

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XI JORNADAS

VOLUMEN 7 (2001), Nº 7

Ricardo Caracciolo

Diego Letzen

Editores



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



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



El problema de la irreversibilidad: algunas precisiones conceptuales

Olimpia Lombardi*

Introducción

Precisamente por los profundos desacuerdos que genera, el problema de la irreversibilidad es uno de los temas más interesantes de la filosofía de la física. Sin embargo, en el debate suelen confundirse y/o asimilarse nociones que, si bien emparentadas entre sí, deben distinguirse cuidadosamente en todo tratamiento pormenorizado del problema.

Frente a este panorama, el objetivo del presente trabajo consiste en precisar los conceptos centrales involucrados en el problema de la irreversibilidad. En particular, se distinguirán los conceptos de *t*-invariancia y de reversibilidad, para luego señalar las relaciones entre ambos, así como sus nexos con otras nociones tradicionalmente asociadas como las de determinismo y de anisotropía temporal. Finalmente se señalarán las perspectivas de este trabajo de elucidación, hacia una contextualización de las principales líneas interpretativas en la discusión del problema de la irreversibilidad en física.

El concepto de *t*-invariancia

En las discusiones acerca del problema de la irreversibilidad, dos nociones con frecuencia asimiladas de un modo apresurado son las de *t*-invariancia y de reversibilidad; se supone que un proceso es reversible si está descrito por leyes invariantes ante la inversión del signo de la variable tiempo. Pero la situación dista de ser tan sencilla; para comprender el problema en detalle es necesario comenzar por elucidar ambas nociones.

Algunos autores caracterizan la *t*-invariancia de un modo demasiado directo; éste es el caso de Mario Bunge, quien define el concepto del siguiente modo: "Llámesese $L(t)$ un enunciado de ley que contiene la coordenada temporal t . Si $L(-t)=L(t)$, se dice que la ley es *T*-invariante, o invariante bajo la inversión del tiempo" (Bunge, 1977, p. 319). Esta caracterización concibe la *t*-invariancia como un concepto puramente sintáctico, esto es, como una propiedad aplicable a una ecuación dinámica que sólo depende de su estructura formal. Pero la *t*-invariancia referida a leyes naturales no sólo requiere la inversión del signo de la variable t , sino también de *todas las variables dinámicas involucradas*. Por lo tanto, el concepto de *t*-invariancia alude a una propiedad aplicable a una ley dinámica L en el contexto de una teoría T : se dice que una ley dinámica L es *t*-invariante en el contexto de una teoría T cuando permanece inalterada al cambiar el signo de la variable tiempo y de todas las variables dinámicas pertenecientes a T . En este sentido, la Segunda Ley de Newton expresada como $F(x) = m \frac{d^2x}{dt^2}$ —donde x representa la distancia a un cierto origen, m , la masa y $F(x)$, la fuerza en la dirección x — es *t*-invariante en el contexto de la mecánica clásica; dado que se trata de una ecuación diferencial de segundo orden, es necesario cambiar el signo de la velocidad inicial v_0 que aparece como constante de integración. Por el contrario, la Ley de Fourier de conducción del calor, $\partial T/\partial t = K/C\rho_m \partial^2 T/\partial x^2$ —donde x representa la distancia a un cierto origen, K , la conductividad térmica, C , el calor específico, ρ_m , la

* Universidad de Buenos Aires. CONICET.

densidad de masa y T , la temperatura— no resulta t -invariante en el contexto de la termodinámica fenomenológica.

Si bien aún parece tratarse de un concepto fuertemente formal, la t -invariancia posee un claro significado físico. Considérese un sistema S que se encuentra en un cierto instante inicial en el estado e_0 , y que al evolucionar adquiere un estado e_1 luego de un intervalo Δt . Supóngase ahora otro sistema S' , idéntico a S , que en instante inicial se encuentra en el estado temporalmente invertido respecto de e_1 ; llámese a este nuevo estado $T(e_1)$. Si la ley que rige la evolución es t -invariante, luego del intervalo Δt el sistema S' se encontrará en el estado $T(e_0)$, esto es, la versión temporalmente invertida del estado inicial de S . Expresando la ley de evolución mediante un operador U_t tal que $e_1 = U_{\Delta t} e_0$, la ley es t -invariante si se cumple que $T(e_0) = U_{\Delta t} T(U_{\Delta t} e_0)$. Pero, ¿qué estados son $T(e_0)$ y $T(e_1)$? Esto depende de cuáles sean las variables dinámicas que definen el estado de S ; y ello, por supuesto, depende de la teoría particular que describe la evolución. Por ejemplo, en mecánica clásica, si S es un sistema de partículas puntuales, su estado en el instante t queda completamente definido por las posiciones y las cantidades de movimiento lineal de las partículas en t , a su vez, dadas masas constantes, las cantidades de movimiento son función únicamente de las velocidades de las partículas. En este caso, el estado temporalmente invertido respecto de e se obtiene cuando las partículas se encuentran en la misma disposición espacial que en e , pero donde cada una posee una velocidad del mismo módulo pero de sentido inverso respecto de la que posee en e .

