Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia
Vol. 22 n.o 44 (2022): 105-131
ISSN: 0124-4620 (papel) & 2463-1159 (electrónico)

Fecha de recepción: 12/05/2021
Fecha de aprobación: 06/12/2021
Fecha de publicación: 29/06/2022
*https://doi.org/10.18270/rcfc.v22i44.3524*

# La relevancia de la invariancia frente a inversión temporal para la flecha del tiempo*

## The Relevance of the Invariance under Time-reversal to the Arrow of Time

Olimpia Lombardi
CONICET - Universidad de Buenos Aires
Buenos Aires, Argentina.
olimpiafilo@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2204-7902

Leonardo Vanni
Universidad de Buenos Aires
Buenos Aires, Argentina.
idaeos@gmail.com

**RESUMEN**

En este artículo se argumenta que la existencia de leyes invariantes frente a inversión temporal no es condición indispensable para la existencia de la flecha del tiempo. Esta última puede definirse como una propiedad global y geométrica del espacio-tiempo que no se basa en consideraciones entrópicas ni requiere de la existencia de leyes no invariantes frente a la inversión temporal. A su vez, si el espacio-tiempo cumple ciertas condiciones, la flecha global se traslada a los contextos locales como un flujo tetradimensional de energía que apunta en la misma dirección temporal en todos los puntos espacio-temporales.

**Palabras clave:** flecha del tiempo; invariancia frente a inversión temporal; espacio-tiempo; orientabilidad temporal; tiempo global; simetría temporal; flujo tetradimensional de energía.

* Este artículo se debe citar: Lombardi, Olimpia & Vanni, Leonardo. “La relevancia de la invariancia frente a inversión temporal para la flecha del tiempo”. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia* 22.44 (2022): 105-131. *https://doi.org/10.18270/rcfc.v22i44.3524*

**ABSTRACT**

In this article is it argued that the existence of physical laws that are invariant under time-reversal is not an indispensable condition for the existence of the arrow of time. Such an arrow can be defined as a global and geometric property of space-time, which neither is based on entropic considerations nor requires the existence of time-reversal invariant laws. In turn, if the space-time satisfies certain conditions, the global arrow can be transferred to the local contexts as a four-dimensional energy flow that points to the same time direction in all space-time points..

**Keywords:** arrow of time; time-reversal invariance; space-time; time orientability; global time; time symmetry; four-dimensional energy flow.

# 1. Introducción

En el campo de la física, la flecha del tiempo suele discutirse en términos de aumento de entropía. Lo que subyace a esta estrategia es el supuesto de que la definición de la flecha del tiempo requiere de una ley no invariante frente a inversión temporal, y puesto que las leyes fundamentales de la física sí son invariantes, lo único que resta es apelar a la segunda ley de la termodinámica. Sin embargo, esto conduce a otro problema: ¿cómo puede surgir la asimetría temporal termodinámica sobre la base de leyes subyacentes que son invariantes frente a inversión temporal?

Los problemas se agudizan cuando se comprueba que no existe consenso acerca del concepto mismo de invariancia frente a inversión temporal. En efecto, diversos autores disienten respecto al modo en que dicha invariancia se define y, con ello, a si ciertas leyes físicas específicas son invariantes o no frente a inversión temporal. Tal disenso parece fatal para el problema de la flecha del tiempo: si para fijarla se requiere al menos de una ley invariante frente a inversión temporal, pero no hay acuerdo acerca del propio significado de dicha invariancia, lejos nos encontramos de brindar una respuesta satisfactoria al problema de la flecha del tiempo.

Sin embargo, el panorama no se presenta tan sombrío si comenzamos por precisar el problema con mayor detalle. Es cierto que si existiera una ley fundamental que no es invariante frente a inversión temporal, se podría dar cuenta de la flecha del tiempo, pero no es cierto que la existencia de al menos una ley invariante frente a inversión temporal es condición indispensable para la existencia de la flecha del tiempo. Precisamente es en favor de esta última afirmación que argumentaremos en el presente trabajo, mostrando que la flecha del tiempo puede definirse como una propiedad global y geométrica del espacio-tiempo que no requiere de la existencia de leyes no invariantes frente a inversión temporal.

Con dicho propósito, este artículo se organiza del siguiente modo: en la sección 2 comenzaremos por distinguir entre conceptos que suelen asimilarse o confundirse en la discusión acerca de la flecha del tiempo; en particular, brindaremos una clara caracterización de los conceptos de invariancia ante inversión temporal, irreversibilidad y flecha del tiempo. Sobre esta base, en la sección 3 repasaremos los principales desacuerdos acerca del concepto de invariancia frente a inversión temporal y cómo se relacionan con diferentes concepciones acerca de las simetrías en física. El nudo gordiano se cortará en la sección 4, en la que presentaremos el enfoque global y geométrico señalando los requisitos que el espacio-tiempo debe cumplir para la existencia de una flecha del tiempo y el modo en que la flecha global se traslada a los contextos locales. En la sección 5 discutiremos la relación entre la flecha del tiempo global y geométrica, y la invariancia ante inversión temporal de las leyes físicas, tanto en el caso de la relatividad general como en el de las teorías locales no-relativistas. Finalmente, la sección 6 se dedicará a presentar las conclusiones generales del trabajo.

## 2. Un paso previo: la distinción clara entre conceptos

Cuando se aborda el problema de la flecha del tiempo, el primer obstáculo a enfrentar es la confusión conceptual: en muchos casos la falta de consenso se debe principalmente a que se identifican conceptos diferentes y se subsumen distintos problemas bajo un mismo rótulo. En particular, se suelen identificar el problema de la irreversibilidad y el de la flecha del tiempo, como si la irreversibilidad fuera la clave para comprender el origen y la naturaleza de la flecha del tiempo, y se vincula la irreversibilidad con la invariancia frente inversión temporal (a partir de aquí, t-invariancia). Por este motivo, comenzaremos por elucidar los conceptos involucrados en el debate.

Una ley dinámica es *t-invariante* cuando la ecuación que la representa es invariante frente a la aplicación del operador de inversión temporal T. Sin duda, esta caracterización reposa esencialmente en cómo se define el operador T. Como veremos en la próxima sección, si bien hay acuerdo en que el operador debe realizar la inversión de la variable tiempo, esto es, la transformación $t \rightarrow -t$, no hay acuerdo en cuanto al modo en que opera sobre otras variables. Por otra parte, una evolución temporal, representada por una solución de una ley dinámica, es *reversible* cuando puede desarrollarse en sentido inverso (Sklar 1993); en general, esto sucede cuando la solución correspondiente no tiene atractores, es decir, no existen "estados de no retorno". Toda evolución que tiende a un equilibrio será, entonces, irreversible pues el equilibrio es un estado del cual el sistema ya no puede escapar espontáneamente (Earman 1986).

Estas caracterizaciones, si bien pueden seguir precisándose, ya ponen de manifiesto que ambos conceptos son diferentes en la medida en que se aplican a entidades distintas. La t-invariancia es una propiedad de las leyes dinámicas, expresadas mediante ecuaciones dinámicas y, a fortiori del conjunto de las evoluciones posibles, representadas por las soluciones de dichas ecuaciones. La reversibilidad es una propiedad de una única evolución temporal compatible con la ley dinámica, evolución que se representa por una solución de la ecuación dinámica correspondiente. Las dos propiedades ni siquiera están correlacionadas: es posible obtener evoluciones reversibles de leyes no t-invariantes y evoluciones irreversibles de leyes t-invariantes (ver ejemplos en Castagnino, Lara & Lombardi 2003).

