Cuán insatisfactoria es la postulación de baja entropía en el universo temprano

How Unsatisfactory Is the Postulation of Low Entropy in the Early Universe?

Quão insatisfatória é a postulação de baixa entropia no universo primitivo

Aldo Filomeno
Instituto de Filosofía
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
aldo.filomeno@pucv.cl
0000-0001-8027-528X

José Ignacio Jerez Torrens
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
joseignaciojerez@gmail.com
0009-0002-3899-7304

→ **Recibido:** 14/07/2026
→ **Aceptado:** 11/08/2026
→ **Publicado:** 31/10/2026

→ **Artículo Dossier II**
"Filosofía y Fundamentos de la Física"
© 2026 Aldo Filomeno y José Ignacio Jerez Torrens
CC BY 4.0

→ **Cómo citar:** Filomeno, A., y Jerez Torrens, J. I. (2026). Cuán insatisfactoria es la postulación de baja entropía en el universo temprano. *Culturas Científicas*, 7(1), pp. 205–222 doi.org/10.35588/cc.v7d8361

[RESUMEN]

Este artículo examina la Hipótesis del Pasado (*Past Hypothesis*, PH), según la cual el universo comenzó en un estado inicial de entropía extremadamente baja, condición considerada necesaria para fundamentar la explicación estadística de la segunda ley de la termodinámica. Se argumenta que, aunque la PH cumple una función formal dentro de la explicación estadística de la segunda ley, su mera postulación tiene un costo epistémico significativo, pues introduce como condición inicial precisamente un estado que el propio enfoque estadístico caracteriza como extraordinariamente atípico. Sin una explicación adecuada de dicha condición, la imagen científica del mundo permanece incompleta, pues quedaría pendiente una fundamentación satisfactoria de la segunda ley, y con ella, la flecha del tiempo y la irreversibilidad de los procesos físicos.

[PALABRAS CLAVES]
Hipótesis del Pasado; entropía; segunda ley

[ABSTRACT]

This article examines the Past Hypothesis (PH), understood as the postulate that the universe began in an initial state of extremely low entropy, a condition usually regarded as necessary to ground the statistical explanation of the second law of thermodynamics. It is argued that, although the PH plays a formal role in the statistical explanation of the second law, its mere postulation carries a significant epistemic cost, since it introduces as an initial condition precisely a state that the statistical framework itself characterizes as extraordinarily atypical. Without an adequate explanation of this condition, the scientific worldview remains incomplete, since a satisfactory grounding of the second law would remain pending, together with an account of the arrow of time and the irreversibility of physical processes.

[KEY WORDS]
Past Hypothesis; entropy; second law

1. Introducción

Un problema que solo algunos filósofos de la física y físicos enfatizan, y que constituye un problema abierto con consecuencias profundas, es la necesidad de una explicación satisfactoria de la llamada "Hipótesis del Pasado" (PH): la postulación de un valor extremadamente bajo de la entropía del universo en un momento temprano, usualmente cerca del Big Bang.

Esta postulación es necesaria para sustentar la explicación más aceptada de la segunda ley de la termodinámica, explicación que debemos originariamente a Ludwig Boltzmann y que ha sido objeto de sucesivas reformulaciones y sofisticaciones hasta la actualidad.

Sin embargo, este postulado resulta problemático cuando se advierte que no se trata simplemente de un valor especial o altamente improbable, sino, en esencia, del valor *opuesto* al que cabría esperar para la entropía del universo primitivo.

Aquí queremos insistir en que limitarse a postular la Hipótesis del Pasado, sin ofrecer una explicación adicional, constituye un problema abierto significativo en los fundamentos filosóficos de la termodinámica y la cosmología. Sin una explicación adecuada, permanece incompleta la fundamentación cosmológica de la segunda ley en su interpretación estadística y, con ello, también la explicación de algunos de los aspectos fenomenológicos más ubicuos de la realidad: el aumento de la entropía hacia el equilibrio, la irreversibilidad de los fenómenos (macroscópicos) naturales y la flecha del tiempo (de acuerdo con la postura mayoritaria que la asocia con la flecha entrópica).

Este problema abierto resulta especialmente interesante, en parte porque muchos filósofos y físicos tienden a pasarlo por alto, mientras que otros reconocen la necesidad de explicar la Hipótesis del Pasado, pero sus propuestas son claramente discutibles. Cabe mencionar también el peculiar intento de Callender (2004) por sostener que, en última instancia, la Hipótesis del Pasado no requeriría una explicación. En contraste con esta postura, aquí se sostiene que un aspecto central de nuestra imagen científica del mundo permanece gravemente incompleto mientras no se disponga, al menos, de una propuesta explicativa aceptable para dicha hipótesis.

En la breve panorámica que se hará aquí se busca destacar un aspecto descuidado: el grado de severidad que conlleva la mera postulación de la Hipótesis del Pasado. En otras palabras, se intenta transmitir una apreciación cuantitativa aproximada del nivel extraordinariamente alto de exigencia explicativa que conlleva. Esto se traduce en que, con la información física que tenemos actualmente, un agente racional debería considerar que tal condición inicial, por su extrema atipicidad dentro del espacio de estados considerado, requiere una explicación adicional. Más concretamente, la PH representa lo contrario de lo que normalmente se esperaría como estado inicial del universo; no simplemente un valor muy especial o inesperado, sino el caso más especial imaginable.

En este sentido, el presente artículo no pretende ofrecer una nueva teoría física de la Hipótesis del Pasado, sino precisar por qué su mera postulación resulta explicativamente insatisfactoria, incluso cuando se acepta su utilidad dentro de la explicación estadística de la segunda ley. El aporte específico del artículo consiste en mostrar la tensión entre el papel funcional de la PH y su costo epistémico, pues esta introduce como condición básica precisamente un estado que el propio enfoque estadístico considera extraordinariamente atípico.

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

2. Antecedentes conceptuales

Todo comienza con el propio Ludwig Boltzmann, quien propuso una explicación estadística de la segunda ley de la termodinámica, pero como se explica más adelante, su insuficiencia fue señalada por Loschmidt. Para resolverlo, Boltzmann propuso que el universo habría comenzado en un estado inicial de entropía muy baja.

