

The Arrow of Time: A Reading Gerald Whitrow

A Flecha do Tempo: Uma Leitura Gerald Whitrow

La Saeta del Tiempo: Una Lectura a Gerald Whitrow

M. Butler

Department of Astronomy - University of Florida
mbutler@astro.ufl.edu

(Artículo de REFLEXIÓN. Recibido el 02-02-2011. Aprobado el 28-05-2011)

¿Por qué el tiempo aparentemente se mueve de una forma, cuando las leyes de la física en realidad son simétricas en el tiempo?

Abstract

In everyday life, the world shows a marked difference between past and future, but –with one small exception–, the laws of physics are symmetric in time. Gerald Whitrow was one of the first to realize that the resolution of this paradox is according to the cosmology and the initial conditions at birth of the universe. But this simple conclusion hidden some deep subtleties that take a new turn with the appearance of quantum cosmology and inflationary universe hypothesis. The question has not been completely resolved yet, and remains one of the great scientific mysteries outstanding.

Keywords: *Arrow of time, cosmology, quantum, universe, origin of universe, entropy.*

Resumo

Na vida cotidiana, o mundo mostra uma diferença acentuada entre o passado eo futuro, mas, com uma pequena exceção, as leis da física são simétricas no tempo. Gerald Whitrow foi um dos primeiros a perceber que a resolução deste paradoxo está em conformidade com a cosmologia e as condições iniciais no momento do nascimento do universo. Mas esta simples conclusão máscaras algumas sutilezas que tomar um novo rumo com o surgimento da cosmologia quântica e no cenário do universo inflacionário. A questão ainda não foi completamente resolvida, e continua a ser um dos grandes mistérios científicos restantes.

Palavras-chave: *Flecha do tempo, cosmologia quântica, universo, origem do universo, entropia.*

Resumen

En la vida cotidiana, el mundo muestra una marcada diferencia entre el pasado y el futuro, pero –con una pequeña excepción– las leyes de la física son simétricas en el tiempo. Gerald Whitrow fue uno de los primeros en darse cuenta que la resolución de esta paradoja está de acuerdo con la cosmología y las condiciones iniciales en el nacimiento del universo. Pero esta simple conclusión oculta algunas profundas sutilezas que toman un nuevo giro con la aparición de la cosmología cuántica y la hipótesis del universo inflacionario. La cuestión aún no ha sido resuelta por completo, y sigue siendo uno de los grandes misterios científicos pendientes.

Palabras clave: Saeta del tiempo, cosmología, cuántica, universo, origen del universo, entropía.

1. Introducción

Gerald Whitrow era un participante frecuente en los seminarios que se llevaban a cabo en el Departamento de Matemáticas en el King's College de Londres, en los que a menudo intercambiaba sus ideas acerca la naturaleza del tiempo. Sus libros *The Natural Philosophy of Time* [1] y *What Is Time?* [2] han sido de gran influencia para los estudiosos de este campo del conocimiento, y sirvieron de inspiración para autores como Davies [3]. Uno de sus mayores aportes fue la promulgación del famoso problema de "la saeta del tiempo", en 1968.

El reconocimiento de que la saeta del tiempo efectivamente constituye un problema data al menos desde el año 1854, cuando Hermann von Helmholtz hizo lo que probablemente es la más sombría predicción en la historia de la ciencia. El universo, afirmó Helmholtz, se está muriendo. La base de este pronunciamiento apocalíptico era la entonces nueva segunda ley de la termodinámica, según la cual la entropía de un sistema cerrado no puede disminuir. La entropía es, a grandes rasgos, una medida del desorden, y cuando la segunda ley se aplica al universo como un todo predice que éste está en

constante degeneración, atrapado en un tobogán de una vía hacia un estado de máxima entropía, conocido como equilibrio termodinámico. Una vez que logre este estado el universo no podrá liberarse. Por lo tanto el estado final de equilibrio fue denominado "la muerte térmica" del universo. La transición unidireccional del orden al desorden culmina en la muerte de calor cósmico, e impone al universo una penetrante "saeta del tiempo", convencionalmente apuntando a un punto del pasado hacia el futuro –en la dirección de la degeneración. El problema, tal como le pareció a los físicos de entonces, y especialmente a Boltzmann, es que las leyes fundamentales de la física –en ese entonces se asumían las leyes de la mecánica de Newton– son simétricas en el tiempo. ¿Cómo puede entonces emerger una saeta del tiempo dirigida desde las leyes que no hacen ninguna distinción entre pasado y futuro?