Sobre la base de estas caracterizaciones, *el problema de la irreversibilidad* se puede plantear de un modo sencillo: cómo explicar las evoluciones irreversibles en términos de leyes t-invariantes. Una vez que se admite que reversibilidad y t-invariancia se aplican a entidades diferentes, resulta claro que no hay un obstáculo conceptual para la resolución del problema de la irreversibilidad: nada impide que una ley t-invariante conduzca a evoluciones irreversibles. Huw Price (1996) ilustra este punto con la analogía de una fábrica que produce igual número de sacacorchos dextrógiros y levógiros: la producción en su conjunto es completamente simétrica, pero cada sacacorchos individual es espacialmente asimétrico. Por supuesto, si bien la respuesta conceptual es simple, se requiere de una gran cantidad de trabajo teórico para obtener evoluciones irreversibles a partir de una dinámica t-invariante subyacente. Pero el punto a enfatizar aquí es que la pregunta sobre la flecha del tiempo no necesita ser invocada para abordar el problema de la irreversibilidad. De hecho, cuando se habla de procesos de aumento de entropía o de procesos de decaimiento, se presupone un aumento de entropía o el decaimiento hacia el futuro; cuando se considera un proceso que se desarrolla desde el no-equilibrio hasta el equilibrio, implícitamente se ubica el equilibrio en el futuro. En general, cualquier evolución que tiende a un atractor se la concibe como aproximándosele en el futuro. Esto significa que la distinción entre pasado y futuro suele presuponerse en los tratamientos tradicionales del problema de la irreversibilidad. Pero, entonces, ¿qué es la flecha del tiempo que introduce la distinción entre las dos direcciones temporales?

El problema de la flecha del tiempo debe su origen a la asimetría intuitiva entre pasado y futuro. Experimentamos el orden temporal del mundo como "dirigido": si dos eventos no son simultáneos, uno de ellos es anterior al otro. Además, accedemos al pasado y al futuro de manera muy diferente: recordamos el pasado y predecimos el futuro. La naturaleza metafísica última del tiempo ha sido uno de los intereses tradicionales de la filosofía desde su nacimiento. Parece haber algo esencialmente evasivo en nuestra experiencia del tiempo y su "fluir" del pasado al futuro a través del presente. Sin embargo, no es el problema de la experiencia del tiempo el que nos ocupa aquí, sino el de fundamentar la flecha del tiempo en el contexto de la física.

La dificultad en este caso es que nada hay en las leyes dinámicas fundamentales que distinga, de manera no arbitraria, entre pasado y futuro tal como los concebimos en nuestro lenguaje ordinario y en nuestra vida cotidiana. Se podría objetar que la física asume implícitamente esta distinción con el uso de expresiones temporalmente asimétricas, como "cono de luz futuro", "condiciones iniciales", "tiempo creciente", etc. Sin embargo, este no es el caso ya que la distinción que estos términos introducen es puramente convencional; por ejemplo, si intercambiáramos los términos "norte" por "sur" para nombrar los polos de un imán, nada cambiaría en la descripción de los fenómenos magnéticos puesto que se trata de objetos formalmente idénticos. En cambio, cuando se nombran con distintos nombres objetos que no son formalmente idénticos, se señala una diferencia sustancial entre ellos; por ejemplo, la diferencia entre los dos polos de la Tierra es sustancial puesto que en el Polo Norte hay un continente y en el Polo Sur no lo hay (ver presentación detallada en Castagnino & Lombardi 2005). Comprendido este punto, queda claro que la física usa los términos "pasado" y "futuro" de una manera convencional. Por tanto, en física la cuestión no puede plantearse en términos de identificar el futuro como distinto del pasado. El *problema de la flecha del tiempo* debe formularse como el problema de encontrar una diferencia sustancial entre las dos direcciones temporales.

La principal dificultad frente a esta cuestión reside en nuestra perspectiva antropocéntrica: la diferencia entre pasado y futuro está tan profundamente arraigada en nuestro lenguaje y nuestros pensamientos que es muy difícil deshacerse de estos supuestos asimétricos. Por lo tanto, cuando pretendemos abordar el problema de la flecha del tiempo desde una perspectiva purgada de nuestras intuiciones temporales, debemos hacer el esfuerzo de evitar las conclusiones derivadas de presuponer implícitamente nociones temporalmente asimétricas. Como afirma Price (1996), debemos situarnos conceptualmente fuera del tiempo y, desde allí, considerar la realidad en términos atemporales. Esta perspectiva atemporal nos impide utilizar expresiones temporalmente asimétricas de una manera no convencional: la suposición sobre la diferencia entre pasado y futuro no es legítima en el contexto del problema de la flecha del tiempo.

Pero, entonces, ¿a qué nos referimos con "flecha del tiempo" cuando aceptamos estas restricciones? Por supuesto, la expresión tradicional acuñada por Arthur Eddington solo tiene un sentido metafórico: su significado debe entenderse por analogía. Reconocemos la diferencia entre los dos extremos de una flecha sobre la base de sus propiedades geométricas; por lo tanto, podemos distinguir sustancialmente entre sus dos direcciones independientemente de nuestra perspectiva particular. De manera análoga, concebiremos el problema de la flecha del tiempo en términos de *la posibilidad de establecer una distinción sustancial entre las dos direcciones del tiempo sobre la base de argumentos exclusivamente físicos*.

## 3. El problema de la t-invariancia

Recordemos que la t-invariancia es una propiedad que, en principio, pueden o no poseer las leyes de la física: se trata de su invariancia frente a la aplicación del operador de inversión temporal T que, al menos, introduce la transformación $t \rightarrow -t$. En los casos tradicionales no parece haber dificultad en decidir el estatuto de una ley en cuanto a su t-invariancia. Por ejemplo, la segunda ley de Newton expresada como $F(\mathrm{x}) = m\, dx^2/dt^2$—donde $x$, y $F(\mathrm{x})$ representan la distancia a un cierto origen, la masa y la fuerza en la dirección , respectivamente— es t-invariante dado que se trata de una ecuación diferencial de segundo orden que incluye una derivada segunda respecto al tiempo. Por el contrario, la ley de Fourier de conducción del calor, —donde *Q*, *K*, *A*, *T* y $x$ representan el calor que atraviesa una superficie, la conductividad térmica, el área de la superficie, la temperatura y la distancia a un cierto origen en la dirección perpendicular a la superficie, respectivamente—, resulta no t-invariante puesto que es una ecuación diferencial de primer orden que incluye una derivada primera respecto al tiempo. De este modo, la decisión respecto de la t-invariancia o no de una ley parece ser una cuestión sencilla basada en criterios puramente formales. Sin embargo, el asunto está lejos de ser tan simple cuando se trata de leyes que involucran otras magnitudes físicas, ya que no existe consenso acerca del modo en que el operador de inversión temporal T actúa sobre tales magnitudes.

