de parámetro; en el ejemplo, alternativamente A y B se encuentran en reposo. Mucho mejor

7 Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», *Die Naturwissenschaften* 48 (1918): 699.

que como realidad absoluta o mera apariencia, el reposo se puede entender como una «ficción» que consiste –como se va a plantear acá–en que el observador *hace como si* el reloj, que en cada caso utiliza de parámetro, no se moviera y, con eso, *como si* se encontrara libre de los efectos relativistas del movimiento; es decir, como si el tic-tac de ese reloj (la medida) no estuviera dilatado en absoluto. Este «*hacer como si*» tiene que ser entendido en el sentido performativo de la expresión «interpretar un rol». Performar la ficción del reposo de los relojes es la condición de posibilidad para constituir un parámetro de tiempo, una medida que permite medir cuánto se dilata el segundo del «otro» reloj en movimiento. Cualquier reloj en movimiento uniforme se puede poner en reposo, transfiriendo su movimiento a otro. Así, la ficción del reposo del reloj permite que el tiempo aparezca como tiempo-medida y como tiempo-medido (dilatado).

La intrínseca (y compleja) conexión entre tiempo y movimiento es señalada ya por Aristóteles en *Física* Δ 10-14 (el tiempo es algo del movimiento, número), pero solo con la relatividad se pone de manifiesto que relojes en «movimiento» marchan más lento relativamente. En este artículo se va a intentar elucidar el tiempo como interpretación y su «estructura»: el «como si». Con este fin se presenta, en primer lugar, un esbozo del problema del tiempo en relatividad; luego se aborda el asunto principal tomando como punto de partida algunos experimentos mentales de la relatividad, presentes en obras de Einstein y en bibliografía secundaria. Dado que el presente trabajo está pensado, sobre todo, para lectores con formación en filosofía (lo cual es hablar en términos muy generales) la utilización de ecuaciones se reduce al mínimo básico y no requieren más conocimientos que el teorema de Pitágoras. Cabe señalar, por último, que este trabajo sobre la naturaleza del tiempo en relatividad se inserta en el marco de una investigación más amplia, la cual confronta con filósofos de la tradición, como Aristóteles y Heidegger.

1. La relatividad del tiempo

El problema que asume y resuelve Einstein es la incompatibilidad entre el principio de relatividad o equivalencia (y conmensurabilidad) de los sistemas inerciales y la hipótesis del carácter absoluto de la velocidad de la luz. Einstein reformula el principio de relatividad haciéndolo extensivo a los fenómenos electromagnéticos y, por lo tanto, a todos los fenómenos físicos –la relatividad clásica solo contemplaba los fenómenos mecánicos–. El dilema que precede la solución es o bien el tiempo es absoluto, invariable ($t = t'$), o bien la velocidad de la luz es absoluta. Einstein sostiene que si el tiempo fuese absoluto, la velocidad de la luz sería relativa y habría que recurrir a la transformación de Galileo para las coordenadas del espacio y el tiempo, pero, en vez de eso, esta tiene que ser reemplazada por la transformación de Lorentz, a partir de lo cual se desvanece el dilema destructivo entre el principio de relatividad y el principio de constancia de la velocidad de la luz.

Einstein pone de cabeza a Newton: el espacio y el tiempo dejan de ser considerados absolutos y pasan a ser relativos al sistema de referencia que se elige para la medición; además, la velocidad de la luz comienza a ser entendida a partir de entonces definitivamente como una magnitud finita y absoluta. La velocidad de la luz es absoluta porque tiempo y espacio son relativos. Todo observador mide siempre la misma velocidad de la luz, independientemente de la velocidad con que se mueva y de la velocidad de la fuente de luz. Relativamente a la velocidad de la luz, todo sistema de referencia está en igualdad de condiciones. Todos los sistemas en movimiento uniforme relativo están en pie de igualdad, tienen el mismo derecho (*gleichberechtigt*) a ser considerados sistemas en «reposo».

Einstein se da cuenta que basta con sustituir la transformación de Galileo para las coordenadas de tiempo y espacio por la transformación de Lorentz (la diferencia es que en esta: $x \neq x'$, $t \neq t'$) para que *todas* las leyes de la física, es decir, tanto de la electrodinámica como de

la mecánica clásica permanezcan invariables, lo cual significa que no cambian de forma cuando se pasa de un sistema de referencia inercial a otro. Es la razón por la que, como señala Cassirer, «si la ley de conservación de la energía es válida respecto a un sistema de referencia S , también es válida respecto a cualquier otro sistema que se mueva respecto a S con velocidad uniforme y movimiento rectilíneo»⁸. Del postulado de que todo observador *debe* medir la misma velocidad de la luz, independientemente de su estado de movimiento relativo, se deduce el segundo postulado de la relatividad especial: no existe ningún «punto de vista» privilegiado.

Hay dos efectos de relatividad especial que son de importancia central por lo que aquí concierne: la contracción de las longitudes y la dilatación del tiempo. Ambos son efectos del movimiento rectilíneo uniforme (MRU). Einstein dice sobre la dilatación del tiempo:

Imaginemos ahora un reloj con segundero que reposa constantemente en el origen ($x' = 0$) de S' . Sean $t' = 0$ y $t' = 1$ dos señales sucesivas de este reloj. Juzgado desde S , el reloj se mueve con la velocidad v ; respecto a este cuerpo de referencia, entre dos de sus señales transcurre no un segundo, sino $1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ segundos, o sea un tiempo algo mayor⁹.

Por lo que corresponde a las longitudes, explica Feynman:

Los cuerpos materiales se contraen cuando se mueven, (...) este acortamiento tiene lugar solo en la dirección del movimiento (...); si el largo es L_0 cuando el cuerpo está en reposo, entonces si se mueve con velocidad v paralela a su largo, este nuevo largo que llamaremos L_{II} estará dado por $L_{II} = L (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ ¹⁰.

«La regla rígida en movimiento es más corta que la misma regla cuando está en reposo, y es tanto más corta cuanto más rápidamente se mueva. Para la velocidad $v = c$ sería $(1 - v^2/c^2)^{1/2} = 0$ »¹¹. ¿Qué significa «estar» en reposo? ¿Se acorta *realmente* la regla? Esto equivale a preguntar si la regla se mueve realmente. ¿«Es» más corta,

8 Ernst Cassirer, *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*, 59.

9 Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 19.

10 Richard Feynman, *Física: Radiación y calor (Vol. 1)* (México: Addison Wesley & Longman Iberoamericana, 1998), 15-7.

11 Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 19.

o solo «parece» más corta cuando se mueve? Si es más corta (se acorta realmente), el movimiento es absoluto; si solo parece más corta, el reposo es absoluto. ¿Cuál es la *verdadera* longitud de la regla? A causa de la relatividad de movimiento y reposo estas preguntas pierden sentido, ya que no existe un sistema de referencia privilegiado en reposo absoluto.

Con la teoría de la relatividad general, Einstein introduce otra modalidad de dilatación del tiempo: dos relojes de idéntica constitución, originalmente sincronizados, dejan de estarlo cuando uno de ellos es llevado, por ejemplo, a un punto de mayor altura, donde el potencial gravitatorio (Φ) es distinto y así $t \neq t'^{12}$. Rovelli reflexiona sobre la relatividad de t y t' con la metáfora de la convertibilidad de la moneda:

¿Qué cosa indica t ? (...) Cuando dos amigos se reencuentran luego que uno ha vivido en la montaña y otro en la llanura, los relojes que tienen en la muñeca marcan tiempos distintos. ¿Cuál de los dos es t ? Dos relojes en un laboratorio de física se mueven con distinta velocidad, si uno está sobre una mesa y el otro en el suelo, ¿cuál de los dos indica el tiempo? (...) ¿Debemos decir que el reloj en el suelo se ralentiza respecto al verdadero tiempo medido en la mesa? ¿O que el reloj en la mesa acelera respecto al tiempo verdadero medido en el suelo? La pregunta carece de sentido. Es como preguntarse si es *más verdadero* el valor de la libra en dólares o el valor del dólar en libras. No existe un valor verdadero, hay dos monedas que tienen valor, *una respecto a la otra*. No hay un tiempo más verdadero. Hay dos tiempos indicados por relojes reales y distintos y que cambian *uno respecto al otro*¹³.