Whitrow identificó la esencia de la solución en las páginas 160 y 162 de su libro, cuando fijó claramente el problema de la saeta del tiempo como parte de la cosmología: "Lo que los muchos intentos por analizar la naturaleza del tiempo han demostrado es que en

última instancia el tiempo debe considerarse cosmológicamente. En última instancia, el tiempo es una propiedad fundamental de la relación entre el universo y el observador... la explicación última de la saeta del tiempo se encuentran en la cosmología" [2].

2. La saeta del tiempo de Whitrow

Para comprender la base cosmológica del problema es necesario adoptar la clasificación que hace Whitrow de las tres diferentes saetas. Distinguió entre una saeta histórica, una cosmológica y una termodinámica. La saeta histórica describe la acumulación de información o registros sobre el tiempo. Un ejemplo notable es la formación de cráteres en la Luna, que dejan constancia de su bombardeo por asteroides, cometas y meteoritos. Un ejemplo menos visible, pero literalmente vital, es la secuencia de nucleótidos en los genomas de los organismos vivos —un registro de la contingencia evolutiva durante billones de años. La acumulación de información de esta manera define una saeta del tiempo que, superficialmente, podría parecer que señala el camino contrario a la saeta termodinámica. Es decir, la información es lo contrario a la entropía, por lo que el aumento de la información se ve como si fuera "anti-termodinámica". Esto no es así: el proceso de fijar información en un registro es en sí un proceso irreversible que genera entropía, por lo que la entropía del universo aún se mantiene como un todo. La saeta cosmológica es fácil de describir: el universo se está expandiendo. De ahí que la saeta apunte en la dirección de un universo más grande. Algunos cosmólogos han planteado la idea de que si el universo se contrajera algún día, de modo que se invirtiera la saeta cosmológica, entonces las otras saetas podrían invertirse también. Pero al parecer esta visión es errónea [4].

La saeta termodinámica tiene múltiples manifestaciones, tanto en la vida cotidiana como en la astronomía. Un ejemplo sencillo es considerar lo que sucede con un huevo al caer al piso. El huevo es fácil de romper, pero prácticamente imposible de volver a armar. Un episodio de una película de un huevo rompiéndose podría, si se rueda a la inversa, representar una increíble secuencia de acontecimientos. Esto se aplica a la mayoría de las

escenas en la vida cotidiana: las personas se ríen cuando las películas se ruedan al revés porque la ven muy absurda. El proceso irreversible más dramático en nuestro vecindario astronómico es la emisión de calor y luz desde el Sol. Cada segundo el Sol irradia 4×10^{26} julios, la mayoría de los cuales desaparece en las profundidades del espacio para no volver jamás, lo que representa un enorme incremento de la entropía. Este gasto derrochador es pagado por el combustible nuclear en el núcleo solar que se utiliza para producirlos, y su energía libre se disipa en el universo. Durante billones de años el Sol ha quemado constantemente y de forma irreversible su stock finito de combustible, y con el tiempo se quemará y morirá. De forma general esta historia se aplica a las estrellas en todo el universo. Una parte importante de la aproximación a la muerte del calor cósmico de Helmholtz se representa en el envejecimiento y la muerte de las estrellas.

3. El problema de la reversibilidad

La marcada contradicción entre la saeta del tiempo y las leyes de la física se ilustra con más fuerza en la Fig. 1, donde se limita un gas a una esquina de una caja perfectamente rígida y luego se libera. El gas se difunde rápidamente por todo el volumen de la caja y eventualmente se asienta en un estado de equilibrio de densidad y presión uniformes. Esta transición es un claro ejemplo de la segunda ley de la termodinámica, ya que la ganancia del gas desde una entropía baja, estado relativamente ordenado, a una entropía alta, desordena el estado de equilibrio. El proceso inverso nunca se encuentra: una caja uniforme de gas en la que todas las moléculas de pronto y espontáneamente se precipitan en una esquina. Cuando nos preguntamos cómo se las arregla el gas para redistribuirse en la caja, nos encontramos con que este resultado se produce por colisiones intermoleculares, que transfieren energía caóticamente entre la población molecular, hasta que se comparte democráticamente. En un famoso artículo, Boltzmann [5] demostró que las colisiones intermoleculares podrían provocar un aumento de la entropía, mediante la aplicación de la mecánica newtoniana a las colisiones y el uso de un promedio estadístico sobre un gran número de moléculas.