Es interesante señalar que, en general, los físicos en su práctica cotidiana no se preguntan acerca de esta cuestión: ellos “saben” cuál es la forma de T y, por tanto, cómo actúa sobre las distintas magnitudes involucradas. Desde esta perspectiva ortodoxa, las teorías físicas tradicionales, como la mecánica clásica, el electromagnetismo y la mecánica cuántica, son t-invariantes. Sin embargo, desde un punto de vista filosófico, la pregunta relevante es no solo cómo se define el operador de inversión temporal T, sino también por qué se lo define de ese modo. Es frente a tales interrogantes que surge un encendido debate (ver Savitt 1996 para un análisis cuidadoso de varios operadores de inversión temporal; ver Peterson 2015 para un enfoque actualizado).

Según Mario Castagnino, Manuel Gadella y Olimpia Lombardi (2005), el operador T efectúa la transformación $t \to -t$ e invierte el signo de todas las magnitudes dinámicas cuya definición en función del tiempo es no invariante frente a la transformación $t \to -t$. Por ejemplo, en mecánica clásica de partículas, la acción de T no invierte las posiciones $q$ de las partículas, $\mathrm{T}q = q$ , pero sí sus momentos cinéticos $p$, $\mathrm{T}p = p$, puesto que estos se definen en términos de las correspondientes velocidades. A su vez, en electromagnetismo, T deja invariantes los campos eléctricos, $\mathrm{T}\, E = E$ , e invierte las velocidades de las cargas, $\mathrm{T}\, v = -v$, y los campos magnéticos, $\mathrm{T}\, B = -B$, ya que estos se definen en función de tales velocidades. De este modo, tanto las leyes de la mecánica clásica de partículas como las leyes del electromagnetismo resultan ser t-invariantes, según la ortodoxia.

Desde una postura abiertamente heterodoxa, David Albert (2000) sostiene que las teorías físicas tradicionalmente consideradas t-invariantes en realidad no lo son. No se trata tan solo de que el electromagnetismo no es t-invariante, sino que tampoco lo es

> […] la mecánica cuántica, tampoco la teoría relativista de campos cuánticos, ni la relatividad general, ni la supergravedad, ni la teoría de cuerdas supersimétrica, y tampoco (para el caso) lo son ninguno de los candidatos a teoría fundamental que alguien ha tomado en serio desde Newton. Y todo lo que todos han dicho por el contrario […] está equivocado. (Albert 2000 14)

Por ejemplo, según el autor el electromagnetismo no es t-invariante porque el campo magnético no debe invertir su signo frente a la aplicación del operador T: "Los campos magnéticos no son el tipo de cosas a las que una adecuada transformación de inversión temporal puede invertir. Los campos magnéticos no son, ni lógica ni conceptualmente, las tasas de cambio de nada" (Albert 2000 20). John Earman (2002) critica severamente la posición de Albert considerando que si *A* produce *B* y *A* se cambia de signo debido a una inversión temporal, entonces *B* también debe ver-se afectado por tal inversión. Este es el caso del campo magnético: si las velocidades de las cargas que atraviesan un cable se invierten, entonces el campo magnético producido por la corriente eléctrica también se invierte. En su crítica a Albert, Earman expresa en términos causales aquello que Castagnino, Gadella y Lombardi (2005) formulan en términos definicionales.

Es claro que el alcance que cada autor adjudica al operador de inversión temporal T depende esencialmente de sus supuestos acerca de cuáles magnitudes son básicas y cuáles dependen causal o definicionalmente de aquellas. Por lo tanto, de tales supuestos depende la propia definición de t-invariancia adoptada.

El problema se torna más agudo en el caso de la mecánica cuántica. Según la perspectiva ortodoxa, el operador de inversión temporal es antiunitario: T no solo efectúa la transformación $t \to -t$, sino que además introduce la transformación. Ante la aplicación del operador antiunitario T, la ecuación de Schrödinger resulta t-invariante. Las razones que se esgrimen para utilizar el operador antiunitario T en lugar del operador unitario T*, que solo efectúa la transformación $t \to -t$, son diversas. En algunos casos la justificación se basa en una analogía clásica: la transformación $t \to -t$ del operador T* no conduce a la transformación del momento como $P \to -P$, que es el resultado esperado puesto que es el modo en que el momento se transforma ante inversión temporal en mecánica clásica (Earman 2002). En otros casos se argumenta que T* invertiría los valores de la energía, de modo que el espectro de energía no resultaría acotado a un valor mínimo, lo cual resulta físicamente inaceptable (Sakurai 1994). En este sentido, algunos autores exigen directamente que el hamiltoniano del sistema cerrado sea invariante frente a inversión temporal, lo cual requiere de un operador de inversión temporal T antiunitario (Gasiorowicz 1966), a veces no debido al modo en que debe transformarse el espectro de energía, sino porque solo de ese modo la ecuación de Schrödinger resulta t-invariante (Sachs 1987). En esta línea de argumentación, hay quienes consideran que ciertas simetrías de las leyes físicas son a priori:

> Una simetría puede ser a priori, es decir, la ley física se construye de tal manera que respete esa simetría particular por construcción. Así lo ejemplifican las

> simetrías espacio-temporales, porque el espacio-tiempo es el teatro en el que actúa la ley física [...], por lo que debe respetar las reglas del teatro. (Dürr & Teufel 2009 43-44)

Desafiando la ortodoxia acerca de inversión temporal en mecánica cuántica, algunos autores han alzado la voz en su contra apelando a razones filosóficas: el operador antiunitario T no ofrecería una representación conceptualmente sólida y clara de la inversión del tiempo. Por un lado, una tradición de larga data, que se remonta a los trabajos de Giulio Racah (1937) y Satosi Watanabe (1955), aboga por un operador de inversión temporal unitario para las teorías cuánticas. En la misma línea, Oliver Costa de Beauregard (1980) defiende el punto de vista heterodoxo al afirmar que el operador unitario T*, que invierte exclusivamente la dirección del tiempo cambiando el signo de la variable t, es más acorde a los contextos relativistas. Por su parte, Craig Callender (2000) y Albert (2000) sostienen que la ecuación de Schrödinger en realidad debería considerarse no t-invariante ya que no es invariante bajo el operador unitario T*, que representa más correctamente lo que significa "invertir la dirección del tiempo". Siguiendo esta línea, Jill North (2009 212) afirma:

> ¿Qué es una transformación de inversión temporal? ¡Solo un cambio de dirección del tiempo! Eso es todo lo que hay en una transformación que cambia cómo son las cosas con respecto al tiempo: un cambio en la dirección del tiempo mismo.

Para estos filósofos, si la t-invariancia de una ley nos dice algo sobre la estructura del tiempo, la inversión temporal solo debería invertir la dirección del tiempo sin agregados adicionales. En particular, si la cuestión es el problema de la flecha del tiempo y la t-invariancia de la teoría se considera relevante para este problema, imponer la t-invariancia de la ecuación de Schrödinger como requisito a priori que la teoría debe satisfacer resulta una estrategia circular (para discusiones ulteriores, ver Roberts 2017; López & Lombardi 2019).