La segunda ley de la termodinámica ha sido formulada de múltiples maneras, un aspecto que resulta especialmente atractivo para los filósofos, aunque no es necesario abordarlo en detalle en esta ocasión. Para buenas introducciones a la noción, pueden consultarse, entre otros: Atkins y de Paula (2014), Reif (1965); cf. también Atkins (2007). Por el momento, basta con entender la segunda ley de la termodinámica en términos que invocan la noción de entropía (la cual puede definirse a su vez de multitud de maneras, algunas de ellas intercambiables):

(Segunda Ley): "La entropía de un sistema aislado aumenta o permanece constante."

La explicación de esta ley sostiene que no se trata de una ley fundamental de la naturaleza, sino de un fenómeno macroscópico de carácter estadístico, que emerge de una dinámica microscópica fundamental. En consecuencia, la segunda ley se explica, o se reduce, a términos de la mecánica (clásica o cuántica) subyacente.

La explicación estándar de Boltzmann recurre a la combinatoria matemática: Boltzmann (1877) observó que la inmensa mayoría de los microestados posibles compatibles con las restricciones macroscópicas corresponden al macroestado de equilibrio M_{eq}, el macroestado en el que las partículas se encuentran distribuidas de manera aproximadamente uniforme en el espacio físico, es decir, donde la entropía alcanza su valor máximo. En la medida considerada natural, la medida uniforme de Lebesgue μ, $\mu(M_{\text{eq}})$ es muchísimo mayor que la de cualquier otra región; de hecho, M_{eq} ocupa casi todo el espacio de fase Γ. Una estimación de la razón entre M_{eq} y otra región genérica suele estar en el orden de 10^N, de modo que para $N = 10^{23}$, dicha relación sería del orden de $10^{10^{23}}$.

Sobre esta base, la entropía de Boltzmann asociada a un macroestado M se define como el logaritmo del tamaño de la región del espacio de fases correspondiente a dicho macroestado:

$$S_B(M) = k_B \log \mu(\Gamma_M),$$

donde k_B es la constante de Boltzmann y $\mu(\Gamma_M)$ representa la medida, o volumen, de la región del espacio de fases asociada al macroestado M. Debido a la enorme diferencia entre el tamaño de la región de equilibrio y el de las regiones de no equilibrio, una evolución hacia macroestados de mayor entropía resulta abrumadoramente más probable que una evolución hacia macroestados de menor entropía.

Si se adopta una medida uniforme sobre el espacio de fases accesible, la probabilidad de que el sistema se encuentre en un macroestado M puede expresarse como:

$$P(M) = \frac{\mu(\Gamma_M)}{\mu(\Gamma)}.$$

De este modo, la conexión entre entropía y probabilidad no depende solo de una intuición cualitativa, sino de la relación entre el tamaño relativo de las regiones del espacio de fases y la cantidad de microestados compatibles con cada macroestado.

Con esto, la explicación de Boltzmann parecería explicar el comportamiento asimétrico en el tiempo establecido por la segunda ley, preservando la visión clásica del mundo con simetría temporal. La segunda ley, entendida de este modo, no constituye una ley estricta, sino una aproximación estadística.

Sin embargo, aunque muchos pasan por alto las complejidades inherentes al enfoque de Boltzmann, existe un corpus sustancial de literatura especializada que reúne investigaciones de físicos, matemáticos y filósofos que han intentado desentrañar dichas complejidades (véanse, por ejemplo: Price, 1996; Sklar, 2015; Frigg y Werndl, 2023; Hemmo y Shenker, 2012; Albert, 2000; Allori, 2020).

El problema más destacado, identificado originalmente por Loschmidt, señala una deficiencia en la explicación anterior de Boltzmann. Esta se relaciona con la necesidad de dar cuenta de la irreversibilidad que la naturaleza parece exhibir a escala macroscópica, a pesar de que la dinámica fundamental es invariante bajo inversión temporal.

Si la explicación de la segunda ley predice un aumento de entropía hacia el futuro, pero también hacia el pasado, entonces algo en la argumentación está fallando. Y esto es precisamente lo que ocurre con la explicación inicial de Boltzmann, como él mismo reconoció: las leyes microscópicas (clásicas o cuánticas) que predicen aumento de entropía hacia el futuro son simétricas en el tiempo; por tanto, también generan *retrodicciones* de aumento de entropía hacia el pasado (véase la figura 1).

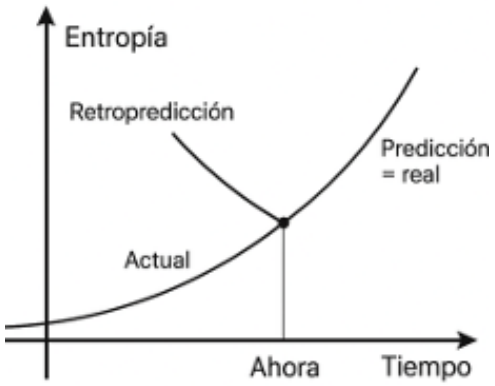


Figura 1: La explicación estadística inicial propuesta por Boltzmann resulta insuficiente debido al problema de la reversibilidad, pues también predice un aumento de entropía hacia el pasado.

Por ello, se considera necesario introducir algún elemento asimétrico para obtener la asimetría temporal que exhibe nuestro universo aparentemente irreversible. La propuesta más aceptada en la actualidad, ya formulada por Maxwell y Boltzmann, consiste en postular que el universo comenzó en un estado inicial de entropía muy baja: lo que hoy llamamos la Hipótesis del Pasado.

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

3. ¿Es realmente aceptable la Hipótesis del Pasado?

La Hipótesis del Pasado, que postula un estado inicial de entropía extremadamente baja en el universo primitivo, es ampliamente aceptada como requisito para fundamentar la segunda ley de la termodinámica desde una perspectiva estadística. Sin embargo, esta postulación, aunque funcional, carece de justificación física o empírica suficiente y plantea un conjunto de desafíos conceptuales. El carácter altamente especial de dicho estado inicial, su carácter extraordinariamente atípico desde un punto de vista estadístico y la ausencia de una teoría que lo explique adecuadamente, hacen de la PH un problema filosófico abierto en el núcleo de la física fundamental. A continuación, se examinan con mayor detalle las razones que sustentan esta afirmación.

3.1. ¿Es esperable un universo con baja entropía inicial?