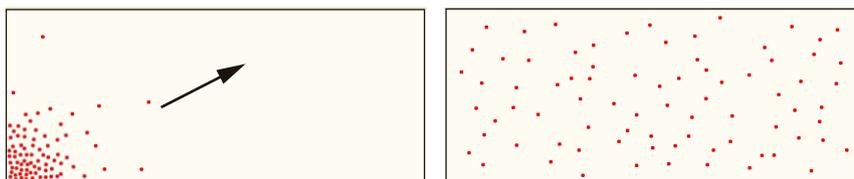


Fig. 1 La contradicción entre la saeta del tiempo y las leyes de la física

Tan pronto como se secó la tinta en el artículo de Boltzmann, sin embargo, se manifestó una paradoja. Cada colisión individual molécula-molécula es reversible. Si, por arte de magia, uno pudiera reflejar la colisión de un par de moléculas, podrían viajar a lo largo del mismo camino hasta su configuración inicial. En principio, toda la población de moléculas podría

recuperarse simultáneamente y enviada de vuelta a la esquina de la caja. Aunque técnicamente no plausible, no hay nada en las leyes de la física que lo descarte. Actualmente utilizaríamos las leyes de la mecánica cuántica en vez de la mecánica newtoniana para describir estos procesos, pero ambas comparten la propiedad de la simetría del tiempo. Así, para cada

conjunto de propuestas de resolución que plantea la entropía, existe un conjunto opuesto —perfectamente coherente con las leyes de la dinámica— que lo reduce, en violación a la segunda ley de la termodinámica. De hecho, simplemente invirtiendo el signo del parámetro de tiempo en la prueba de Boltzmann uno puede concluir que, al igual que la entropía, puede aumentar desde un estado específico de entropía baja como resultado de las colisiones intermoleculares, y que también debe caer, desde un estado de entropía mayor, antes del estado especificado (ver Fig. 2).

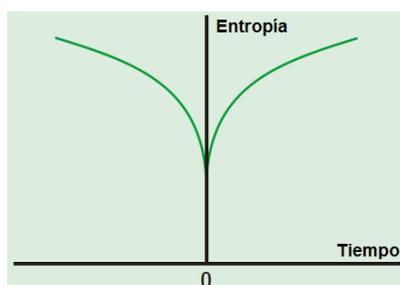


Fig. 2 Inversión del signo del parámetro de tiempo en la prueba de Boltzmann

La resolución de la anterior paradoja es para reconocer que no hay nada intrínseco a la caja de gas que se asemeje a una saeta del tiempo. Esto se demuestra más gráficamente en el trabajo de Poincaré [6] sobre este problema, quien puso de manifiesto que, dado un tiempo suficiente, el gas podría volver a revisar su posición inicial prensado en esquina de la caja. Una forma de entender esto es aceptar que la agitación aleatoria de las moléculas siempre va a crear pequeñas fluctuaciones sobre la uniformidad, es decir, pequeñas excursiones en la entropía que van "al revés" desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica.

En el caso del movimiento browniano, por ejemplo, una pequeña partícula suspendida en un gas sigue una ruta en zig-zag debido a que el bombardeo de su superficie es ligeramente irregular. Solamente por razones estadísticas, las moléculas a veces forman pandillas y cooperan en pequeñas cantidades, bajando ligeramente la entropía. La rareza de estas fluctuaciones aleatorias aumenta considerablemente con las cantidades involucradas, y es obvio que se debería esperar mucho tiempo antes de que todas las moléculas en una habitación se muevan a una esquina al mismo momento por pura casualidad. Una medida aproximada de la duración entre esas "repeticiones" es 10^N , donde N es el número de moléculas en el sistema. Para una caja de gas de laboratorio, N puede ser 10^{23} , así la duración es un exponencial de un exponencial —un número estupendamente grande. Tan grande, de hecho, que no tenemos que preocuparnos demasiado por las unidades de tiempo utilizados para medirlo!