El propósito aquí no es analizar en detalle el debate acerca de la definición de t-invariancia y sopesar los argumentos en favor de las diferentes posiciones (ver López 2021). El objetivo de esta sección ha sido únicamente poner de manifiesto los profundos desacuerdos que aún existen respecto a cómo debe concebirse la inversión temporal. Es claro entonces que, si se hace depender la existencia de la flecha del tiempo de la t-invariancia de las leyes físicas, tales desacuerdos tienen fuertes repercusiones sobre el problema mismo de la flecha del tiempo. En la siguiente sección mostraremos que es posible cortar el nudo gordiano, definiendo la flecha del tiempo sin apelar a la t-invariancia de las leyes físicas.

## 4. La flecha del tiempo global-geométrica

En el contexto de un enfoque entrópico de la flecha del tiempo, muchos autores han considerado que la dirección pasado-a-futuro se define como la dirección en a que proceden las evoluciones irreversibles, esto es, que tienden al equilibrio. Ahora bien, supongamos que hemos resuelto el problema de la irreversibilidad y, por tanto, contamos con la descripción de todas las evoluciones irreversibles del universo. Sin embargo, dado que aún no hemos establecido una diferencia sustancial entre ambas direcciones del tiempo, no tenemos forma de decidir hacia qué dirección temporal procede cada evolución hacia el equilibrio. Por supuesto, obtendríamos la flecha del tiempo si pudiéramos coordinar los procesos irreversibles de tal manera que todos o la mayoría de ellos procedieran paralelamente en la misma dirección temporal. Pero esto es precisamente lo que la física local no puede ofrecer: solo mediante consideraciones globales se pueden coordinar todos los procesos irreversibles para afirmar que todos ellos tienen al equilibrio en una misma dirección temporal. Esto significa que la flecha global del tiempo juega el papel del escenario de fondo donde es posible hablar de manera significativa de la dirección temporal de todos o la mayoría de los procesos irreversibles del universo, y este escenario no puede construirse mediante teorías locales que solo describen fenómenos confinados en pequeñas regiones del espacio-tiempo. Una vez que se acepta que el problema de la flecha del tiempo no puede ser abordado desde una perspectiva local, entra en juego la relatividad general. Sobre esta base, adoptaremos la "herejía de la dirección del tiempo" formulada por Earman (1974), según la cual la flecha del tiempo, si existe, es una característica del espacio-tiempo que no necesita ni puede ser reducida a propiedades no temporales.

Según la relatividad general, las propiedades físicas básicas son la geometría del espacio-tiempo, representada por el tensor métrico Lorentziano $g_{\mu\nu}$, y la distribución de materia-energía sobre el espacio-tiempo, representada por el tensor de energía-momento $T_{\mu\nu}$. Un espacio-tiempo relativista general es un par ordenado $(M, g_{\mu\nu})$, donde $M$ es una variedad tetradimensional pseudoriemanniana y $g_{\mu\nu}$ es un tensor métrico lorentziano definido sobre $M$ tal que satisface, para algún tensor de energía-momento $^{\mu\nu}$, las ecuaciones de campo de Einstein, $R_{\mu\nu} - (1/2)\, R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G g_{\mu\nu}$ , donde $R_{\mu\nu}$ es el tensor de Ricci, $R$ es el escalar de Ricci, $\Lambda$ es la constante cosmológica y  es la constante de gravitación. Respecto a la flecha del tiempo, algunos autores se han preguntado si se trata de una propiedad del tiempo mismo o de una propiedad de la disposición de las cosas en el tiempo (ver, por ejemplo, Price 1996). Es interesante señalar que, en el contexto de la relatividad general, ambas situaciones conceptualmente diferentes están estrechamente relacionadas: las ecuaciones de campo expresan la estrecha correlación legal entre las propiedades geométricas del espacio-tiempo y la distribución de materia-energía sobre ese espacio-tiempo.

Para el cosmólogo, el universo es un objeto espacio-temporal de cuatro dimensiones. Este objeto, en tanto tal, puede ser simétrico o asimétrico en sus diferentes dimensiones. Cuando se considera el problema de la flecha del tiempo, la cuestión es averiguar si el universo es temporalmente asimétrico: dicha asimetría consiste en la asimetría de las propiedades geométricas del espacio-tiempo a lo largo de la dimensión temporal. Sin embargo, por supuesto, las cosas no son tan sencillas. Muchos espacio-tiempos diferentes, de topologías extraordinariamente variadas, son consistentes con las ecuaciones de campo y algunos de ellos tienen características que no permiten definir las dos direcciones del tiempo de manera global, ni siquiera hablar de un tiempo único para el universo en su conjunto. Por lo tanto, es necesario establecer (i) las condiciones que debe cumplir un espacio-tiempo para ser espacialmente asimétrico, (ii) cómo se define la asimetría temporal cuando esas condiciones se cumplen, y (iii) de qué modo tal asimetría global se transfiere al ámbito local en términos de alguna magnitud propia de las teorías locales de la física. A continuación, abordaremos cada uno de los aspectos.

## 4.1. Condiciones: orientabilidad temporal y tiempo global

Un espacio tiempo $(M, g_{\mu\nu})$ es *temporalmente orientable* (t-orientable) si puede definirse sobre $M$ un campo vectorial continuo y no nulo que es no tipo-espacio en todos los puntos. Mediante este campo vectorial es posible particionar el conjunto de todos los semiconos de luz del espacio-tiempo en dos subconjuntos: $C^+$, cuyos semiconos contienen los vectores del campo vectorial, y $C^-$, cuyos semiconos no los contienen. La importancia de esta condición es que, en un espacio-tiempo no t-orientable, es posible transformar un vector tipo-tiempo que apunta hacia una dirección en un vector tipo-tiempo que apunta en la otra dirección mediante un transporte continuo que siempre mantiene los vectores tipo-tiempo como tales (por ejemplo, dando la vuelta a una "cinta de Moebius" temporal); por lo tanto, la distinción entre semiconos de luz futuros y pasados no puede definirse unívocamente a nivel global.

Earman (1974) fue uno de los primeros autores que enfatizó la relevancia de la orientación temporal para el problema de la flecha del tiempo. Su posición fue cuestionada por Geoffrey Matthews (1979) sobre la base de que si la flecha del tiempo se define por medio de una ley local, un espacio-tiempo puede tener flechas de tiempo regionales pero sin contar con una flecha global: según la visión tradicional de Ludwig Boltzmann, solo ciertas regiones del universo tienen direcciones temporales y estas pueden no ser las mismas en todas las regiones. Sin embargo, esta posición implica que, en los puntos de frontera entre regiones donde la flecha del tiempo apunta en direcciones diferentes, la flecha no está unívocamente definida y, con ello, la ley local que la define pierde su validez. Este hecho contradice el principio metodológico de *universalidad*, incuestionablemente aceptado en la cosmología contemporánea, según el cual las leyes de la física son válidas en todos los puntos del espacio-tiempo (para más detalles, ver Castagnino, Lombardi & Lara 2003). Esto significa que la posibilidad de que las flechas del tiempo apunten en direcciones distintas en diferentes regiones del espacio-tiempo exige no solo una definición local de estas flechas, sino también ignorar las consideraciones globales provenientes de la cosmología.