Que no hay un valor verdadero y absoluto quiere decir que no hay referente común externo, un «patrón oro», ni tampoco un parámetro absoluto que mide sin ser medido por algo ulterior, al cual

12 La ecuación para calcular la relación entre t y t' dice: $t' = t(1 + \Phi/c^2)$. Aquí Φ representa el «potencial gravitatorio». «Para medir el tiempo en un lugar que tiene un potencial gravitacional Φ en relación al origen del sistema de coordenadas tendríamos que utilizar un reloj que –colocado en el origen del sistema de coordenadas– marche $(1 + \Phi/c^2)$ veces más lento que el reloj con el que se mide el tiempo en el origen del sistema de coordenadas». Albert Einstein, «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen», *Jahrbuch für Radiaktivität und Elektronik* 4 (1907): 458 s. Ver también: Albert Einstein, «Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes», *Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik* 4 (1911): § 3.

13 Carlo Rovelli, *Lordine del tempo* (Milán: Adelphi, 2017), 23 s.

el símbolo t se adheriría como una etiqueta, como si fuera el nombre específico de un estado de cosas objetivo, la «cosa» tiempo. El valor relativo de t y t' se constituye en un juego de espejos confrontados. Es imposible señalar cuál refleja al otro primero. Esta forma de relatividad es simetría. Aunque, por otro lado, se observa también una asimetría, ya que los amigos no pueden ser «el observador» al *mismo tiempo*, debido al quiebre de la simultaneidad. Así, el símbolo t representa el tiempo que mide el reloj del observador del caso y t' el tiempo dilatado –y no, de modo unilateral, el tiempo medido en la llanura (t) y el tiempo medido en la montaña (t')–. Se alternan los roles de observador y observado, cada uno de los amigos tiene el mismo derecho a proclamar su sistema de referencia como parámetro y en ese acto poner sus propias escalas de tiempo y espacio a salvo de los efectos relativistas, a la vez que «dilata» y «contrae» el sistema de referencia del *otro*, el «observado». El tiempo t es el número que indica el reloj pulsera, el tiempo «a mano», que en física se conoce como «tiempo propio» (*proper time*). El tiempo más propio sería el del propio cuerpo (la carne), porque cuando un cuerpo se traslada en un móvil con velocidad uniforme:

Todos los fenómenos que ocurren allí –el ritmo del pulso del hombre, sus procesos mentales, el tiempo que emplea para encender un cigarro, cuánto necesita para crecer y envejecer– todas estas cosas deben ser más lentas en la misma proporción, porque él no puede decir que está en movimiento¹⁴.

Como explica Bergson, para el hombre dentro del móvil, el curso del tiempo es absolutamente normal y solo un observador externo puede medir los efectos relativistas del movimiento:

El sistema S' , considerado en el Espacio y el Tiempo, es un doble del sistema S que se ha contraído, en cuanto al espacio, en el sentido de su movimiento, que ha dilatado, en cuanto al tiempo, cada uno de sus segundos; y que finalmente, en el tiempo, ha dislocado en sucesión toda simultaneidad entre dos acontecimientos cuya distancia se ha estrechado

14 Richard Feynman, *Física: Radiación y calor*, 15-9.

en el espacio. Pero estos cambios escapan al observador que forma parte del sistema móvil. Únicamente el observador fijo se apercibe de ello¹⁵.

Esto trasladado al ejemplo de Rovelli significa que si el amigo que sube a la montaña tuviera un metro estándar (una barra de aleación de platino e iridio) y midiera su estatura antes de partir y lo hiciera nuevamente en la cima de la montaña, vería que sigue midiendo exactamente lo mismo; su regla se ha contraído. Si tuviera un reloj de Cesio, la frecuencia en la cima sería 9.192 Mhz, como si estuviera en la llanura. Si midiera su pulso, sería normal y, en todo caso, no se habría vuelto más lento con la subida. Solo el amigo en la llanura mediría los efectos relativistas, es decir, que el tiempo en la cima de la montaña pasa más velozmente y su amigo envejece más rápido.

La teoría de la relatividad general plantea que la gravedad no es una fuerza (Newton), sino la curvatura del espacio-tiempo. Weehler resumió esta tesis fundamental en la célebre frase «el espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse». Una pregunta casi obligada es con qué parámetro (necesariamente no curvado) sale a luz la curvatura, porque dar a entender que el espacio-tiempo está originariamente ya *curvado* es como decir que no existe realmente ningún parámetro de espacio-tiempo. Si se define el tiempo como el «número del movimiento», más específicamente como el número de las oscilaciones del Cesio, los dos relojes de Cesio, en la llanura y en la montaña, marcan el mismo número, pero si los amigos acordaran comunicarse por radio luego de transcurrida una hora exacta y no sincronizaran los relojes ajustándolos según la ecuación de Einstein para la dilatación del tiempo, estarían desfasados, y sería impreciso señalar como causa que el reloj en la montaña está atrasado o el de la llanura adelantado. Esto prueba que la definición aristotélica del tiempo como «número del movimiento»¹⁶ es incompleta: el número es el mismo pero *los tiempos no*.

15 Henry Bergson, *Duración y Simultaneidad (A propósito de la teoría de Einstein)* (Buenos Aires: Ediciones del Signo, 2005), 57.

16 Aristóteles define el tiempo como ἀριθμὸς κινήσεως κατὰ τὸ πρότερον καὶ ὕστερον, «número del movimiento según lo anterior y lo posterior» (Física Δ 11, 219^b1-2).

«De acuerdo con la teoría de la relatividad especial, cada cuerpo tiene, en comparación con otro cuerpo en movimiento, relativamente a él, su tiempo propio (*Eigenzeit*)»¹⁷. Safranski compara la multiplicidad de tiempos propios con «mónadas de tiempo»¹⁸. La metáfora es parcialmente adecuada porque las mónadas no están conectadas, mientras que *los tiempos* están vinculados por la transformación de Lorentz para sistemas de coordenadas en movimiento uniforme relativo. La transformación de Lorentz es el fundamento de lo que los físicos llaman «tiempo coordinado» (*coordinated time*). Según la relatividad especial, el intervalo entre t y t' (la unidad de tiempo del reloj de Cesio en S y S') varía proporcionalmente a la velocidad relativa en una *ratio* constante igual a γ ¹⁹. La relatividad de los tiempos no indica, por ende, una inconmensurabilidad de los «puntos de vista» (relativismo), sino precisamente el carácter relacional de *los tiempos*. Por otro lado, la mónada leibniziana no tiene «ventanas» hacia el exterior (de ahí su carácter solipsista) pero contiene en sí la totalidad del mundo; por el contrario, el observador está preso en la «jaula» relativista, cuyo horizonte trascendental de experiencia viene dado por su espacio y tiempo propios. No puede medir con su regla contraída y su tiempo dilatado, curvado, distorsionado la distorsión y la contracción de sus escalas.

