

Filosofía de la Física Estadística y la Termodinámica

Aldo Filomeno Farrerons*

Entrada para la Enciclopedia de la Sociedad Española de Filosofía Analítica

<http://www.sefaweb.es/enciclopedia/>

Índice

1	Introducción	2
2	Enmarcando los fenómenos termodinámicos en el resto de la física	3
3	La explicación estadística de la 2ª ley	6
3.1	Condiciones en la dinámica	8
3.2	Recurrencia eterna	9
3.3	Irreversibilidad	10
4	Interpretaciones y justificaciones de la probabilidad	13
4.1	Probabilidad Epistémica	14
4.2	Probabilidad Óptica	15
	Lecturas recomendadas	15
	Entradas relacionadas	16
	Referencias	16

*Instituto de Filosofía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. aldo.filomeno@pucv.cl. <https://philpeople.org/profiles/aldo-filomeno>. Agradecimientos: Javier Anta, Ronald Durán y colegas del grupo de sistemas complejos de Valparaíso.

1. Introducción

En esta entrada se mencionan las principales cuestiones acerca de los fundamentos teóricos de la mecánica estadística y la termodinámica, y las cuestiones filosóficas en las que repercuten estas áreas de la física. Al final se añaden lecturas recomendadas, enfatizando las traducidas al español.

Respecto a la repercusión en cuestiones filosóficas, la termodinámica y la mecánica estadística pueden influir o arrojar luz sobre los temas de:

- el determinismo, la probabilidad, el azar;
- el reduccionismo y la emergencia;
- la irreversibilidad en el universo;
- la teleología;
- la asimetría y direccionalidad del tiempo;
- las leyes de la naturaleza;
- la simplicidad y complejidad en la naturaleza.

Por otro lado, dentro de tales teorías físicas, su fundamentación conceptual no está resuelta (Sklar, 1993; Uffink, 2006; Shenker y Hemmo, 2011), y además, dependiendo del camino que se tome, puede conllevar una revisión substancial de nuestra imagen e historia del universo. Así, tal fundamentación es de interés para la física teórica, pero innecesaria para la exitosa puesta en práctica de tales teorías (de hecho, estos temas apenas se tratan en los libros de texto).

En tercer lugar, al margen de su repercusión en dichas cuestiones filosóficas y de su fundamentación conceptual, la termodinámica lidia con conceptos fundamentales del universo que han sido entendidos de varias maneras. Hay por tanto un estudio para entender si conceptos como el de energía y entropía, por citar los más paradigmáticos, tienen una definición que es más prioritaria que otras, una se deriva de otra, etc. Un estudio profundo de las teorías científicas puede que deje completamente determinada la cuestión, pero es posible que la formalización matemática y la evidencia empírica no basten y este tipo de cuestiones ontológicas queden subdeterminadas, por lo que sólo quedaría disponible el análisis filosófico. Lo mismo ocurre para el status de sus leyes, es decir las 5 leyes de la termodinámica (si contamos las últimas propuestas), y su relación entre ellas:

numeradas de la -1 a la 3 para indicar una supuesta prioridad de unas respecto otras. En esta línea, hay expresiones famosas (p. ej. Eddington o Feynman) acerca del elevado status de la 2ª ley, como necesaria en algún sentido (lógicamente?).

2. Enmarcando los fenómenos termodinámicos en el resto de la física

La termodinámica investiga los fenómenos relacionados con los conceptos interrelacionados de energía y entropía (entre otros, como calor y temperatura). Se la suele considerar una teoría fenomenológica (p.ej. Pierre Duhem y Ernst Mach), en el sentido de que explica las observaciones empíricas, a nivel macroscópico, pero no se considera como una teoría fundamental. Es decir, no tiene la ambición de postular como existentes, o sea de comprometerse ontológicamente, con las propiedades, entidades, y leyes que postula. Es el ejemplo paradigmático que Einstein dio de ‘teoría de principio’ (‘principle theory’), en oposición a ‘teorías constructivas’ (como la teoría cinética de gases / mecánica estadística).

La mecánica estadística, entonces, pretende explicar el comportamiento macroscópico termodinámico en términos de sus constituyentes microscópicos fundamentales. Los constituyentes que suelen presuponerse son los de la mecánica clásica: partículas y leyes newtonianas de movimiento. Se usa la mecánica clásica en vez de la cuántica por simplicidad, en cuanto no influye este cambio en los debates sobre los fundamentos (con excepciones, en las que sí se apela a características de la teoría cuántica).

Hay también un acercamiento alternativo a la mecánica estadística, asociado al formalismo de Willard Gibbs, en el cual las explicaciones apelan a colectivos estadísticos y no directamente a los componentes individuales microscópicos. Mayoritariamente en la literatura filosófica el acercamiento presupuesto como fundamental es el primero, asociado a Ludwig Boltzmann, mientras que el de Gibbs es considerado meramente como una teoría efectiva, útil a nivel práctico. Sin embargo, la prioridad de uno u otro acercamiento sigue siendo a día de hoy un debate filosófico abierto. Para defensas del acercamiento de Gibbs véase (Prigogine y Stengers, 1994; Nicolis y Prigogine, 1989; Wallace, 2020) .