Si bien la t-orientabilidad del espacio-tiempo excluye topologías que no permiten distinguir globalmente entre las direcciones de sus conos de luz, aún no permite hablar de un tiempo global para todo el universo. En efecto, un espacio-tiempo puede ser tal que no sea posible dividir el conjunto de todos los eventos en clases de equivalencia, disjuntas y exhaustivas, de modo que: (i) cada una de las clases disjuntas sea una hipersuperficie tipo-espacio y (ii) tales hipersuperficies puedan ser ordenadas en el tiempo. En particular, esto sucede cuando el espacio-tiempo contiene curvas temporales cerradas. Para que ello no ocurra, el espacio-tiempo $(M, g_{\mu\nu})$ debe poseer un *tiempo global*, lo cual se cumple si existe una función tiempo global $t: M \rightarrow R$ cuyo gradiente es tipo-tiempo sobre toda la variedad. Cuando esta condición se cumple, el valor del tiempo global aumenta a lo largo de cualquier curva no tipo-espacio dirigida hacia una de las direcciones temporales. La existencia de tal función garantiza que el espacio-tiempo se puede particionar globalmente en hipersuperficies de simultaneidad que definen una *foliación* del espacio-tiempo (Schutz 1980). Además, la existencia de un tiempo global no solo evita "patologías" temporales, como las curvas temporales cerradas, sino que también excluye la posibilidad de que la más mínima variación de la métrica conduzca de nuevo a ellas (Hawking & Ellis 1973).

## 4.2. Asimetría temporal

Hasta aquí se han presentado las condiciones que el espacio-tiempo debe cumplir para la existencia de la flecha del tiempo: t-orientabilidad y existencia de tiempo global, pero aún nada se ha dicho acerca de su orientación. Como se señaló en la sección 2, el problema de la flecha del tiempo consiste en establecer una diferencia sustancial entre las dos direcciones temporales. Por lo tanto, en el plano cosmológico, se trata de determinar si el espacio-tiempo es asimétrico respecto de sus propiedades geométricas a lo largo del tiempo global.

A fin de precisar esta idea, la simetría temporal se define del siguiente modo: un espacio-tiempo, que posee un tiempo global $t$, es *temporalmente simétrico* (t-simétrico) si (i) existe un difeomorfismo que invierte las orientaciones temporales pero preserva la métrica $g_{\mu\nu}$, y (ii) existe una hipersuperficie tipo-espacio correspondiente a , donde es una constante, tal que el difeomorfismo deja invariante dicha hipersuperficie. Intuitivamente, esto significa que, desde la hipersuperficie tipo-espacio correspondiente a , el espacio-tiempo "se ve igual" en ambas direcciones temporales. Por lo tanto, si un espacio-tiempo t-orientable con tiempo global es t-asimétrico, no encontraremos ninguna hipersuperficie tipo-espacio que divida el espacio-tiempo en dos "mitades", una imagen especular de la otra respecto de sus propiedades geométricas intrínsecas.

De este modo, la orientación temporal puede establecerse de manera sustancial sobre la base de la t-asimetría. En un espacio-tiempo t-asimétrico, cualquier hipersuperficie tipo-espacio correspondiente a un tiempo global $t = t_A$ divide la variedad en dos secciones que son diferentes entre sí: la sección $t > t_A$ es sustancialmente diferente a la sección $t < t_A$ respecto a sus propiedades geométricas. Esto significa que la dirección temporal $t < t_A$ a $t > t_A$ es geométrica y sustancialmente diferente de la dirección temporal a , de manera análoga a la diferencia sustancial, geométricamente fundamentada, entre las dos direcciones de una flecha física. Una vez establecida la diferencia sustancial entre las dos direcciones temporales, podemos elegir cualquier punto del espacio-tiempo y llamar convencionalmente a la dirección hacia $t > t_A$ "futuro" y a la dirección hacia $t > t_A$ "pasado", o viceversa: los nombres son convencionales, pero en cualquier caso el pasado es sustancialmente diferente del futuro.

## 4.3. De la flecha global a la flecha local

Hasta aquí se ha establecido una diferencia geométrica entre las dos direcciones temporales. Ahora la cuestión es si es posible definir la flecha del tiempo mediante algún objeto matemático que también se pueda interpretar en términos de las magnitudes más "familiares" de la física.

Puesto que el tensor de energía-momento representa la densidad y el flujo de energía y momento en cada punto del espacio-tiempo, sería deseable definir la flecha del tiempo en términos de $T_{\mu\nu}$. Esto puede efectuarse si se cumplen las siguientes dos condiciones: (i) la *densidad de materia-energía es no nula* en todo el espacio-tiempo, $T^{00} \neq 0$ , y (ii) se cumple la *condición de energía dominante* en todo el espacio-tiempo,

$T^{00} \geq |T^{\alpha\beta}$ para todo (Castagnino & Lombardi 2009). Estas condiciones no imponen requisitos muy fuertes. La primera exige que no haya un vacío perfecto en ninguna región del universo, situación que parece ser físicamente realista ya que en cualquier región del universo existe, al menos, radiación cósmica de cuerpo negro. Según Stephen Hawking y George Ellis (1973), hay buenas razones para creer que la segunda condición se cumple en todas las situaciones físicamente plausibles. Podrían existir casos "anómalos" en los que la condición de energía dominante no se cumple, por ejemplo, en la vecindad de la garganta de un agujero de gusano (Visser 1996), pero aún no hay evidencia experimental alguna en favor de la existencia de agujeros de gusano.

Consideremos una base ortonormal en cada punto del espacio-tiempo: $V_{(\alpha)} = (V^0_{(\alpha)}, V^1_{(\alpha)}, V^2_{(\alpha)}, V^3_{(\alpha)})$, con $\alpha$=0,1,2,3. En dicho punto, $T^{0\alpha} V_{(\alpha)}$ son las coordenadas del tensor de energía-momento en esa base y puede concebirse como la representación del flujo tetradimensional de energía en ese punto. Si allí se cumple la condición de energía dominante, $T^{00} \geq |T^{\alpha\beta}$ para todo $\alpha\beta$, entonces se cumple como caso particular que $T^{00} \geq |T^{\alpha\beta}$, lo cual implica que el flujo de energía $T^{0\alpha} V_{(a)}$ es no tipo-espacio. Además, si la densidad de materia-energía es no nula, $T^{00} \neq 0$, entonces $T^{0\alpha} \neq 0$ , esto es, el flujo de energía será no nulo. Por lo tanto, en todos los puntos del espacio-tiempo existe un flujo de energía que apunta en la misma dirección temporal, la cual resulta sustancialmente diferente de la otra debido a las propiedades globales y geométricas del espacio-tiempo.

Si bien $T^{0\alpha} V_{(\alpha)}$ suele denominarse "vector de flujo de energía" (ver, por ejemplo, Hawking & Ellis 1973), estrictamente no es un vector porque no se transforma como un vector —de manera covariante— frente a las transformaciones de Lorentz: en cada punto del espacio-tiempo, $T^{0\alpha} V_{(\alpha)}$ representa el flujo de energía solo en la base $V_{(\alpha)}$. Sin embargo, esto no resulta un obstáculo para transferir la flecha del tiempo global al ámbito local. En efecto, la condición de energía dominante es una condición covariante, por lo tanto, si el flujo de energía es no tipo-espacio en un sistema de referencia, es no tipo-espacio en todo sistema de referencia. En otras palabras, no importa qué base ortonormal se elija, el flujo de energía en esa base, representado por $T^{0\alpha} V_{(\alpha)}$, puede utilizarse para establecer la flecha del tiempo (Castagnino, Lara &

Lombardi 2003b; Castagnino & Lombardi 2004). Sobre esta base, puede decidirse convencionalmente que, en cada punto del espacio-tiempo, el semicono de luz futuro $C_+$ es el que contiene el flujo de energía o al que pertenece el flujo de energía, cualquiera sea la base elegida: es posible así establecer la orientación temporal de manera local para todo el espacio-tiempo. De todos modos, es importante recordar que si bien la terminología es convencional, la orientación temporal se asienta sobre la diferencia sustancial entre las dos direcciones temporales basada en las propiedades globales del espacio-tiempo.