El concepto de irreversibilidad

A diferencia de la t -invariancia, el concepto de irreversibilidad no se aplica a leyes sino a procesos. Dado un tipo de procesos P compuesto por la sucesión temporal de eventos a_1, a_2, \dots, a_n , se dice que P es *reversible* si tal sucesión puede presentarse en ese orden o en el orden inverso; se dice que P es *irreversible* si tal sucesión siempre se presenta en ese orden temporal, y nunca ocurre en el sentido inverso a_n, \dots, a_2, a_1 . Cuando los conceptos de reversibilidad e irreversibilidad se expresan de este modo, los eventos a_i suelen ser aspectos parciales de los estados de un sistema; por ejemplo, las sucesivas posiciones de una partícula en su movimiento mecánico, o los sucesivos volúmenes que ocupa un gas inicialmente concentrado en una pequeña región en su evolución hacia la ocupación total del recipiente que lo contiene. Pero, en física, los casos relevantes son aquéllos en los cuales el tipo de procesos P es una sucesión de estados e_1, e_2, \dots, e_n , y el tipo de procesos inversos P' es la sucesión en orden inverso de los estados originales *temporalmente invertidos*, $T(e_n), \dots, T(e_2), T(e_1)$: el tipo de procesos P es *reversible* si tanto P como P' se dan espontáneamente en la naturaleza, y es *irreversible* si, dándose P , nunca ocurre espontáneamente su inversión temporal P' .¹

Así expresado, el concepto de irreversibilidad significa que ciertos procesos, en particular los que resultan de la inversión temporal de procesos irreversibles, quedan excluidos del ámbito de los procesos naturales. El origen de tal exclusión permite distinguir entre dos tipos de irreversibilidad. Se trata de una irreversibilidad *nomológica* cuando ciertos procesos quedan excluidos por una ley o combinación de leyes físicas.² Por ejemplo, la Ley de Fourier excluye los procesos de conducción espontánea de calor de menores a mayores temperaturas; el Segundo Principio de la Termodinámica excluye los procesos que involucren la disminución de la entropía en un sistema aislado. En cambio, la irreversibilidad es

de facto en el caso en que algunos procesos quedan excluidos, no como resultado de una ley, sino debido a que ciertas condiciones no se dan de hecho en la naturaleza.³ Cuando las leyes dinámicas se expresan como ecuaciones diferenciales ordinarias, en su integración aparecen constantes que representan el valor de las variables en el instante inicial y que deben determinarse empíricamente (por ejemplo, posición y velocidad en t_0); tales valores se denominan “*condiciones iniciales*”. En el caso en que se trata de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, el procedimiento anterior no es suficiente: es necesario determinar empíricamente las constantes que representan el valor de las variables para una cierta región del espacio (por ejemplo, el valor de la temperatura en los extremos de un cuerpo); tales valores se denominan “*condiciones de contorno*”. Por lo tanto, la irreversibilidad *de facto* se da cuando algunos procesos quedan excluidos debido a que ciertas condiciones iniciales o condiciones de contorno nunca se efectivizan. Por ejemplo, las ecuaciones que describen la propagación de ondas —mecánicas o de radiación— admiten dos tipos de soluciones, correspondientes a potenciales retardados y avanzados respectivamente: las primeras describen ondas coherentes propagándose desde un centro, las segundas describen ondas coherentes propagándose hacia un punto central; la no ocurrencia del segundo tipo de procesos se debe al hecho de que las condiciones de contorno requeridas para su efectivización nunca se dan espontáneamente en la realidad física.

Relación entre t-invariancia e irreversibilidad

Esta caracterización de *t-invariancia* y de *reversibilidad* permiten establecer la relación entre ambos conceptos:

- Los procesos *nomológicamente irreversibles* quedan descritos por leyes *no t-invariantes*; los procesos excluidos son, precisamente, los correspondientes a la ecuación dinámica que resulta de cambiar el signo de la variable tiempo y de todas las variables dinámicas en la ley original.
- Los procesos *irreversibles de facto* quedan descritos por leyes *t-invariantes*; quedan excluidos aquellos procesos descritos por las soluciones correspondientes a condiciones iniciales o condiciones de contorno que, de hecho, nunca o casi nunca se efectivizan.