El proyecto de la mecánica estadística. La mecánica estadística se enmarca como un área ligada a la teoría de sistemas dinámicos, de sistemas complejos y teoría del caos (Batterman, 2013; Ladyman y Wiesner, 2020). Estas son ciencias especialmente abstractas, lo que les permite una amplísima aplicabilidad en la descripción de una variedad de sistemas físicos muy diferentes entre sí (p. ej. organismos complejos como huracanes, seres vivos, o grandes colectivos de animales como sociedades humanas).

En general, la mecánica estadística aspira a vincular las propiedades individuales de sus constituyentes con las propiedades colectivas del sistema físico bajo estudio. Así, estudia diversas *escalas* de la realidad y su interrelación: el caso tradicional de estudio es el comportamiento termodinámico de partículas de un gas. Pero la mecánica estadística también es aplicable a cualquier otro sistema, donde sus constituyentes individuales son más pequeños (p.ej. quarks), o más grandes (planetas, estrellas, galaxias). En el ejemplo de las estrellas, el comportamiento de un “gas de estrellas” modela el comportamiento de una galaxia. Otros ejemplos son un laser, el cual es un conjunto de fotones; un ecosistema, en el cual interactúan muchos organismos vivos; o la economía mundial, en la cual hay un elevadísimo conjunto de agentes intercambiando capital.

En el caso tradicional de la Termodinámica, la mecánica estadística intenta proveer una explicación *reduccionista* de la 2ª ley, de tipo *estadístico*, y con ello, una explicación de la *asimetría temporal* que describe (ver abajo). (A su vez, mencionar que el reduccionismo va generalmente ligado a una visión *monista* y *unificada* de la realidad.)

Relación con el resto de la física. En cuanto su aplicación se extiende potencialmente al universo entero como sistema físico cerrado, la mecánica estadística y la termodinámica son relevantes para la cosmología.

A día de hoy, la imagen científica del mundo la compone, por un lado, la mecánica cuántica con el modelo estándar de la física de partículas, y por otro lado, la teoría de la relatividad general de Einstein. Esta última da cuenta principalmente de la gravitación y de la estructura del espaciotiempo, mientras que la física de partículas da cuenta del resto de partículas e interacciones elementales (electromagnética, nuclear fuerte y débil). Sin embargo, tales teorías físicas no explican el ubicuo comportamiento termodinámico: no explican los hechos constatados continuamente de que, por ejemplo, el humo del ta-

baco se esparce ocupando toda la habitación, nunca se acaba juntando en una esquina; o de que el café espontáneamente sólo se enfría, nunca se calienta; o de que café y la leche siempre se mezclan, nunca se separan en capas. Otros ejemplos en sistemas físicos más complejos son el que las frutas siempre acaban marchitando; o el dicho de que en este mundo la única certeza que tenemos es la muerte (en otras palabras, que todo organismo vivo resiste un tiempo finito postponiendo su tendencia hacia el equilibrio termodinámico con el entorno). Se desprende de todos estos fenómenos que parece haber una tendencia “natural”, o sea *espontánea*, en la Naturaleza, con una *direccionalidad* – y además, una *irreversibilidad* – en el universo. Esto se describe en términos de la 2ª ley de la termodinámica, según la cual los sistemas o procesos físicos tienden espontáneamente a aumentar su entropía. La predicción “última” sería la llamada ‘muerte térmica del universo’, el estado de entropía máxima global, el estado de equilibrio, al cual el universo se dirige inexorablemente (en el que no habría ningún tipo de estructura compleja físicamente posible).¹

Una actitud inicial comprensible es la de, simplemente, añadir las leyes de la termodinámica a la lista de leyes fundamentales del universo. Pero añadir la 2ª ley de la termodinámica sin más a la ontología resulta insatisfactorio. Se suele esperar una explicación más profunda que su mera postulación, no sólo por la preferencia de intentar minimizar postulaciones en la ontología, sino principalmente porque los fenómenos termodinámicos parecen contener una *asimetría* que no existe en el resto de áreas de la física. De hecho, el motivo por el cual el resto de la física no explica estos fenómenos, o sea el porqué no explica que los cambios son sólo en una dirección, es porque todas las otras leyes de la física son *simétricas respecto al tiempo*.

Tal simetría temporal conlleva una falta de distinción entre pasado y futuro. Así, en la imagen científica estándar, tal distinción entre pasado y futuro es interpretable como una mera ilusión. A nivel fundamental no hay ningún privilegio entre un tiempo pasado o presente o futuro (de modo análogo a como en el espacio no hay un lugar privilegiado). Cualquier proceso es, en principio, reversible. Nada en la Física fundamental prohíbe que ocurran procesos inversos, en dirección contraria, “marcha atrás”. Sin embargo, ciertos

¹Una visualización basada en la imagen científica actual puede verse en el vídeo ‘Timelapse of the future’ de John Boswell: <https://www.youtube.com/watch?v=uD4izuDMUQA>.

fenómenos sólo ocurren en una dirección: la asimetría termodinámica se constata continuamente. Así, tal asimetría termodinámica parece sugerir una asimetría temporal entre pasado y futuro. Explicar esta *apariencia* de *asimetría* del comportamiento termodinámico es una de las misiones de la mecánica estadística.