A primera vista, se podría sostener lo siguiente: "Si se ignora el comportamiento del universo durante épocas tan distantes y energéticamente extremas, y en ausencia de una teoría física o evidencia empírica, es esperable y no se puede descartar que el universo haya podido originarse con cualquier valor de entropía, incluyendo uno muy bajo". Esta afirmación se apoya en una forma de agnosticismo epistemológico: al carecer de información física suficiente, todo estado inicial parece estar, en principio, dentro del dominio de lo posible.

No obstante, este tipo de razonamiento enfrenta dificultades importantes. Ignorar los límites impuestos por la mecánica estadística y por los modelos cosmológicos actuales introduce una forma de indiferencia que difícilmente puede sostenerse sin consecuencias teóricas relevantes. En otras palabras, lo "concebible" no puede operar como justificación suficiente frente al carácter extraordinariamente atípico de un estado de baja entropía, a menos que se ofrezca algún tipo de mecanismo explicativo que lo respalde.

Por otro lado, este tipo de razonamiento se ve comprometido tanto por consideraciones probabilísticas como científicas (cf. Earman, 2006).

El bajo valor de entropía requerido es precisamente lo opuesto a lo que cabría esperar, lo que impone la necesidad de una explicación. La primera cuestión fundamental que se debería enfatizar se refiere a la magnitud extremadamente baja del valor de entropía, valor tan notablemente reducido que se considera excepcionalmente especial. Sería algo extraordinariamente inesperado, extraño o — si resultara legítimo hablar de probabilidades en este contexto — extraordinariamente improbable.

Esta idea puede formularse en términos de tipicidad. Para un macroestado M, su grado de tipicidad relativa puede representarse como:

$$T(M) = \frac{\mu(\Gamma_M)}{\mu(\Gamma)}.$$

Mientras mayor sea $T(M)$, más típico será el macroestado dentro del espacio de fases considerado. La Hipótesis del Pasado postula precisamente un macroestado inicial M_{PH} tal que:

$$T(M_{\mathrm{PH}}) = \frac{\mu(\Gamma_{M_{\mathrm{PH}}})}{\mu(\Gamma)} \approx 0.$$

Esto no significa que su tipicidad sea literalmente nula, sino que la región correspondiente a dicho macroestado ocupa una fracción despreciable del espacio de fases considerado. Por ello, el problema no consiste simplemente en que la PH introduzca una condición inicial especial, sino en que introduce una condición inicial extraordinariamente atípica dentro del mismo enfoque estadístico que pretende fundamentar.

3.2. Analogías y críticas al ajuste fino (fine-tuning)

No se trata solo de la Hipótesis del Pasado: este tema que estamos tratando aquí es solo uno entre varios casos de aparente ajuste fino, o 'fine-tuning', que, en las últimas décadas, se han identificado en cosmología para una diversidad de parámetros. Este tipo de casos ha sido objeto de evaluación crítica en filosofía, donde algunos han argumentado que se apoyan en suposiciones probabilísticas injustificadas, por lo que en realidad no constituirían un problema. Estas críticas a los argumentos probabilísticos, que ya venían desarrollándose desde hace años en la filosofía de la ciencia (por ejemplo, en relación con la noción de naturalidad, véanse Richter, 2006; Wells, 2019; cf. Williams, 2015; Bain, 2019), han sido popularizadas más recientemente (Hossenfelder, 2018). Precursores de este debate pueden encontrarse en las objeciones al principio antrópico cosmológico (por ejemplo, Mosterín, 2004) y, más en general, en las críticas al razonamiento probabilístico en cosmología (véanse McCoy, 2018; Norton, 2018), que a su vez remiten a cuestionamientos similares ya presentes en los fundamentos de la mecánica estadística (Sklar, 1993, §3.III). Nos encontramos, por tanto, ante una amplia variedad de fascinantes problemas abiertos. Determinar si realmente constituyen un problema y, en caso afirmativo, qué hacer al respecto, podría depender de cada caso en particular.

Entonces, cuán aceptable sea la postulación de una hipótesis puede ser una cuestión de grado, como ocurre en este caso. El grado de insatisfacción con la Hipótesis del Pasado es, dejando de lado otras consideraciones, inversamente proporcional a cuán especial, es decir, cuán bajo, sea el valor de entropía requerido. No obstante, en filosofía se han estudiado las explicaciones probabilísticas y existe cierto consenso en que pueden aceptarse fenómenos improbables, que simplemente pueden ocurrir, incluso si su probabilidad es extremadamente baja (véase, por ejemplo, Strevens, 2008). Esto es particularmente aceptable si sabemos que no existen explicaciones alternativas compitiendo: si tu vecina gana la lotería y sabes que el sorteo fue justo (por la razón que sea), entonces, por muy increíblemente improbable que haya sido que ganara, es racional aceptar que simplemente ganó. (La paradoja de la lotería está relacionada con este punto; cf. Wheeler, 2007.)

Sin embargo, ese no es el escenario que plantea la Hipótesis del Pasado, por varias razones. Aún persiste el aspecto relativo a *cuán especial es una posibilidad específica, o un subconjunto de posibilidades, en relación con el resto del espacio de posibilidades*. Esta distinción puede marcar una diferencia y llevarnos a no esperar nunca un valor de ese tipo; y, si llega a ocurrir, a esperar que exista alguna explicación subyacente. En el caso de una lotería, imaginemos que se realiza un sorteo único a nivel mundial y que la persona ganadora resulta ser. . . el propietario de todo el sistema que gestiona la lotería.

Parece razonable buscar una explicación. Es perfectamente posible, por lo que no puede

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

demostrarse que el propietario haya hecho trampa. Bajo el supuesto implícito de equiprobabilidad, no es más improbable que cualquier otra posibilidad, por lo que podríamos estar dispuestos a aceptar el resultado sin sospechas ni envidia. Sin embargo, el propietario (junto con algunos pocos individuos más) constituye un subconjunto especial: el pequeño grupo de personas con la capacidad de manipular la lotería. Parece entonces razonable investigar si esto constituye una pista que apunte a una explicación alternativa, aún no propuesta.