4. La Cosmología al rescate

La explicación de la saeta del tiempo se encuentra, al parecer, no en la dinámica intrínseca del gas —o

cualquier otro sistema—, sino en sus condiciones iniciales especiales. Está claro que se trata del caso de que si el gas inicia en un estado de entropía baja, lo hará, con una probabilidad abrumadora, proceder a un estado de entropía mayor. Pero todavía nos preguntamos cómo alcanza el gas su estado de entropía baja. Se pueden rastrear las circunstancias de cualquier sistema dado —caja de gas, el Sol, una estrella, etc.— a su entorno inmediato, pero en última instancia, como Whitrow señaló, este es un problema de la cosmología, ya que el entorno final es el universo como un todo. Boltzmann ya se enfrentó a la dimensión cosmológica del problema en el siglo XIX, al abordar la cuestión de cómo alcanzó su estado de entropía menor hasta la máxima que podemos ver actualmente. Su respuesta [7] fue para invocar al abuelo de todas las fluctuaciones, una excursión aleatoria a escala cósmica desde el equilibrio termodinámico, una situación rara y casi inimaginable que requiere una espera de por lo menos 10^{80} años —o un uno seguido por 10^{80} ceros. Hay muchas razones porque las conjeturas de Boltzmann no van a funcionar, no por el hecho de que el universo no ha existido por el requisito de 10^{80} años. Más bien, comenzó con un Big Bang hace unos simples 1.37×10^{10} años.

Para la resolución correcta, recurrimos nuevamente a Whitrow. En la página 160 de [2] escribe: "Si existe alguna profunda relación entre el tiempo y el universo, puede deberse a que la saeta del tiempo está asociada de alguna manera con las "condiciones iniciales" que determinaron el universo particular como es actualmente, a diferencia de cualquier otro universo que podría haber existido de acuerdo con los mismos principios físicos". En otras palabras, el universo empezó en un estado especial de entropía baja en el Big Bang y se ha desarrollado desde entonces, como un gigantesco reloj en movimiento. Así que la explicación para la saeta del tiempo se relaciona con la conducta del nacimiento cósmico.

Aunque esta resolución de la paradoja de la reversibilidad parece bastante plausible, una consideración inicial de sus consecuencias observacionales parece problemática, ya que predice que el universo primitivo debería haber tenido un estado de entropía mucho más bajo que el universo de hoy. La mejor información que tenemos acerca de los inicios del universo proviene de la radiación de fondo de microondas cósmico —CMB—, que ha viajado tranquilamente desde una época de alrededor de 380.000 años después del Big Bang, y lleva una impresión del estado del universo en los primeros instantes de su origen. Es muy reconocido el hecho de que el CMB lleva el sello distintivo del equilibrio termodinámico: su espectro traza precisamente esa radiación del agujero negro. Esto implica que, hace por lo menos 380.000 años, la materia y la radiación en el universo estaban en un estado muy cercano de la entropía máxima del equilibrio termodinámico. Entonces, ¿qué está mal?

La solución a este enigma se encuentra en la expansión del universo. La segunda ley de la termodinámica se aplica a un sistema cerrado. La materia y la radiación cosmológica no constituyen un sistema cerrado sujeto a la expansión del universo. En efecto, la expansión saca la materia y la radiación fuera del equilibrio. La historia completa de esto es complicada y tiene que ver con procesos como las reacciones nucleares que tuvieron lugar durante los tres primeros minutos [8], [9]. Esto se puede explicar con un ejemplo sencillo. Imaginemos que el universo está uniformemente lleno con una mezcla de un fluido no relativista –polvo– y radiación, inicialmente a una temperatura común. Es bien conocido que a medida que el universo se expande las temperaturas de estos dos componentes caen como $1/a^2$ y $1/a$, respectivamente, donde a es el factor de escala cosmológica. Por lo tanto, en ausencia de acoplamiento fuerte entre la materia y la radiación, se abre entre ellos una diferencia de temperatura. En otras palabras, lo que comenzó como equilibrio termodinámico es conducido, por la expansión, a un estado de no equilibrio. Si la materia y la radiación pueden equilibrarse mediante acoplamiento, entonces la entropía se incrementará como resultado de la transferencia irreversible de energía térmica, desde la radiación caliente a la materia más fría.