Detrás de estos debates está la cuestión acerca del *tiempo*: ¿Es el tiempo un constituyente esencial de la realidad o una ilusión fenomenológica? El debate evoca o bien una visión parmenidea en la que el universo existe atemporalmente, o bien una visión heraclitea. La concepción asociada a Parménides se asocia con la idea de una realidad fundamental inmutable, eterna, *estática*; la concepción asociada a Heráclito con la idea de un universo en constante *cambio*. En los debates en filosofía de la física se hallan ambas visiones: quienes intentan reconciliar los fenómenos asimétricos de la termodinámica con la imagen parmenidea simétrica respecto al tiempo de la física, y quienes argumentan que tal imagen parmenidea debe revisarse a la luz de los fenómenos termodinámicos que consideran irreducibles.

3. La explicación estadística de la 2ª ley

La entropía se puede definir de varias formas (en términos de trabajo y calor tenemos las definiciones equivalentes originarias de Clausius por un lado y Kelvin por otro); en términos energéticos; o en términos probabilísticos (además de la entropía en términos de información, de la que aquí no hablaremos). Aunque la entropía no corresponde exactamente al vago concepto de desorden de un sistema, se considera una buena, aunque imprecisa, primera aproximación pedagógica al concepto. En términos probabilísticos, la entropía se puede empezar a entender como la propiedad de un sistema que mide la probabilidad que tiene de darse la configuración microscópica en la que éste se encuentra. Aquí, probabilidad se entiende asociada al número de combinaciones posibles que corresponden al estado observado. Como veremos, resultará que la grandísima mayoría de permutaciones de las posiciones y velocidades de las moléculas corresponden al estado de equilibrio termodinámico, el de máxima entropía, y por esto es el más probable. Esta definición se entenderá con la explicación siguiente.

La 2ª ley de la termodinámica puede formularse como la afirmación que en todo sistema cerrado la entropía espontáneamente crece o se mantiene estable. Una formulación más general de la 2ª ley es la que [Macke \(1963\)](#); [Brown y Uffink \(2001\)](#) llaman la ‘ley menos uno’ (por ser la conceptualmente más prioritaria de todas las otras 4), que afirma *la tendencia espontánea de todo sistema físico al estado de equilibrio termodinámico*.

La explicación estándar de Boltzmann recurre a matemática combinatoria: [Boltzmann \(1877\)](#) advirtió que la grandísima mayoría de todos los posibles micro-estados correspondían al macro-estado de equilibrio M_{eq} , es decir, el macro-estado en que la entropía es máxima, es decir el macro-estado en el cual las partículas están distribuidas de manera uniforme en todo el espacio. Es decir, en la medida considerada natural, la medida uniforme μ (de Lebesgue), $\mu(M_{eq})$ es extremadamente mayor que cualquier otra región; de hecho, M_{eq} ocupa casi la totalidad del espacio de fases Γ (fig. 1). Una estimación del ratio entre M_{eq} y otra región genérica se suele aproximar a 10^N , por lo que para un $N = 10^{23}$, digamos, el ratio sería de $10^{10^{23}}$.



Figura 1: El espacio de fases particionado en macro-regiones. Cada macro-región agrupa a los micro-estados que son macroscópicamente indistinguibles. La macro-región del estado de equilibrio M_{eq} es la de mayor tamaño, es decir, la que contiene más micro-estados (no está a escala; es mucho mayor). (Figura de [Penrose, 1989](#).)

Así, Boltzmann define el concepto de entropía S como el logaritmo del tamaño de la región del macro-estado M :

$$S(M) = k_B \ln|\Gamma_M|$$

donde k_B es la constante de Boltzmann. Entonces, debido a la diferencia radical entre los tamaños de la macro-región de equilibrio y el resto de macro-regiones, la no-disminución

de entropía establecida por la 2ª ley será extremadamente más probable que ocurra. Así, resulta que

$$S(M_{Eq}) \gg S(M_{\neg Eq})$$

donde $M_{\neg Eq}$ refiere a cualquier otro macro-estado.

Esto explicaría el comportamiento asimétrico en el tiempo establecido por la 2ª ley, preservando la imagen newtoniana del mundo *simétrica en el tiempo*. La 2ª ley, así entendida, no sería una ley estricta sino una aproximación, con excepciones, describiendo la probabilidad de tal comportamiento termodinámico.

Por tanto, *parece* que ya no habría ningún conflicto entre las leyes microscópicas reversibles y el comportamiento macroscópico irreversible. Sin embargo, esta explicación se enfrenta a varias objeciones, que han sido afrontadas por físicos y matemáticos durante décadas hasta el día de hoy. Dos temas centrales son la cuestión de la irreversibilidad (Loschmidt) y la objeción de la recurrencia (Zermelo). La primera (§3.3) tiene que ver con esta explicación de la *asimetría* temporal, o de la flecha del tiempo y la flecha de la entropía, en base a ingredientes que son todos *simétricos* respecto al tiempo. La segunda (§3.2) tiene que ver con resultados matemáticos que preveen un “eterno retorno”.

3.1. Condiciones en la dinámica

Ergodicidad. Se puede advertir que para que la explicación estadística de Boltzmann funcione, el sistema debe evolucionar de modo que no quede “atrapado” o “recluido” a una región del espacio de fases, sino que recorra todo este espacio de manera equitativa, o sea proporcional a su tamaño (fig. 1, ver también §4.2). Esto lleva a la llamada hipótesis ergódica, postulada por el mismo Boltzmann.

