

EL PROBLEMA DE LA FLECHA DEL TIEMPO EN FÍSICA

Cristian López

(FFyL – UBA)

Introducción.

El tiempo, intuitivamente, parece tener una dirección: experimentamos que los procesos físicos macroscópicos evolucionan del pasado hacia el futuro pero nunca en sentido inverso. El *problema de la flecha del tiempo* surge como intento de dar un fundamento a esta idea intuitiva formada en base a tal experiencia y, particularmente en el contexto de la filosofía de la física, este problema asume la tarea específica de encontrar para esta asimetría temporal un *correlato físico*. Uno de los primeros intentos, y probablemente el más extendido, buscó *reducir* la flecha del tiempo al formalismo introducido por la termodinámica a través de su Segundo Principio y del concepto de entropía: si los sistemas aislados mostraban una tendencia a evolucionar irreversiblemente hacia estados de equilibrio –máxima entropía–, entonces esta asimetría física podía constituir un buen correlato físico de la asimetría temporal. De esta manera, la flecha termodinámica (donde los estados de no-equilibrio tienden al equilibrio) fue considerada como el fundamento de la asimetría temporal, siendo el futuro la dirección en la que entropía aumenta y el pasado en la que disminuye (Boltzmann 1895, Reichenbach 1954, Davies 1997). En el presente trabajo, me propongo un doble objetivo: por un lado, argumentar contra este enfoque (que denominaré *entrópico*) que busca reducir la flecha del tiempo a la flecha termodinámica; y, por otro lado, siguiendo la ‘Herejía de la Flecha del Tiempo’ de John Earman (1974), proponer que si existe una flecha del tiempo, ésta es irreducible y ha de entenderse como una propiedad del tiempo mismo. Esta idea, en el contexto de la filosofía de la física, ha de formularse en el marco de la relatividad general como una asimetría geométrica de la estructura del espacio-tiempo.

A los fines de desarrollar estos objetivos, estructuraré el trabajo en tres secciones. En la Sección I, presentaré el *problema de la flecha del tiempo* señalando algunas pautas metodológicas generales a tener en cuenta a la hora de encontrar una respuesta al problema en el marco de la filosofía de la física. En la Sección II, expondré los rasgos fundamentales del enfoque entrópico y la estructura reduccionista que exhiben sus argumentos; a continuación, plantearé algunas objeciones y problemas que este enfoque tiene a la hora de definir una flecha del tiempo en términos físicos mediante el concepto de entropía. Finalmente, en la

Sección III, frente a los problemas del enfoque entrópico, defenderé un punto de vista no reduccionista que sigue el espíritu de la tesis herética de Earman y la propuesta de Mario Castagnino y Olimpia Lombardi (2009): el problema de la flecha del tiempo puede ser abordado desde una perspectiva no entrópica que, en el marco de la relatividad general, entiende la asimetría temporal como una asimetría geométrica de la estructura del espacio-tiempo.

I. El problema de la flecha del tiempo y algunas consideraciones metodológicas

El problema de la flecha del tiempo admite muchos abordajes y respuestas posibles. Por ejemplo, puede pensarse que el carácter asimétrico y dirigido del tiempo pertenece a nuestra forma subjetiva de percibir los fenómenos. Bajo esta perspectiva, la flecha del tiempo estaría constituida por una *flecha psicológica* que exigiría una argumentación en términos de cómo la mente humana ordena temporalmente el mundo y determina su evolución a un único sentido posible. También puede considerarse el problema en términos estrictamente metafísicos: la direccionalidad privilegiada del tiempo es una propiedad esencial del tiempo mismo que no admite argumentación en términos *a posteriori* sino *a priori*.

Sin embargo, es en el ámbito de la física y la filosofía de la física donde el problema de la flecha del tiempo ha tenido mayor desarrollo. En este contexto, se requiere que la asimetría temporal tenga como correlato una asimetría material que sea recogida por el formalismo de alguna teoría física. De esta manera, sería posible –en principio– coordinar la flecha del tiempo con alguna flecha física (que en términos generales se pensó en términos de *irreversibilidad* en la evolución de los fenómenos) y obtener así una “teoría física de la flecha del tiempo” (Sklar, 1974: 360). Este es el camino de indagación que seguiré.