Por lo tanto, si una ley es no t-invariante en el contexto de una teoría, describe un proceso nomológicamente irreversible. Si una ley es t-invariante en el contexto de una teoría, o bien describe un proceso reversible, o bien describe un proceso irreversible *de facto* en el caso de que la no ocurrencia de ciertas condiciones iniciales o de contorno excluya el proceso inverso.

Es importante destacar la importancia de identificar la teoría en el contexto de la cual se determina si una ley es o no t-invariante. Pasar por alto este punto puede conducir a conclusiones como las de Henry Hollinger y Michael Zenzen (1982, pp. 314-322), quienes niegan contenido al concepto mismo de irreversibilidad nomológica, considerándolo internamente inconsistente. Para determinar si una ley es o no t-invariante, estos autores exigen el análisis *completo* de cada símbolo de la ecuación correspondiente. Aplicando este criterio a la Ley de Fick de difusión de materia, $\partial c/\partial t = D \partial^2 c/\partial x^2$ (donde x representa la distancia a un cierto origen, D , el coeficiente de conducción y c , la concentración), comprueban que D cambia de signo ante la inversión de t cuando tal coeficiente se deriva a partir de *consideraciones mecánico-estadísticas*. Tomando este ejemplo como caso paradigmático conclu-

yen que, dado que todas las leyes fundamentales son t -invariantes, la distinción entre irreversibilidad nomológica e irreversibilidad *de facto* colapsa: en consecuencia, debe considerarse que legalidad implica reversibilidad nomológica (Hollinger y Zenzen, 1982, p. 322). Sin embargo, en el argumento de Hollinger y Zenzen, la derivación del coeficiente de difusión D ya no corresponde a la teoría original, sino que acude a consideraciones dinámicas y estadísticas totalmente ajenas a la termodinámica fenomenológica, en la cual se describe el proceso irreversible de difusión. Por lo tanto, la estrategia de los autores implica suponer resuelto el problema de la reducción de la termodinámica fenomenológica a la mecánica estadística; pero éste es, precisamente, uno de los núcleos centrales del viejo problema de la irreversibilidad. En otras palabras, estipular que las únicas leyes legítimas de la física son las leyes fundamentales t -invariantes sigue sin explicarnos por qué la concentración c tiende a uniformarse con el tiempo y nunca observamos la evolución contraria. Por esta razón, resulta conceptualmente más fructífero considerar, por ejemplo, la Ley de Fourier o la Ley de Fick como legítimas leyes de la física: estas leyes resultan no t -invariantes en el contexto de la termodinámica fenomenológica, y dicha no t -invariancia expresa un aspecto relevante de nuestra experiencia física macroscópica.

Un caso típico de irreversibilidad *de facto* es la expansión indefinida de un gas ideal a partir de un centro; esta situación ha recibido diferentes interpretaciones. Para Grünbaum (1963), al igual que para Popper (1956, 1957, 1958), se trata de un claro caso de irreversibilidad no entrópica, pues la función entropía no puede definirse en un sistema en expansión indefinida. Otros autores (*cf.* Zenzen, 1977) consideran que el concepto de entropía puede definirse en estos casos; no obstante, el aumento de entropía debido a la expansión del sistema se compensa exactamente con la disminución de entropía asociada a la progresiva separación entre las partículas más rápidas y las partículas más lentas del gas. De todos modos, en cualquiera de ambas interpretaciones la irreversibilidad del proceso no puede explicarse en términos de un aumento de entropía; por lo tanto, el origen de la irreversibilidad debe buscarse en la no ocurrencia *de facto* de ciertas condiciones de contorno.

Flecha del tiempo y determinismo

Es importante notar que, hasta aquí, no se ha hablado de la "flecha del tiempo" o de la asimetría temporal, problema éste que suele asimilarse al problema de la irreversibilidad. Quienes adoptan tal postura, identifican el sentido temporal privilegiado, pasado-a-futuro, con el sentido en el que se desarrollan los procesos irreversibles, de modo tal que la irreversibilidad brinda el fundamento, *define* la asimetría temporal. En otras palabras, desde esta perspectiva se intenta reducir la relación temporal " e_2 es posterior a e_1 " en términos de otra relación asimétrica *no temporal* entre eventos, sea de carácter nomológico o *de facto*. Sin embargo, como señala adecuadamente Lawrence Sklar (1977, pp. 398-411), hay muy buenas razones para rechazar este enfoque reduccionista acerca de la asimetría temporal. En primer lugar, comprendemos el significado de "posterior" y podemos establecer relaciones temporales entre eventos con total independencia del conocimiento teórico científico. Pero, sobre todo, sin este conocimiento independiente del orden temporal, la irreversibilidad que afirman las leyes irreversibles pierde su contenido empírico para convertirse en una verdad analítica; esta sobreabundancia de analiticidad torna "imposible en principio que el cambio científico alguna vez nos conduzca a concluir que, de hecho, estábamos equivocados al asumir una asociación legal entre las dos relaciones" (Sklar, 1977, p. 403). En otras pala-

