



¿Qué significa “invertir el tiempo” en física?


What does “reversing time” mean in physics?

O que significa “inverter o tempo” em física?

Cristian Lopez

CONICET, Argentina / Université de Lausanne, Suiza

cristian.lopez@unil.ch

0000-0002-2883-4037 

→ **Recibido:** 03 / 09 / 2025

→ **Aceptado:** 14 / 10 / 2025

→ **Publicado:** 05 / 12 / 2025

→ **Artículo Dossier**

“Filosofía y Fundamentos de la Física”

© 2025 Cristian Lopez - CC BY 4.0

→ **Cómo citar:** Lopez, C. (2025).

¿Qué significa “invertir el tiempo” en física?.

Culturas Científicas, 6(1), 18-40.

doi.org/10.35588/cc.v6d7828

[RESUMEN]

En este artículo exploraré el concepto de inversión temporal en física. Argumentaré que la complejidad de la inversión temporal se debe a dos planos que juegan un papel fundamental en la conceptualización e implementación del concepto: un plano metafísico y un plano heurístico-metodológico. Posiciones alternativas en cada uno de estos planos guían y determinan (de manera parcial) cómo se entiende la inversión temporal. El resultado no es sólo una importante complejidad conceptual de qué significa invertir el tiempo en física, sino también una cierta subdeterminación en el abanico de respuestas posibles.

[PALABRAS CLAVES]

Filosofía de la física, Filosofía del tiempo, Inversión temporal, Simetrías, Metafísica del tiempo

[ABSTRACT]

This article examines the concept of time reversal in physics. I argue that the complexity of time reversal arises from two distinct levels that play a fundamental role in its conceptualization and implementation: a metaphysical level and a heuristic–methodological level. Different positions adopted at each of these levels guide, and to some extent determine, how time reversal is to be understood. The outcome is not only a significant conceptual complexity in clarifying what it means to reverse time in physics, but also a degree of underdetermination in the range of possible answers.

[KEY WORDS]

Philosophy of physics, Philosophy of time, Time reversal, Symmetries, Metaphysics of time

1. Introducción

La idea de “invertir el tiempo” ha ejercido una atracción persistente en la cultura, la literatura y el cine. Desde los relatos de H. G. Wells hasta las ficciones contemporáneas de Christopher Nolan, el motivo narrativo de “retroceder en el tiempo” fascina precisamente porque combina fibras sensibles de nuestra vida cotidiana con la ciencia ficción: la posibilidad de deshacer errores, revivir momentos, alterar el curso de los acontecimientos, evitar una guerra o una calamidad ya pasada. En la cultura popular, esa inversión temporal se suele ilustrar con imágenes muy sugestivas pero simples: vasos rotos que se recomponen, objetos que desandan sus pasos hacia “el pasado”, lenguajes que se hablan en sentido inverso. Estas representaciones, aunque potentes, ocultan la complejidad conceptual y científica de la cuestión: ¿qué significa, en rigor filosófico y físico, invertir el tiempo? Y más aún, ¿es compatible con las leyes fundamentales de la física que gobiernan nuestro universo?

En filosofía de la física, la pregunta ha adquirido un lugar crucial en las últimas décadas. La idea de invertir el tiempo no es solo fascinante en sí misma, sino que también juega un papel central en varios problemas filosóficos y científicos. Buena parte de las leyes dinámicas—desde la mecánica clásica hasta la mecánica cuántica— se describen como *invariantes bajo inversión temporal*. Dicho de manera informal, esto implica que, si un proceso está permitido por las leyes cuando el tiempo corre en una dirección (digamos, de pasado a futuro), también lo estaría su imagen temporalmente invertida en la que el tiempo corre en sentido contrario (digamos, de futuro a pasado). Desde esta perspectiva, las ecuaciones serían incapaces de distinguir entre evoluciones hacia el futuro o hacia el pasado. En otras palabras, ellas son “ciegas” a la dirección temporal. Esta conclusión contrasta de manera llamativa con nuestra experiencia cotidiana del mundo, en el que los huevos se rompen pero no se recomponen espontáneamente, en la que recordamos el pasado y no el futuro, en la que las causas preceden a los efectos. Surge, entonces, un problema filosófico bastante profundo: ¿cómo conciliar la aparente simetría temporal de las leyes físicas con la asimetría temporal de la experiencia cotidiana y de los fenómenos macroscópicos?

Diferentes respuestas a esta pregunta han gravitado en torno a especificar de manera precisa qué significa invertir el tiempo. El objetivo general de este trabajo es explorar las diferentes sutilezas y debates que encierra esta pregunta. Si bien muchos han pensado que una correcta implementación teórico-formal de la inversión temporal agotaba su significado y complejidad, yo creo que no es así en absoluto. La inversión temporal, desde mi visión, es un concepto bastante complejo y polifacético, cuyo sentido depende de compromisos metafísicos sobre la naturaleza del tiempo y de estrategias metodológico-heurísticas acerca del papel de las simetrías en la construcción de las teorías físicas. Es decir, lejos de ser una herramienta neutral, una pieza más de la estructura formal de una teoría física, la forma en que definimos y aplicamos la inversión temporal codifica supuestos sobre qué es el tiempo, cómo se relaciona con el movimiento, qué papel desempeñan las simetrías en la descripción científica y cómo se conectan los formalismos matemáticos con la realidad que pretenden representar.

En esta línea, voy a estructurar este artículo en dos planos complementarios que muestran tal complejidad. Por un lado, en el plano **conceptual-metafísico**, voy a argumentar que concepciones acerca del tiempo (específicamente, *substantialismo* frente a *relacionalismo*) inspiran y guían distintas maneras de entender la inversión temporal. Por otro lado, en el plano **heurístico-metodológico**, voy a distinguir entre dos maneras de entender el papel de las simetrías: *por descubrimiento*—concebiéndolas como propiedades genuinas de la realidad—

y *por estipulación* —tratándolas como principios heurístico-metodológicos útiles para construir teorías consistentes y elegantes.

Mi idea es que al combinar, ambos planos, la complejidad conceptual de la inversión temporal se vuelve más evidente. Muchas discusiones previas han partido de una definición tácita de inversión temporal, dando por sentado que se trata de un concepto unívoco. Sin embargo, al reconocer esta complejidad (y la pluralidad de maneras de entender el concepto), queda claro que la cuestión de la *invariancia* bajo inversión temporal es más intrincada: algunas teorías resultan invariantes si se adopta la concepción estándar (la cual voy a llamar ‘la visión heredada’), pero dejan de serlo bajo concepciones alternativas (las cuales llamaré ‘heterodoxas’). Asimismo, si se concibe la invariancia como un principio heurístico-metodológico en lugar de una propiedad del mundo a descubrir, su relevancia para debates como el de la dirección del tiempo puede quedar en entredicho.

El artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2 voy a explicar con cierto detalle en qué consiste la visión heredada de la inversión temporal en física. En la Sección 3, voy a explorar el primer plano, conceptual metafísico, y argumentar cómo los compromisos metafísicos respecto de qué es el tiempo influyen y guían en la conceptualización de la inversión temporal. En la Sección 4, voy a explorar el segundo plano, heurístico-metodológico, mostrando que existen dos maneras de entender las simetrías en física. Esto afecta, directamente, cómo entender la simetría de inversión temporal en varias discusiones contemporáneas, como la de la dirección del tiempo. La convicción de fondo es que ciertos problemas persistentes —como el vínculo entre la simetría de inversión temporal y la dirección del tiempo— no se resuelven con “más física” únicamente, sino que requieren esclarecer las conceptualizaciones que guían el uso del formalismo. En este sentido, creo, la filosofía de la física no actúa como una comentadora externa, sino como socia necesaria en la tarea de exponer supuestos, iluminar compromisos y clarificar motivaciones en la construcción de teorías físicas.

2. La inversión temporal en la visión heredada

La primera intuición que tenemos respecto de invertir el tiempo es la idea de reproducir hacia atrás el desarrollo de los acontecimientos. Un ejemplo típico es la inversión de una película al correrla en reversa. Sin embargo, al intentar trasladar esa intuición a la física, aparecen inmediatamente dificultades conceptuales y técnicas. ¿Es la inversión temporal una mera reordenación de sucesos “a la inversa”? ¿O exige algo más que simplemente invertir el orden de los eventos? De manera un poco más técnica, ¿es la inversión temporal una mera transformación geométrica que reparametriza la coordenada temporal en la evolución dinámica de un sistema? ¿O es una transformación que exige, además, transformar los estados mismos del sistema?