No obstante, este punto de partida no está exento de problemas importantes a la hora de abordar el problema de la flecha del tiempo. Por un lado, las nociones temporales asimétricas están tan profundamente arraigadas en nuestras intuiciones y en nuestro lenguaje, que muchas veces la argumentación se vuelve circular: se supone en el inicio aquello a lo cual queríamos arribar. Esto es un problema, pues si buscamos un correlato físico como fundamento de la asimetría temporal, no podemos presuponer en esta asimetría física alguna noción que involucre algún tipo de direccionalidad o distinción entre pasado y futuro. Por otro lado, en general, las teorías físicas y su estructura nomológica fundamental no solo usan las palabras ‘pasado’ y ‘futuro’ de manera puramente convencional, sino que tampoco impiden, en general, que se piensen las ecuaciones en una dirección del tiempo (digamos t) y en la dirección contraria ($-t$). Un ejemplo del primer caso lo constituye el uso que se hace en

mecánica relativista de los conceptos de “cono de luz *pasado*” (C^-) y “cono de luz *futuro*” (C^+): nada hay *in re* que impida cambiar los nombres libremente, pues, las propiedades del sistema no cambiarán. El segundo caso es una propiedad de las leyes fundamentales de la física: son invariantes ante inversión temporal (t -invariantes), *i.e.*, si en una ecuación dinámica se invierte la variable t ($t \rightarrow -t$), el resultado también es una solución de la ecuación. Por lo tanto, ¿qué tipo de respuesta buscamos, en el contexto de la filosofía de la física, al problema de la flecha del tiempo? Y, ¿cómo buscar esa respuesta?

Es necesario –a los fines de responder a las preguntas del párrafo anterior– establecer algunas definiciones y preceptos metodológicos. En primer lugar, parece necesario adoptar una *perspectiva atemporal* tal como propone Huw Price (1996):

(...) Si queremos entender la asimetría del tiempo, entonces necesitamos poder entender, y poner en cuarentena, las diversas formas en las que nuestros patrones de pensamiento reflejan las peculiaridades de nuestra perspectiva temporal. Necesitamos familiarizarnos con lo que apropiadamente podemos llamar el punto de vista desde “ningún-tiempo [*nowhen*]” (Price, 1996: 4)

La idea consiste en mirar la realidad mediante términos atemporales parándonos por “fuera del tiempo”. Tal perspectiva nos permitiría prevenirnos de cualquier clase de proyección antropocéntrica y no caer así en la circularidad que mencioné anteriormente.

En segundo lugar, el tipo de asimetría que buscamos no es convencional: pasado y futuro deberán distinguirse de manera sustancial y no, meramente, ser distintos nombres para entidades formalmente idénticas.

Definición 1. Dos objetos son formalmente idénticos cuando existe una permutación que, al intercambiarlos, no cambia las propiedades del sistema al cual pertenecen.

Definición 2. La diferencia entre dos objetos es sustancial cuando asignamos diferentes nombres a dos objetos que no son formalmente idénticos. (Penrose, 1979: 581- 638).

En resumen, se hace necesario obtener un *argumento sustancial* y una *perspectiva atemporal*. Esto implica reformular el problema de la flecha del tiempo en nuevos términos. Arthur Eddington (1928) articula este punto mediante una metáfora: podemos definir la flecha del tiempo en base a la distinción entre la dirección cola-punta de la flecha o punta-cola, es decir, desde una asimetría que se manifiesta a nivel geométrico.