## 5. Relación entre la flecha global y geométrica, y la invariancia ante inversión temporal de las leyes

La presentación de la sección anterior deja claro que la flecha del tiempo puede definirse a nivel global sin la necesidad de recurrir a la t-invariancia de las leyes físicas. No obstante, esto no significa que no deba explorarse la relación entre la flecha global así definida y la t-invarianacia de las leyes. Esta tarea se llevará a cabo en las próximas dos subsecciones respecto a las leyes físicas locales y a las propias leyes relativistas generales.

### 5.1. Rompiendo la simetría de los gemelos t-simétricos

El enfoque local tradicional del problema de la flecha del tiempo debe su origen a los intentos de reducir la termodinámica a la mecánica estadística: en este contexto, la respuesta al problema consistió en definir el futuro como la dirección del tiempo en la que aumenta la entropía. Sin embargo, ya en 1912 Paul Ehrenfest y Tatiana Ehrenfest (1959) señalaban que, cuando la entropía se define en términos estadísticos a partir de la dinámica clásica subyacente, si la entropía de un sistema cerrado aumenta hacia el futuro, dicho aumento se corresponde con uno similar hacia el pasado del sistema. En otras palabras, si rastreamos la evolución dinámica de un sistema fuera de equilibrio desde el tiempo inicial hacia el pasado, también obtendremos estados que están más cerca del estado de equilibrio.

Esta vieja discusión puede generalizarse a cualquier tipo de evolución que surja de leyes locales t-invariantes. En efecto, si $e(t)$ es una solución de una ecuación t-invariante, entonces $\mathrm{T}e(t)$, donde $z$ es el operador de inversión temporal, también es una solución. En general, cualquier ley t-invariante da lugar a lo que llamaremos "gemelos t-simétricos" (Castagnino, Lara & Lombardi 2003a), es decir, dos estructuras matemáticas simétricamente relacionadas por la transformación de inversión temporal $\mathrm{T}$: cada "gemelo", que en algunos casos representa una evolución irreversible, es la imagen especular temporal del otro. El ejemplo tradicional de los gemelos t-simétricos es el que se da en el electromagnetismo, en el que las ecuaciones dinámicas siempre tienen soluciones avanzadas y retardadas relacionadas respectivamente con los estados entrantes y salientes en situaciones de *scattering*.

Desde el punto de vista de la teoría local que produce los gemelos t-simétricos, la diferencia entre ellos es solo convencional: ambos gemelos son nomológicamente posibles respecto a la teoría. Los argumentos tradicionales para descartar a uno de los gemelos y retener al otro invocan nociones temporalmente asimétricas que no están justificadas en el contexto de la teoría local. Por ejemplo, la naturaleza retardada de la radiación suele explicarse mediante argumentos de facto referidos a las condiciones iniciales: las soluciones avanzadas de las ecuaciones de onda corresponden a ondas convergentes que requieren un comportamiento emisor cooperativo "milagroso" de regiones espacialmente distantes en el origen temporal del proceso (uno de los primeros autores que considera el caso de la propagación de ondas en la discusión acerca del problema de la irreversibilidad y la t-invariancia es Karl Popper, en una serie de notas cortas sin título aparecidas en *Nature* entre 1956 y 1967).

Parece bastante claro que este tipo de argumentos, incluso si admisible en las discusiones sobre la irreversibilidad, no es legítimo en el contexto del problema de la flecha del tiempo, puesto que introduce la flecha "a mano" al presuponer la diferencia entre las dos direcciones del tiempo desde el comienzo. Es decir, estos argumentos violan la exigencia de adoptar una perspectiva atemporal depurada de intuiciones temporales como las relacionadas con la asimetría entre pasado y futuro o entre condiciones iniciales y finales. Por tanto, desde un punto de vista atemporal, el desafío consiste en brindar un criterio no convencional, basado en argumentos teóricos, para elegir a uno de los gemelos t-simétricos como el físicamente significativo: tal criterio establecerá una diferencia sustancial entre los dos miembros del par.

El criterio deseado, que no puede ser legítimamente proporcionado ni por la teoría local ni por nuestras intuiciones preteóricas, viene dado por el flujo de energía local expresado en términos de $T^{0\alpha}V_{(\alpha)}$. De hecho, una vez que hemos decidido convencionalmente llamar a la dirección del flujo de energía positiva “futuro”, en cada punto espacio-temporal  el flujo de energía local define el semicono de luz futuro: la energía emitida en  debe estar contenida en o pertenecer a $C_+(x)$ . Por lo tanto, para cualquier teoría local, el gemelo correspondiente a este tipo de flujo de energía es el miembro del par que debe retenerse como físicamente significativo para representar la evolución dirigida hacia el futuro. En el caso del electromagnetismo, solo las soluciones retardadas cumplen la condición requerida, ya que describen estados salientes (de evolución espontánea) que se obtienen mediante energía proveniente del pasado y aportan energía hacia el futuro. Esta ruptura de simetría introducida por el flujo local de energía puede análogamente aplicarse en decoherencia cuántica, medición cuántica, teoría cuántica de campos, en incluso en el caso de los gráficos de Feynman (ver Aiello, Castagnino & Lombardi 2008, sección 4). También en el caso de la irreversibilidad fenomenológica puede demostrarse que, cuando las teorías fenomenológicas se analizan en términos fundamentales, siempre es posible identificar —al modo en que lo hicieron los Ehrenfest— una segunda solución irreversible que evoluciona hacia el pasado, de modo tal que solo el flujo de energía local es el factor que rompe la simetría temporal del par de gemelos t-simétricos (ver Aiello, Castagnino & Lombardi 2008, sección 5).

En definitiva, las leyes t-invariantes de una teoría local producen soluciones temporalmente especulares que son solo convencionalmente distintas a la luz de la teoría. Es a través de la flecha del tiempo global —definida como la asimetría temporal del espacio-tiempo que se expresa localmente como un flujo de energía dirigido hacia la misma dirección en todo el universo— que se rompe la simetría de los pares de gemelos t-simétricos que resultan de las leyes fundamentales t-invariantes de la física.

### 5.2. Invariancia ante inversión temporal en relatividad general

La relatividad general es t-invariante en el sentido de que, para cualquiera de los modelos de las ecuaciones de campo de Einstein, si se invierte la dirección en la parametrización de todas las curvas tipo-tiempo y tipo-luz del espacio-tiempo, se obtiene otro espacio-tiempo que también es modelo de las ecuaciones. En otras palabras, frente a inversión temporal se obtiene un par de "gemelos t-simétricos": dos soluciones, cada una de las cuales es la imagen especular temporal de la otra, ambas posibles en relación con las leyes de la relatividad general. En este punto, el fantasma de la simetría parece amenazar nuevamente. Ahora deberíamos proporcionar un criterio no convencional para elegir una de las dos soluciones nomológicamente admisibles. Sin embargo, la amenaza puede superarse cuando las suposiciones implícitas involucradas en el problema son explícitamente formuladas.