En las siguientes tres subsecciones mostraré y analizaré cómo la visión heredada ha respondido a estas preguntas. Con ‘la visión heredada’, me refiero a cómo la inversión temporal es usualmente introducida en manuales de física, en cursos introductorios y en la filosofía de la física en general. Comenzaré la discusión motivando diferentes enfoques de la inversión temporal a nivel intuitivo. Continuaré, en la subsección 2.1, con cómo la inversión temporal se aplica en mecánica clásica, sirviendo como modelo. Finalmente, mostraré cómo la inversión temporal encierra ciertas sutilezas en la física cuántica, aunque marque una continuidad con la mecánica clásica. El propósito general de la sección es mostrar que, incluso en su formulación

canónica, la inversión temporal está lejos de ser un concepto trivial: obliga a precisar qué se entiende por “invertir el tiempo” y hasta qué punto la operación es una mera simetría formal o una transformación con contenido físico.

2.1. Una aproximación intuitiva

Como dije anteriormente, la primera intuición respecto a la inversión temporal es la mera inversión del orden de los eventos en una serie. Si, por ejemplo, tenemos una secuencia como “Desayuno–Almuerzo–Cena”, la versión temporalmente invertida sería “*Cena–Almuerzo–Desayuno*”:

$$D \rightarrow A \rightarrow C \Rightarrow C \rightarrow A \rightarrow D \quad (1)$$

Donde ‘ \Rightarrow ’ designa la acción de invertir el orden temporal de la serie. Esta clase de inversión temporal es, por ejemplo, la que asume Roger Penrose (1989, pp. 355-360) al pensar en la inversión temporal de mediciones en mecánica cuántica.

Pero este ejemplo trivializa un poco qué es lo que se entiende por inversión temporal en filosofía y en física. Algunos han señalado que la inversión temporal en física no invierte simplemente el orden de los eventos, sino también los estados mismos. En el ejemplo de la serie “Desayuno–Almuerzo–Cena”, la inversión temporal de la serie original no es simplemente (1), sino:

$$D \rightarrow A \rightarrow C \Rightarrow C^T \rightarrow A^T \rightarrow D^T \quad (2)$$

Donde X^T designa la inversión temporal del evento C (cena), A (almuerzo) y D (desayuno). Es decir, cada evento en la serie está a sí mismo invertido temporalmente (ver Davies 1974, Savitt 1996). El primer problema que surge es, ¿qué significa, exactamente, “invertir temporalmente un evento, o un estado”? Pensemos en qué significa, por ejemplo, C^T (la inversión temporal de cena). Todos sabemos qué es una cena en el sentido ordinario del tiempo, pero, ¿ C^T es simplemente una cena ocurriendo en el sentido inverso del tiempo? ¿Qué implica? ¿Cada suceso dentro del evento “cena” está a su vez temporalmente invertido? Pensemos en los comensales. Sus estados mentales y neurofisiológicos, ¿suceden en la dirección temporalmente opuesta, es decir, de futuro-a-pasado? Pero esto resulta bastante inverosímil porque no es en absoluto claro que siquiera puedan existir personas con sus estados mentales y neurofisiológicos invertidos. ¿Entonces? ¿Una cena temporalmente invertida es simplemente la inversión del movimiento de algunos aspectos (por ejemplo, el orden en el que se sirven los platos), pero no de otros (el sistema digestivo y metabolismo de los comensales)? Estas preguntas muestran que, aun en el nivel intuitivo, la noción de inversión temporal encierra algunas ambigüedades.

Steven Savitt (1996) propuso distinguir tres formas de entender la inversión temporal: (i) la que corresponde solo a invertir el parámetro temporal ($t \rightarrow -t$); (ii) la que implica también invertir los eventos y estados; y (iii) la que se entiende como inversión del movimiento. Si esto es así, no hay garantía alguna de que la simetría de inversión temporal se siga cumpliendo si se adopta una forma o la otra. Según el criterio adoptado, una teoría podría ser invariante en un sentido pero no en otro. Ahora bien, esta es una distinción en principio conceptual atestiguada

en la literatura en mayor o menor medida. Esto no implica que, en física, no haya una manera privilegiada de entender la inversión temporal. De hecho, uno de los objetivos de este artículo es explorar y exponer los supuestos que justifican por qué la inversión temporal en física es entendida de una manera específica, a pesar de su diversidad conceptual.

2.2. La inversión temporal en la mecánica clásica

En física, es mucho más usual utilizar la inversión temporal tipo (2) (o (ii)-(iii) de acuerdo con Savitt). ¿Qué implicancias tiene esto? Desde un punto de vista muy general y formal, esto significa que la inversión temporal invierte el orden de los eventos mediante la reparametrización de la coordenada temporal t e invierte todas aquellas variables dinámicas en los estados de los sistemas físicos que se definen en función de t . Intuitivamente, por ejemplo, esto significa que la inversión temporal va a invertir también el signo de todas aquellas variables que son derivadas primeras del tiempo (como la velocidad), mientras que deja intactas aquellas variables que son independientes del tiempo o derivadas segundas (como posición y aceleración, respectivamente). Si bien esto se cumple en algunos casos, no tiene que ser generalizado: cómo la inversión temporal actúa en concreto depende esencialmente de la teoría en discusión y de cómo se definan sus principales variables. Como definición general y abstracta, en la línea de (2), puede decirse que la inversión temporal es una transformación de simetría T tal que:

$$T : t \rightarrow -t \quad T : s \rightarrow \tilde{s} \quad T : O \rightarrow \tilde{O} \quad T : D \rightarrow \tilde{D} \quad (3)$$

Es decir que, además de (1), la inversión temporal transforma los estados físicos ($s \rightarrow \tilde{s}$), las magnitudes físicas del sistema ($O \rightarrow \tilde{O}$) y los operadores de derivación ($D \rightarrow \tilde{D}$).

Mencioné rápidamente que la inversión temporal es una transformación *de simetría*. Esto significa que su utilidad primordial es utilizar la transformación para testear si un objeto matemático en particular es simétrico (o no) bajo la transformación¹. En física, tales objetos matemáticos son las ecuaciones dinámicas de la teoría y la simetría se manifiesta en al menos tres niveles: preservación de las relaciones funcionales entre los elementos en la ecuación, preservación del espacio de soluciones de la ecuación y preservación de alguna propiedad adicional (usualmente llamada “interpretativa”) que se deriva de las soluciones a la ecuación (e.g., cierta observacional o empírica)². Entonces, podemos definir la simetría, en general, de la siguiente manera, donde L es una ecuación dinámica que representa una ley:

$$L(s, O, D, t) = L(\tilde{s}, \tilde{O}, \tilde{D}, -t) \quad (4)$$

Todo lo mencionado hasta el momento representa la inversión temporal (y la simetría

¹Términos como “simetría”, “invariancia” y “covariancia” suelen ser tomados como sinónimos aunque, en sentido estricto, no lo son. De manera general, “simetría” es un concepto más amplio que puede llevar a “invariancia” (cuando una magnitud permanece inalterada ante una transformación); mientras que “covariancia” suele referir a que la *forma estructural* de la ley retiene su forma ante la transformación. En general, covariancia requiere invariancia (pero no viceversa), y ambos conceptos son formas de expresar la idea de simetría (ver Lopez and Lombardi 2019 por un tratamiento más formal). En lo que sigue del artículo, utilizaré el término ‘simetría’ e ‘invariancia’ de manera indistinta ya que no afecta el fondo de la cuestión.

²Este nivel suele agregarse porque existen transformaciones que cumplen los primeros dos requisitos pero que no debieran considerarse simetrías físicamente relevantes (ver Belot 2013).

bajo inversión temporal) a nivel general. Lo interesante es la aplicación a teorías físicas y modelos en concreto. La mecánica clásica, y en particular su formulación Hamiltoniana, ofrece un terreno claro para precisar el concepto y suele tomarse como punto de partida para definir la inversión temporal en otras teorías (con algunas sutilezas como voy a explicar más adelante). En mecánica Hamiltoniana, el estado de un sistema se describe mediante coordenadas generalizadas y momentos conjugados, (q_i, p_i) . La evolución física del sistema se representa como una curva suave en el espacio de las fases, $x(t) = (q(t), p(t))$ que satisface las ecuaciones de movimiento de Hamilton.

En este caso, la inversión temporal T se implementa (y define) revirtiendo el parámetro temporal, invirtiendo el signo de los momentos y manteniendo fijas las posiciones:

$$T : t \rightarrow -t, \quad p_i \rightarrow -p_i, \quad q_i \rightarrow q_i \quad (5)$$

De este modo, si las ecuaciones de Hamilton resultan simétricas ante inversión temporal, cada trayectoria en el espacio de fases se transforma en otra trayectoria que también satisface las mismas ecuaciones, siempre que el hamiltoniano conserve su forma bajo la transformación, $H(q_i, p_i) \rightarrow H(q_i, -p_i)$. Esto, en teoría, mantendría las tres equivalencias mencionadas anteriormente: conservaría el espacio de soluciones (la inversión temporal transforma soluciones en soluciones), las relaciones funcionales entre los elementos de la ecuación (hay equivalencia formal estructural), y las observaciones o el contenido empírico de la teoría.