II. El enfoque entrópico y sus problemas

Experimentamos una gran cantidad de fenómenos que ocurren en un único sentido. Un vaso está sobre la mesa y *luego* cae al piso rompiéndose en numerosos pedazos. Esta es una imagen común, pero, ¿alguien ha visto, espontáneamente, a un vaso roto en el piso

“rearmarse” y reubicarse sobre la mesa? Es, ciertamente, una imagen surreal. Los vasos, *de facto*, se caen y se rompen, pero no se “des-rompen” y “se levantan”. Como éste, hay numerosos ejemplos en la vida diaria que atestiguan el carácter *irreversible* de los fenómenos. Si se busca un correlato físico para la asimetría temporal, parece haber tantos que la búsqueda se trivializa. Sin embargo, lo que se pretende es algo un poco más preciso: que el formalismo de una teoría física, que se ocupa de la descripción de tales procesos, refleje una diferencia sustancial entre pasado y futuro, o, en otras palabras, obtener una asimetría física *de iure*, no *de facto*.

Los fenómenos irreversibles que observamos suelen ser tratados por la Termodinámica que involucra conceptos como ‘transferencia de calor’, ‘entropía’, ‘equilibrio-no equilibrio’, etc. Desde su nacimiento en el siglo XIX, el problema de la flecha del tiempo ha sido tradicionalmente abordado desde su formalismo y sus conceptos, constituyendo uno de los enfoques más difundidos en la bibliografía acerca del tema. En este punto, el concepto de ‘entropía’ y el Segundo Principio se han vuelto esenciales. Autores como Ludwig Boltzmann (1895), Hans Reichenbach (1926, 1954), Adolf Grünbaum (1963), entre otros, han dado forma a este enfoque que llamaré *entrópico*. En el libro *La Dirección del Tiempo* (1954), Reichenbach introduce la siguiente definición: “La dirección en la cual la mayoría de los procesos termodinámicos en sistemas aislados ocurren es la dirección positiva del tiempo” (Reichenbach, 1954: 127). En esencia, la idea consiste en que pasado y futuro se definen como los sentidos temporales hacia donde la entropía decrece o aumenta respectivamente, por lo que “si existe una única dirección del tiempo o si la dirección del tiempo alterna, depende de la curva de entropía trazada por el universo” (Reichenbach, 1954: 128).

Ahora veamos cuál es la estrategia argumentativa general del enfoque entrópico. Supongamos dos sucesos dispuestos temporalmente de manera contraria:

- (1) $T(x, y)$, donde x antecede temporalmente a y .
- (2) $T(y, x)$ donde y antecede temporalmente a x .

La pregunta a responder es: ¿cómo sabemos cuál es el orden correcto que se adecúa a nuestro mundo? El enfoque entrópico entendió que la respuesta a esta pregunta debía ser derivada: la relación $T(x, y)$ puede *reducirse* a una relación no temporal $E(x, y)$ a partir de la cual inferimos cuál es la relación temporal correcta. Si, por ejemplo, $T(x, y)$ es la disposición temporal correcta, lo es en virtud de obtenerse a partir de una relación no temporal, donde se evidencia $E(x, y)$ y no se evidencia la relación contraria, $E(y, x)$. Si, a su vez, la relación $E(x, y)$ –que es una relación irreversible entre eventos– es la solución de alguna ley física y la relación contraria no constituye una solución de la misma ley, entonces, la relación temporal

$T(x, y)$ se está fundamentando en la estructura nomológica y formal de una teoría física que refleja una asimetría *de iure*, expresada en el carácter no invariante de la ley ante la inversión de la variable t , ($t \rightarrow -t$).

Esta es la estrategia argumentativa del enfoque entrópico. Más allá de las diferentes propuestas, permanece como propio de esta clase de argumentos dos elementos claves: por un lado, asumir una actitud reduccionista respecto de la asimetría temporal; y, por el otro, no considerar a la relatividad general y la estructura espacio-temporal del universo como un terreno propio de discusión.

Sin embargo, creo que el enfoque entrópico se enfrenta a algunos obstáculos difíciles de superar, a raíz de ciertos compromisos que asume a la hora de tratar el problema de la flecha del tiempo en términos reductivos y no relativistas. Expondré tres problemas generales de índole conceptual, empírico y argumental, que ponen en tela de juicio el papel preponderante que, según este enfoque, tiene la entropía en el problema en cuestión.