Cuando se asume la necesidad de elegir una entre dos soluciones posibles, se supone que cada una de ellas describe un universo posible diferente: hay dos objetos posibles y es necesario decidir cuál de ellos corresponde al universo actual. Pero, ¿por qué los dos universos posibles son diferentes? La respuesta parece obvia: son diferentes porque están ordenados en el tiempo en sentidos opuestos. Esa respuesta es aceptable cuando se describe un sistema inmerso en un entorno: este trasfondo permitiría distinguir entre ambas soluciones y decidir cuál de ellas describe adecuadamente el sistema de interés, pero cuando el sistema es el universo completo, no hay entorno. La pregunta es entonces: ¿qué significa que ambos universos posibles son temporalmente opuestos?

En sí mismos, los enunciados "dos universos posibles son temporalmente opuestos" o "dos universos posibles están ordenados en el tiempo en direcciones opuestas" presuponen que existe un tiempo único, común a ambos universos posibles, respecto al cual podemos decir que uno se opone al otro. Pero suponer que podemos hablar de manera significativa sobre un tiempo común a dos universos posibles, como si existiera un tiempo "fuera" del espacio-tiempo mismo, es completamente contrario a la interpretación estándar de la relatividad general. Según esta interpretación, el tiempo —o mejor, el espacio-tiempo— coexiste con el universo: no es admisible distinguir entre el universo y el espacio-tiempo de la misma manera que dividimos entre contenido y contenedor. Es decir, cada universo tiene su propio espacio-tiempo, y no existe un punto de vista temporal, externo a ambos universos posibles, desde el cual podamos compararlos. Si esto se comprende, no tiene sentido afirmar que, cuando se obtienen dos soluciones de las ecuaciones de campo, una imagen especular temporal de la otra, dichas soluciones describen dos universos posibles cuya diferencia consiste en oponerse temporalmente: por el contrario, tales soluciones son descripciones diferentes pero equivalentes de un mismo universo posible.

Desde un punto de vista más general, esta conclusión se enmarca en el modo en que son concebidas las simetrías en el ámbito de la física, donde suele distinguirse entre transformaciones espacio-temporales continuas y discretas: la traslación espacial, la rotación espacial y la traslación temporal son transformaciones continuas; por el contrario, la reflexión espacial y la inversión temporal son transformaciones discretas. A su vez, bajo la interpretación activa, una transformación corresponde al cambio de un sistema por otro; bajo la interpretación pasiva, una transformación consiste en el cambio del punto de vista desde el cual se describe el sistema. La posición habitual sobre las simetrías asume que, en el caso de transformaciones discretas, solo la interpretación activa tiene sentido, ya que el observador no puede reflejarse espacialmente ni invertirse temporalmente para describir el sistema desde la perspectiva opuesta. Esto es cierto cuando el observador idealizado está inmerso en el mismo espacio-tiempo que el sistema observado. Sin embargo, cuando el sistema es el universo como un todo, ¿cómo se supone que el observador debe rotar en el espacio para describir el sistema desde una perspectiva espacial diferente? Puesto que no hay espacio fuera del espacio-tiempo, no podemos cambiar nuestra orientación espacial con respecto al universo: es tan imposible rotar en el espacio como invertir el tiempo. Pero esto no implica que la interpretación activa sea la correcta: ¿cuál es el significado conceptual de la idea de dos universos idénticos, uno trasladado en el espacio o en el tiempo respecto al otro? Estas observaciones apuntan al hecho de que ambas interpretaciones de las transformaciones de simetría, cuando se aplican al universo como un todo, colapsan en un sinsentido conceptual.

En la cosmología contemporánea, las transformaciones de simetría no se interpretan en términos de un cambio de un sistema a otro, ni en términos de un cambio del punto de vista del observador. De hecho, dos modelos matemáticos para el universo, definidos por $(M, g_{\mu\nu})$ y $(M', g'_{\mu\nu})$, se consideran equivalentes si son isométricos, es decir, si existe un difeomorfismo $\theta: M \rightarrow M'$ que conduce de la métrica  a la métrica (Hawking & Ellis 1973). En particular, las transformaciones de simetría son isometrías: los modelos relacionados por una transformación de simetría son isométricos. Por lo tanto, dos modelos  y , donde  es cualquier transformación de simetría, se consideran descripciones equivalentes de un mismo universo. Earman y John Norton llaman a esta relación "equivalencia de Leibniz", según la cual los modelos difeomórficos representan la misma situación física; la negación de este principio está "en desacuerdo con los textos modernos estándar en relatividad general, en los que esta equivalencia se acepta sin cuestionar para el caso específico de variedades con métricas" (Earman & Norton 1987 522; ver también, Hawking & Ellis 1973). Estas precisiones enfatizan la importancia de proceder con gran cautela cuando las conclusiones válidas para regiones finitas del universo son extrapoladas al universo como un todo: nuestras convicciones filosóficas deben ser revisadas al pasar de un contexto local al nivel cosmológico.

En resumen, la t-invariancia de las ecuaciones de campo de Einstein no amenaza el enfoque global geométrico. Como afirma Eric Curiel,

> […] la regla para construir la inversión temporal de un espacio-tiempo relativista (temporalmente orientable) es dejar todo igual excepto por el sentido de parametrización de las curvas temporales (y curvas nulas), sentido que debería invertirse. […] La mejor manera de ver esto es preguntando qué debería suceder con la métrica frente a la inversión del tiempo. Yo afirmo que la respuesta es: nada en absoluto (2017 88).

En otras palabras, el fantasma de los gemelos t-simétricos desaparece a nivel cosmológico: no es necesario brindar un criterio no convencional para seleccionar una de las dos soluciones nomológicamente admisibles ya que ambas son descripciones de un único universo posible.

## 6. Conclusiones

En este artículo se ha analizado la posibilidad de definir la flecha del tiempo para el universo como un todo, solo sobre la base de las características intrínsecas del espacio-tiempo. Como fue señalado, cuando la cuestión se aborda desde un punto de vista atemporal, el problema consiste en establecer si y bajo qué condiciones es posible construir un modelo del universo que resulte temporalmente asimétrico respecto a las propiedades geométricas del espacio-tiempo; en tal modelo es posible distinguir entre las dos direcciones del tiempo exclusivamente sobre la base de consideraciones geométricas, sin referencia a argumentos entrópicos o a la distinción entre pasado y futuro basada en nuestra percepción subjetiva del tiempo. Esta investigación lleva a concluir que, contrariamente a lo que generalmente se supone, la invariancia frente a inversión temporal de las leyes físicas no es un obstáculo para la definición de una flecha global del tiempo.