Aunque intuitiva, se descubrió que tal hipótesis ergódica no se verifica fácilmente: no parece ser condición ni necesaria ni suficiente para explicar el acercamiento al equilibrio. Parece que muchos sistemas realistas (p. ej. de ciertos gases) no son ergódicos, Y del mismo modo, hay sistemas ergódicos que no tienden al equilibrio.

Esto podría ser quizá subsanado por la hipótesis cuasi-ergódica, que es una versión

más laxa de aquella.² En última instancia, para resolver estas críticas se necesita invocar el elevado número de grados de libertad del sistema. El objetivo es que el sistema exhiba un suficiente grado de *inestabilidad* dinámica, de modo que *aleatorice* la evolución del sistema.

Universalidad en transiciones de fase. Un tema aparte, cercano al gigantesco estudio de teoría ergódica, es el de la sorprendente *universalidad* de ciertos fenómenos críticos: el intrigante hecho de que la explicación matemática de las *transiciones de fase* sea casi idéntica para sistemas físicos sumamente diferentes entre sí (la transición del agua de la de fase líquida a sólida, o la de un metal que se magnetiza). Entre otras cosas, esto evidencia un elevado grado de *autonomía* de entre escalas “macro” y “micro” de la realidad (Batterman, 2018).

Tal autonomía, cabe mencionar, también ocurre en escalas mucho más fundamentales de la realidad: en escalas de energía más altas también se ha detectado una elevada autonomía entre ellas, que de hecho se modela con formalismos matemáticos análogos (las llamadas técnicas de renormalización), dando lugar a teorías llamadas ‘efectivas’, es decir válidas sólo para ciertas escalas (Castellani, 2002). Este tipo de resultados (cf. abajo §4.2) dan cuenta de la emergencia de patrones regulares, por lo que podrían ayudar a elucidar el status ontológico de las leyes de la naturaleza (Filomeno, 2019, 2021, cf. Misra et al., 1979; Prigogine y Stengers, 1994).

3.2. Recurrencia eterna

Poincaré, en el estudio de la evolución temporal de sistemas dinámicos, encontró que casi cualquier punto del espacio de fases Γ yace sobre una trayectoria la cual volverá a ese punto (arbitrariamente cerca), después de un tiempo finito. Este es informalmente el resultado del llamado teorema de recurrencia de Poincaré. Aplicado a la física estadística, Zermelo mostró que implica que la entropía no puede estar continuamente creciendo, tarde o temprano acabará disminuyendo, pues se probó que cualquier sistema cerrado

²Pero ver crítica de Earman y Rédei (1996), y réplicas de Lombardi (2003, §6) o Vranas (1998); Frigg y Werndl (2011).

en que la energía se conserva volvería, considerando un lapso de tiempo infinito, una infinidad de veces a una posición arbitrariamente cerca de su posición inicial.

Para la 2ª ley entendida como una ley aproximada, estadística, tal objeción resulta más tratable. Pues se suele responder que sí, tal recurrencia podría ocurrir, pero no en lapsos de tiempo humanamente observables; incluso, según las estimaciones del tiempo necesario, a escalas de tiempo de la edad del universo hasta un supuesto “big crunch”, esta recurrencia nunca llegaría a ocurrir. (Boltzmann mismo estimó que incluso restringido a 1cm^3 de aire, el tiempo de recurrencia era de $10^{10^{19}}$ segundos.) El matrimonio Ehrenfest-Afanassjewa y resultados de Lanford ayudaron en décadas posteriores a responder este problema.

3.3. Irreversibilidad

Con la explicación de Boltzmann tenemos que lo más probable es que, desde el instante actual hacia el futuro, la entropía aumente. Bien, pero teniendo en cuenta que las leyes son simétricas respecto al tiempo, la pregunta que surge inevitablemente es: ¿Por qué la entropía no aumentaría desde el instante actual también hacia el pasado? Podríamos invertir la flecha del tiempo (transformar de $+t$ a $-t$, tal como permite dicha simetría) y la predicción de Boltzmann sería que hacia el pasado la entropía también crecería, lo cual obviamente no es acorde a la realidad (Fig. 2). Así pues, la explicación de Boltzmann, sin más, es insuficiente.

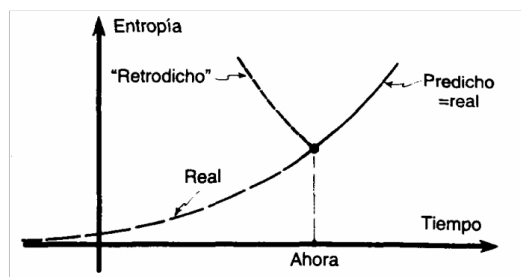


Figura 2: La explicación inicial de Boltzmann es insuficiente, debido al problema de la reversibilidad, pues también predice hacia el pasado un aumento de entropía (de (Penrose, 1989)).

Hay varios intentos de resolución. La propuesta primaria para completar la explicación de la 2ª ley es la propuesta de Maxwell y Boltzmann de añadir una postulación adicional, hoy llamada la ‘hipótesis del pasado’: postular que el universo empezó en un estado inicial de bajísima entropía (Feynman et al., 1963).