Problema conceptual: Se suele entender que la Termodinámica es una teoría fenomenológica, donde las propiedades que describe son propiedades derivadas. Este se refleja en que, por ejemplo, el concepto de entropía es compatible con diversas configuraciones del sistema en cuestión. Esto conduce a pensar si no existe acaso una propiedad más fundamental, no fenomenológica ni derivada, que permita establecer una flecha del tiempo: propiedad que tendrá prioridad conceptual con respecto al concepto de entropía.

Problema empírico: Si queremos obtener una flecha del tiempo global, enmarcamos la discusión en el contexto cosmológico. Sin embargo, si adoptamos un enfoque entrópico y buscamos una flecha para todo el universo, presuponemos que es al menos posible determinar la entropía para una sección instantánea de él. Pero este supuesto no parece adecuado en el contexto de la cosmología contemporánea: por una parte, no hay una idea clara de cómo definir la entropía producto de campos gravitacionales por lo que solo se suele considerar la entropía para materia y energía ; por otro lado, no todos los espacio-tiempos puede ser divididos en rebanadas temporales (*timelike slices*).¹

Problema argumental: El enfoque entrópico cae en cierta circularidad al no adoptar una perspectiva atemporal: presupone nuestras intuiciones temporales como ser la relación

¹ Este punto constituye un problema solo para los enfoques entrópicos que buscan ser globales. De hecho, varias vertientes que utilizan argumentos termodinámicos han renunciado a la posibilidad de una flecha global y en su lugar postulan flechas locales (Boltzmann, Reichenbach y Matthews constituyen buenos ejemplos de ello).

anterior-posterior. El núcleo del problema es que el argumento termodinámico no debería presuponer que los estados de baja entropía son anteriores a los estados de alta entropía, como así tampoco sostener que ésta aumenta o disminuye: de lo único que da cuenta es que existe un gradiente entrópico.

III. El enfoque geométrico: una perspectiva no entrópica y no reduccionista.

En este apartado, plantearé y defenderé un enfoque con respecto al problema de la flecha del tiempo que se basa en dos premisas o compromisos: (i) la discusión en torno al problema de la flecha del tiempo debe darse en el terreno de la relatividad general, por lo cual, es un enfoque no entrópico; y (ii) debe adoptarse un punto de vista no reduccionista siguiendo la “Herejía de la Flecha del Tiempo” de Earman. Comenzaré por esta última.

En la sección II, expuse la estructura argumentativa del enfoque entrópico. Allí señalé que la estrategia general consistía en intentar una *reducción* de la asimetría temporal a una asimetría física entendida en términos de irreversibilidad. En un artículo de 1974, John Earman se propone eliminar este dogma (Earman, 1974: 15) mediante su ‘Herejía de la Flecha del Tiempo’. La formulación es la siguiente:

En primer lugar, si existe, una orientación temporal es una característica intrínseca del espacio-tiempo que no necesita y no puede ser reducida a características no temporales, y, en segunda lugar, la existencia de una orientación temporal no depende de manera crucial de la irreversibilidad como el reduccionista nos ha hecho creer. (Earman, 1974: 20)

Con su tesis herética, Earman está abriendo la puerta a la posibilidad de definir una flecha del tiempo con independencia de los argumentos termodinámicos. En el fondo, explota el problema conceptual señalado en el apartado anterior: cualquier gradiente entrópico –al ser una propiedad derivada compatible con varias configuraciones del sistema– necesita una base más fundamental que lo haga posible y, por lo tanto, depende de alguna propiedad más fundamental en el universo que permita realizar la distinción entre pasado y futuro de manera sustancial; propiedad que, además, tiene prioridad conceptual frente a alguna propiedad termodinámica. La pregunta, en este punto, puede formularse en los siguientes términos: ¿cuál es y cómo buscar tal propiedad fundamental del universo?