Si la inversión temporal se define como en (5), es fácil demostrar que las ecuaciones de Hamilton, en su expresión más general y fundamental, son invariantes ante inversión temporal. Y aquí hay dos puntos para enfatizar, que discutiré más adelante: primero, la visión heredada parte del supuesto de que (5) representa fielmente la inversión temporal; y, segundo, que es la expresión general y fundamental de las ecuaciones la que es realmente relevante para evaluar si existe una simetría o no. Con respecto al primer punto, resulta ligeramente intuitivo pensar que la inversión temporal *no debiera* cambiar las posiciones de los sistemas (después de todo, “posición” es independiente del tiempo); pero sí resulta lógico que el momento cambie de signo ante la inversión temporal, el cual sí parece depender del tiempo³. Con respecto al segundo punto, es cierto que muchos modelos Hamiltonianos no resultan invariantes ante inversión temporal porque, por ejemplo, hay un potencial que oscila dependiendo del tiempo. Sin embargo, se considera que estos sistemas no son fundamentales y que la ruptura de simetría es circunstancial y propia del modelo, no de la formulación general de la teoría (Callender 1995). Debido a la conexión que existe entre, por ejemplo, la estructura geométrica espacio-temporal de una teoría y las simetrías espacio-temporales de sus ecuaciones fundamentales (Earman 1989, North 2009, North 2021), se piensa que solo éstas son las relevantes para determinar si se cumple (o no) una determinada simetría espacio-temporal (como la inversión bajo inversión temporal).

La lección general, entonces, es que la inversión temporal en mecánica clásica (formulación Hamiltoniana) se entiende como una operación bien definida sobre el espacio de fases: $t \rightarrow$

³En mecánica clásica Hamiltoniana, el momento conjugado depende de las velocidades, las cuales son una primera derivada temporal. Por esta razón, T cambia el signo del momento. Vale la pena notar que la inversión temporal es una transformación *anti-simpléctica* que preserva las ecuaciones de movimiento, pero invierte la orientación del espacio de las fases. Esto transforma la inversión temporal en una “involución anti-simpléctica”, lo cual sirve de base para desarrollar la inversión temporal en mecánica cuántica.

$-t, p \rightarrow -p, q \rightarrow q$. Justamente, esta transformación trata no solo de reproducir (2), sino también de relacionar la inversión temporal con la idea de inversión del movimiento (o de la evolución) de un sistema (sentido (iii) en Savitt). Esta idea medular es la que se tratará de preservar en la implementación formal de la inversión temporal en otras teorías.

2.3. La inversión temporal en la mecánica cuántica

Si la mecánica clásica sirve como modelo claro para pensar la inversión temporal en física, la mecánica cuántica encierra varios bemoles que han dado lugar a una fructífera discusión en la filosofía de la física (Albert 2000, Callender 2000, Roberts 2018, Lopez 2019, 2021b; Allori 2019). Las dificultades se reflejan en diferentes aspectos, pero uno de los más centrales es que los estados de un sistema cuántico ya no son puntos en el espacio de las fases sino vectores en un espacio de Hilbert. Esto plantea el problema de cómo debe actuar la inversión temporal frente a estados cuánticos y ciertos operadores.

Una de las estrategias es trasladar la implementación formal en mecánica clásica al mundo cuántico. La manera más sencilla es definiendo un operador unitario lineal (digamos, Θ) que invierta el parámetro t y aquellas magnitudes definidas como derivadas primeras de t , pero mantenga las posiciones fijas, tal como hacía la inversión temporal en mecánica clásica:

$$\Theta : t \rightarrow -t, \quad x \rightarrow x \quad (6)$$

En este caso, el operador momento (\hat{P}) no cambia de signo ante inversión temporal porque no depende del tiempo ni de ninguna derivada primera del tiempo, sino que depende de la posición. La invariancia, en este caso, se evalúa en la ecuación de Schrödinger en su expresión general y fundamental,

$$H\psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) \quad (7)$$

Donde el estado cuántico está expresado en la base de posición. El problema central de implementar la inversión temporal en términos de Θ , y que ha dado a mucha discusión en la literatura especializada, es que la ecuación de Schrödinger resulta *asimétrica* bajo Θ (para detalles, ver Roberts 2018, Lopez 2021b). Hay dos motivos fundamentales para este resultado: primero, es que Θ invierte el signo del Hamiltoniano, generando un espectro de energías negativas sin significado físico. Segundo, la ecuación temporalmente invertida es incapaz de generar una involución, rompiendo la preservación del espacio de soluciones (es decir, la transformación toma una solución y la transforma en una no-solución)⁴.

La mayoría de los libros de texto advierten este problema e introducen ciertas condiciones específicas que cualquier operador de inversión temporal debiera cumplir dentro de la teoría. Primero, el Hamiltoniano debe permanecer invariante ante inversión temporal (esto significa

⁴En relación con el pie de página 3, es importante notar que una implementación unitaria de la inversión temporal en mecánica cuántica rompe formalmente la analogía con la mecánica Hamiltoniana: una transformación anti-simpléctica en mecánica Hamiltoniana se corresponde con un operador *anti-unitario* en mecánica cuántica, no con un operador unitario que es incapaz de invertir la orientación de la estructura subyacente (la estructura compleja en este caso), necesaria para mantener el producto interno.

que el espectro del Hamiltoniano tiene que estar siempre acotado y que la transformación no puede generar energías negativas a partir de energías positivas o viceversa, ver Ballentine 1998). Segundo, la inversión temporal debe preservar el espacio de soluciones, en el sentido en el que un estado cuántico temporalmente invertido debe pertenecer también al mismo espacio funcional unitario (ver Sakurai 2011, p. 290; Sachs 1987, p. 36). Y tercero, la inversión temporal tiene que satisfacer los principios de correspondencia, generando una inversión del movimiento en el límite clásico (Bigi y Sanda 2016, p. 27).

Cuando estas condiciones son tenidas en cuenta para definir la inversión temporal en mecánica cuántica, es evidente que una transformación como Θ no puede satisfacerlas (ver Gasiorowicz 1966, p. 27; Roberts 2018, Lopez 2021b para detalles técnicos). Por lo tanto, si la inversión temporal cumple con tales condiciones, entonces no puede estar representada por Θ . Lo interesante a notar en este paso es que, por un lado, Θ parece reproducir *formalmente* lo que hace la inversión temporal en mecánica clásica⁵; pero no representa *conceptualmente* la misma idea de inversión temporal. Claramente, la coherencia y continuidad teórica demandan renunciar a una de las dos: continuidad formal o continuidad conceptual.

Tal como he argumentado en otros artículos (Lopez 2025a, Lopez 2021a,b), la visión heredada prefiere preservar cierta continuidad conceptual, a riesgo de romper (al menos a primera vista) la continuidad formal. Algunos autores (entre ellos, yo mismo) han argumentado que el término “inversión temporal” en mecánica cuántica encierra una doble implementación, una genuina y una espuria: una que efectivamente representa la inversión temporal (Θ , en este caso) y otra que representa la inversión del movimiento (la implementación de la visión heredada, ver Albert 2000, Callender 2000, Lopez 2019. Ver Peterson 2015 para un análisis de esta dualidad). Yo ya no estoy de acuerdo con esta idea y me inclino a pensar que la implementación de la visión heredada sí busca representar genuinamente la inversión temporal, buscando cierta preservación conceptual y metafísica con la inversión temporal en otros ámbitos teóricos.

En la visión heredada, la guía para la implementación formal y conceptual de la inversión temporal en mecánica cuántica fue propuesta por Eugene Wigner en los años 1930. Wigner formula la definición de inversión temporal en base a dos elementos: el teorema de Wigner (1932) y la idea de “involución”. El teorema de Wigner establece que cualquier transformación sobre el espacio de Hilbert que preserve la transición de probabilidad debe ser o bien unitaria, o bien antiunitaria. La idea de “involución” implica que la inversión temporal debe ser tal que al aplicarse dos veces genera la identidad, con una sutileza: la identidad es generada mediante la aplicación en serie de cuatro transformaciones:

$$\begin{aligned} &\text{Desplazamiento temporal } t \times \text{Inversión temporal} \times \text{Desplazamiento temporal } t \\ &\times \text{Inversión temporal} = I. \end{aligned}$$

Esto significa que la operación de invertir el tiempo está bien definida solo si genera una involución en este sentido. Como un operador unitario (como Θ) es incapaz de satisfacer esta condición, se sigue por el teorema de que el operador debe ser anti-unitario (τ).