«Si cada objeto que se mueve en el espacio tiene, en comparación con todo otro objeto, su tiempo propio, se modifica lo que se entiende por simultaneidad»²⁰. La «simultaneidad» en sí no existe, en primer lugar, porque si la velocidad de la luz es finita, ningún observador puede tener una experiencia inmediata (en tiempo «real») de los entes del mundo. Toda experiencia sensible tiene un retardo (es dilatada) y la distancia temporal depende directamente de la distancia espacial entre el ente que se percibe y el/los observador/es. Dos observadores

17 Rüdiger Safranski, *Zeit. Was sie mit uns macht und was wir aus ihr machen* (Frankfurt am Main: Fischer, 2017), 193.

18 Rüdiger Safranski, *Zeit. Was sie mit uns macht und was wir aus ihr machen*, 171.

19 $t [1 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}]$

20 Rüdiger Safranski, *Zeit. Was sie mit uns macht und was wir aus ihr machen*, 163.

situados en puntos diferentes tienen experiencias diferidas del «mismo» evento. En el quiebre del concepto de simultaneidad (quizás el aporte filosófico más relevante de la relatividad) se percibe la influencia de Hume y trasluce inclusive el *leitmotiv* del idealismo de Berkeley: *Esse est percipi*. Solo un observador absoluto, ubicuo, podría garantizar un ahora universal, la simultaneidad de todo lo que existe. Pero si todos los observadores están en pie de igualdad y no existe lo Simultáneo, tampoco un observador ubicuo, situado a la misma «distancia» en el espacio y en el tiempo, o sea, a ninguna distancia, junto a todas las cosas al mismo tiempo. Habría que partir de esta idea precisamente para explicitar el planteo teológico de la relatividad especial, respecto al cual aquí no podemos más que hacer alusiones generales.

Dos eventos son simultáneos si están a la misma distancia del observador, ya que entonces la luz que reflejan tarda lo mismo en llegar a él. El movimiento también provoca el efecto de «dislocación de la simultaneidad»²¹. Dos eventos que para un observador A son simultáneos, no lo son para un observador B que se mueve respecto al observador A. El intervalo entre cada «ahora» del observador en S y cada «ahora» del observador en S' varía proporcionalmente a ty .

Con la hipótesis de la relatividad de la simultaneidad (ahora \neq ahora') desaparece la incompatibilidad entre el principio de relatividad y el electromagnetismo sin que se vea afectada la hipótesis de la invariancia de la velocidad de la luz, exigida por las ecuaciones de campo de Maxwell. No existe un ahora presente universal que abarca y contiene la totalidad de lo ente. El Tiempo *uno y verdadero* de Newton se revela meramente ilusorio. Lo que aparece «ahora» y constituye el presente podría ser visto como un fenómeno en sentido literal del término, ya que, como se sabe, «fenómeno» y «luz» comparten la raíz del verbo griego «φαίω» (aparecer, salir a luz, hacerse visible). Se podría definir el ahora, o sea, la «totalidad» que

21 Henry Bergson, *Duración y Simultaneidad*, 57.

ahora se muestra y es patente, como lo «φαίνεσθαι», es decir, como la totalidad de lo que sale a luz. Salir a luz es «hacerse patente», venir a la presencia²².

Kant señala en la estética trascendental que no se puede imaginar un cuerpo sin atribuirle cierta magnitud espacial, así como tampoco se puede pensar un proceso que no implique alguna duración; se puede perfectamente imaginar, no obstante, un espacio vacío de entes y una duración pura, sin eventos, sin cambios. Einstein, por su parte (más cerca de Descartes)²³, sostiene que si se hace abstracción de los cuerpos materiales, no queda ningún sustrato espacio-temporal, es decir, que no hay espacio-tiempo libre de la materia que curva el espacio-tiempo, o sea, libre de campo y, por ende, libre de curvatura. Al hecho de que el vínculo entre los observadores y el tiempo es indisoluble, se agrega ahora el vínculo indisoluble entre materia y espacio-tiempo. El tiempo no tiene existencia separada.

Lo esencial en esto es que lo «físicamente real», imaginado como independiente de los sujetos que lo vivencian, se interpretaba –al menos en teoría– como compuesto de espacio y tiempo, por un lado, y de puntos materiales permanentemente existentes y en movimiento respecto a aquellos, por otro²⁴.

Sin embargo, como se verá a partir de algunos experimentos mentales de Einstein, la *interpretación* del principio de equivalencia entre gravedad y aceleración (gravedad como aceleración) puede producir por sí misma un campo gravitatorio «fingido», es decir, no generado por la presencia efectiva de materia y masa. El reposo es relativo, por lo tanto, es movimiento, de un modo que ya no se deja pensar como «privación» (Aristóteles). Elegir un sistema de coordenadas significa poner en reposo un cuerpo de referencia y constituir un sistema cartesiano (o gaussiano, en relatividad general). No obstante, si el movimiento es relativo, poner en reposo un sistema

22 Cf. concepto de fenómeno en Heidegger. Martin Heidegger, *Sein und Zeit* (Ga 2) (Frankfurt am Main: Klostermann, 1977), par. 7, 38-42. Martin Heidegger, *Prolegomena zur Geschichte des Zeitbegriffs* (Ga 20) (Frankfurt a. M.: Klostermann, 1979), par 9 a, 111-115.

23 Cf. Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 72.

24 Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 77.

no significa forzarlo al reposo o acaso imaginar algo que en verdad no existe. A continuación, se desarrollará la hipótesis según la cual poner en reposo reglas y relojes es interpretar el principio de relatividad y equivalencia legítimamente. Dicho acto interpretativo consiste en «hacer como si» el sistema estuviera en reposo.

2. Reposo y «como si» (interpretación) en relatividad especial

Un pasajero a bordo de un avión arroja una moneda al aire, que al caer vuelve a su mano. La moneda no sale disparada como una bala hacia atrás (como si se quedase quieta en relación con el suelo terrestre). Luego el pasajero se pone de pie y da un salto, cae en el mismo lugar, no se estrella contra el compartimento de la tripulación al final del pasillo. El hombre, la moneda, todo lleva la inercia del avión. Todo en el avión sucede como si estuviese estacionado en el hangar, como si estuviera en reposo. Desde el punto de vista de los fenómenos físicos, no hay diferencia cuando el avión se mueve en línea recta y uniformemente respecto al suelo que cuando está estacionado. El principio de relatividad clásico (Galileo) establece que un sistema en reposo y un sistema en MRU son equivalentes, es decir, que los fenómenos físicos responden a las mismas leyes. La equivalencia de los sistemas inerciales hace que sea imposible determinar por medio de experimentos si el cuerpo de referencia (el avión en este caso) está en reposo o en movimiento.

En *Física*²⁵ Aristóteles advierte, por primera vez, que hay dos hechos (de carácter fenomenológico, por cierto)²⁶ que probarían la existencia de una relación entre tiempo y movimiento²⁷:

1. Percibimos el tiempo cuando percibimos el cambio.

25 Δ 11 (218^b20 ss.)

26 Wieland y Vigo han visto en el Aristóteles de *Física* un proto-fenomenólogo. Cf. Werner Wieland, *Die aristotelische Physik* (Göttingen: Vandenhoeck u. Ruprecht, 1962); Alejandro Vigo, *Estudios aristotélicos* (Navarra: Eunsa, 2006).

27 En sentido amplio de κίνησις y μεταβολή, los cuales comprenden cambios locativos, cuantitativos, cualitativos, etc.

2. Cuando nada cambia, como cuando todo está oscuro y no se ve ni se percibe nada por medio de los sentidos, así como cuando nada cambia en el pensamiento, parece que el tiempo no pasa.