La pregunta, considero, nos conduce directamente a trasladar la discusión sobre la flecha del tiempo en el contexto de la relatividad general. ¿Por qué? Porque si buscamos una propiedad fundamental del universo que permita la distinción entre pasado y futuro, y el universo y sus propiedades son objeto de estudio de la relatividad general, es legítimo introducir la discusión en su terreno. Esbozaré, simplemente, ciertas condiciones y términos

generales de cómo abordar el problema de la flecha del tiempo desde este nuevo enfoque no entrópico y no reduccionista.

Como es bien sabido, la relatividad general reemplaza las nociones clásicas de espacio y tiempo: mientras que en la mecánica newtoniana los eventos ocurrían en *un* espacio y *un* tiempo que se consideraban entidades separadas, la relatividad general introduce el concepto de espacio-tiempo que entrelaza íntimamente espacio y tiempo, siendo este último entendido no como un “trasfondo” externo al sistema, sino como una dimensión de una estructura tetradimensional. El espacio-tiempo relativista suele representarse matemáticamente como una variedad Riemmaniana, dada por el par ordenado $\langle M, \eta \rangle$, donde M es una variedad cuadridimensional diferenciable y η es la métrica lorentizana para M . A su vez, espacio-tiempo se vuelve co-existente con universo: el universo *es* el espacio-tiempo, es decir, el espacio-tiempo no es posible de ser entendido como el “receptáculo” en el cual ocurren los eventos. Ahora bien, las propiedades que podemos ofrecer del espacio-tiempo de la relatividad general, están dadas, fundamentalmente, por sus propiedades geométricas, ligadas íntimamente a la distribución de materia-energía a través de las ecuaciones de campo de Einstein. Esto nos conduce a que las propiedades fundamentales del universo son las propiedades fundamentales del espacio-tiempo que son entendidas en términos geométricos dadas por el tensor métrico y la distribución de materia-energía. Por lo tanto, el enfoque entrópico es reemplazado por un *enfoque geométrico*.

Este enfoque, que se asume como no reduccionista y no entrópico, fue ampliamente desarrollado por Mario Castagnino, Olimpia Lombardi y Luis Lara en numerosos artículos (2004a, 2004b, 2005, 2009). No es mi intención en este trabajo pormenorizar en su propuesta y en cómo superan los obstáculos que se presentan a otros enfoques, sino que quisiera mostrar cómo el enfoque geométrico resulta una alternativa de investigación altamente viable para discutir el problema de la flecha del tiempo si abandonamos los argumentos termodinámicos – tarea que realicé párrafos atrás–, y presentar de manera breve y general la propuesta del enfoque de Castagnino y Lombardi (2009). Pasaré a exponer este último punto.

Los autores reconocen el carácter t -invariante de las leyes fundamentales de la física, en particular, de las ecuaciones de campo de Einstein. Sin embargo, superan este problema al considerar que la t -invariancia de una ley física es una propiedad de una ecuación dinámica (*i.e.* una entidad matemática) que no impide que tenga soluciones (*i.e.* una evolución de un proceso físico) irreversibles. Esta postura distingue de manera conceptual dos pares de términos que el enfoque entrópico había entendido en conjunto: la invariancia de la ley