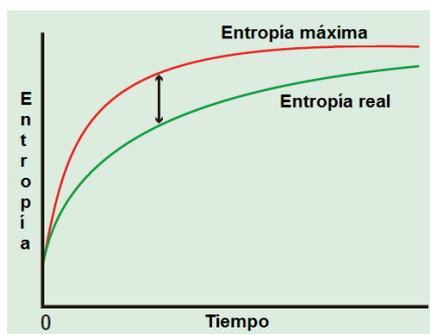


Fig. 3 La entropía del Universo

Una ilustración simplificada y esquemática de la historia entrópica del universo se muestra en la Fig. 3. La curva roja representa la entropía máxima admisible de una región en co-movimiento con el universo, que aumenta a medida que el universo se expande. La curva verde representa la entropía real de esta región. Cerca del principio –digamos hace 380.000 años, al momento de la disociación de la materia y la radiación– estas curvas coincidían, lo que implica una condición –temporal– de equilibrio termodinámico, según lo confirmado por el espectro de la CMB. Pero a medida que el universo se expandía, se abrió una brecha entre las dos curvas, con la entropía real cayendo detrás de la entropía máxima permitida en ese momento –y con el valor de a . Esta brecha en la entropía es la que permite todos los procesos de generación de entropía –como la combustión de estrellas– que proporcionan la saeta termodinámica del tiempo –procesos que están tratando de cerrar la brecha. La vida misma se alimenta de esa brecha, por lo que nuestra existencia se debe a los efectos del crecimiento diferencial en

las dos curvas de la entropía. En la práctica, la brecha mayor entre las dos curvas se abrió, no después de la disociación, sino durante la época de la nucleosíntesis, pero esa es otra historia [3]. La pregunta sigue siendo si la brecha en la entropía nunca se cerrará, conduciendo a la muerte térmica infame, o si, en el contexto de un universo en expansión, puede ser arbitrariamente retrasada [8].

5. La gravitación cambia la historia

La expansión cosmológica es una manifestación de la actividad gravitacional del universo. La expansión uniforme es, por supuesto, una descripción simplificada del campo gravitatorio cosmológico. Una inspección más cuidadosa a los datos del CMB muestra todas las fluctuaciones importantes en temperatura y densidad a un nivel de aproximadamente una parte en 10^5 . Estas ondulaciones en el CMB son las semillas de la estructura a gran escala del universo, características que estaban destinadas a convertirse en cúmulos de galaxias. El mecanismo del aumento del agrupamiento es la agregación gravitatoria. Las regiones del universo que eran ligeramente más densas tenían una tendencia a tirar material a expensas de su entorno y de ese modo aumentar el contraste de densidad. Esta tendencia por la gravitación a su vez distribuyó suavemente el gas en unos cúmulos marcando un contraste con la tendencia de los gases, por lo que los efectos gravitatorios sean despreciables para ir desde una gran concentración a una menos densa –como en la Fig. 1.

En términos generales, entonces, un gas de laboratorio agrupado representa un estado de baja entropía, mientras que un gas expandido representa un estado de alta entropía. Para un sistema gravitacional es al revés. El estado final de esta amplificación del agrupamiento gravitatorio es el agujero negro, que puede ser considerado como el estado de equilibrio de entropía máxima de la materia gravitatoria. Esto nos lleva a una conclusión significativa acerca del universo temprano. Considerando que en los primeros tiempos el contenido de materia del universo estaba en un estado cercano al equilibrio termodinámico, el campo gravitatorio estaba muy lejos de dicho equilibrio.

¿Hasta dónde? Una forma de cuantificar la brecha ha sido propuesta por Penrose [10], [11], quien apeló a la fórmula de Bekenstein-Hawking para la entropía de un agujero negro [12], [13]. Tomando el contenido de todo el universo observable hoy en día, es sencillo calcular la entropía de un agujero negro de masa equivalente. La respuesta es $10^{123}k$, donde k es la constante de Boltzmann. Compare esto con la entropía real derivada del CMB de alrededor de $10^{90}k$ en el momento de la desvinculación, o la actual $10^{100}k$. Es evidente que el universo de hecho estaba –y sigue estando– muy lejos del estado de entropía máxima posible. Este desfase es aún más sorprendente cuando se traduce a probabilidades. La entropía de un estado está relacionada logarítmica con el número de micro-estados que la componen, lo

que significa que la probabilidad de un determinado estado de entropía, menor a la máxima, disminuye exponencialmente con la entropía. Si nos preguntamos cuál es la probabilidad de que un estado aleatorio inicial del universo poseyera una entropía de sólo $10^{90}k$ en lugar de $10^{123}k$, la respuesta es $\exp(-10^{123})$, un número alucinante pequeño.