Aristóteles desarrolla esta idea recurriendo al mito de los que duermen en Cerdeña junto a los héroes²⁸, así especula sobre una forma primigenia de relatividad del tiempo. El sueño es tan profundo que no perciben el paso del tiempo y al despertar piensan que ha transcurrido un instante –un abrir y cerrar de ojos (*Augenblick*)– o «nada» de tiempo. Pero lo que para ellos fue un instante en realidad ha durado varios días. El parámetro objetivo de tiempo son las revoluciones del cielo de estrellas fijas. La contracción del tiempo a un instante (un ahora puntual, sin extensión o muy breve) es solo aparente, a diferencia de la dilatación del tiempo sobre la que teoriza la relatividad.

Un hombre despierta repentinamente en una nave espacial (A), no sabe por qué está ahí, no recuerda nada, no sabe qué día ni qué hora es. Mira por la ventana de la nave, ve solo el espacio negro y vacío. Silencio absoluto... En ese mismo momento, otro hombre despierta repentinamente en una nave espacial (B), tampoco sabe cómo llegó allí y también ha perdido toda referencia temporal objetiva (como los durmientes). Mira por la ventana, solo espacio negro y vacío, ningún cuerpo de referencia, como una estrella o un planeta, nada que pudiera permitirle saber si la nave se mueve... Unos segundos después ve aparecer la nave A por la ventana. Su intuición inmediata es que esta se mueve con velocidad uniforme y pasa junto a su nave. Pero el astronauta en A tiene la misma intuición, su nave está quieta, la nave B se está moviendo. Luego el hombre en A duda, quizás él se mueve y el otro está quieto. ¿Quién se mueve realmente si el movimiento es relativo? El astronauta en A no puede determinar mediante ningún experimento si se está moviendo, tampoco si B avanza o si su propia nave retrocede. Ambas posibilidades son admisibles como explicación de la aparición de B.

28 Cf. *Física* Δ 11 (218b 21 y ss.)

A veces ocurre que uno mira por la ventana del autobús y piensa que ya se ha puesto en marcha, pero luego se da cuenta de que, *en realidad*, es el autobús de al lado el que se está moviendo. Si alguien preguntara seriamente «¿Se detiene Oxford en este tren?»²⁹, parecería un loco, y, sin embargo,

perfectamente se puede ver al tren que marcha con velocidad constante como si estuviera en «reposo» y la vía como si se «moviera uniformemente» junto con todo alrededor. ¿Estaría dispuesto a admitirlo la «sana razón» del conductor del tren? Diría contra eso que ha estado aceitando y echando leña sin parar a la locomotora, no a *las vías* y, por ende, tiene que ser aquélla la que al moverse refleja los efectos de su trabajo³⁰.

Un pasajero en el tren deja caer una manzana. Respecto a él y al vagón (cuerpo de referencia), la trayectoria que sigue la manzana es rectilínea; en cambio, respecto al andén, tomado como cuerpo de referencia, la trayectoria de la manzana es una parábola. Esta trayectoria no es una ilusión óptica. Como uno de los principios fundamentales de la teoría de la relatividad es que sistemas que se mueven unos respecto a otros con MRU son equivalentes para la descripción de fenómenos físicos, no tiene ningún sentido preguntar cuál de las trayectorias es verdadera (real) y cuál una mera apariencia. No hay una trayectoria meramente aparente. La afirmación «la trayectoria es relativa» significa que no hay una trayectoria verdadera, única y absoluta que se muestre tal como es (cosa en sí) a la luz de un sistema de referencia privilegiado por naturaleza –el espacio absoluto newtoniano (*sensorium Dei*)– en reposo absoluto. Lo irreal es la «perspectiva de Dios». El observador no tiene paraje en el reposo absoluto. Además de observador, siendo su reposo relativo, puede ser «observado» en movimiento. Si fuera real que el terraplén está en reposo, el movimiento de las vías y el reposo del tren serían meras apariencias y eso, a su vez, negaría la validez del principio de relatividad.

29 Según Newton-Smith, esta afirmación se atribuye apócrifamente a Einstein. Cf. William Newton-Smith, *The structure of time* (London: International library of philosophy, 1984), 177.

30 Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 701.

Entonces, aun cuando la sana razón me indicara, corrigiendo la primera impresión de mi atención distraída que, en realidad, la Luna no se está moviendo a toda velocidad, sino las nubes del cielo nocturno, yo aún podría afirmar válidamente (poniendo entre paréntesis la causa del movimiento de las nubes, el viento) que «se mueve la Luna» y que su longitud se contrae proporcionalmente a su velocidad. Estaría describiendo un fenómeno relativista y no una mera apariencia, como si uno dijera: «La Luna es del tamaño de una arveja», o «el palo dentro del agua está quebrado». Los fenómenos relativistas no son espejismos de esta clase.

Husserl dice que, en tanto suelo originario (no como un cuerpo celeste más entre otros), la Tierra no se mueve³¹. Einstein, por su parte, relativiza el giro copernicano y pone en pie de igualdad los dos máximos «sistemas del mundo». Si en astronomía se otorga privilegio al sistema heliocéntrico es solo porque la descripción de los movimientos planetarios resulta más sencilla. «La Tierra se mueve» y «la Tierra está en reposo» son, por tanto, enunciados igualmente válidos.

Hay una posibilidad que ofrece la teoría de la relatividad, el referir los movimientos de los planetas del sistema solar a un sistema de coordenadas geocéntrico (...) ¿Sería realmente legítimo considerar que este sistema está «en reposo» y en pie de igualdad y que las estrellas fijas se mueven en círculos relativamente a la Tierra con velocidad enorme? (...) Nadie utilizaría en la investigación del sistema solar un sistema de coordenadas en reposo relativamente a la Tierra porque no sería práctico. *Por principio*, no obstante, este sistema de coordenadas está en pie de igualdad con cualquier otro, como sostiene la teoría de la relatividad general. Que las estrellas fijas giran con velocidad enorme si la consideración parte de ese sistema de coordenadas no es un argumento contra la *admisibilidad* [Zulässigkeit] de la elección del sistema de coordenadas sino solo contra su conveniencia [Zweckmäßigkeit]³².

31 Edmund Husserl, «Grundlegende Untersuchungen zum phänomenologischen Ursprung der Räumlichkeit der Natur», en *Philosophical Essays in memory of Edmund Husserl*, ed. M. Farber (Cambridge: Harvard university press 2014).

32 Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 700 ss.

¿Cómo se llega a esta relativización del giro copernicano? En las ecuaciones de Maxwell, la velocidad de las ondas electromagnéticas se representa con la magnitud constante c ($3 \cdot 10^8$ m/s). Este valor correspondía con las mediciones de la velocidad de la luz, dando respaldo a la unificación de electricidad y magnetismo en una electrodinámica, y también a la consideración de la luz como una onda electromagnética –contra la teoría corpuscular de Newton y previo al descubrimiento del comportamiento cuántico (dual) de la luz–. Los físicos pensaban que la luz, como otras ondas, debía generarse a partir de las oscilaciones de su medio específico de propagación: el éter luminífero. Ya Newton concebía el éter como una sustancia que ocupaba todo el espacio absoluto y que se encontraba, por tanto, en reposo absoluto. Hacia fines del siglo XIX era una creencia generalizada que la velocidad de la luz c era un valor medido relativamente al éter inmóvil, por lo tanto, también relativamente al espacio absoluto newtoniano. Se pensaba que sería posible medir la velocidad de la luz relativamente a la Tierra, en movimiento de traslación elíptica respecto al Sol, con una velocidad de 30 m/s. Así como explica Ruhrländer:

De acuerdo con la transformación de Galileo para la velocidad, la luz proveniente de una estrella sería $c - v$, cuando la Tierra se mueve en dirección a la estrella con $v = 30$ m/s. Si luego la Tierra, siguiendo su trayectoria de traslación, se aleja de la estrella, la velocidad de la luz proveniente de la estrella sería el resultado de $c + v$ ³³.