Esta conclusión no implica que esa flecha del tiempo así definida emergerá en todos los universos posibles descriptos por la relatividad general: la existencia de una flecha global está restringida por la orientabilidad temporal del espacio-tiempo y la posibilidad de definir un tiempo global. No obstante, los modelos estándar de la cosmología contemporánea, basados en la métrica de Robertson-Walker, cumplen ambos requisitos. En efecto, los modelos Robertson-Walker suministran las bases para la teoría del Big Bang, que ha resultado extremadamente exitosa en la explicación de muchas características relevantes del universo observable. Este tipo de modelos cuentan no solo con tiempo global, sino también con tiempo cósmico, que permite coordinar las evoluciones de todos los cuerpos del universo y en términos del cual los cosmólogos estiman la edad del universo. Es precisamente en este sentido que los modelos Robertson-Walker recuperan una noción de tiempo análoga a la de la física prerrelativista, en la que el tiempo es un parámetro respecto al cual se describe la evolución de un sistema. Si se acepta, por tanto, que estos modelos describen, incluso aproximadamente, el universo real, entonces es posible concluir que la estructura del universo que habitamos introduce una diferencia intrínseca entre las dos direcciones del tiempo.

Por supuesto, este enfoque, si bien fecundo, no agota todas las preguntas relativas al problema de la flecha del tiempo. Una cuestión relevante en el ámbito de la física consiste en considerar la relación entre la flecha del tiempo global y geométrica, tal como fue presentada en este trabajo, con otras simetrías de la física, como la invariancia que impone el teorema CPT. Por otra parte, más allá de los confines de la física, puede preguntare cómo se vincula la asimetría temporal del universo, que se manifiesta localmente como un flujo tetradimensional de energía, con el modo en que los seres vivientes experimentan el devenir temporal. Si bien estas cuestiones exceden los límites del presente trabajo, ponen de manifiesto el amplio abanico de interrogantes que aún restan por abordar en una temática multidimensional como la que rodea al problema de la flecha del tiempo.

## Agradecimientos

El presente trabajo ha sido posible gracias al apoyo del proyecto ID: 61785 financiado por la John Templeton Foundation.

## Trabajos citados

Aiello, Matías, Castagnino, Mario & Lombardi, Olimpia. "The arrow of time: From universe time-asymmetry to local irreversible processes". *Foundations of Physics* 38 (2008): 257-292.

Albert, David. *Time and chance.* Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000.

Callender, Craig. "Is time 'handed' in a quantum world?". *Proceedings of the Aristotelian Society* 100 (2000): 247-269.

Castagnino, Mario, Gadella, Manuel & Lombardi, Olimpia. "Time's arrow and irreversibility in time-asymmetric quantum mechanics". *International Studies in the Philosophy of Science* 19 (2005): 223-243.

Castagnino, Mario, Lara, Luis & Lombardi, Olimpia. "The cosmological origin of time-asymmetry". *Classical and Quantum Gravity* 20 (2003a): 369-391.

Castagnino, Mario, Lara, Luis & Lombardi, Olimpia. "The direction of time: From the global arrow to the local arrow". *International Journal of Theoretical Physics* 42 (2003b): 2487-2504.

Castagnino, Mario & Lombardi, Olimpia. "The generic nature of the global and non-entropic arrow of time and the double role of the energy-momentum tensor". *Journal of Physic*s 37 (2004): 4445-4463.

Castagnino, Mario & Lombardi, Olimpia. "A global and non entropic approach to the problem of the arrow of time". *Spacetime physics research trends. Horizons in world physics*, editado por Albert Reimer. Nueva York: Nova Science, 2005, pp. 73-108.

Castagnino, Mario & Lombardi, Olimpia. "The global non-entropic arrow of time: From global geometrical asymmetry to local energy flow". *Synthese* 169 (2009): 1-25.

Castagnino, Mario, Lombardi, Olimpia & Lara, Luis. "The global arrow of time as a geometrical property of the universe". *Foundations of Physics* 33 (2003): 877-912.

Costa de Beauregard, Oliver. "CPT invariance and interpretation of quantum mechanics". *Foundations of Physics* 10 (1980): 513-530.

Curiel, Eric. "A primer on energy conditions". *Towards a theory of spacetime theories*, editado por Dennis Lehmkuhl, Gregor Schiemann y Erhard Scholz. Basel: Springer, 2017, pp. 43-104.

Dürr, Detlef & Teufel, Stefan. *Bohmian mechanics. The physics and mathematics of quantum theory.* Dordrecht: Springer, 2009.

Earman, John. "An attempt to add a little direction to «the problem of the direction of time»". *Philosophy of Science* 41 (1974): 15-47.

_______. "The problem of irreversibility". *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association 1986*, Vol. 2, editado por Andrea Woody. Chicago: Philosophy of Science Association, 1986, pp. 226-233.

_______. "What time reversal invariance is and why it matters". *International Studies in the Philosophy of Science* 16 (2002): 245-264.

Earman, John & Norton, John. "What price spacetime substantivalism? The hole story". *The British Journal for the Philosophy of Science* 38 (1987): 515-525.

Ehrenfest, Paul & Ehrenfest, Tatiana. *The conceptual foundations of the statistical approach in mechanics, 1912.* Ithaca: Cornell University Press, 1959.

Gasiorowicz, Stephen. *Elementary particle physics.* Nueva York: John Wiley and Sons, 1966.

Hawking, Stephen & Ellis, George. *The large scale structure of space-time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.

López, Cristian. "Three facets of time-reversal symmetry". *European Journal for Philosophy of Science* 11 (2021): 1-19.

López, Cristian & Lombardi, Olimpia. "Space-time symmetries in quantum mechanics". *Quantum worlds. Perspectives on the ontology of quantum mechanics*, editado por Olimpia Lombardi, Sebastian Fortin, Cristian López & Federico Holik. Cambridge: Cambridge University Press, 2019, pp. 269-293.

Matthews, Geoffrey. "Time's arrow and the structure of spacetime". *Philosophy of Science* 46 (1979): 82-97.

North, Jill. "Two views on time reversal". *Philosophy of Science* 75 (2009): 201-223.

Peterson, Daniel. "Prospect for a new account of time reversal". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 49 (2015): 42-56.

Popper, Karl. *Nature* 177 (1956a): 538.

_______. *Nature* 178 (1956b): 382.

_______. *Nature* 179 (1957): 1297.

_______. *Nature* 181 (1958): 402.

_______. *Nature* 207 (1965): 233.

_______. *Nature* 213 (1967a): 320.

_______. *Nature* 214 (1967b): 322.

Price, Huw. *Time's arrow and Archimedes' point: New directions for the physics of time.* Oxford: Oxford University Press, 1996.

Racah, Giulio. "Sulla simmetria tra particelle e antiparticelle". *Il Nuovo Cimento* 14 (1937): 322-326.

Roberts, Bryan W. "Three myths about time reversal invariance". *Philosophy of Science* 84 (2017): 315-334.

Sachs, Robert G. *The physics of time reversal.* Londres: University Chicago Press, 1987.

Sakurai, Jun John. *Modern quantum mechanics. Revised edition.* Reading, MA: Addison- Wesley, 1994.

Savitt, Steven F. "The direction of time". *The British Journal for the Philosophy of Science* 47 (1996): 347-370.

Sklar, Lawrence. *Physics and chance.* Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Schutz, Bernard F. *Geometrical methods of mathematical physics.* Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

Visser, Matt. *Lorentzian wormholes.* Berlin: Springer-Verlag, 1996.

Watanabe, Satosi. "Symmetry of physical laws. Part 3: Prediction and retrodiction". Reviews of Modern Physics 27 (1955): 179-186.*