bras, si, por ejemplo, se definiera el futuro como el sentido temporal hacia el cual aumenta la entropía, el Segundo Principio no sería una ley empírica sino un enunciado analítico: la disminución de entropía hacia el futuro no sería meramente un hecho posible pero que contradice una ley natural, sino un hecho imposible como la existencia de un triángulo que no tiene tres lados. John Earman también distingue cuidadosamente entre *orientación temporal* e *irreversibilidad*, adoptando lo que denomina “*La Herejía de la Dirección del Tiempo*”. Ella afirma, primero, que la orientación temporal, si existe, es una característica intrínseca del espacio-tiempo que no necesita ni puede ser reducida a características no temporales; y, segundo, que la existencia de una orientación temporal no influye sobre la irreversibilidad de un modo tan crucial como el reduccionista nos haría creer” (Earman, 1974, p. 20). La discusión pormenorizada del enfoque reduccionista en el tema de la irreversibilidad excede el objetivo del presente apartado; no obstante, su mención sirve para señalar que es posible distinguir conceptualmente el problema de la irreversibilidad del problema de la asimetría del tiempo: la discusión del primer problema no exige abordar el segundo.

En la bibliografía sobre el tema suele adoptarse el supuesto según el cual determinismo y reversibilidad van siempre de la mano, como si existiera una implicación conceptual recíproca entre ambos. Tal supuesto, inspirado en las peculiares características de la mecánica clásica, mueve a algunos autores hacia la búsqueda de una fundamentación del carácter indeterminista de lo real como etapa previa indispensable para explicar la irreversibilidad (cfr. Prigogine, 1990). En contra de esta frecuente asociación entre determinismo, t-invariancia y reversibilidad bajo el modelo de la mecánica clásica, deben distinguirse estas nociones y establecerse las relaciones entre ellas. En el caso de la relación entre determinismo y t-invariancia, si las leyes dinámicas de una teoría son t-invariantes, el universo descrito por tal teoría, si es futurísticamente determinista, también lo es históricamente y viceversa —entendiendo futurística e históricamente determinista a la manera de Earman (1986)—; es decir, ante la t-invariancia, si el determinismo se cumple, se cumple en ambos sentidos temporales.

Respecto de la relación entre determinismo y reversibilidad, la situación no es tan sencilla. En primer lugar, debe subrayarse que el determinismo no implica reversibilidad; en efecto, hay sistemas deterministas que describen evoluciones irreversibles *de facto*, como es el caso de la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio desde una fuente puntual. Pero este ejemplo no debe conducir a suponer que las situaciones de irreversibilidad *de facto* son las únicas que invalidan tal implicación: hay sistemas deterministas cuyas evoluciones son nomológicamente irreversibles, como es el caso de un sistema aislado que posee un gradiente térmico inicial, en su evolución hacia el equilibrio según la Ley de Fourier de conducción del calor. Por lo tanto, tampoco la irreversibilidad nomológica implica indeterminismo.

En cuanto a la implicación inversa, algunos autores, como Reichenbach (1956), afirman que la reversibilidad implica determinismo. La idea de Reichenbach parece ser que, para que el sistema pueda “remontar” la evolución original, ésta debe encontrarse totalmente determinada. No obstante, no es tan claro que así deba ser: supóngase un sistema que, partiendo del estado e_0 , pueda evolucionar según una de las dos siguientes secuencias de estados: e_0, e_1, e_{2A}, e_{3A} o e_0, e_1, e_{2B}, e_{3B} ; aún en este caso podría tratarse en ambos casos de procesos reversibles si las secuencias $e^*_{3A}, e^*_{2A}, e^*_1, e^*_0$ y $e^*_{3B}, e^*_{2B}, e^*_1, e^*_0$ —donde los

asteriscos indican los correspondientes estados temporalmente invertidos—no quedan excluidos ni por consideraciones nomológicas ni por cuestiones *de facto*. Sin duda, no es fácil imaginar un caso en el que efectivamente se cumpla esta combinación entre indeterminismo y reversibilidad, pero no parece existir razón lógica alguna que la impida. De todos modos, no es éste el caso que entra en juego en las tradicionales discusiones acerca del problema de la irreversibilidad en física.