Este cambio en la implementación formal tiene las siguientes consecuencias. La inver-

⁵Es decir, invertir el tiempo y todas las derivadas primeras del tiempo. Cuando se investiga más en detalle, incluso la continuidad formal se rompe, ver el pie de página anterior 4.

sión temporal en la mecánica cuántica mediante τ no sólo invierte el signo de la coordenada temporal t , sino que también incluye la conjugación compleja, $\tau i \tau^{-1} = -i$. Esto implica que el estado cuántico (la función de onda en (7), base posición), se transforma en su complejo conjugado ante τ , $\psi(x, t) \rightarrow \psi^*(x, -t)$. Este operador de inversión temporal anti-unitario no solo satisface las condiciones que impuso Wigner, sino también las tres condiciones que mencionamos anteriormente: preserva el espectro del Hamiltoniano, ya que $\tau H \tau^{-1} = H$; preserva el espacio de soluciones de la ecuación de Schrödinger, ya que resulta simétrica ante τ ; y reproduce la idea de inversión de movimiento en el límite semiclásico.⁶

A modo de conclusión parcial. Si bien la inversión temporal en general admite diferentes conceptualizaciones e implementaciones, hay una versión estándar heredada de cómo debe implementarse en casos concretos. Tal implementación no es arbitraria ni ad hoc, sino que busca cierta continuidad conceptual tomando como base la inversión temporal en mecánica clásica: la idea de invertir el movimiento, la idea de invertir los estados además del orden temporal, la idea de generar una involución que preserve el espacio de soluciones, responden a salvaguardar cierta unidad y coherencia conceptual transteórica que demanda cierta creatividad formal que podría lucir no suficientemente bien justificada o, incluso, trivial. Sin embargo, creo, la justificación no se agota aquí: la visión heredada a su vez descansa sobre supuestos *metafísicos* respecto de la naturaleza del tiempo y sobre supuestos heurístico-metodológicos respecto del papel de las simetrías en la física que, si bien fortalecen su andamiaje conceptual, también la expone a varios contraargumentos.

3. Inversión temporal y metafísica del tiempo

En esta sección, argumentaré que teorías filosóficas contrarias respecto de cuál es la naturaleza del tiempo afectan la manera de entender la inversión temporal. Prima facie, esto resulta fácil de comprender: si queremos entender qué significa “invertir el tiempo”, parece plausible que las respuestas estén condicionadas por qué entendemos por “tiempo”. Si bien este debate es sumamente complejo, reduciré las potenciales divergencias a dos teorías generales: **substantivalismo temporal** y **relacionalismo temporal** (ver Pooley 2013, Dasgupta 2015, North 2018 para detalles). De acuerdo con la primera, el tiempo es una sustancia que existe independiente y autónomamente del contenido material que puede localizarse en él; de acuerdo con el segundo, el tiempo se reduce a un tipo específico de relaciones entre sucesos. Esto sugiere que los debates sobre inversión temporal involucran un meta-nivel de discusión, irreducible a los detalles técnicos o condiciones físicas que eventualmente puedan surgir.

3.1. Metafísicas del tiempo: substantivalismo y relacionalismo

3.1.1. Substantivalismo temporal

El *substantivalismo temporal* (**ST** de ahora en adelante) sostiene que el tiempo existe de manera independiente, como una sustancia autónoma de la materia o los eventos. En la

⁶En la misma línea de los pies de página anteriores, un operador anti-unitario restablece la correspondencia con la mecánica clásica Hamiltoniana: mientras que en el último la transformación es anti-simpléctica, en el primero es anti-unitaria, como cabría esperar.

versión clásica, asociada a Isaac Newton, el tiempo está compuesto por instantes cualitativamente indistinguibles pero ontológicamente primitivos, relacionados entre sí por vínculos de anterioridad y posterioridad. Estos instantes no dependen de los eventos materiales: tienen existencia propia y proporcionan el marco absoluto en el que los acontecimientos se localizan (temporalmente) (Para teorías substantivalistas en filosofía de la física ver Maudlin 1993, Maudlin 2002, Mozarsky 2016).

La ontología de **ST** es, por lo tanto, una ontología dual, con (al menos) dos tipos de sustancias. Lo importante del esquema son los tipos de relaciones (temporales) que son posibles. En primer lugar, los instantes temporales mantienen relaciones temporales primitivas con otros instantes (i.e., relaciones instante-a-instante). En segundo lugar, los objetos o eventos están localizados temporalmente respecto de estos instantes, lo cual define un segundo tipo de relación temporal, evento-a-instante. Y en tercer lugar, la duración entre eventos suele involucrar una tercera relación temporal, evento-a-evento. Es claro que la relación instante-a-instante es primitiva, definida en función de los instantes que componen el tiempo (los cuales por definición son primitivos). Las relaciones evento-a-instante se derivan de las primeras, al igual que las relaciones evento-a-evento. De esta manera, el tiempo se estructura como una sucesión de instantes (primitivos) conectados por relaciones primitivas (instante-a-instante), sobre las cuales supervienen al menos dos relaciones temporales más: de locación (evento-a-instante) y de duración relativa (evento-a-evento).

La pregunta clave en el contexto de la inversión temporal es sobre qué tipo de relación temporal debe actuar la transformación. Si el substantivalismo es tomado seriamente, es claro que 'inversión temporal' en sentido estricto y genuino debe significar la inversión de las relaciones instante-a-instante, ya que son las primitivas y las que más transparentemente expresan qué es el tiempo. Jill North parece sostener esta visión cuando dice:

"What is a time reversal transformation? Just a flipping of the direction of time! That is all there is to a transformation that changes how things are with respect to time: change the direction of time itself". (North 2009, p. 212)

Físicamente, no es muy claro qué quiere decir "invertir la dirección del tiempo mismo", pero *prima facie* uno supone que la mera inversión de $t \rightarrow -t$ representa tal idea. Es importante entender la dialéctica de esta afirmación y sus supuestos. Si asumimos **ST** y asumimos una visión realista de la física, entonces las teorías físicas deben capturar de alguna manera **ST**. La coordenada temporal t , bajo estos supuestos, no es meramente un parámetro, sino que representa el tiempo. Entonces, la transformación $t \rightarrow -t$ representa la idea de inversión temporal. Esto supone que el resto de las relaciones temporales derivadas (como la relación evento-a-evento) se invertirán, o no, dependiendo de cómo estén definidas físicamente en función de t . Craig Callender parece abonar a esta idea cuando afirma que las variables dinámicas de una teoría cambian de signo ante inversión temporal solo si este cambio se sigue lógicamente de la inversión $t \rightarrow -t$ (Callender 2000).

Esta discusión es sumamente relevante porque, de adoptarse **ST**, la inversión temporal en física debiera estar más cerca de (1) o incluso de Θ , que de (2) o de τ . En Lopez (2021b), he argumentado que posiciones como las de David Albert o Craig Callender (denominadas el "pancake view" en Roberts 2018) suponen una metafísica del tiempo substantivalista. Desde ese ángulo, es fácil comprender por qué la visión heredada de la inversión temporal en física falla en capturar la inversión temporal genuina: representa una transformación diferente. Por ello

es que Callender (2000) distingue entre inversión temporal e inversión de Wigner en mecánica cuántica; la última no representa genuinamente la inversión temporal, sino que representa la inversión del movimiento (i.e., de las cosas *en el tiempo*). La definición de inversión temporal como tal no debe involucrar la transformación de otras magnitudes (como mostré en (5) y en el caso cuántico que incluye la conjugación compleja); sino que estas se siguen de la transformación $t \rightarrow -t$, de la misma manera que las relaciones temporales evento-a-evento supervienen sobre las relaciones instante-a-instante.

Para clarificar el argumento. Esto no implica que transformaciones “heterodoxas” de la inversión temporal estén justificadas. Mi punto es que tales transformaciones pueden estar motivadas si se asume **ST**. Y si bien cierta afinidad con **ST** puede sugerir que las transformaciones heterodoxas sean más correctas, tal coherencia filosófica (la cual creo que existe) conlleva ciertas consecuencias físicas que pueden resultar indeseables. En primer lugar, la inversión temporal “no hace lo mismo” en mecánica clásica y en mecánica cuántica (mientras que en la primera invierte la dirección del movimiento, en la segunda no). En segundo lugar, muchas teorías que se pensaban simétricas ante la inversión temporal dejarían de serlo.

3.1.2. Relacionalismo temporal

La teoría filosófica rival de **ST** es el *relacionalismo temporal* (**RT** en adelante). En este caso, el tiempo no es una sustancia independiente, sino un constructo derivado de las relaciones entre eventos materiales. Según esta visión, el único tipo de sustancia que existe es la materia y sus relaciones espaciales. El tiempo se reduce a la sucesión de configuraciones materiales: no hay instantes primitivos, sino únicamente relaciones de anterioridad, simultaneidad y sucesión entre eventos. Es decir que, si las configuraciones de materia cambian, entonces una nueva relación primitiva aparece: relaciones temporales evento-a-evento (por diferentes teorías relacionalistas en física, Rovelli 2002, 2004; Barbour 2020, Thébault y Grybs 2016, Lopez y Esfeld 2025).

La ontología de **RT** es, por tanto, monista: solo la materia es sustancial. El tiempo se concibe como parasitario de las relaciones entre materia (eventos), i.e., relaciones temporales que son primitivas y directas, relacionando eventos con eventos. A diferencia de **ST**, no existen relaciones instante-a-instante ni relaciones de locación evento-a-instante; éstas son puramente ideales y abstractas.