mediante inversión temporal y reversibilidad de los procesos. No voy a adentrarme en esta disquisición, sino tan solo señalar que la distinción llevada a cabo por Castagnino y Lombardi permite que a pesar de la t -invariancia de las ecuaciones de campo de Einstein, uno pueda tener modelos del universo temporalmente asimétricos. Pero, la relatividad general, es consistente con diferentes modelos que poseen propiedades muy disímiles: universos con curvas temporales cerradas, universos de tipo ‘pantalón’ (donde el espacio-tiempo se subdivide en un par de secciones de forma continua), universos globalmente planos (donde la distribución de materia-energía no llega al límite crítico para curvar la totalidad espacio-temporal), etc.; el punto es que no en todos estos universos podemos definir una flecha del tiempo (v.g. es imposible hacerlo en un universo con curvas temporales cerradas). Por lo tanto, cualquier enfoque que busque dar una respuesta a este problema en términos de las propiedades geométricas del espacio-tiempo debe poder seleccionar entre todos los modelos posibles en cuál es posible definir una flecha del tiempo en los términos en que la buscamos, y, por otra parte, mostrar que ese modelo del universo probablemente sea el que representa al nuestro. La estrategia puede ser puesta en estos términos: en primer lugar, señalar un conjunto de condiciones que el modelo del espacio-tiempo debería satisfacer para ser temporalmente asimétrico, y, en segundo lugar, mostrar que el modelo resultante es consistente con el modelo estándar de la cosmología actual dado por el modelo Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker. De manera general, la propuesta y los argumentos de Castagnino y Lombardi apuntan a mostrar que si el universo tiene ciertas condiciones que restringen su topología, como ser la *orientabilidad temporal* y la posibilidad de definir un *tiempo cósmico*, es posible establecer una flecha del tiempo para todo el universo a partir de romper la simetría resultante de la invariancia de las leyes locales bajo inversión temporal en función de un flujo de energía cuatridimensional que apunta siempre hacia el mismo extremo del universo.

IV. Conclusión.

Las discusiones en torno a la flecha del tiempo, así como de la naturaleza y propiedades temporales de nuestro universo, permanecen abiertas en nuestros días. En este trabajo intenté ofrecer una presentación general de cómo el problema de la flecha del tiempo ha sido tratado en el marco de la física y la filosofía de la física. A su vez, señalé los problemas empíricos, conceptuales y argumentativos que el enfoque entrópico tradicional presenta al asumir compromisos reduccionistas y no atender a la relatividad general. Por estos motivos, creo que los argumentos termodinámicos deberían ser dejados de lado en favor de argumentos que atiendan a la estructura geométrica del espacio-tiempo, descrita por la relatividad general.

Bibliografía

- Boltzmann, L. (1895). On certain questions of the theory of gases. *Nature*, 51, 413-415.
- Castagnino, M. y Lombardi, O. (2004a). *Time asymmetry as universe asymmetry*. En O. Descalzi, J. Martínez & S. Rica (eds.), *Instabilities and nonequilibrium Structures IX*, 11-15, Dordrecht: Kluwer.
- (2004b). The generic nature of the global and non-entropic arrow of time and the double role of the energy-momentum tensor. *Journal of Physics A (Mathematical and General)*, 37, 4445-4463.
- (2005). *A global and non-entropic approach to the problem of the arrow of time*. En A. Reimer (ed.), *Spacetime Physics Research Trends. Horizons in World Physics*, 74-108, New York: Nova Science.
- (2009). The global non-entropic arrow of time: from global geometrical asymmetry to local energy flow. *Synthese*, 169, 1-25.
- Castagnino, M., Lara, L. y Lombardi, O. (2003a). The cosmological origin of time asymmetry. *Classical and Quantum Gravity*, 20, 369-391.
- (2003b). The direction of time: From the global arrow to the local arrow. *International Journal of Theoretical Physics*, 42, 2487-2504.
- Castagnino, M., Lombardi, O. y Lara, L. (2003). The global arrow of time as a geometrical property of the universe. *Foundations of Physics*, 33, 877-912.
- Earman, J. (1974). An Attempt to Add a Little Direction to ‘The Problem of the Direction of Time’. *Philosophy of Science*, 41, 15-47.
- Eddington, A. (1928). *The Nature of the physical world*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Grünbaum, A. (1963). *Philosophical problems of space and time*. New York: Alfred A. Knopf.
- Penrose, R. (1979). *Singularities and time asymmetry*. En *General Relativity, an Einstein Centenary Survey*, S. W. Hawking and W. Israel, eds. Cambridge: Cambridge University Press.
- Price, H. (1996). *Time’s Arrow and Archimedes’ point: new directions for the physics of time*. New York: Oxford University Press.

Reichenbach, H. (1928), *The Philosophy of Space and Time*. New York: Dover Publications.

—— (1956). *The direction of time*. Berkeley: University of California Press.

Sklar, L. (1974). *Space, time and spacetime*. Berkeley: University of California Press.