Volviendo a nuestro caso, el valor especial consiste en que S_B es extremadamente pequeño. Si dicho valor se considera especial, esto implica que un agente racional ideal debería esperarlo como algo que requiere, y merece, una explicación. Ahora bien, asumir que dicho valor es el resultado de algún proceso análogo a una lotería sería suponer demasiado: en nuestro contexto no existe ningún fundamento que justifique la aleatoriedad y la selección ciega propias de una lotería justa.

3.3. Estimación cuantitativa aproximada de la atipicidad

Es posible ofrecer una estimación aproximada, de carácter heurístico, de cuán especial es el valor de S_B requerido. En primer lugar, dado que en la fórmula de Boltzmann S_B está vinculado al tamaño de regiones del espacio de fases Γ, en la explicación estadística de un gas que se expande adiabáticamente en un recipiente cerrado ya se han cuantificado los volúmenes en el espacio de fases, mostrando que el tamaño de la región de microestados correspondiente al macroestado de equilibrio es varios órdenes de magnitud mayor que cualquier otra región.

Un caso simple permite ilustrar la magnitud del problema. Si N partículas se distribuyen aleatoriamente entre dos mitades iguales de un recipiente, la probabilidad de que todas se encuentren en una misma mitad es:

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)^N .$$

Para un número macroscópico de partículas, $N \sim 10^{23}$, esta probabilidad se vuelve extraordinariamente pequeña:

$$P \sim 2^{-10^{23}}.$$

Este ejemplo no pretende modelar el universo temprano, sino mostrar de manera intuitiva cómo, en mecánica estadística, los macroestados de baja entropía ocupan regiones extremadamente pequeñas del espacio de fases. Anteriormente se ha citado el valor increíblemente alto de $10^{10^{23}}$ aludiendo a la proporción entre los tamaños de regiones del espacio de fases (el macroestado de equilibrio en relación con los demás) en el caso tratable de un gas en expansión adiabática.

Incluso en este contexto tan limitado se puede apreciar la disparidad extrema entre los tamaños de las regiones y, en consecuencia, cuán extraordinariamente especial es el estado inicial de baja entropía en el que todas las partículas se encuentran aproximadamente ubicadas en una esquina del recipiente. Cuando esta configuración es preparada intencionalmente por el científico para que las partículas se dispongan así al inicio, contamos con una explicación. Sin embargo,

estos valores muestran cuán extremadamente sorprendente sería obtener espontáneamente una disposición inicial de ese tipo.

Teniendo esto en cuenta, corresponde concluir citando la estimación que se ha propuesto a escala cosmológica. Dicha afirmación es tentativa y se basa en numerosas suposiciones teóricas altamente especulativas (incluyendo la termodinámica de los agujeros negros, materia oscura, energía oscura, entre otras).

Una estimación aproximada ampliamente citada, formulada dentro de un modelo cosmológico estándar $k = +1$ (es decir, espacialmente cerrado) de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, fue propuesta por Penrose (1989a,b), y ajustada posteriormente (Penrose, 2003, Cap. 2.6) para incluir la materia oscura. En ella se estima el tamaño del volumen del espacio de estados correspondiente a:

(a) Toda la cantidad actual de materia colapsando en un agujero negro, lo que daría una entropía del orden de 10^{124}, y por lo tanto un volumen de $10^{10^{124}}$ (según la fórmula de Boltzmann mencionada anteriormente);

(b) La homogeneidad observada en el espectro del fondo cósmico de microondas (CMB), es decir, la baja entropía del universo temprano, del orden de 10^{89}, lo que corresponde a un volumen de $10^{10^{89}}$. El tamaño de este volumen es despreciable en comparación con el anterior, por lo que la razón entre ambos da un valor del orden de $10^{10^{124}}$.

Por lo tanto, expresado de manera heurística, si se asumiera solo con fines ilustrativos que cualquier microestado es tan probable como cualquier otro para ser el estado inicial, encontrar al universo en un microestado tan especial equivaldría a:

$$P(\mathsf{PH}) = \frac{1}{10^{10^{124}}} \approx 0$$

Esta expresión no debe entenderse como una probabilidad cosmológica objetiva, sino como una forma de calibrar la extrema atipicidad del estado seleccionado por la PH.

Así pues, desde el punto de vista de la tipicidad estadística, la PH selecciona una región extremadamente reducida y no genérica del espacio de estados considerado. En otras palabras, aun si esta razón no se interpreta como una probabilidad cosmológica objetiva, la postulación de tal estado inicial resulta insatisfactoria desde el punto de vista explicativo si no va acompañada de una justificación adicional.

En las últimas décadas, los avances de la cosmología contemporánea han entrado en escena y han pasado a ocupar un lugar central en el debate, debido a la disponibilidad de evidencia observacional altamente precisa sobre el universo temprano, en particular la célebre radiación de fondo de microondas (CMB, ya introducida), representada en la figura 2. Conviene precisar, sin embargo, que el CMB no constituye una imagen directa del Big Bang, sino una observación del universo cuando este se volvió transparente a la radiación, aproximadamente 380.000 años después. Su extraordinario grado de homogeneidad e isotropía muestra que el universo temprano se encontraba, al menos respecto de ciertos grados de libertad no gravitacionales, muy próximo al equilibrio térmico. Esto podría sugerir inicialmente un estado de alta entropía.

No obstante, la interpretación estándar del problema cambia al incorporar la gravitación. En sistemas dominados por la gravedad, el equilibrio no corresponde a una distribución homogénea

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

y uniforme de materia y energía, sino a configuraciones crecientemente agrupadas, como galaxias, cúmulos y, en el límite, agujeros negros. Por ello, la homogeneidad observada en el CMB no elimina el problema de la baja entropía inicial, sino que lo reformula: el universo temprano parece haber estado en un estado de entropía gravitacional extraordinariamente baja. En este sentido, el CMB no resuelve por sí solo la Hipótesis del Pasado, sino que proporciona una de las principales bases observacionales para afirmar que el universo primitivo era altamente especial desde el punto de vista entrópico.