Perspectivas

En las discusiones acerca de la irreversibilidad temporal, los procesos macroscópicos regidos por el Segundo Principio de la Termodinámica suelen ser considerados como ejemplos paradigmáticos de irreversibilidad nomológica. Es aquí donde se origina el problema de la irreversibilidad en la física: ¿cómo surge esta irreversibilidad nomológica en un sistema termodinámico a partir de los procesos mecánicos nomológicamente irreversibles que describen los elementos del sistema? Este es el problema al que debieron enfrentarse Boltzmann y Gibbs ya en los orígenes de la mecánica estadística.

El enfoque de Boltzmann se basa en identificar la evolución irreversible de un sistema hacia el equilibrio con el proceso que pasa de macroestados menos probables a macroestados más probables. No obstante, esta interpretación exige que, en estado de equilibrio, la ocurrencia de ciertos microestados—precisamente los que conducirían a una evolución anti-entrópica—deba quedar excluida o, al menos, relegada a una ínfima probabilidad. Esto hace suponer que la irreversibilidad nomológica macroscópica queda así reducida a una irreversibilidad *de facto* microscópica. No obstante, la situación no es tan clara: la pregunta acerca de la efectividad del enfoque boltzmanniano para fundamentar la irreversibilidad nomológica termodinámica en una irreversibilidad *de facto* subyacente merece una ulterior investigación.

En cuanto al enfoque de Gibbs, el carácter reversible de las evoluciones mecánicas microscópicas se traslada al plano macroscópico: la irreversibilidad fenomenológica resulta de una descripción de grano grueso de la evolución reversible subyacente. Algunos autores consideran que esta interpretación confiere un carácter inaceptablemente subjetivo al fenómeno de la irreversibilidad. Aquí la pregunta que se impone es la que se refiere a la relación entre las categorías objetivo-subjetivo y los diferentes planos de descripción posibles de una misma realidad física.

Estas preguntas, que exceden ampliamente el alcance del presente trabajo, abren, a mi entender, uno de los campos de investigación más apasionantes de la filosofía de la física.

Notas

¹ Aquí se entiende que un proceso ocurre espontáneamente cuando no requiere una inversión adicional de energía. Por ejemplo, puede transferirse calor de una fuente a otra de mayor temperatura, pero ello exige inyectar energía al sistema desde el exterior.

² En este contexto nos referimos a leyes dinámicas, expresadas bajo la forma de ecuaciones diferenciales, que fijan la evolución temporal del estado del sistema a partir de su estado inicial. En este caso, las condiciones iniciales y de contorno no forman parte de la ley sino que son los enunciados singulares que sirven para fijar el valor de las constantes de integración.

³ Es interesante notar que en la expresión “proceso irreversible *de facto*” se comete un cierto abuso de lenguaje, ya que la palabra “irreversible” parece sugerir una fuerza modal—no es posible revertirlo—que es de hecho desmentida por la definición.

Bibliografía

- Bunge, M. (1977), *Treatise on Basic Philosophy*, Vol. 3, Reidel Publishing Company, Dordrecht-Boston.
- Earman, J. (1974), "An Attempt to Add a Little Direction to «The Problem of the Direction of Time»", *Philosophy of Science*, 41, pp. 15-47.
- Earman, J. (1986), *A Primer on Determinism*, Dordrecht, Reidel.
- Grünbaum, A. (1963), *Philosophical Problems of Space and Time*, Vol. 12 de los *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Boston, Reidel Publishing Co.
- Hollinger, H. B. y Zenzen, M. J. (1982), "An Interpretation of Macroscopic Irreversibility within the Newtonian Framework", *Philosophy of Science*, 49, pp. 309-354.
- Popper, K. (1956), "Irreversibility and Mechanics. Reply to R. Schlegel", *Nature*, 178, p. 382.
- Popper, K. (1957), "Irreversibility Processes in Physical Theory. Reply to E. L. Hill and A. Grünbaum", *Nature*, 179, p. 1297.
- Popper, K. (1958), "Irreversibility Processes in Physical Theory. Reply to R. C. L. Bosworth", *Nature*, 181, pp. 402-403.
- Prigogine, I. y Stengers, I. (1990), *La Nueva Alianza. Metamorfosis de la Ciencia*, Alianza Editorial, Madrid.
- Reichenbach, H. (1956), *The Direction of Time*, University of California Press, Berkeley.
- Sklar, L. (1993), *Physics and Chance*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Zenzen, M. J. (1977), "Popper, Grünbaum and *de facto* Irreversibility", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 28, pp. 313-324.