Resulta claro que, desde esta perspectiva, invertir el tiempo signifique invertir las relaciones temporales evento-a-evento, coincidentes con invertir el cambio. Mientras que para **ST**, el parámetro t representaba al tiempo mismo, para **RT** sólo representa un elemento abstracto en la formulación de una teoría física que busca parametrizar el cambio, i.e., relaciones evento-a-evento. De esta manera, es natural pensar que la inversión temporal se defina primariamente por cómo se transforman las variables dinámicas que generan la evolución de los sistemas físicos, ya que el tiempo es parasitario de ellas. En este marco, definiciones como (5) y la del operador anti-unitario en mecánica cuántica son esenciales a la definición de la inversión temporal, ya que son esenciales a la inversión de la relación evento-a-evento. Y esta teoría del tiempo resulta mucho más alineada tanto con (2) como con el sentido (iii) de la definición de Savitt: inversión temporal significa inversión del movimiento. En el ámbito de la mecánica cuántica, también se alinea con la definición de Wigner: la inversión temporal debe capturar la idea de involución. Y esto se alinea con la visión heredada de la inversión temporal en física.

Este argumento no muestra directamente que la visión heredada haya defendido **RT**, o sea, abiertamente relacionalista. El punto es que parece haber una alineación natural: la manera en la que la visión heredada entiende el papel de la inversión temporal en física sugiere que subyace una concepción relacionalista del tiempo. De hecho, esta tesis no es totalmente extraña, sino que explicita algo que parece insinuarse en muchos libros de texto cuando se introduce la inversión temporal. Por ejemplo, Gibson y Pollard dicen:

“In this approach we see that no metaphysical notion of reversal of the direction of the flow of time is involved. We are led to consider time reversed processes but not reversal time itself. Although motion reversal and motion reversal invariance would be better names, we shall adhere to the accepted, if imprecise, usage” (Gibson y Pollard 1976, p.177)

En la misma línea, Leslie Ballentine afirma:

“The term ‘time reversal’ is misleading, and the operation that is the subject of this section would be more accurately described as motion reversal. We shall continue to use the traditional but less accurate expression ‘time reversal’, because it is so firmly entrenched” (1998, p. 377)

Y Wigner mismo enfatiza que “reversal of the direction of motion” hubiese sido una expresión más adecuada que inversión temporal (1932, p. 325).

En resumen, la conceptualización y la implementación de la idea de “invertir el tiempo” están guiadas y parcialmente determinadas por la teoría metafísica del tiempo que se adopte. **ST** parece alinearse más directamente con cierta idea de inversión temporal que implica, fundamentalmente, una inversión del orden de los eventos; inversión sobre la cual supervienen el resto de las potenciales inversiones (e.g., momento, velocidad, etc.). Sin embargo, pienso que esta no es la metafísica temporal que subyace a la visión heredada. La visión heredada parece estar motivada o alineada con alguna forma de **RT**, donde la definición de inversión temporal se reduce esencialmente a invertir el cambio. Esto implica cierta subdeterminación metafísica (Lopez 2023a) en la idea de inversión temporal. Subdeterminación que, no obstante, se extiende más allá de la metafísica del tiempo.

3.2. Otros compromisos metafísicos

La dicotomía relacionalismo y substantivalismo es sólo una dimensión de hasta dónde ciertos compromisos metafísicos guían y determinan el concepto de inversión temporal. En esta sección, voy a repasar brevemente otras dimensiones de este debate que sirven para ilustrar el alcance de la complejidad de este concepto.

En su célebre libro del 2000, *Time and Chance*, David Albert propone distinguir entre propiedades *básicas* y no *básicas*. Según su planteo, las propiedades básicas —como las posiciones de las partículas— son irreducibles y describen completamente el estado de un sistema en un instante. En este sentido, no deben invertirse bajo inversión temporal. En cambio, las propiedades derivadas —como las velocidades— no forman parte de la descripción completa del estado de un sistema en un instante y sí pueden cambiar de signo, dependiendo de su

relación con el tiempo. Según Albert, entonces, cómo la inversión temporal debe actuar ante ciertas variables depende, crucialmente, de si éstas son básicas o derivadas. Pero qué es básico o derivado no es una cuestión física, sino ontológica. El enfoque de Albert tiene consecuencias importantes. Una de ellas es que el electromagnetismo clásico resulta no simétrico ante inversión temporal, contra la visión heredada. Según Albert, el campo magnético es una propiedad básica y no debe cambiar de signo ante inversión temporal (Albert 2000, p. 20–21). Si esto es así, la Ley de Lorentz no es invariante ante inversión temporal, implicando que el electromagnetismo clásico tampoco lo es (para críticas contra el enfoque de Albert, ver Earman 2002, Malament 2004, Peterson 2015, Struyve 2025).

Craig Callender ha defendido una posición cercana, señalando que invertir un estado instantáneo carece de sentido si ese estado ya contiene toda la información fundamental sobre el sistema en un instante. Bajo este enfoque, la inversión temporal consiste simplemente en invertir el orden de los estados, sin modificar su contenido básico. Una de las críticas más agudas contra esta visión proviene de Bryan Roberts (2018), quien ha denominado al enfoque Albert-Callender “el pancake view”. De acuerdo con Roberts, este enfoque ignora propiedades cuya definición depende esencialmente de la dirección temporal, como el momento angular o el espín. Según Roberts, para capturar el sentido físico de la inversión temporal es necesario transformar también esas propiedades.

En una línea similar, Valia Allori (2015, 2019) ha destacado la importancia de la ontología de las teorías físicas en la definición de la inversión temporal. En electromagnetismo clásico, sostiene, las disputas sobre si la teoría es invariante bajo inversión temporal se reducen a desacuerdos acerca de la realidad ontológica de los campos. Según ella, la definición de inversión temporal en electromagnetismo clásico depende de asumir que los campos son reales, pero además de asumir que la teoría debe ser invariante ante inversión temporal (punto que analizaré en la próxima sección). Cualquier enfoque divergente debe rechazar alguno de estos supuestos (2015). Por otra parte, en mecánica cuántica, defiende un enfoque de ontología primitiva para apuntalar la visión heredada. Según su punto de vista, la función de onda no debe considerarse un campo real, sino un instrumento matemático para gobernar la evolución de las entidades fundamentales (2019). En este sentido, está totalmente permitido que la inversión temporal actúe sobre el estado cuántico mediante la conjugación compleja. Ella utiliza este argumento para mostrar que, por ejemplo, el realismo de la función de onda de Albert y Alyssa Ney es incompatible con la visión heredada de la inversión temporal.

Por último, vale la pena mencionar otras fuentes de subdeterminación metafísica que han sido señaladas en la literatura sobre inversión temporal. En un artículo del 2023, yo he señalado tres dimensiones en la subdeterminación: la metafísica del tiempo, la jerarquía de las leyes sobre las cuales debe actuar la inversión temporal (i.e., cuáles se consideran fundamentales y cuáles no), y la identificación de propiedades básicas (i.e., qué magnitudes se consideran primitivas y cuáles no). Como ilustré en esta sección, el primer y el tercer punto están sujetos a debate. En cuanto al segundo, existe cierto consenso de que las ecuaciones fundamentales (lo que Nancy Cartwright llamaría las “overarching laws”, 1983) tienen algún tipo de estatus privilegiado. Si bien poco discutido, este es un supuesto adicional que puede estar abierto a críticas. De hecho, recientemente esto ha sido objetado por el “open system view” (Cuffaro y Hartman 2023, Lopez 2025b). Ward Struyve, por su parte, también ha señalado que la conceptualización de la inversión temporal, así como también si una teoría resulta invariante o no, depende crucialmente de la ontología adoptada. Como la mayoría de teorías sufren de sub-determinación metafísica, cuál es la correcta conceptualización e implementación de la

inversión temporal la sufre también (Struyve 2025).

En resumen, la lección principal de esta sección es que la inversión temporal no puede entenderse sin atender a la metafísica del tiempo. Si se concibe el tiempo como sustancia independiente, invertirlo significa invertir el tiempo mismo; si se lo concibe como relacional, invertirlo equivale a invertir el movimiento. Más allá de esta dicotomía, otras concepciones ontológicas influyen decisivamente en cómo se define la operación y qué magnitudes se transforman. Así, la discusión en torno a la conceptualización e implementación de la inversión temporal no es puramente física ni meramente formal: es también profundamente metafísica. Las ecuaciones no determinan por sí solas el concepto de inversión temporal; es necesario especificar qué ontología se adopta y qué compromisos filosóficos se asumen. El resultado es un panorama bastante más complejo, en el que distintas concepciones conviven y se alinean de maneras diversas.