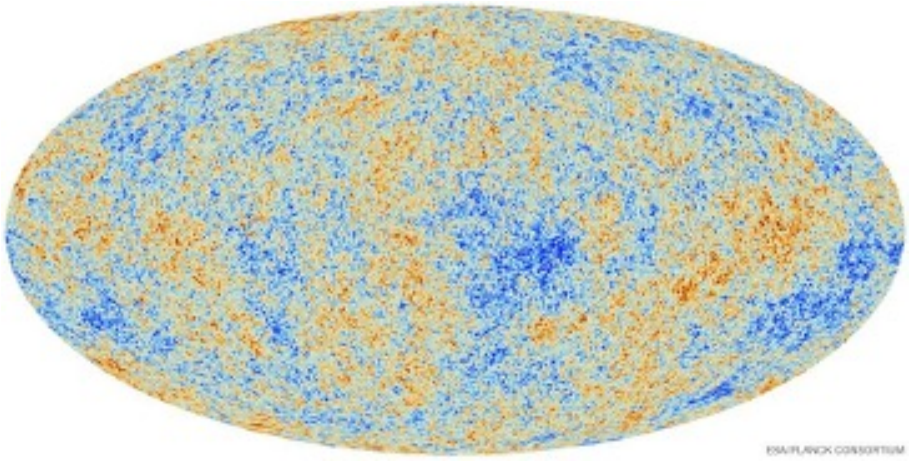


Figura 2: Radiación de fondo de microondas, que muestra un universo temprano aproximadamente homogéneo e isótropo. Las variaciones de color representan fluctuaciones respecto del valor promedio, del orden de una parte en 100.000.

Este reconocimiento empírico, sin embargo, no elimina la necesidad de explicar por qué el universo comenzó, efectivamente, en un estado inicial extremadamente inesperado. Porque de hecho se puede argumentar que es casi por la propia definición de la entropía de Boltzmann S_B que, si se propone un estado inicial de entropía muy baja, entonces será necesario buscar una explicación. La razón es que la fórmula de Boltzmann para la entropía S_B se define en función del tamaño de las macrorregiones en el espacio de fases, y esta fórmula fue concebida precisamente para cuantificar el "grado de probabilidad" de los microestados. Si equiparamos tamaños con probabilidades, entonces resulta casi una *verdad analítica* que una entropía muy baja equivale a algo muy especial (atípico, no genérico), y lo "muy especial" equivale a algo que exige (o al menos admite) una explicación.

Los calificativos empleados hasta aquí, como 'extremadamente inesperado', así como las estimaciones numéricas de Penrose, quizá no resulten por sí solos suficientemente esclarecedores. Podemos reformular la situación en términos quizá más ilustrativos: por lo que acabamos de decir acerca del significado del concepto de entropía, un estado de entropía baja es, literalmente, lo *opuesto* que uno esperaría.

4. Enfoques contemporáneos sobre la Hipótesis del Pasado

La Hipótesis del Pasado ha sido objeto de múltiples análisis, tanto en la física teórica como en la filosofía de la ciencia. En esta sección se revisan algunas de las observaciones más influyentes. Estas observaciones hacen referencia a: modelos inflacionarios, el razonamiento probabilístico, la metafísica humeana, y explicaciones dinámicas. A continuación se examinan estas alternativas junto con las principales objeciones que enfrentan.

4.1. Objeción explicativa: la inflación y sus límites para fundamentar la PH

Desde la Cosmología, además del papel de la gravitación y de la evidencia empírica citada, otro aporte es el supuesto rol de la inflación cosmológica. La hipótesis de la inflación cosmológica se refiere al período postulado de expansión exponencial en el universo temprano. Esta hipótesis ha sido objeto de un amplio debate durante décadas, y ha recibido críticas tanto en términos técnicos como filosóficos (Smeenk y Ellis, 2017). Por el momento, se dejarán de lado dichos debates y se asumirá que algún tipo de proceso inflacionario efectivamente tuvo lugar. Algunos han sostenido que, finalmente, tras un siglo de debates en torno a los fundamentos de la termodinámica, la inflación ofrece una explicación para la Hipótesis del Pasado. La idea es que, durante el supuesto estiramiento de la materia-energía producido por la expansión acelerada, cualquier irregularidad habría sido suavizada, lo que explicaría el estado inicial homogéneo y de baja entropía posterior a la inflación.

Sin embargo, varios autores han señalado (Price, 1996, Cap. 4; Penrose, 2003, Cap. 2.6; Penrose, 1989a; Earman, 2006, §7; Carroll, 2010, Cap. 14) que esta explicación podría ser demasiado apresurada: la inflación amplifica las disparidades preexistentes en la región que va a experimentar la expansión, y, en cualquier caso, también requiere condiciones iniciales muy especiales para que se active. Por lo tanto, se ha sostenido que la inflación ya presupone cierto grado previo de homogeneidad (de una forma u otra, pero que igualmente constituye un requisito especial).

4.2. Objeción probabilística: la medida natural

Otro tipo de enfoques busca resistir la necesidad de explicar la Hipótesis del Pasado apelando a las dificultades presentes en la exposición probabilística del problema, en particular el problema de seleccionar de forma objetiva, es decir, no arbitraria, una única medida de probabilidad. En otras palabras, ¿cómo justificar la medida natural de probabilidad uniforme (la "medida de Lebesgue") que se adopta en la mecánica estadística clásica? Este es un punto que, nuevamente, amenaza a todos los razonamientos probabilísticos en Cosmología relativos a ajustes finos (cf. Earman, 2006; Filomeno, 2023). A su vez, está vinculado con el llamado problema de la clase de referencia, señalado por primera vez por el matemático Joseph Bertrand en sus paradojas. Véase van Fraassen (1989) para una ilustración clara a partir de una fábrica de cubos.

Esta objeción afecta directamente a las expresiones anteriores, pues cuestiona que razones

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

como

$$\frac{\mu(\Gamma_{\mathrm{PH}})}{\mu(\Gamma)}$$

puedan interpretarse sin más como probabilidades objetivas. Sin embargo, aun si se evita hablar de probabilidad en sentido estricto, la formulación en términos de tipicidad conserva parte importante de la fuerza del problema: la PH sigue seleccionando una región extremadamente reducida y no genérica del espacio de estados considerado.