Se pensó, en consecuencia, que también sería posible diseñar un experimento óptico para medir la velocidad de la Tierra relativamente al éter en reposo en el espacio absoluto, usando c como parámetro en la comparación y el teorema de adición de velocidades ($c \pm v$) basado en la transformación de Galileo para la coordenada espacial ($x' = x - vt$). El más famoso de estos experimentos fue el de Michelson y Morley. Se empleó un dispositivo construido con espejos en los que se proyectaban rayos de luz. El llamado «interferómetro» de

33 Michael Ruhrländer, *Aufstieg zu den Einsteingleichungen. Einführung in die quantitative allgemeine Relativitätstheorie* (Berlin: Pro Business, 2014), 256.

Michelson era un reloj de luz basado, como todos los relojes, en un movimiento uniforme y cíclico (un *loop*): emisión y retorno de los rayos. La predicción era que habría una diferencia de tiempos minúscula (aunque medible) en el retorno de los rayos al punto de origen y eso debido al movimiento del dispositivo respecto al éter (o sea, a causa del movimiento de la Tierra)³⁴. Para desconcierto de los científicos, el resultado del experimento no fue el predicho: la velocidad de la luz no se alteraba en absoluto con la velocidad de la Tierra, permanecía siendo *c*, como si la Tierra estuviera en reposo en relación con el éter y como si, en realidad, el Sol se estuviera moviendo a 30 km/s respecto a la Tierra. Es decir, parecía que el experimento «falsaba» el heliocentrismo³⁵.

En verdad, el experimento con el interferómetro pone de manifiesto que no es posible usar la velocidad de la luz como parámetro para saber si la Tierra se está moviendo³⁶. Como no hay posibilidad de detectar el movimiento por vía experimental, no hay ninguna certeza de la traslación de la Tierra. Sin embargo, proponer el reposo de la Tierra habría significado retroceder doscientos años en el camino de la ciencia moderna. En vez de dejar que la física se precipite en una verdadera crisis de fundamento, Einstein declara

34 «Si todo este sistema se halla en reposo respecto al éter luminífero, cualquier rayo de luz necesita un tiempo muy determinado *T* para ir de un espejo al otro y volver. Por el contrario, el tiempo (calculado) para ese proceso es algo diferente (*T'*) cuando el cuerpo, junto con los espejos, se mueve respecto al éter». Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 27. El rayo de luz que hace un recorrido longitudinal o paralelo a la dirección del movimiento del aparato sería más lento que el rayo proyectado en el espejo de «arriba» (recorrido transversal). La diferencia de tiempos de los rayos sería igual a: $1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$.

35 Aquí puede resultar esclarecedor un ejemplo. Un observador en un tren imaginario ultra-veloz ve pasar un rayo de luz en la dirección de su movimiento. La luz proviene de la parte trasera del tren. El observador quiere determinar la velocidad del tren (y, por ende, la suya propia) haciendo uso del teorema de adición de velocidades. Si midiera 100 mil km/s, sabría que el tren se está moviendo a 200 mil km/s ($c - v$). Si midiera 0 km/s, sabría que se está moviendo con velocidad *c* respecto al éter. Si midiera 300 mil km/s tendría una prueba absoluta de que el tren está en reposo en relación al éter (y por tanto que en verdad se mueve el andén). Si, posteriormente, la luz rebotara en un espejo colocado en la parte delantera del tren y regresara, su velocidad relativa al observador (que ahora va al encuentro del rayo) sería: $c + v$ (en el primer caso 500 mil km/s). Si, en cambio, la luz proviniera de una fuente en el suelo del tren y rebotara en un espejo en el techo, su velocidad sería $(c^2 - v^2)^{1/2}$, o sea, menor que *c*.

36 La primera explicación del resultado nulo viene de Lorentz y FitzGerald: el brazo paralelo a la dirección del movimiento se acorta en un factor igual a $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ y así los rayos llegan en simultáneo, contra la hipótesis de base.

superflua la hipótesis del éter, poniendo fin al concepto de reposo absoluto (no al éter en cuanto tal)³⁷. En el experimento, la velocidad de la luz no aparece como si *en realidad* la Tierra estuviera en reposo respecto al éter, sino simplemente *como si* lo estuviera. Cassirer ha visto esto con claridad: «Según el resultado del experimento de Michelson y del principio de constancia de propagación de la luz, cada observador tiene derecho a ver su sistema como si "reposara en el éter"»³⁸. Bergson, por su parte, afirma algo similar: el sistema inmovilizado «se vuelve provisoriamente un punto de orientación absoluto, un sucedáneo del éter»³⁹. «Éter» ya no es el nombre de una sustancia, sino del reposo «ficticio» (relativo), pero legítimo, del sistema de referencia. Que la hipótesis del éter resulta superflua significa en verdad que no tiene sentido discutir acerca de si existe o no. La hipótesis de la existencia del éter es indemostrable, pero un observador hipotético en el Sol tendría la misma perspectiva que un observador hipotético en el éter (que esperaban detectar y medir Michelson y Morley), es decir, ese observador detectaría el desfase de los rayos de luz predicho; el resultado del experimento sería positivo (no hay simultaneidad absoluta) en correspondencia con la hipótesis del movimiento de la Tierra⁴⁰. La relativización del giro copernicano significa que no tiene sentido decir que el movimiento diario del Sol es «aparente». En este caso, lo que aparece es real en cuanto aparece y como aparece.

37 «¿Cuál es la situación del convalciente de la física teórica, el éter, al cual (...) han decretado definitivamente muerto? (...) Pues tiene un destino lleno de vicisitudes a sus espaldas y ya no se puede decir en absoluto que ha muerto (...) La teoría de la relatividad especial considera que una porción de espacio sin materia y sin campo electromagnético es espacio vacío sin más, es decir, considera que no se le pueden atribuir magnitudes físicas de ninguna clase. Por el contrario, para la teoría de la relatividad general el espacio vacío en el sentido anterior tiene cualidades físicas matemáticamente caracterizadas por los componentes del potencial gravitacional que definen tanto el comportamiento métrico de esa porción de espacio como su campo gravitatorio. Este estado de cosas se puede concebir perfectamente como éter, el estado de este éter varía constantemente de un punto a otro. Hay que cuidarse únicamente de no atribuir a este "éter" propiedades como las de la materia (como, por ejemplo, una velocidad determinada en cierto lugar)». Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 701 ss.

38 Ernst Cassirer, *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*, 65.

39 Henry Bergson, *Duración y Simultaneidad*, 50.

40 «El cuerpo que sostiene los espejos en el experimento de Michelson y Morley no se acorta respecto a un sistema de referencia solidario con la Tierra, pero sí respecto a un sistema que se halle en reposo en relación al Sol». Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 28.

El experimento de M-M es análogo a uno de Galileo: un tripulante de un barco ve que se aleja de Tierra firme. Hace un experimento para corroborar que el movimiento no es solo una ilusión: suelta un peso desde lo alto del mástil. El cuerpo cae al pie del mástil. Repite el mismo experimento en Tierra firme. Sucede exactamente lo mismo. El experimento podría partir perfectamente del supuesto de que el barco está en reposo relativamente a la orilla que se aleja. No hay ninguna forma de demostrar la falsedad de un juicio totalmente contraintuitivo como «la orilla se aleja y el barco está quieto». La Tierra en reposo, el andén en movimiento, el movimiento «aparente» del Sol, el «viento del éter» inclusive, adquieren un nuevo estatuto ontológico con la relatividad. No tendría ningún sentido decir que se trata de meras apariencias. *En verdad*, la Tierra gira alrededor del Sol y el Sol gira alrededor de la Tierra. Todo depende de la elección de sistemas de referencia equivalentes por principio. Y dicha elección, como indica Einstein, solo se rige por criterios pragmáticos.