4. Invariancia bajo inversión temporal: aspectos heurístico-metodológicos

En la Introducción, mencioné que había dos dimensiones para analizar la inversión temporal en física. Hasta aquí, el análisis se ha concentrado en la dimensión metafísica, focalizándose en la *transformación* de inversión temporal en sí misma, es decir, en qué consiste y cómo se implementa en distintos marcos teóricos y de acuerdo con diferentes metafísicas del tiempo. Pero, como he mencionado de pasada con anterioridad, el interés principal de la física contemporánea no recae tanto en la transformación aislada como en la cuestión de la *invariancia* bajo inversión temporal, es decir, si las leyes fundamentales de la naturaleza permanecen válidas y conservan su forma estructural, su espacio de soluciones y la equivalencia empírica al aplicarle dicha transformación. Este cambio de foco abre una nueva dimensión de análisis: el papel heurístico-metodológico de las simetrías en física y, en particular, de la simetría bajo inversión temporal.

El interrogante central de esta sección es si las teorías deben —o no— ser *a priori* invariantes bajo inversión temporal en el nivel de sus ecuaciones fundamentales. Este asunto no es técnico sino metodológico: revela distintas concepciones sobre el papel de las simetrías en la construcción de teorías y modelos en física. Analizarlo permite comprender cómo una dimensión heurístico-metodológica, junto con una metafísica, da forma a cómo entender la inversión temporal en física.

4.1. Dos enfoques: intuición vs. libro de texto

En un artículo de 2015, Daniel Peterson ha distinguido entre dos formas de concebir la inversión temporal en física. La primera, a la que llama **“enfoque intuitivo”**, parte de una definición previa de la transformación (que responde a la pregunta: qué significa “invertir el tiempo”) y luego pregunta si una teoría concreta resulta invariante bajo esa operación. La segunda, denominada **“enfoque de libro de texto”** o **“relativo a la teoría”**, procede de manera inversa: presupone que la teoría es invariante bajo inversión temporal y, a partir de ese supuesto, determina cómo deben transformarse las magnitudes para que la invariancia se cumpla. Según Peterson, ambos enfoques conviven en la filosofía de la física y son la fuente (o

una de las fuentes) de discusiones sobre cuál es la conceptualización e implementación correcta de la inversión temporal.

Según Peterson, posiciones como las de Albert o Callender reflejan el enfoque intuitivo: primero tratamos de intuir qué significa invertir el tiempo, cómo debiera actuar sobre los estados y observables del sistema, y luego aplicar tal transformación en diferentes teorías para observar si permanecen simétricas (o no) ante tal transformación. Ya he hablado *in extenso* sobre este enfoque, por lo que me concentraré en el segundo, el enfoque de libro de texto.

De acuerdo con Peterson, la presentación de la inversión temporal en los libros de texto no responde a un enfoque intuitivo, sino que parte de un principio distinto: primero, se asume que la teoría en cuestión es invariante ante inversión temporal; luego, se encuentra qué transformación deja invariante la teoría a la vez que invierte el movimiento. Si una transformación *no* deja invariante la teoría, entonces no es un candidato para definir la inversión temporal en *esa* teoría (de allí que el otro nombre del enfoque sea “relativo a la teoría”). Un claro exponente de este enfoque son Frank Arntzenius y Hillary Greaves (2009). Al discutir la inversión temporal en electromagnetismo clásico (contra Albert), ellos dicen que:

“Next let us consider the electric and magnetic fields. How do they transform under time reversal? Well, the standard procedure is simply to assume that classical electromagnetism is invariant under time reversal. From this assumption of time reversal invariance of the theory (...) it is inferred that the electric field E is invariant under time reversal (...)” (Arntzenius y Greaves 2009, p. 6).

Este ejemplo es bastante ilustrativo. De acuerdo con Albert, como vimos, el campo magnético y el campo eléctrico no deben invertir signo bajo inversión temporal porque son propiedades básicas. Para Arntzenius y Greaves, el punto de partida es que la teoría *debe* ser invariante y, a partir de ese supuesto, deducir cómo tales magnitudes debieran transformarse para mantener la teoría invariante. Este razonamiento parece reflejar el modo en que Wigner procede al definir la inversión temporal en mecánica cuántica: ya que la inversión temporal se define mediante una cuádruple transformación que *debe* llevar a la identidad, se supone que la primera aplicación de inversión temporal *debe* mantener una evolución temporalmente invertida que sea compatible con las leyes de la teoría. Esto, *mutatis mutandis*, equivale a asumir la invariancia bajo inversión temporal (ver Peterson 2015, p., 47 y Lopez 2021a,b).

A primera vista, puede pensarse que tal enfoque resulta trivial y hasta circular: ¿cómo la inversión temporal podría servirnos para saber si la teoría es invariante si en su misma definición se asume que la teoría es invariante? Sin embargo, creo que hay una razón más profunda (y bastante razonable) para defender el enfoque de libro de texto. Desde la relatividad especial (ver Wigner 1967, Brading y Castellani 2007, §5.2), es usual suponer que las simetrías sirven como principios heurísticos que guían la construcción de teorías y modelos. Y la inversión temporal no es la excepción. La idea es que al formular la dinámica y la cinemática de una teoría, se asume que tal dinámica y cinemática deben satisfacer ciertas simetrías (en general, ciertas simetrías espacio-temporales que se adecuen a la geometría subyacente, ver Earman 1989, p. 49). Si esto es así, entonces no resulta extraño que se asuma que la teoría deba ser invariante: la invariancia ante inversión temporal no es una herramienta para sondear cómo es la estructura temporal del mundo, sino un principio heurístico-metodológico que guía la formulación de las leyes fundamentales de esa teoría.

Una de las enunciaciones más claras de este criterio pertenece a Dettlef Dürr y Stephan Teufel en su desarrollo de la mecánica bohmiana. Ellos dicen:

“A symmetry can be a priori, i.e., the physical law is built in such a way that it respects that particular symmetry by construction. This is exemplified by spacetime symmetries, because spacetime is the theater in which the physical law acts (as long as spacetime is not subject to a law itself, as in general relativity, which we exclude from our considerations here), and must therefore respect the rules of the theater.” (2009, pp. 43–44).

En efecto, al formular la ecuación guía en la mecánica bohmiana, el supuesto de invariancia ante inversión temporal resulta crucial (ver Dürr, Goldstein y Zanghì 1992, Lopez 2025a, §3.3; para críticas, Skow 2010). Robert Sachs (1987) hace el mismo punto, de manera más general:

“In order to express explicitly the independence between the kinematics and the nature of the forces, we require that the transformations leave the equations of motion invariant when all forces or interactions vanish” (Sachs 1987: 7).

Esta dimensión heurístico-metodológica de la inversión temporal muestra no sólo que conviven dos enfoques divergentes, sino también dos motivaciones y objetivos diferentes que guían el uso y papel de la inversión temporal en física. El enfoque intuitivo parece sugerir que la inversión temporal es una herramienta formal-conceptual para explorar, *a posteriori*, cuáles son las simetrías de una teoría, las cuales podrían correlacionar con la estructura del mundo físico (ver North 2021). Por ello, bajo este enfoque, el supuesto de invariancia ante inversión temporal en la misma definición de la transformación es una clara circularidad: la definición de inversión temporal *no* supone que la teoría sea invariante. Sin embargo, la motivación y el objetivo de los que defienden el enfoque de libro de texto es totalmente distinta: se supone que la inversión temporal no es una herramienta teórico-conceptual para sondear la estructura del mundo físico, sino un supuesto heurístico que guía a los físicos a formular y desarrollar teorías y modelos de acuerdo con ciertos estándares no necesariamente epistémicos. Bajo este enfoque no existe tal circularidad porque la motivación y el objeto de la inversión temporal son otros.

4.2. Simetrías: “por descubrimiento” o “por estipulación”

En una serie de artículos, he llevado esta distinción de enfoques a un plano general. Tal tensión refleja una divergencia más amplia en la filosofía de la física respecto del estatus de las simetrías (ver Lopez 2023b, 2024). Tal distinción se aplica a la invariancia bajo inversión temporal. Como he argumentado, un enfoque considera que las simetrías “se descubren” (enfoque “por descubrimiento”) mientras que el otro considera que las simetrías “se estipulan” (enfoque “por estipulación”). Esta distinción correlaciona bastante bien con la distinción entre enfoques intuitivos y el enfoque de libro de texto, pero es más general y pone el énfasis en diferentes aspectos del papel específico de las simetrías de acuerdo con un enfoque o el otro.