Incluso dejando de lado el problema, quizá irresoluble, de la clase de referencia, ¿qué razones tenemos para creer que cualquier condición inicial es igualmente probable? Dado que ignoramos por completo esa era, en la cual se sabe que nuestras leyes físicas dejan de ser aplicables, parece razonable evitar cualquier compromiso infundado con una medida de probabilidad. Aunque se comprende que resulte intuitivo adoptar la distribución uniforme, en muchos contextos de ignorancia dicha elección carece de justificación; simplemente podría no ser así como las cosas están distribuidas probabilísticamente (véase, por ejemplo, Albert, 2000). Incluso en el contexto de la mecánica estadística clásica, la identificación de las probabilidades con la medida de los volúmenes en el espacio de fases es objeto de controversia: una condición de ergodicidad podría justificar esta identificación, ya que actúa como una especie de condición de "aleatorización" (débil), que garantiza (como aproximación) un recorrido aleatorio por el espacio de fases y, por lo tanto, una distribución uniforme a largo plazo. Sin embargo, la ergodicidad ha sido objeto de críticas, por no ser ni necesaria ni suficiente para explicar el comportamiento termodinámico. En resumen, este tipo de objeción probabilística constituye una de las estrategias mediante las cuales algunos han intentado rechazar las críticas y defender la Hipótesis del Pasado, ya que socava la afirmación de que dicha hipótesis es improbable, pues tal afirmación estaría mal definida.

4.3. Objeción epistemológica neo-humeana: La ilusión del orden

Los influyentes David Albert y Barry Loewer han defendido una concepción naturalista del mundo (el llamado "*mentaculus*"), uno de cuyos tres ingredientes fundamentales es la Hipótesis del Pasado. (Junto con los otros dos componentes, las leyes de la naturaleza y el Postulado Estadístico, constituye una especie de esbozo cualitativo general, de espíritu neo-Humeano, de una "teoría completa del universo", que presuntamente querría dar cuenta de las regularidades estadísticas a lo largo de la historia del universo; véase Allori, 2020, cap. 1). Otros ejemplos recientes siguen esta misma línea, como los artículos de Eddy Keming Chen, que profundizan en la cuestión del estado inicial en el dominio cuántico (Chen, 2021). Estos autores no se limitan simplemente a asumir la Hipótesis del Pasado, sino que la incorporan al conjunto de las llamadas "leyes humeanas".

Sin embargo, parece *ad hoc* incluir en la lista del "Mejor Sistema Humeano" aquello que se necesite postular; además, el problema se vuelve más grave si se trata de una condición de contorno. La situación empeora aún más cuando dicha condición de contorno no es genérica (típica), sino altamente atípica.

Dejando estas críticas de lado, apelar a las leyes humeanas parece agravar aún más la situación, en la medida en que el enfoque humeano enfrenta un problema análogo. La

concepción (neo)humeana de las leyes ha sido objeto de numerosas sofisticaciones, pero continúa enfrentando un problema fundamental reconocido desde el inicio: se trata de una concepción de las leyes, de regularidades aparentemente no accidentales, que no logra explicar la ubicuidad de las regularidades presentes en el mosaico humeano (la historia del universo). Estas regularidades están presentes en todo el mosaico; su número (resumido en el conjunto de manuales de una biblioteca de física) es tan grande que, básicamente, ninguna interacción queda entregada al azar. En otras palabras, según la física, nada se trata como una casualidad a nivel fundamental, incluso si se acepta que las leyes fundamentales son indeterministas. En cambio, el (neo)humeano sostiene que no se necesita ninguna explicación. Así, la "uniformidad de la naturaleza" (en términos de David Hume) no sería más que una coincidencia cósmica (cósmica en el sentido de tener dimensiones cósmicas). El humeano podría negarse a explicar estas coincidencias cósmicas, pero este recurso parece ir en contra de normas básicas de la racionalidad. Esta conocida objeción ha sido desarrollada en detalle en Filomeno, 2021.

Lo interesante ahora es que puede advertirse que esta dialéctica es la misma que en el caso de la Hipótesis del Pasado. También aquí un rasgo extremadamente atípico es simplemente asumido como un hecho bruto dentro del marco explicativo. Por lo tanto, incorporar la Hipótesis del Pasado al "Mejor Sistema Humeano" no elimina la dificultad, sino que la traslada al estatuto de una condición incorporada al sistema explicativo, a menos que se rechace el razonamiento de tipicidad desarrollado en los párrafos anteriores. Dado que la situación ya era "suficientemente" problemática antes de introducir la Hipótesis del Pasado, resulta difícil determinar en qué medida se agrava al incorporarla como una ley.

4.4. Objeción dinámica: la conjetura de Penrose y sus límites

Una propuesta más tradicional es la de Roger Penrose, quien intentó explicar la Hipótesis del Pasado mediante una explicación dinámica que apela a una condición de contorno en la singularidad inicial del espacio-tiempo (Penrose, 1980, 1989b). Penrose consideró la relevancia de la gravedad en dichas escalas y recurrió al tensor de curvatura de Weyl, una magnitud geométrica asociada a la curvatura del espacio-tiempo. Propuso entonces la conjetura de que dicho tensor de Weyl debió haber sido extremadamente pequeño (cercano a cero) en la singularidad inicial del Big Bang, lo cual estaría asociado a una geometría suave del espacio-tiempo, y que, a su vez, explicaría el bajo valor de S_B. Esta condición se postula como una especie de principio primitivo, es decir, como una ley fundamental de la naturaleza. Es comprensible que esto haya parecido, para algunos, una maniobra *ad hoc*. Sin embargo, este enfoque desplaza el foco hacia la búsqueda de explicaciones para esta condición de contorno asimétrica.

Otra objeción a la propuesta de Penrose se relaciona con una forma de razonar implícita que ha afectado a la mayoría de los tratamientos del tema, incluidos los ya citados. Se trata de lo que se ha denominado "doble estándar temporal": la (presunta) ilegitimidad de invocar elementos asimétricos dentro de una visión del mundo que, según la física moderna, es en gran medida simétrica (principalmente debida a la invariancia temporal y la relatividad general) (Price, 1996). En particular, Price critica todo razonamiento que presuponga (sin justificación, como ocurre en la física moderna) cualquier privilegio de una dirección del tiempo, o de un "extremo" del universo en lugar del otro; es decir, que presuponga que el tiempo fluye del pasado hacia el futuro, o que cierta condición inicial se sostuvo en el Big Bang pero no en el Big Crunch. Eliminar este doble estándar (como en el enfoque simétrico de Thomas Gold), sin

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

embargo, conlleva sus propios desafíos particulares.