Esta postulación, para empezar, implica adentrarse en terreno cosmológico, y en tiempos cercanos al Big Bang, para explicar fenómenos del presente local, como los ubícuos fenómenos termodinámicos de la mezcla espontánea del café con la leche. Aunque minoritario, hay quien considera que esto está yendo más allá de los límites en los que debería enmarcarse la ciencia de la termodinámica. Dejando de lado esta sospecha, el problema principal es que la suposición del estado de bajísima entropía no es una postulación fácil de aceptar, pues es la postulación de un estado realmente *muy* especial; o sea, es un estado que sería *extremadamente* inesperado, extraño, o improbable. El grado de improbabilidad es tal que en una estimación de Penrose (1989, 445) es del orden de $10^{-10^{123}}$ (para que se entienda, este número tiene más 0’s que el número estimado de partículas del universo).

Además, no basta con postular la hipótesis del pasado sin mención alguna a la dinámica del sistema. Se debería garantizar de algún modo que esto ocurra para todos los hamiltonianos³ o, al menos, para la mayoría (Frigg, 2009; Filomeno, 2021; y ver arriba §3.1). Otros dos problemas inmediatos que tiene esta postulación es que no sabemos a qué se refiere uno exactamente al referirse al macro-estado del universo temprano. Y hablar de entropía en tal contexto tampoco está claro, entre otras cosas porque a día de hoy no tenemos la teoría física en cuestión (gravedad cuántica, digamos). Para más objeciones a la hipótesis del pasado, ver Earman (2006), North (2010).

En todo caso, hay otros caminos para intentar explicar la irreversibilidad y la asimetría de la entropía. Otra alternativa, ideada en la etapa final de Boltzmann por su estudiante de doctorado Schutz, es la de suponer que en realidad la historia del universo siempre ha estado en un estado de equilibrio o cercano al equilibrio, con lo cual, mirado a gran escala, la humanidad simplemente resulta que ha podido surgir en una pequeña fluctuación que ha alejado al universo del equilibrio y ahora está volviendo a tal estado

³Esto corresponde a diferentes dinámicas. Cada hamiltoniano codifica la información de la energía cinética y potencial de cada configuración del sistema, lo cual acaba generando una diferente evolución de su trayectoria en el espacio de fases.

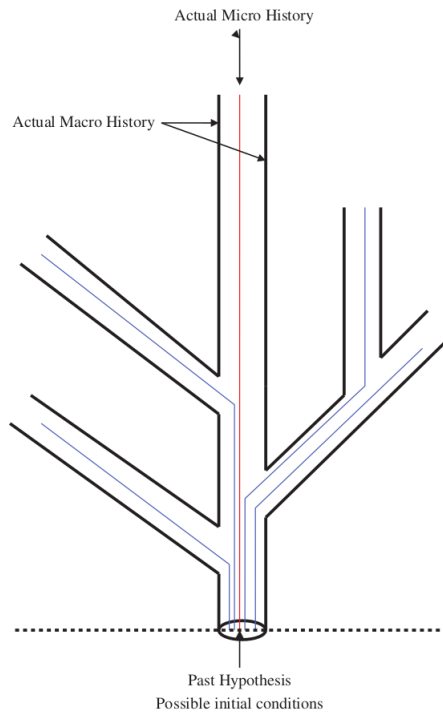


Figura 3: La imagen resultante de la historia del universo en el espacio de posibilidades es la de una evolución determinista en el nivel fundamental, ‘micro’, siendo la línea roja la historia actual. Según el controvertido modelo que presupone la hipótesis del pasado, hay un minúsculo subconjunto de condiciones iniciales posibles de bajísima entropía. Algunas de estas condiciones iniciales evolucionarían a una historia a nivel macro compatible con la historia a nivel macro a día de hoy (las que estarían dentro del cilindro central). Otras de estas condiciones iniciales, sometidas a leyes, darían lugar a ramificaciones en esta historia, o sea a una historia del universo que a escala macro sería diferente a la actual. Figura de (Allori, 2020).

(Ehrenfest y Ehrenfest, 1959) (fig. 4).

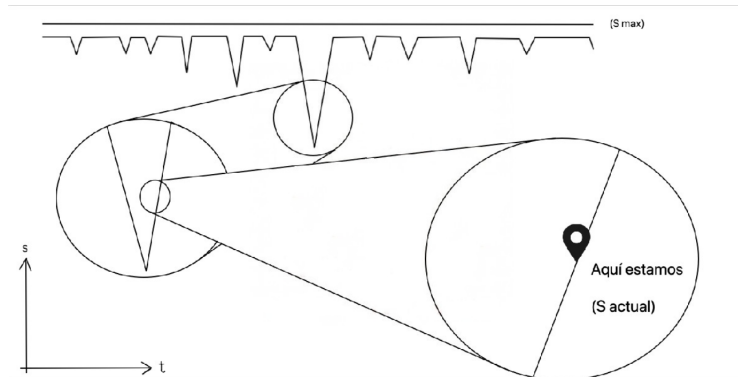


Figura 4: En esta propuesta para resolver la irreversibilidad, el universo pasa la mayor parte del tiempo cercano al estado de equilibrio S_{max} , siendo así la historia del universo simétrica en el tiempo. Sin embargo, hay fluctuaciones aleatorias, y nosotros nos encontraríamos en la pendiente de subida de una de ellas, en S_{actual} . (Figura de Thomas Mies.)