Relojes atómicos transportados en aviones y aceleradores de partículas han permitido confirmar una consecuencia peculiar predicha por Einstein: la dilatación del tiempo y la contracción del espacio según el factor de las ecuaciones de Lorentz *realmente* se produce. Un caso paradigmático de dilatación del tiempo se observa en el caso del muón, partícula elemental con un promedio de vida de $2 \mu s$ (aprox.)⁴¹, en estado de reposo. Se ha comprobado que a una velocidad de 99,8 % de c ($0,998/c$) el tiempo de vida del muón se incrementa quince veces (conforme a la predicción de la ecuación de Einstein). La dilatación del tiempo de vida del muón es un problema de relatividad especial. Se coloca un detector de muones a distintas alturas para demostrar empíricamente la realidad de la dilatación del tiempo y la contracción de las longitudes. Ahora, si se aplica el cambio de perspectiva que habilita el principio de equivalencia, el muón en reposo «ve» que el detector se aproxima con velocidad $v = 0,998/c$.

41 1 microsegundo equivale a una millonésima de segundo (10^{-6} s.).

Un arreglo sencillo del experimento del muón permite explicitar una «asimetría» efectiva en el postulado de constancia de la velocidad de la luz. Se puede reemplazar en un experimento mental el muón con un fotón. Como en el caso del tren y el terraplén, como en el caso del muón, si hubiese simetría entre los sistemas de referencia solidarios con el fotón y con el detector fotovoltaico, respectivamente, tendría que ser posible invertir la perspectiva y ver el fotón en «reposo»; mientras que el detector fotovoltaico situado en la superficie de la Tierra se «movería» con $v = c$ (transferencia) en dirección al fotón. Si se introducen los valores correspondientes en las ecuaciones de contracción de las longitudes y dilatación del tiempo: $v = 1$ (100% respecto a c), el resultado es que la distancia que debería recorrer el detector fotovoltaico sería nula y que el tiempo del fotón en el sistema de referencia de la Tierra se dilataría al infinito. La interpretación usual es que «para la luz no hay tiempo», que el tiempo se detiene, se *anula*⁴². Sin embargo, la ecuación indica que, en realidad, el paso del tiempo se haría infinitamente lento. Para el muón el tiempo se dilata 15 veces, el tiempo de vida del fotón se dilataría al infinito. Que la luz recorre cualquier distancia en un tiempo cero solo sería posible si la velocidad de la luz fuese infinita, como pensaba Newton. Por otro lado, $t' = \infty$ es el efecto relativista, no el «tiempo propio» del fotón; este no «ve» el tiempo detenerse o dilatarse. En verdad, eso es lo que debería percibir y medir un observador en la Tierra. Sin embargo, todo observador mide c para la luz y el cociente entre cualquier distancia (cualquier número > 0) e infinito ($v = e/t$) no da como resultado c . En sus escritos autobiográficos Einstein relata que siendo adolescente imaginaba cómo sería un rayo de luz si él corriese a la par, si vería una onda sinusoidal en reposo y dice que ahí estaba el germen de la teoría de la relatividad especial⁴³, porque la respuesta madura (relativista) a ese enigma es que todo

42 Cf. Jean-Pierre Luminet, «Time, topology and the twin paradox»: 5, consultada en agosto 23, 2017, <https://arxiv.org/pdf/0910.5847v1.pdf>.

43 Albert Einstein, «Autobiographical notes», en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, ed. P. A. Schlipp (New York: Tudor Publishing, 1951), 52 s.

observador mide la misma velocidad c , independientemente de cuál sea su propia velocidad. Imaginar el fotón en reposo ($v = 0$) implica infringir el postulado de constancia de la velocidad de la luz. Por otro lado, suponer un detector que se «aproxima» con $v = c$ (transferencia) implica infringir el principio de equivalencia de masa y energía: ningún cuerpo con masa puede alcanzar la velocidad de la luz. Es ilícito invertir la perspectiva. Imaginar el movimiento de la luz detenido lleva al absurdo de querer someter lo absoluto a lo relativo. La imposibilidad de imaginar (interpretar) la luz en reposo significa, además, que la luz (a diferencia del muón) no «ve» al detector fotovoltaico aproximarse con $v = c$. Es imposible «hacer como si» la luz estuviera en reposo. Si el movimiento de la luz es absoluto, lo absoluto no es una «perspectiva» absoluta (la luz ciega).

3. Reposo y «como si» (interpretación) en relatividad general

El experimento mental, que podría llamarse «del cajón acelerado»⁴⁴, plantea el siguiente escenario: una especie de ascensor se mueve en el vacío con aceleración constante al ser tirado de una cuerda atada al techo por un ser semejante al genio maligno cartesiano. Dentro del cajón, un observador no consciente del engaño (llámese «observador ingenuo») siente el peso de su cuerpo, suelta un objeto que tiene en la mano y este «cae» con aceleración uniforme, hace un péndulo simple, que responde a las leyes del movimiento armónico. Ningún experimento que pudiera imaginar y efectuar le permitiría saber a ciencia cierta si el cajón se está moviendo con aceleración uniforme o si está en reposo en un planeta, cuya masa genera gravedad. Si el observador interpretara, a partir de sus experimentos, que el cajón está *en reposo* en un planeta con gravedad estaría en todo su derecho, dada la equivalencia entre gravedad y

44 Cf. Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 33 ss.

aceleración (generada por una fuerza externa), principio fundamental de la teoría general de la relatividad⁴⁵.

La posibilidad de esta *interpretación* [el cajón acelerado en reposo] descansa en la propiedad fundamental que posee el campo gravitatorio de comunicar a todos los cuerpos la misma aceleración, o lo que viene a ser lo mismo, en el postulado de igualdad entre masa inercial y masa gravitatoria. Si no existiera esta ley de la naturaleza, el hombre en el cajón acelerado no podría interpretar el comportamiento de los cuerpos circundantes a base de suponer la existencia de un campo gravitatorio, y ninguna experiencia le autorizaría a suponer que su cuerpo de referencia está «en reposo»⁴⁶.

Un segundo observador, en reposo respecto al cajón, vería a este moviéndose con aceleración uniforme a través del espacio y tendría ante los ojos la verdadera causa del comportamiento de los fenómenos en el interior; sería consciente del engaño en el que se encuentra preso el observador ingenuo, vería, en efecto, que no hay ninguna masa cerca (única causa posible de un campo gravitatorio real) y que la verdadera causa del comportamiento de los cuerpos es la fuerza que transmite al cajón el tirón del «genio maligno». La hipótesis del campo gravitatorio del observador ingenuo no se adecua a los hechos. Si «verdad» se entiende en el sentido tradicional de «*adæquatio intellectus rei*», la hipótesis del hombre en el ascensor—existe un campo gravitatorio—sería totalmente falsa; pero el principio de relatividad legitima la posibilidad de interpretar el tirón como gravedad y *ver* al cajón en «reposo».

Para el hombre del cajón existe un campo gravitatorio, pese a no existir tal respecto al sistema de coordenadas inicialmente elegido [sistema del observador externo]. Diríase entonces que la existencia de un campo gravitatorio es siempre meramente *aparente* (...) ⁴⁷.

La pregunta «por qué caen los cuerpos» no tiene *una* explicación última, es cuestión de interpretación, así que la pregunta por la *causa*

45 El movimiento uniformemente acelerado es equivalente al reposo, lo mismo que el MRU, en tanto son indistinguibles por vía experimental. Precisamente por eso la relatividad es «general»; ahora ya no se *restringe* al MRU, sino que aplica a todo movimiento.