5. Alternativas a la PH para abordar el problema

Tras examinar en las secciones anteriores algunas dificultades conceptuales y probabilísticas asociadas a la Hipótesis del Pasado, cabe preguntarse si existen alternativas a su mera postulación. En esta sección se revisan algunas de las propuestas más influyentes, que intentan dar cuenta del origen del bajo valor de entropía inicial o replantear su necesidad.

En primer lugar, se ha considerado la propuesta de Boltzmann y Schutz, según la cual el universo se encontraría en equilibrio térmico la mayor parte del tiempo, excepto por raras fluctuaciones; por lo tanto, la era en la que evolucionaron sistemas vivos complejos como nosotros es solo una de las pendientes del gradiente de entropía durante estas raras fluctuaciones. Esta visión requiere un universo lo suficientemente extenso y antiguo como para permitir fluctuaciones de gran escala, lo que entra en conflicto con los datos cosmológicos actuales, en particular con la edad estimada del universo. Además, este enfoque conduce a la llamada paradoja de los "cerebros de Boltzmann", según la cual sería más probable la aparición espontánea de observadores mínimos en lugar de estructuras complejas como los seres humanos. Este escenario ha sido objeto de diversas críticas en la literatura reciente (Dogramaci, 2020; Chalmers, 2018; Carroll, 2017).

Otro enfoque alternativo evita la PH introduciendo una dinámica fundamentalmente estocástica, sin simetría temporal y sin leyes deterministas subyacentes. Diversos formalismos han sido desarrollados en esta dirección (van Kampen, 2011; Davies, 1974; Mackey, 1992; Streater, 1995). Este tipo de propuestas ofrece un marco atractivo para explicar la irreversibilidad, pero aún deja abierta la cuestión de cómo puede emerger un comportamiento físico estable y regular, susceptible de ser descrito mediante leyes, a partir de una dinámica intrínsecamente aleatoria. Esta línea ha sido discutida en profundidad por autores como Uffink (2009) y Filomeno (2019).

Asimismo, se han analizado propuestas más especulativas que también evitan postular la PH, como el modelo desarrollado por S. M. Carroll y Chen (Carroll y Chen, 2004), y el programa de *shape dynamics* propuesto por Barbour, Koslowski y Mercati (Barbour et al., 2014). Estas teorías sugieren que el universo observable podría ser solo una fracción diminuta de una realidad más amplia y diversa. En ese contexto, los rasgos altamente especiales que observamos en nuestro entorno —como un estado inicial de muy baja entropía— podrían explicarse como contingencias estadísticas dentro de un multiverso. Esta estrategia suele combinarse con un razonamiento antrópico, dado que la existencia de observadores conscientes solo sería posible en regiones del cosmos donde se den ciertas condiciones específicas. Si bien este tipo de argumentos enfrenta obvias objeciones epistemológicas por su difícil verificabilidad empírica, no puede descartarse por ello como falso.

Por último, se ha destacado una vía alternativa que merece mayor atención: la revisión de la noción de entropía a escala cosmológica, en particular considerando el papel de la gravitación. Como ha subrayado Wallace (2011), y también se discute en trabajos como Callender (2011) y Dougherty y Callender (2016), la relación entre entropía y evolución cosmológica puede haber sido excesivamente simplificada. Dependiendo de cómo se interpreten los grados de libertad gravitacionales, la historia termodinámica del universo podría adquirir una estructura muy

distinta a la actualmente aceptada. Por ejemplo, si se considera que la cosmología trata al universo temprano como un estado de equilibrio térmico local con entropía constante, surge la necesidad de conciliar esa imagen con los modelos termodinámicos tradicionales que exigen un inicio en baja entropía.

En suma, mientras ninguna de las alternativas actuales resuelve de forma definitiva el enigma de la Hipótesis del Pasado, su análisis comparado permite comprender con mayor claridad el carácter abierto, tanto conceptual como empírico, del problema.

Conclusiones

El análisis realizado muestra que la Hipótesis del Pasado (PH) constituye un problema abierto significativo, cuya magnitud excede lo meramente especial. Si se interpreta la razón entre volúmenes de espacios de estado como una medida orientativa de tipicidad, la región correspondiente a un universo inicial de entropía tan baja sería del orden de 1 en $10^{10^{124}}$, respecto del espacio de estados considerado. Esto sitúa dicha condición en el ámbito de lo extraordinariamente atípico. Para calibrar su escala, basta señalar que $10^{10^{124}}$ es un 1 seguido de 10^{124} ceros; este solo número de ceros ya es aproximadamente 10^{44} veces la cantidad total de átomos del universo observable ($\approx 10^{80}$). En consecuencia, incluso la mera cantidad de cifras que compondría este número rebasa de manera inconmensurable cualquier magnitud física conocida, de modo que, en comparación, otros números astronómicos, como el número de átomos del universo, la cantidad de segundos transcurridos desde el Big Bang o incluso un gúgolplex, quedan reducidos, en términos relativos, a magnitudes prácticamente nulas. Esta desmesura no constituye un detalle técnico, sino que pone de manifiesto una laguna relevante en los cimientos de nuestra comprensión de la realidad, una situación que un agente racional ideal debería considerar no solo digna de atención, sino como algo que requiere explicación.

La falta de una explicación adecuada implica que la comprensión científica actual del universo permanece fundamentalmente incompleta. Mientras este punto no se resuelva, permanecerá incompleta la fundamentación cosmológica de la segunda ley en su interpretación estadística, lo que a su vez compromete la solidez de la concepción de la flecha del tiempo, la evolución cosmológica, la irreversibilidad de los procesos físicos, entre otros aspectos, los cuales seguirán siendo, en lo esencial, provisionales.

Una posible solución podría requerir una reconceptualización profunda de nociones centrales, en particular, una revisión de la idea de entropía. Esta línea sugiere que los conceptos actuales pueden ser insuficientes para describir el universo primitivo y su evolución.

En conjunto, la Hipótesis del Pasado sigue siendo un problema abierto de gran relevancia para la física y la filosofía de la ciencia. Su resolución (o la demostración de que no requiere una explicación adicional) se perfila como una de las tareas centrales para comprender el fundamento cosmológico de la segunda ley, así como el estatuto de la flecha entrópica del tiempo y de la irreversibilidad macroscópica.

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

Agradecimientos

Este trabajo contó con financiamiento de ANID, Programa FONDECYT de Iniciación, Folio 11240113.