En contra de esta propuesta ha sido influyente el argumento probabilístico de los cerebros de Boltzmann. Por otro lado, la cosmología ha progresado mucho desde la formulación de esta hipótesis, y nos provee con una historia estándar del universo observable, desde el big bang hasta hoy, que no contempla tal escenario de fluctuaciones entrópicas. Para otras alternativas recientes, ver p.ej. (Carroll y Chen, 2004) o (Barbour et al., 2015), y la evaluación de ambas en (Lazarovici y Reichert, 2020).

4. Interpretaciones y justificaciones de la probabilidad

La introducción de probabilidades, además en una teoría física determinista, nos conduce a su interpretación. Por ejemplo, la distribución resultante en el estado de equilibrio térmico es una distribución uniforme de posiciones y normal de velocidades. Se ha intentado demostrar (desde el teorema H de Boltzmann) que era la única distribución a la que convergían los gases y se mantenía estacionaria sin importar las colisiones entre moléculas (fig. 5).

Otra asunción probabilística importante se halla en la suposición de que, dado un

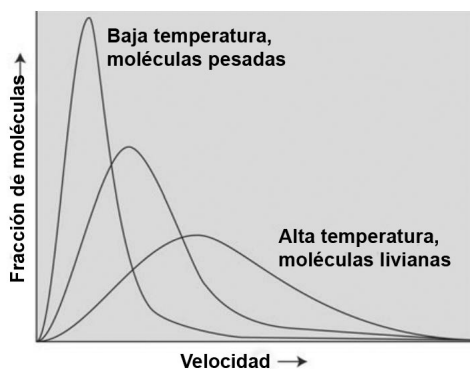


Figura 5: Distribución de Maxwell estacionaria en el estado de equilibrio de la proporción de partículas en función de la velocidad, para 3 diferentes temperaturas.

cierto macro-estado (el de todas las partículas dispersas en equilibrio, o el de todas en una esquina en no-equilibrio) cualquier micro-estado compatible con tal macro-estado es igual de probable: una medida de probabilidad *uniforme* sobre los micro-estados. Algunos han llamado a esta distribución de probabilidad el ‘postulado estadístico’.

4.1. Probabilidad Epistémica

Podríamos interpretar las probabilidades no de manera óptica, sino epistémica. Aquí, para empezar, la tentación de la interpretación clásica, basada en el principio de indiferencia, se tendría que dejar de lado, ya que presenta problemas varios irresolubles (especialmente en espacios de posibilidades continuos, como el que nos concierne), o al menos irresueltos desde hace siglos (Gillies, 2000; Filomeno, 2018). Nos queda la interpretación epistémica entendida como que las probabilidades se refieren a nuestra ignorancia acerca de las condiciones iniciales precisas del micro-estado y de la evolución del sistema. Es la forma en que se suele interpretar el acercamiento de Gibbs. Jaynes (1957) es de los pioneros en defender una interpretación epistémica de la probabilidad en este contexto (recientemente, ver Bricmont (2020)). Uno de las motivaciones principales es la mencionada supuesta incompatibilidad entre leyes deterministas y probabilidad óptica. Así es como de hecho suele presentarse en manuales de mecánica estadística.

Sin embargo, la interpretación epistémica ha sido cuestionada, principalmente porque la ocurrencia real de las distribuciones estacionarias de patrones estadísticos halladas experimentalmente (p. ej. la distribución de probabilidad en el estado de equilibrio de la fig. 5) no parece que tengan nada que ver con la ignorancia de un agente, aunque sea un agente ideal. Para una elaboración ilustrativa, aunque quizá tendenciosa, de esta objeción, ver [Albert, 2000](#), 64. Cf. [Prigogine y Stengers, 1994](#), cap. VII y ([Wallace, 2021](#), 75-79).

4.2. Probabilidad Óptica

Entre las interpretaciones de probabilidad óptica, los candidatos principales son una interpretación frecuentista (ya sea de las frecuencias actualmente observadas, o hipotéticas si extendemos el número de observaciones al infinito). Esto tiene asociados los problemas irresueltos en las interpretaciones frecuentistas de la probabilidad ([Gillies, 2000](#)). Además, esta interpretación sólo es compatible con nuestras descripciones del sistema si este posee un determinado comportamiento dinámico ergódico (o similar), lo cual hemos comentado en §3.1 que es problemático.

Una propuesta cercana reciente pretende dar sentido a la emergencia de probabilidades objetivas, aunque el nivel físico subyacente esté gobernado por leyes deterministas (nivel en el cual no habría probabilidades objetivas). Un acercamiento es de espíritu deflacionista ([Frigg y Hoefer, 2015](#)), en la línea del influyente proyecto reduccionista de inspiración humeana, y cercano a la interpretación de frecuencias actuales. Otro acercamiento cercano se ha dedicado a explicar la emergencia de patrones estadísticos en un nivel macroscópico, independientemente de los detalles (deterministas o no) del nivel microscópico. Esto se fundamenta en el teorema de Poincaré llamado ‘método de funciones arbitrarias’ ([Poincaré, 1896](#); [Kochen, 1990](#); [Strevens, 2011](#)).

Lecturas recomendadas

Para introducciones al estudio científico de la termodinámica, ver p. ej. [Atkins \(1997, 2008\)](#), [Prigogine y Stengers \(1994, caps. 1-7\)](#), [Schneider y Sagan \(2008\)](#).

Para manuales de termodinámica y mecánica estadística, Sethna (2006); Stowe (2007); Eisberg (1969); Landau y Lifshitz (1963).