El enfoque por descubrimiento supone que las simetrías reflejan aspectos reales del mundo. Que una teoría sea invariante bajo cierta transformación es indicio de que la naturaleza misma

exhibe dicha simetría⁷. Por supuesto, no hay ningún motivo para suponer que el mundo tenga o no una determinada simetría, por lo que esta resulta *contingente*. El éxito empírico de una teoría física incluye identificar cuáles son las simetrías que realmente el mundo tiene, y cuáles no. Por lo tanto, no hay ningún motivo para suponer que una teoría (o modelo) tenga o no una determinada simetría, ya que eso dependerá de cómo es el mundo y de si la teoría logra capturar sus propiedades de manera adecuada o no. Si bien este enfoque no es el usual hoy en día, lo fue en el siglo dieciocho y siglo diecinueve. En efecto, tanto Isaac Newton como Joseph Lagrange suponen que tanto las simetrías como los principios de conservación tienen que considerarse resultados generales de las leyes dinámicas de la teoría, y no principios fundamentales de la ciencia (Lagrange 1811, p. 241). En Newton, el principio de relatividad no es un axioma sino un corolario de las ecuaciones de movimiento (Newton 1729 [1687], Book I, Corollary VI). En ambos casos, la simetría no es un supuesto, sino una *consecuencia contingente* de la dinámica de la teoría.

Si aplicamos este enfoque a la inversión temporal, resulta claro que no hay ningún motivo por el cual la inversión temporal deba ser necesariamente una propiedad del mundo o de la teoría física que intenta describir el mundo. Por lo tanto, su invariancia no debería formar parte de su definición. El mundo podría ser invariante (o no) ante inversión temporal. Lo que eventualmente dictamina si lo es o no es la dinámica y el éxito empírico global de la teoría. En cualquier caso, tiene sentido preguntarse si tal teoría es o no invariante ante inversión temporal porque la respuesta sí es epistémicamente relevante respecto de cómo es el mundo y de cómo una teoría en particular lo captura.

En el enfoque por estipulación, las simetrías se imponen como principios metodológico-heurísticos en la formulación de teorías. Por ello, no necesariamente revelan cómo es el mundo, sino que proporcionan criterios generales de cómo formular teorías físicas de acuerdo con varios criterios epistémicos y no epistémicos. Por ello, la pregunta de si tal teoría es o no simétrica ante una transformación en particular carece de sentido: se supone que lo es. Esto implica que una teoría *no puede* ser asimétrica ante cierta transformación, lo cual parece imponer cierta necesidad. Esto, por supuesto, no quiere decir que exista algún rasgo de modalidad *in re*, sino que se trata de un principio más normativo, típico de las estipulaciones. Si creemos que las teorías deben satisfacer ciertos estándares de simplicidad, economía explicativa y poder predictivo, podemos estipular ciertas condiciones que deben cumplirse. Tales estipulaciones, de acuerdo con este enfoque, son las simetrías (al menos, algunas de ellas como las espacio-temporales). Por ello, la invariancia de una teoría no implica compromiso ontológico alguno.

Al aplicarse el enfoque por estipulación a la inversión temporal, se captura la esencia del enfoque de libros de texto. Al dilucidar en una teoría específica cómo debe transformar la inversión temporal, se estipula que la teoría es invariante bajo tal transformación. A partir de allí, se deduce caso por caso cómo los parámetros, observables y estados de la teoría (cuya definición es relativa a la teoría) deben transformarse. Queda claro que no hay rastro alguno de circularidad ni trivialidad: la inversión temporal es un principio heurístico-metodológico con cierta carga normativa que guía la construcción de teorías y modelos.

Desde mi punto de vista, no existe contradicción entre ambos enfoques sino una divergencia en las motivaciones y los objetivos que guían el uso de simetrías en física. En el caso de la inversión temporal, la disyuntiva es particularmente aguda y la claridad conceptual es clave

⁷Por supuesto, también subyace un supuesto realista respecto de las teorías físicas.

para evitar equívocos. Si se adopta el enfoque por estipulación, necesariamente las ecuaciones fundamentales de la mayoría de las teorías físicas resultarán invariantes ante inversión temporal⁸. Esto no significa que tales ecuaciones impliquen que, por ejemplo, no existe una dirección del tiempo, sino que la invariancia ante inversión temporal es un supuesto normativo en la formulación y el desarrollo de la teoría. Cualquier insinuación de circularidad o trivialidad es confundir ambos enfoques. Si se adopta el enfoque por descubrimiento, la invariancia sí sugeriría alguna propiedad de la naturaleza. Dentro de este enfoque, es entendible que la invariancia temporal tal como es entendida y definida en física resulte insatisfactoria. Pero, nuevamente, es importante distinguir los enfoques y sus motivaciones: la invariancia temporal en física es usualmente entendida y definida en base al enfoque por estipulación, no por descubrimiento.

En resumen, dos enfoques con motivaciones y objetivos divergentes conviven en tensión en la discusión sobre la inversión temporal, en particular, con respecto a su invariancia. Yo no creo que uno de los enfoques sea el correcto y el otro no. En su lugar, creo que ambos enfoques tienen motivaciones y objetivos válidos, y lo importante es no confundirlos y emplearlos en sus ámbitos correctamente. Si creemos que las simetrías (y en particular la simetría de inversión temporal) sirven como herramienta metafísica para explorar cómo es la estructura del mundo físico (e.g., si las leyes fundamentales de la física distinguen o no una orientación temporal), entonces resulta claro que las definiciones usuales de la inversión temporal no son muy útiles en este ámbito. Esto puede implicar dos cosas: o bien que se rechace tal uso metafísico de la inversión temporal, o bien que se rechacen las definiciones de inversión temporal en física. Si creemos que las simetrías (y en particular la simetría de inversión temporal) sirven como principio heurístico-metodológico para el desarrollo de teorías y son estipuladas, entonces hacer un uso metafísico de ello resulta, al menos, inadecuado. Sea cual sea el camino, lo importante es reconocer estas divergencias y actuar en consecuencia.

5. Conclusiones

En este artículo analicé con cierto detalle la conceptualización y la implementación de la inversión temporal en física. Mi tesis central es que la idea de inversión temporal es sumamente compleja, sufre de un grado relevante de sub-determinación y que la discusión de fondo atraviesa tanto aspectos metafísicos como heurístico-metodológicos. En esa línea, argumenté que diferentes conceptualizaciones e implementaciones de la inversión temporal están guiadas (y parcialmente determinadas) por compromisos metafísicos respecto de la naturaleza del tiempo. En particular, mostré como la visión heredada de la inversión temporal estaba guiada por una metafísica relacionista del tiempo, mientras que enfoques más heterodoxos podrían estar motivados por supuestos substantivalistas.

En un segundo plano de análisis, mostré que conviven en tensión dos enfoques respecto del papel que deben jugar las simetrías en física (entre ellas, la invariancia ante inversión temporal). Mostré que algunos autores parecerían asumir un enfoque "por descubrimiento", lo

⁸Existen casos en teoría cuántica de campos (como el decaimiento del kaón neutro) que violarían la invariancia ante inversión temporal en una teoría fundamental. El decaimiento del kaón neutro viola carga y paridad (CP), lo cual implica mediante el teorema CPT, que también se viola inversión temporal (T). Sin embargo, el caso es discutido: no es claro que CPT sea una ley fundamental; tampoco es claro en qué medida el fenómeno afecta la invariancia temporal de la teoría, ya que es un caso de un modelo específico.

cual sugería que las implementaciones canónicas de inversión temporal podrían ser inadecuadas para abordar y responder las motivaciones y objetivos de tal enfoque. Por el contrario, el enfoque “por estipulación” parece estar a la base del andamiaje teórico-conceptual de la inversión temporal en física. Sin embargo, éste no resulta adecuado para abordar ciertos problemas metafísicos relacionados con la inversión temporal.

Si bien el concepto de inversión temporal es interesante y filosóficamente rico en sí mismo (ya que involucra aspectos relacionados con la ontología científica, la naturaleza del tiempo y el papel de simetrías en física), la inversión temporal ha cumplido un rol fundamental en otras discusiones centrales de la filosofía de la física, como la de la dirección del tiempo. De acuerdo con un argumento muy común en la literatura, se asume que si las leyes fundamentales de la física son invariantes ante inversión temporal, entonces tales leyes serían “ciegas” a la dirección temporal, sugiriendo que ésta tiene un carácter emergente o no fundamental (Reichenbach 1956, Mehlberg 1961, Horwich 1987, Price 1996, Maudlin 2002). Tal inferencia podría considerarse un caso de “argumento de la simetría-a-la-realidad” (Baker 2010, Dasgupta 2016, North 2021), y si bien la validez de tal inferencia ha sido discutida (ver Lopez 2023b), es usual en la literatura. De acuerdo con las conceptualizaciones e implementaciones canónicas de la inversión temporal en física (la visión heredada), la gran mayoría de leyes fundamentales son invariantes ante inversión temporal, sugiriendo que la flecha del tiempo *no* es fundamental (o, más fuerte, no es real). Esto ha conducido, por un lado, a buscar explicaciones de la discordancia entre microfísica y macrofísica en, por ejemplo, una asimetría en las condiciones iniciales (Penrose 1989, Albert 2000, Loewer 2012); por el otro, ha formulado el problema de manera diferente, sin relación con la invariancia ante inversión temporal (Earman 1974, Castagnino y Lombardi 2009).