46 Cf. Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 34 ss. Cursiva mía.

47 Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 35. Agregados en corchetes míos.

real de los fenómenos físicos se vuelve superflua; para elaborar leyes del movimiento no es necesario descubrir si el cajón se mueve por la fuerza que imprime al cajón el genio maligno o si está en reposo en un planeta con gravedad.

Si el cajón estuviese en caída libre (o sea en un campo gravitatorio), el observador ingenuo (no se sabe en caída libre) se vería flotando dentro del mismo, como si no tuviera peso, como si no hubiera gravedad. Si soltara un objeto, este quedaría quieto relativamente al cajón, flotando en el mismo lugar y si luego recibiera un ligero impulso, se movería con MRU, como los cuerpos en el vacío –se confirmaría la ley de inercia de Galileo–. Ningún experimento imaginable le permitiría determinar con certeza absoluta si el cajón está realmente en caída libre en un campo gravitatorio homogéneo o en reposo en el vacío, como él estaría autorizado a interpretar por el principio de equivalencia. Por eso, si el observador teorizara partiendo del supuesto de que el cajón está en reposo en el espacio exterior, lo haría con todo derecho. Los fenómenos en el cajón se producen *como si* este fuera un cuerpo de referencia inercial. Si pensara, en cambio, que dentro del cajón no hay gravedad porque está en caída libre, no tendría cómo demostrar que en verdad no está en reposo en el vacío. Si luego el cajón en caída libre comenzara a frenar repentinamente, el observador podría atribuir el tirón inercial que se genera y que percibe de modo claro y distinto a la aparición repentina de un campo gravitatorio, e interpretar que el cajón sigue en reposo, dado que una fuerza externa, una divinidad salvadora, evita la caída, tirando de una cuerda atada al techo y ejerciendo una fuerza con dirección contraria a la del tirón gravitacional. De hecho, en *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* y en *Diálogo sobre objeciones contra la teoría de la relatividad*, Einstein propone un experimento mental similar: un observador dentro de un tren siente un tirón hacia adelante y ve que los objetos a su alrededor salen violentamente despedidos en la misma dirección.

Sin duda es cierto que el observador que se halla en el vagón siente un tirón hacia adelante como consecuencia del frenazo, y es verdad

que en eso nota la no uniformidad del movimiento. Pero nadie le obliga a atribuir el tirón a una aceleración «real» del vagón. Igual podría interpretar el episodio así: «mi cuerpo de referencia (el vagón) permanece constantemente en reposo. Sin embargo, (durante el tiempo de frenada) existe respecto a él un campo gravitatorio temporalmente variable, dirigido hacia adelante. Bajo la influencia de este último, el terraplén, junto con la Tierra, se mueve no uniformemente, de suerte que su velocidad inicial, dirigida hacia atrás, disminuye cada vez más. Este campo gravitatorio es también el que produce el tirón del observador»⁴⁸.

En otro experimento mental de Einstein, que puede denominarse «del disco giratorio»⁴⁹, el observador ingenuo, «sentado en posición excéntrica sobre el disco»⁵⁰, interpreta la fuerza centrífuga del disco como gravedad⁵¹. El pulso del tiempo en sistemas acelerados no es homogéneo, sino que varía localmente de acuerdo con el valor del potencial gravitatorio (Φ) donde se sitúa el reloj, de modo que, cuanto mayor sea Φ , más rápido será el pulso del tiempo relativamente al sitio donde $\Phi = 0$ (periferia del disco, posición del observador).

Hay un reloj ($R1$) en la periferia del disco, donde está el observador, y otro ($R2$) en el centro del disco, donde el potencial gravitatorio es mayor. Según lo dicho, el reloj $R2$ tiene un pulso más veloz que $R1$. Si el observador en el disco puede interpretar que está en «reposo», atribuyendo el comportamiento de los cuerpos en torno suyo (y el tirón centrífugo) a la acción de un campo gravitatorio, significa que no puede deducir, por ejemplo, midiendo el tiempo en distintos lugares, si el campo gravitatorio es «meramente ficticio»

48 Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 35 ss. En *Diálogo*, aparece el mismo ejemplo, pero con el tren y las vías: «Según exige el sentido más simple del principio de relatividad general debemos admitir que (...) cabe de algún modo la posibilidad de que en verdad la vía y todo lo de afuera experimenta el cambio de velocidad y que, por lo tanto, todo el desastre ocurrido dentro del tren es solo una consecuencia del tirón que se transmite desde afuera hacia adentro del tren por "efecto de la gravedad" externa». Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 700.

49 Cf. Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 40.

50 Cf. Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 40.

51 «Supongamos (...) que el observador sentado en el disco considera este como un cuerpo de referencia "en reposo", para lo cual está autorizado por el principio de relatividad. La fuerza que actúa sobre él –y en general sobre los cuerpos que se hallan en reposo respecto al disco– la interpreta como la acción de un campo gravitatorio». Albert Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 40. *Cursiva mía*.

(*bloß fiktiv*)⁵², si está *realmente presente* o acaso si, en realidad, el disco está en movimiento acelerado.

Si el observador adquiriera certeza de su estado de movimiento a partir del tirón inercial, entonces el movimiento acelerado sería absoluto y esto, precisamente, haría imposible la generalización de la relatividad. Pero un observador no necesita tener certeza de su estado de movimiento para medir y formular leyes físicas. El campo interpretado es fingido, bien que no «meramente fingido» (*bloß fingiert*)⁵³.

A los componentes del campo gravitatorio en un punto del espacio-tiempo, por ejemplo, no corresponde ninguna de las magnitudes independientes de la elección del sistema de coordenadas; de modo que al campo gravitatorio *en un lugar* no le corresponde aún nada «físicamente real»; sí, no obstante, en conexión con otros datos. Por eso no se puede decir ni que el campo gravitatorio en un lugar es algo «real» ni tampoco que es algo «meramente ficticio»⁵⁴.

Es cierto que el observador fuera del cajón ve que no hay ningún campo. Sin embargo, la elección del sistema de coordenadas puede «simular» (*vortäuschen*)⁵⁵ la existencia de un campo o, por el contrario, hacerlo des-aparecer⁵⁶. La consideración de estos experimentos mentales nos permite ahora formular algunas conclusiones acerca del concepto de «como si» entendido como interpretación y acerca del problema planteado de la realidad o irrealidad del tiempo en relatividad.

52 Cf. Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 700.

53 Cf. Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 699.

54 Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 700.

55 Cf. Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 699.

56 El caso es completamente análogo a lo que sucede con las longitudes y la energía cinética de un sistema. Dice Einstein: «Nadie duda de la "realidad" de la energía cinética (...). Pero es claro que la energía cinética de un cuerpo depende del estado de movimiento del sistema de coordenadas. Mediante la elección adecuada [del sistema] es posible evidentemente hacer que la energía cinética del movimiento continuo de un cuerpo adopte en determinado instante un valor positivo aparente e incluso el valor cero. (...) Se puede anular la energía cinética total mediante la adecuada elección del sistema de coordenadas». Albert Einstein, «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», 699.

Conclusión

Weizsäcker explica con toda claridad la imposibilidad de distinguir movimiento uniforme y reposo:

«Relatividad» significa (...) relatividad del movimiento (...) Según la ley de inercia, un cuerpo conserva su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme si no actúa sobre él ninguna fuerza externa. De eso se sigue que a partir de ninguna medición de las fuerzas que actúan (*Wirkungskraft*) entre dos cuerpos se puede determinar cuál de ellos reposa y cuál se mueve uniformemente, solo se puede verificar la velocidad relativa⁵⁷.