¿Cómo explicar este resultado? En resumen, la saeta del tiempo deriva en última instancia del hecho de que el universo empezó en un –tranquilo– estado gravitacional de entropía extremadamente baja, con casi toda la actividad gravitacional concentrada en un único y ordenado modo dilatatorio, y sólo con pequeñas irregularidades sobrepuestas en él. Este estado inicial, sin embargo, desde el punto de vista de la gravedad, es sumamente especial y notable, pero es un elemento esencial para explicar el universo que percibimos. ¿Dejamos las cosas así, y aceptamos que el universo nació en un estado extremadamente inusual? O ¿Hay una explicación más profunda?

6. ¿La inflación es la respuesta?

Hoy en día existe una explicación para la tranquilidad inicial del universo. Se llama inflación. De acuerdo con el escenario inflacionario [14], el universo saltó en tamaño a través de un enorme factor durante la primera fracción de segundo de su existencia. Esto tuvo el efecto de "aplanamiento" que puede haber estado presente inicialmente por un amplio espacio de distensión. El episodio fugaz de expansión acelerada fue impulsado por la excitación de un campo de "inflación" hipotético que poseía presión negativa conducida en forma de anti-gravedad. Los detalles no son importantes aquí. El punto a resaltar es que la tentación de apelar a un proceso físico anterior para explicar las condiciones "iniciales" del universo simplemente es un paso más. Las ecuaciones que rigen el campo de inflación son simétricas en el tiempo como todas las otras, y todavía se puede preguntar, en primer lugar, ¿cómo pudo el campo de inflación entrar en su estado excitado de baja entropía? En otras palabras, sólo es posible cambiar el carácter especial del estado de gravitación inicial al campo especial de inflación.

Al final, nunca será posible derivar la asimetría de la simetría, y parece ser que sólo quedan estas alternativas:

- Aceptar un estado inicial especial como un hecho real.
- Postular alguna forma de ley asimétrica del tiempo, posiblemente limitada en sus efectos principales al universo muy temprano [11].
- Utilizar algún tipo de argumento antrópico como un efecto de selección, a lo largo de las siguientes líneas: Solamente en regiones donde el campo de inflación, por casualidad, inicialmente estaba en un estado excitado especial, podría inflarse el universo y lograr un alto grado de uniformidad gravitacional, desde la cual surgen, eventualmente, de una manera ordenada las

galaxias, las estrellas y la vida. La mayor parte del universo se caracteriza por estados gravitacionalmente muy agrupados, con grandes agujeros negros, con expansión cosmológica altamente caótica, etc., que es hostil a todo tipo de vida.

- Recurrir a la mecánica cuántica.

7. La mecánica cuántica

La mecánica cuántica se puede aplicar a todo el universo, de la forma como la discuten Hartle & Hawking [15], tomando la función de onda del universo como una suma de todas las posibles historias cósmicas y geometrías. La cuestión de cómo interpretarla como una función de onda ha sido muy discutida, pero el consenso parece ser que sólo tiene sentido la interpretación de los así llamados universos múltiples. Es decir, se supone que todas las ramas de la función de onda cósmica describen un universo realmente existente, y que existe una infinidad de universos que coexisten en paralelo [16], [17]. Así que esta es una variación de una teoría de todos los mundos posibles.

Las implicaciones son más fáciles de comprender si nos restringimos solamente a la función de onda para todos los posibles universos reconstruidos. Se trata de universos que se inician con una gran explosión y terminan con un big crunch (Fig. 6).