Sin embargo, tal resultado depende crucialmente de asumir que la inversión temporal debe entenderse a la manera de la visión heredada, lo cual, como he mostrado y argumentado en este artículo, no está libre de supuestos. Hay dos resultados interesantes que, creo yo, vale la pena investigar con más detenimiento en la relación entre inversión temporal y la dirección del tiempo:

- Si las implementaciones canónicas de inversión temporal en física están, efectivamente, motivadas por un enfoque “por estipulación” de las simetrías, entonces su utilidad para investigar el problema filosófico de la dirección del tiempo carece de valor (más en general, muchas instancias de los argumentos de la simetría-a-la-realidad carecerían también de valor).
- Si las implementaciones canónicas de inversión temporal en física son rechazadas por algún otro motivo (e.g., compromisos o intuiciones sustancialistas), entonces muchas de las leyes fundamentales que eran invariantes ante inversión temporal en las implementaciones canónicas podrían no serlo ante implementaciones más heterodoxas. Un caso paradigmático es la ecuación de Schrödinger en mecánica cuántica no relativista.

Agradecimientos

Agradezco a Sebastián Fortín por la invitación a contribuir a este número especial de la revista *Culturas Científicas*. Este artículo resume cinco años de trabajo que he presentado

y discutido con innumerables colegas en innumerables eventos científicos; a todos ellos mis agradecimientos por intercambios muy fructíferos que me hicieron cambiar de idea varias veces, corregir varios errores y persistir en algunos aciertos. En particular, quisiera agradecer a mis dos supervisores de doctorado, Olimpia Lombardi y Michael Esfeld, con los cuales he discutido en profundidad estos temas, y con los cuales continuo colaborando. También quisiera agradecer al *Buenos Aires Group of Philosophy of Particular Sciences* y al *Buenos Aires Group of Metaphysics of Science*, en los cuales he presentado varios borradores y discutido ideas a lo largo de los últimos 5 años.

Financiamiento

Este trabajo fue posible gracias al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la Argentina (CONICET), al *Swiss National Science Foundation* (SNSF) y la Universidad de Lausanne.

Referencias

- Albert, D. Z. (2000). *Time and Chance*. Harvard University Press.
- Allori, V. (2015). Maxwell's Paradox: the metaphysics of classical electrodynamics and its time-reversal invariance. *Analytica*, 1, 1-19.
- Allori, V. (2019). Quantum mechanics, time, and ontology. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 66(100), 145-154.
- Arntzenius, F., & Greaves, H. (2009). Time reversal in classical electromagnetism. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 60, 557-584.
- Baker, D. (2010). Symmetry and the Metaphysics of Physics. *Philosophy Compass*, 5(12), 1157-1166.
- Ballentine, L. (1998). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. World Scientific Publishing Company.
- Barbour, J. (2020). *The Janus Point: A New Theory of Time*. Basic Books.
- Belot, G. (2013). Symmetry and Equivalence. En R. Batterman (Ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics* (pp. 318-339). Oxford University Press.
- Bigi, I. I., & Sanda, A. I. (2009). *CP Violation* (2nd). Cambridge University Press.
- Brading, K., & Castellani, E. (2007). Symmetries and Invariances in Physics. En J. Butterfield & J. Earman (Eds.), *Philosophy of Physics, Part B* (pp. 1331-1367). North-Holland.
- Callender, C. (2000). Is Time 'Handed' in a Quantum World? *Proceedings of the Aristotelian Society*, 100(3), 247-269.
- Cuffaro, M., & Hartmann, S. (2023). The open system view. *Philosophy of Physics*, 2(1), 6.
- Dasgupta, S. (2015). Substantivalism vs. Relationalism About Space in Classical Physics. *Philosophy Compass*, 10(9), 601-624.
- Dasgupta, S. (2016). Symmetry as an Epistemic Notion (Twice Over). *British Journal for the Philosophy of Science*, 67(3), 837-878.
- Davies, P. C. W. (1974). *The Physics of Time Asymmetry*. University of California Press.

- Dürr, D., Goldstein, S., & Zanghì, N. (1992). Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty. *Journal of Statistical Physics*, 67(5–6), 843-907.
- Dürr, D., & Teufel, S. (2009). *Bohmian Mechanics: The Physics and Mathematics of Quantum Theory*. Springer.
- Earman, J. (1974). An Attempt to Add a Little Direction to ‘The Problem of the Direction of Time’. *Philosophy of Science*, 41(1), 15-47.
- Earman, J. (1989). *World Enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. MIT Press.
- Earman, J. (2002). What Time Reversal Invariance Is and Why It Matters. *International Studies in the Philosophy of Science*, 16(3), 245-264.
- Gasiorowicz, S. (1966). *Elementary Particle Physics*. Wiley.
- Gryb, S., & Thébault, K. P. Y. (2016). Time Remains. *British Journal for the Philosophy of Science*, 67(3), 663-705.
- Horwich, P. (1987). *Asymmetries in Time: Problems in the Philosophy of Science*. MIT Press.
- Lagrange, J. L. (1811). *Mécanique Analytique*. Courcier.
- Loewer, B. (2012). Two Accounts of Laws and Time. *Philosophical Studies*, 160(1), 115-137.
- Lopez, C. (2019). Roads to the past: how to go and not to go backward in time in quantum theories. *European Journal for Philosophy of Science*, 9, article 27.
- Lopez, C. (2021a). The physics and philosophy of time reversal in standard quantum mechanics. *Synthese*, 199, 14267-14292.
- Lopez, C. (2021b). Three facets of time-reversal symmetry. *European Journal for Philosophy of Science*, 11, article 51.
- Lopez, C. (2023a). The metaphysical under-determination of time reversal. *Synthese*, 201, 29.
- Lopez, C. (2023b). Should physical symmetries guide metaphysics? Two reasons why they should maybe not. *European Journal for the Philosophy of Science*, 13, 23.
- Lopez, C. (2024). Against Symmetry Fundamentalism. *Erkenntnis*, 89(4), 1321-1345.
- Lopez, C. (2025a). Open systems and time [forthcoming]. *Philosophy of Science*.
- Lopez, C. (2025b). *The Philosophy of Time Reversal*. Cambridge University Press.
- Lopez, C., & Esfeld, M. (2025). Relational primitivism about the direction of time. *International Studies in the Philosophy of Science*, 38(2), 83-99.
- López, C., & Lombardi, O. (2019). Space-time symmetries in quantum mechanics. En O. Lombardi, S. Fortin, C. López & F. Holik (Eds.), *Quantum Worlds: Perspectives on the Ontology of Quantum Mechanics* (pp. 263-293). Cambridge University Press.
- Malament, D. (2004). On the Time Reversal Invariance of Classical Electromagnetism. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35(2), 295-315.
- Maudlin, T. (1993). Buckets of waters and waves of space: why spacetime is probably a substance. *Philosophy of Science*, 60(2), 183-203.
- Maudlin, T. (2002). *The Metaphysics Within Physics*. Oxford University Press.
- Mehlberg, H. (1961). *Time: The Present and Its Role in Nature*. University of California Press.
- Mozersky, J. (2015). *Time, Language, and Ontology: The World from the B-Theoretic Perspective*. Oxford University Press.
- Newton, I. (1729). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (A. Motte, Trad.) [Original work published 1687].
- North, J. (2009). The ‘Structure’ of Physics: A Case Study. *Journal of Philosophy*, 106(2), 57-88.
- North, J. (2021). *Physics, Structure, and Reality*. Oxford University Press.

- Penrose, R. (1989). *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics*. Oxford University Press.
- Peterson, D. (2015). Prospects for a new account of time reversal. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 49, 42-56.
- Pooley, O. (2013). Substantialist and Relationalist Approaches to Spacetime. En R. Batterman (Ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics* (pp. 522-586). Oxford University Press.
- Price, H. (1996). *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. Oxford University Press.
- Reichenbach, H. (1956). *The Direction of Time*. University of California Press.
- Roberts, B. W. (2018). Three Myths About Time Reversal in Quantum Theory. *Philosophy of Science*, 85(5), 1087-1099.
- Rovelli, C. (2002). Partial Observables. *Physical Review*, D65, 124013.
- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Sachs, R. G. (1987). *The Physics of Time Reversal*. University of Chicago Press.
- Sakurai, J. J., & Napolitano, J. (2011). *Modern Quantum Mechanics* (2nd). Addison-Wesley.
- Savitt, S. F. (1996). The Direction of Time. *British Journal for the Philosophy of Science*, 47(3), 347-370.
- Skow, B. (2010). On a symmetry argument for the guidance equation in Bohmian Mechanics. *International Studies in the Philosophy of Science*, 24, 393-410.
- Struyve, W. (2025). Time Reversal and Ontology in Classical Electromagnetism. *British Journal for the Philosophy of Science*, 76(3), 619-637.
- Wigner, E. P. (1932). On the Quantum Correction for Thermodynamic Equilibrium. *Physical Review*, 40(5), 749-759.
- Wigner, E. P. (1967). *Symmetries and Reflections: Scientific Essays*. Indiana University Press.