Para estudios históricos de la termodinámica, Cardwell (1971), Varios (1999), Ordóñez et al. (2013).

Para los fundamentos filosóficos de la termodinámica y la mecánica estadística, Price (1996); Albert (2000); Uffink (2006); Hemmo y Shenker (2012); Frigg (2008, 2010); Sklar (1993, 2015); Batterman (2013); Ladyman y Wiesner (2020); Gabbay et al. (2011), y en español, Sklar (1994, Parte 3), Lombardi (1999, 2003, 2015); Lombardi y Labarca (2005, 2013); Martínez González y Lombardi (2018); Guzmán y Cervera (2006); Durán Allimant y Orellana (2015); Durán Allimant (2019); Filomeno (20xx).

Entradas relacionadas

[Emergentismo](#)

[Leyes naturales](#)

[El Tiempo](#)

[Filosofía de la Química](#)

Referencias

Albert, David Z. *Time and Chance*. Harvard University Press, 2000.

Allori, Valia. *Statistical Mechanics And Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism And Laws Of Nature*. World Scientific, 2020.

Atkins, P. *Química - Física*. Médica Panamericana, 1997.

———. *Las cuatro leyes del universo*. Espasa Forum, 2008.

Barbour, Julian, Tim Koslowski, y Flavio Mercati. “Entropy and the Typicality of Universes.”, 2015. arxiv.org/abs/1507.06498.

Batterman, R. *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. Oxford Handbooks in Philosophy. Oxford University Press, 2013.

- Batterman, Robert W. “Autonomy of Theories: An Explanatory Problem.” *Noûs* 858–873.
- Boltzmann, Ludwig. “Über die beziehung dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respesktive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht.” *Wiener Berichte* 76 (1877): 373–435.
- Bricmont, Jean. “Probabilistic Explanations and the Derivation of Macroscopic Laws.” En *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature*, editado por Valia Allori. Singapore: World Scientific, 2020, 31–64.
- Brown, Harvey R., y Jos Uffink. “The Origins of Time-Asymmetry in Thermodynamics: The Minus First Law.” *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 32, 4 (2001): 525–538.
- Cardwell, D.S.L. *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*. Cornell University Press, 1971.
- Carroll, Sean M., y Jennifer Chen. “Spontaneous inflation and the origin of the arrow of time.” *ArXiv pre-print arXiv:hep-th/0410270*.
- Castellani, Elena. “Reductionism, Emergence, and Effective Field Theories.” *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 33, 2 (2002): 251–267.
- Durán Allimant, Ronald. “Filosofía y ciencia: críticas al uso que hace Bergson del argumento de Boltzmann contra la reversibilidad del universo.” *Filosofía Unisinos* 20 (2019): 228–237. doi: 10.4013/fsu.2019.203.01.
- Durán Allimant, Ronald, y Oscar Orellana. *Morfogénesis, inestabilidad y modelos químico-matemáticos: Turing y Prigogine*. 2015, 183–198.
- Earman, John. “The “Past Hypothesis”: Not Even False.” *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 37, 3 (2006): 399–430.
- Earman, John, y Miklós Rédei. “Why Ergodic Theory Does Not Explain the Success of Equilibrium Statistical Mechanics.” *British Journal for the Philosophy of Science* 47, 1 (1996): 63–78.
- Ehrenfest, Paul, y Tatyana Ehrenfest. *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics*. Cornell University Press, 1959.
- Eisberg, R. *Física Estadística. Berkeley Physics Courses, Vol VI*. Reverté, 1969.
- Feynman, R.P., R.B. Leighton, y M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics, Vol. I*. Basic Books, 1963.
- Filomeno, Aldo. “Qué es racional creer en situaciones de ignorancia.” *Boletín de la Sociedad de Lógica, Metodología y Filosofía de la Ciencia* 63, 1 (2018): 46–50.
- . “Stable Regularities Without Governing Laws?” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 66 (2019): 186–197.
- . “Typicality of Dynamics and the Laws of Nature.” En *Current Debates in Philosophy of Science: In Honor of Roberto Torretti*. Synthese Library Series, Springer, 2021.