Esta imposibilidad de determinar si un cuerpo de referencia reposa o está en movimiento no es un problema porque un observador puede hacer, por ejemplo, *como si* la vía estuviera en movimiento y el tren en reposo. Dada la relatividad de movimiento y reposo, la idea racional y coherente de «la vía en reposo y el tren en movimiento» no es «la realidad», sino un «como si», es decir, también una interpretación del observador, preso de la jaula relativista de la indistinción. Lo importante es que esta interpretación del estado de movimiento o reposo le permite constituir un sistema de referencia: el reloj en el tren en reposo, libre de los efectos relativistas, también el «como si» del tic-tac del otro reloj en movimiento dilatado. Uno de los relojes juega el rol de parámetro en esta ficción del reposo. Pero como los roles se pueden invertir con solo un cambio de perspectiva, no tiene sentido preguntar cuál de los dos relojes se mueve «realmente» (¿el que está en la vía o el que está en el tren?) o si alguno de los dos relojes marcha unilateralmente más lento que el otro. No se trata de un reposo «absoluto», sino «inmanente» a la legítima ficción –respaldada por las leyes físicas– que el observador interpreta.

El interferómetro es un ejemplo aún mejor, ya que pone de manifiesto la dualidad del tiempo y cómo el observador se mueve entre ficciones tales como «sistema geocéntrico» / «sistema

57 Carl von Weizsäcker, *Wahrnehmung der Zeit* (München: Carl Hanser Verlag, 1983), 127.

heliocéntrico». El interferómetro es un reloj de luz. Si el observador elige como marco de referencia la Tierra (pone en reposo a la Tierra) los rayos retornan a la fuente de luz simultáneamente; mientras que si elige el Sol como cuerpo de referencia, vería que los instantes de retorno de los rayos a la fuente son tiempos sucesivos. El observador intercambia una ficción por otra. Real es lo que se puede medir, dice Planck, como se ha señalado, pero la simultaneidad y la sucesividad del evento, «retorno de los rayos a la fuente emisora», se pueden medir. La sucesividad de los rayos es tan «real» como la simultaneidad, si todos los sistemas de referencia inerciales están en pie de igualdad. Uno y el mismo evento, el «retorno de los rayos a la fuente» es simultáneo y sucesivo, ya que su temporalidad varía de tal modo que el evento no sucede *al mismo tiempo*, sino en horas convertibles por la transformación de Lorentz.

A partir del experimento mental del cajón acelerado se puede ver también cómo tiene lugar una interpretación de la ficción del reposo y del movimiento por parte del observador y, a partir de eso, el efecto del movimiento acelerado sobre relojes, equivalente al de la gravedad, también por qué el tiempo no es real ni tampoco una mera apariencia. El cajón acelerado está lejos de todo cuerpo masivo capaz de provocar gravedad, o sea, una curvatura del espacio-tiempo «real».

Pero así como el observador puede hacer aparecer un campo gravitatorio, también puede hacerlo desaparecer simplemente interpretando la ficción del movimiento, si por ejemplo, se encontrara dentro de un cajón en reposo en un planeta pero hiciera como si un genio maligno tirara de una cuerda atada al cajón, diciendo: «la tensión de la cuerda del péndulo se debe a la masa inercial, a la aceleración del cajón». Si luego dijera, «la tensión se debe a la masa gravitatoria, puesto que estoy en reposo en un planeta con gravedad», no estaría diciendo una verdad, sino que, por lo que a él respecta –sus posibilidades de corroborar dicha hipótesis–, estaría interpretando un nuevo «como si». En el principio de relatividad y equivalencia entre masas gravitatoria e inercial está el fundamento

del cruce de las ficciones del cajón en reposo y el cajón acelerado. Un campo gravitatorio real y uno fingido son completamente equivalentes desde el punto de vista de las leyes físicas. A causa de la relatividad de movimiento y reposo, resulta imposible distinguir si la curvatura del espacio-tiempo es producida por la presencia efectiva de un cuerpo masivo. Si real es lo que se puede medir, el observador en el cajón acelerado mediría un campo gravitatorio ficticio, una curvatura «irreal» que no podría distinguir de ninguna otra forma de una curvatura provocada por una masa.

Bibliografía

- Aristóteles. *Física* (L. III-IV). Buenos Aires: Biblos, 2012.
- Bergson, Henry. *Duración y Simultaneidad (A propósito de la teoría de Einstein)*. Buenos Aires: Ediciones del Signo, 2005.
- Cassirer, Ernst. *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*. Hamburg: Felix Meiner Verlag, 2001.
- Der Spiegel online. «Eine hartknäckige Illusion. Das Zeitbild der modernen Physik». Consultada en agosto 25, 2017. <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13494900.html>.
- Einstein, Albert. «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen», *Jahrbuch für Radiaktivität und Elektronik* 4 (1907): 411-462.
- Einstein, Albert. «Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes», *Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik* 4 (1911): 898-908.
- Einstein, Albert. «Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie», *Die Naturwissenschaften* 48 (1918): 697-702.
- Einstein, Albert. «Autobiographical notes». En *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, editado por P. A. Schlipp, 2-95. New York: Tudor Publishing, 1951.

- Einstein, Albert. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Atalaya, 1998.
- Feynman, Richard. *Física: Radiación y calor (Vol. 1)*. México: Addison Wesley & Longman Iberoamericana, 1998.
- Guerrero Pino, Germán. «Einstein y la realidad del espacio: Realismo y convencionalismo», *Praxis filosófica* 22 (2006). Consultada en Agosto 24, 2017. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-46882006000100004.
- Heidegger, Martin. *Sein und Zeit (Ga 2)*. Frankfurt am Main: Klostermann, 1977.
- Heidegger, Martin. *Prolegomena zur Geschichte des Zeitbegriffs (Ga 20)*. Frankfurt a. M.: Klostermann, 1979.
- Heidegger, Martin. *Vorträge und Aufsätze (Ga 7). Wissenschaft und Besinnung*. Frankfurt a. M.: Klostermann, 2000.
- Husserl, Edmund. «Grundlegende Untersuchungen zum phänomenologischen Ursprung der Räumlichkeit der Natur». En *Philosophical Essays in memory of Edmund Husserl*, editado por Marvin. Farber, 307-326. Cambridge: Harvard university press, 2014.
- Luminet, Jean-Pierre, «Time, topology and the twin paradox». Consultada en Agosto 23 2017, <https://arxiv.org/pdf/0910.5847v1.pdf>. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199298204.003.0018
- Newton-Smith, William. *The structure of time*. London: International library of philosophy, 1984.
- Rovelli, Carlo. *L'ordine del tempo*. Milán: Adelphi, 2017.
- Ruhrländer, Michael. *Aufstieg zu den Einsteingleichungen. Einführung in die quantitative allgemeine Relativitätstheorie*. Berlin: Pro Business, 2014.
- Safranski, Rüdiger. *Zeit. Was sie mit uns macht und was wir aus ihr machen*. Frankfurt am Main: Fischer, 2017.

- Vigo, Alejandro. *Estudios aristotélicos*. Navarra: Eunsa, 2006.
- Taylor, Edwin y Wheeler, John. *Spacetime physics*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1966.
- Weehler, John. «Information, physics, quantum: The search for links». Consultada en Agosto 24, 2017. <http://cqi.inf.usi.ch/qic/wheeler.pdf>.
- Weizsäcker –von, Carl Friedrich. *Wahrnehmung der Zeit*. München: Carl Hanser Verlag, 1983.
- Wieland, Werner. *Die aristotelische Physik*. Göttingen: Vandenhoeck u. Ruprecht, 1962.

Enviado: 28 de agosto de 2017

Aceptado: 29 de diciembre de 2017