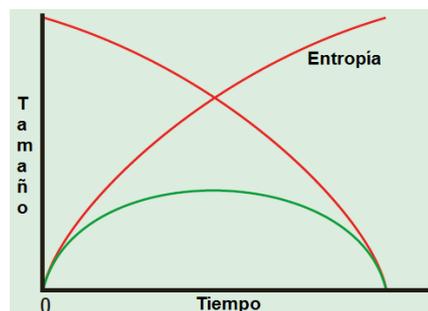


Fig. 6 Comportamiento de algunos universos

En promedio, el brusco comportamiento dinámico es por tanto simétrico en el tiempo. Sin embargo, en los universos individuales –es decir, las ramas de la función de onda–, la entropía no seguirá el factor de escala cósmica para subir y bajar de nuevo. Más bien, es muy probable que comience baja y al final sea alta, o viceversa, como se muestra en la Fig. 6. Cualquier de estos universos podría por definición finalizar con baja entropía “big bang” y con alta entropía “big crunch”, por lo que desde cualquier punto de vista no importa cualquier forma redonda para una rama particular de la función de onda –es decir, el universo. El asunto clave es que para ensamblar los universos como un todo la situación sigue siendo simétrica en el tiempo. Por lo tanto, la idea es integrar universos especiales con tiempo asimétrico en un conjunto global simétrico en el tiempo. Hay que tener en cuenta que en casos muy raros –ya que la función de onda del universo contiene todos los posibles universos contraídos– la

entropía aumenta y luego cae de nuevo, permitiendo que la saeta del tiempo se invierta.

8. Conclusión

Al parecer esto es lo mejor que podemos hacer tanto como para tener nuestro pastel y comérmolo. Esto da cuenta de la existencia de una saeta del tiempo, sin imponerse a través de una legislación ad hoc especial,

y sin una apelación indebida a la selección antrópica. Su debilidad radica en el hecho de que la aplicación de la mecánica cuántica a todo el universo sigue siendo un ejercicio altamente especulativo, y la interpretación de la función de onda, de la forma como se ha descrito, está lejos de ser aceptada de forma general.

REFERENCIAS

- [1] G. J. Whitrow. "The Natural Philosophy of Time". Edinburgh: Thomas Nelson and Sons, 410 p. 1980.
- [2] G. J. Whitrow. "What Is Time?" London: Thames & Hudson, 192 p. 1972.
- [3] P. C. W. Davies. "The Physics of Time Asymmetry". Berkeley: University of California Press, 214 p. 1977.
- [4] H. Price. "Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time". Oxford: Oxford University Press, 214 p. 1997.
- [5] L. Boltzmann. "Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gas-Molekülen". *Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaften*, No. 66, pp. 275-370, 1872.
- [6] H. Poincaré. "Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste vol. II". Paris: Gauthier-Villars, 251 p. 1893.
- [7] L. Boltzmann. "Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft". *Annalen der Physik*, Vol. 296, No. 2, pp. 231-247, 1897.
- [8] P. C. W. Davies. "The Last Three Minutes: Speculating About the Fate of the Cosmos". London: Weidenfeld & Nicolson, 176 p. 1995.
- [9] A. Albrecht. "Cosmic inflation and the arrow of time". In J. D. Barrow, P. C. W. Davies and C. L. Harper (Eds.) "Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity". Cambridge: Cambridge University Press, 742 p. 2004.
- [10] R. Penrose. "Singularities and time asymmetry". In W. Israel and S. W. Hawking (Eds.) "General Relativity: an Einstein centenary survey". Cambridge: Cambridge University Press, p. 581-638, 1980.
- [11] R. Penrose. "The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe". London: Jonathan Cape, 1136 p. 2005.
- [12] J. D. Bekenstein. "Black Holes and Entropy". *Phys. Rev. D*, Vol. 7, No. 8, pp. 2333-2346, 1973.
- [13] S. W. Hawking. "Particle creation by black holes". *Commun. Math. Phys.* Vol. 43, No. 3, pp. 199-220, 1975.
- [14] A. Guth. "The Inflationary Universe". New York: Basic Books, 384 p. 1998.
- [15] J. B. Hartle & S. W. Hawking. "Wave function of the Universe". *Phys. Rev. D*. Vol. 28, No. 12, pp. 2960-2975, 1983.
- [16] H. Everett. "'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics". *Rev. Mod. Phys.* Vol. 29, No. 3, pp. 454-462, 1957.
- [17] D. Deutsch. "The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes and Its Implications". London: Allen Lane, 390 p. 1998. [Ω](#)