- . “Cuestiones metafísicas en los fundamentos de la termodinámica.”, 20xx. Manuscrito.
- Frigg, Roman. “A Field Guide to Recent Work on the Foundations of Statistical Mechanics.”, 2008.
- . “Typicality and the Approach to Equilibrium in Boltzmannian Statistical Mechanics.” *Philosophy of Science* 76, 5.
- . “What is Statistical Mechanics?” En *History and Philosophy of Science and Technology, Encyclopedia of Life Support Systems*, editado por Ortiz Galles, Lorenzano, y Rheinberger. Encyclopedia of Life Support Systems, 2010, volumen 4.
- Frigg, Roman, y Carl Hoefer. “The Best Humean System for Statistical Mechanics.” *Erkenntnis* 80, S3 (2015): 551–574.
- Frigg, Roman, y Charlotte Werndl. “Explaining Thermodynamic-Like Behavior in Terms of Epsilon-Ergodicity.” *Philosophy of Science* 78, 4 (2011): 628–652.
- Gabbay, D.M., P. Thagard, J. Woods, y C.A. Hooker. *Philosophy of Complex Systems*. Handbook of the Philosophy of Science. Elsevier Science, 2011.
- Gillies, Donald A. *Philosophical Theories of Probability*. Routledge, 2000.
- Guzmán, Ricardo, y José Antonio Cervera. “La mecánica estadística: sus orígenes y sus paradojas a la luz de los escritos de Paul y Tatiana Ehrenfest.” *Llull: Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas* 29, 64 (2006): 331–356.
- Hemmo, M., y O.R. Shenker. *The Road to Maxwell’s Demon: Conceptual Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press, 2012.
- Jaynes, E. T. “Information Theory and Statistical Mechanics.” *Phys. Rev.* 106 (1957): 620–630.
- Kechen, Zhang. “Uniform distribution of initial states: The physical basis of probability.” *Phys. Rev. A* 41 (1990): 1893–1900. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.41.1893>.
- Ladyman, J., y K. Wiesner. *What Is a Complex System?* Yale University Press, 2020.
- Landau, y Lifshitz. *Física Estadística*. Reverté, 1963.
- Lazarovici, Dustin, y Paula Reichert. “Arrow(s) of Time without a Past Hypothesis.” En *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature*, editado por Valia Allori. Singapore: World Scientific, 2020, 343–386.
- Lombardi, Olimpia. “El fin de la omnisciencia: la respuesta de prigogine al problema de la irreversibilidad.” *Theoria: An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 14, 3(36) (1999): 489–510. <http://www.jstor.org/stable/23918639>.
- . “El problema de la ergodicidad en la mecánica estadística.” *Crítica: Revista Hispanoamericana de Filosofía* 35, 103 (2003): 3–41. <http://www.jstor.org/stable/40104899>.

- . *¿Existe la flecha del tiempo?: Ilya Prigogine, entre la filosofía y la ciencia*. Colección de las ciencias a la filosofía. Ediciones Logos, 2015.
- Lombardi, Olimpia, y Martín Labarca. “Los enfoques de Boltzmann y Gibbs frente al problema de la irreversibilidad (Boltzmann and Gibbs Approaches in the Problem of Irreversibility)” *Crítica: Revista Hispanoamericana de Filosofía* 37, 111 (2005): 39–81. <http://www.jstor.org/stable/40104957>.
- . *Irreversibilidad y pluralismo ontológico. Una reflexión acerca de los fundamentos de la mecánica estadística*. Imago Mundi, 2013.
- Macke, W. “Lectures in Statistical Mechanics.” *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* 43, 10-11 (1963): 520–520.
- Martínez González, Juan Camilo, y Olimpia Lombardi. “El problema de la irreversibilidad: una relación interteórica de dos niveles.” *ArtefaCToS. Revista de estudios de la ciencia y la tecnología* 29–50.
- Misra, B., I. Prigogine, y M. Courbage. “From deterministic dynamics to probabilistic descriptions.” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 98, 1 (1979): 1–26. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378437179901638>.
- Nicolis, G., y I. Prigogine. *Exploring Complexity: An Introduction*. W.H. Freeman, 1989.
- North, Jill. “Time in Thermodynamics.” En *The Oxford Handbook on Time*. Oxford, 2010.
- Ordóñez, Javier, Víctor Navarro Brotóns, y José Manuel Sánchez Ron. *Historia de la ciencia*. Austral, 2013.
- Penrose, Roger. *La nueva mente del emperador*. Penguin Random House, 1989.
- Poincaré, Henri. *Calcul des probabilités*. 1st ed. Gauthier-Villars, Paris, 1896.
- Price, H. *Time’s Arrow & Archimedes’ Point: New Directions for the Physics of Time*. Oxford Paperbacks: Philosophy. Oxford University Press, 1996.
- Prigogine, I., y I. Stengers. *La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia*. Editorial Alianza, 1994, 2ª edición.
- Schneider, E.D., y D. Sagan. *La termodinámica de la vida*. Serie Metatemas. Tusquets, 2008.
- Sethna, J. *Statistical Mechanics: Entropy, Order Parameters, and Complexity*. Oxford Master Series in Physics. Oxford University Press, 2006.
- Shenker, Orly, y Meir Hemmo. “Introduction to the Philosophy of Statistical Mechanics: Can Probability Explain the Arrow of Time in the Second Law of Thermodynamics?” *Philosophy Compass* 6, 9 (2011): 640–651.
- Sklar, Lawrence. *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press, 1993.
- . *Filosofía de la física*. Alianza Universidad. Alianza Editorial, 1994.

- . “Philosophy of Statistical Mechanics.” En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. 2015.
- Stowe, K. *An Introduction to Thermodynamics and Statistical Mechanics*. Cambridge University Press, 2007.
- Strevens, Michael. “Probability Out Of Determinism.” En *Probabilities in Physics*. Oxford University Press, 2011.
- Uffink, Jos. “Compendium of the foundations of classical statistical physics.”, 2006. Chapter for “Handbook for Philosophy of Physics”, J. Butterfield and J. Earman (eds) to appear.
- Varios. “Investigación y Ciencia. Temas 16. Calor y Movimiento.”, 1999.
- Vranas, Peter B. M. “Epsilon-Ergodicity and the Success of Equilibrium Statistical Mechanics.” *Philosophy of Science* 65, 4 (1998): 688–708.
- Wallace, David. “The Necessity of Gibbsian Statistical Mechanics.” En *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature*, editado por Valia Allori. Singapore: World Scientific, 2020, 583–616.
- . *Philosophy of physics: A Very Short Introduction*. Oxford University Press, 2021.