Referencias

Albert, D. Z. (2000). *Time and Chance*. Harvard University Press.

Allori, V. (2020). Some reflections on the statistical postulate: Typicality, probability and explanation between deterministic and indeterministic theories. In Allori, V., editor, *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature*, pages 65–111. World Scientific, Singapore.

Atkins, P. (2007). *Four Laws That Drive the Universe*. Oxford University Press.

Atkins, P. y de Paula, J. (2014). *Atkins' Physical Chemistry*. Oxford University Press.

Bain, J. (2019). Why be natural? *Foundations of Physics*, 49(9):898–914.

Barbour, J., Koslowski, T., y Mercati, F. (2014). Identification of a gravitational arrow of time. *Physical Review Letters*, 113(181101).

Boltzmann, L. (1877). Über die beziehung dem zweiten hauptsatze der mechanischen wärmetheorie und der wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den sätzen über das wärmegleichgewicht. *Wiener Berichte*, 76:373–435.

Callender, C. (2004). Measures, explanations and the past: Should 'special' initial conditions be explained? *British Journal for the Philosophy of Science*, 55(2):195–217.

Callender, C. (2011). Hot and heavy matters in the foundations of statistical mechanics. *Foundations of Physics*, 41(6):960–981.

Carroll, S. (2010). *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*. Dutton.

Carroll, S. (2017). *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*. Penguin.

Carroll, S. M. y Chen, J. (2004). Spontaneous inflation and the origin of the arrow of time. *Preprint*. arXiv:hep-th/0410270.

Chalmers, D. J. (2018). Structuralism as a response to skepticism. *The Journal of Philosophy*, 115(12):625–660.

Chen, E. K. (2021). Quantum mechanics in a time-asymmetric universe: On the nature of the initial quantum state. *British Journal for the Philosophy of Science*, 72(4):1155–1183.

Davies, E. B. (1974). Markovian master equations. *Communications in Mathematical Physics*, 39(2):91–110.

Dogramaci, S. (2020). Does my total evidence support that i'm a boltzmann brain? *Philosophical Studies*, 177(12):3717–3723.

Dougherty, J. y Callender, C. (2016). Black hole thermodynamics: More than an analogy? Manuscript.

Earman, J. (2006). The "past hypothesis": Not even false. *Studies in History and Philosophy of Science Part B*, 37(3):399–430.

Filomeno, A. (2019). Stable regularities without governing laws? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 66:186–197.

Filomeno, A. (2021). Are non-accidental regularities a cosmic coincidence? revisiting a central threat to humean laws. *Synthese*, pages 1–32.

Filomeno, A. (2023). Typicality of dynamics and the laws of nature. In *Current Debates in Philosophy of Science: In Honor of Roberto Torretti*, Synthese Library. Springer.

Frigg, R. y Werndl, C. (2023). Philosophy of statistical mechanics. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Summer 2023 Edition.

Hemmo, M. y Shenker, O. (2012). *The Road to Maxwell's Demon: Conceptual Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press.

Hossenfelder, S. (2018). *Lost in Math: How Beauty Leads Physics Astray*. Basic Books.

Mackey, M. C. (1992). *Time's Arrow: The Origins of Thermodynamic Behavior*. Springer-Verlag.

McCoy, C. D. (2018). The implementation, interpretation, and justification of likelihoods in cosmology. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 62:19–35.

Mosterín, J. (2004). Anthropic explanations in cosmology. In Hajek, V. y Westerstahl, D., editors, *12th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science*. North-Holland Publishing, Amsterdam.

Norton, J. D. (2018). Eternal inflation: When probabilities fail. *Synthese*. Special issue "Reasoning in Physics".

Penrose, R. (1980). Singularities and time asymmetry. In Hawking, S. W. y Israel, W., editors, *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*, pages 581–638. Cambridge University Press.

Penrose, R. (1989a). Difficulties with inflationary cosmology. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 571:249–264.

Penrose, R. (1989b). *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. Oxford University Press.

Penrose, R. (2003). *Cycles of Time*. Knopf.

Price, H. (1996). *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. Oxford University Press.

© 2026 A. Filomeno y J. I. Jerez Torrens | CC BY 4.0 | doi.org/10.35588/cc.v7d8361

Reif, F. (1965). *Berkeley Physics Course: Statistical Physics*. McGraw-Hill.

Richter, B. (2006). Theory in particle physics: Theological speculation versus practical knowledge. *Physics Today*, 59(10):8–9.

Sklar, L. (1993). *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press.

Sklar, L. (2015). Philosophy of statistical mechanics. `https://plato.stanford.edu/archives/win2015/entries/statphys-statmech/`. Winter 2015 Edition, The Stanford Encyclopedia of Philosophy.

Smeenk, C. y Ellis, G. (2017). Philosophy of cosmology. `https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/`. Winter 2017 Edition, The Stanford Encyclopedia of Philosophy.

Streater, R. F. (1995). *Statistical Dynamics: A Stochastic Approach to Nonequilibrium Thermodynamics*. Imperial College Press. `https://books.google.cl/books?id=e7IvvgAACAAJ`.

Strevens, M. (2008). *Depth: An Account of Scientific Explanation*. Harvard University Press.

Uffink, J. (2009). Irreversibility in stochastic dynamics. In Ernst, G. y Hüttemann, A., editors, *Time, Chance and Reduction: Philosophical Aspects of Statistical Mechanics*, pages 180–207. Cambridge University Press.

van Fraassen, B. C. (1989). *Laws and Symmetry*. Oxford University Press.

van Kampen, N. G. (2011). *Stochastic Processes in Physics and Chemistry*. Elsevier.

Wallace, D. (2011). Gravity, entropy, and cosmology: In search of clarity. *British Journal for the Philosophy of Science*, 61(3):513–540.

Wells, J. D. (2019). Naturalness, extra-empirical theory assessments, and the implications of skepticism. *Foundations of Physics*, 49(9):991–1010.

Wheeler, G. (2007). A review of the lottery paradox. In Harper, W. y Wheeler, G., editors, *Probability and Inference: Essays in Honour of Henry E. Kyburg, Jr.* College Publications.

Williams, P. (2015). Naturalness, the autonomy of scales, and the 125 gev higgs. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 51:82–96.