



UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

FACULTAD DE FILOSOFÍA

Máster Universitario en Filosofía Teórica y Práctica

Especialidad de Lógica, Historia y Filosofía de la Ciencia

Trabajo Fin de Máster

El multiverso como solución al problema del ajuste fino

Autor: Francisco Mariscal Olmedo

Tutor: Dr. Manuel Sellés García

Septiembre, 2016

RESUMEN

En el marco de la historia de la ciencia, este trabajo remite al problema del ajuste fino, planteando por qué las condiciones iniciales en que se encontraba el universo primigenio y el valor que poseen las constantes fundamentales de la naturaleza muestran el notable ajuste que ha permitido la existencia de vida en nuestro universo. Como propuesta de solución se presenta la teoría del multiverso, señalando los diferentes mecanismos físicos que hacen posible la existencia de múltiples universos y cómo ofrecen respuesta al problema del ajuste fino. El planteamiento del problema y las propuestas de solución refieren diversas facetas de la física del siglo XX, que serán expuestas y contextualizadas históricamente.

ABSTRACT

In the context of the history of science, this dissertation refers to the problem of fine-tuning, considering why the initial conditions of the early universe and the value of the fundamental constants of nature have the remarkable adjustment that has allowed the existence of life in our universe. The multiverse theory is presented as a proposal for solution, pointing out the different physical mechanisms that make possible the existence of multiple universes and how they offer response to the problem of fine-tuning. Both the approach of the problem as well as proposed solutions relate various aspects of twentieth-century physics, which will be historically exposed and defined.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	5
2. Consideraciones preliminares	11
2.1. Qué se entiende por ajuste fino	11
2.2. Qué se entiende por vida.....	14
2.3. Qué se entiende por multiverso	16
3. El ajuste fino del universo como problema	19
3.1. Boltzmann y la entropía.....	19
3.2. Eddington y el combustible estelar	24
3.3. Milne y el principio cosmológico	32
3.4. Einstein y la constante cosmológica	36
3.5. Hubble y la expansión del universo	49
3.6. Hoyle y el proceso triple-alfa.....	56
3.7. Sakharov y la bariogénesis	60
4. El multiverso como solución	66
4.1. Mundos cuánticos de Everett	67
4.2. Universo cíclico de Steinhardt.....	73
4.3. Inflación eterna de Linde	79
4.4. Multiverso selectivo de Smolin	86
4.5. Multiverso paisaje de Susskind.....	91
5. Conclusiones.....	98
Referencias	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Entropía	20
Figura 2. Deformación del espacio-tiempo	44
Figura 3. Resonancia	59
Figura 4. Simetría CPT	64
Figura 5. Universos brana.....	76
Figura 6. Falso vacío	81
Figura 7. Inflación cósmica	83
Figura 8. Universos burbuja	84
Figura 9. Variedades Calabi-Yau	96

1. INTRODUCCIÓN

La precisión que muestra la configuración del universo para posibilitar la aparición de vida y por extensión nuestra existencia como seres conscientes es lo que se denomina ajuste fino del universo. La estructura del cosmos depende de los valores de las constantes fundamentales de la naturaleza y de las condiciones iniciales que caracterizaron el universo primigenio, siendo que un cambio en algunos de sus valores tendría como resultado la evolución hacia un universo radicalmente diferente al que observamos, con una alta probabilidad de que fuese imposible el desarrollo de ningún tipo de evolución biológica. Esta realidad tan embarazosa, que nos sitúa ante el dilema de tener que aceptar la aparente certeza de un universo que parece diseñado para nuestra existencia, fue sutilmente captada por el célebre físico alemán Albert Einstein cuando dirigiéndose a Ernst Straus, su asistente en Princeton, le manifestó: «Lo que realmente me interesa es si Dios tuvo alguna elección en la creación del mundo» (Kuznetsov, 1972, p.39). O como también manifestó en *Sobre el estado actual de la teoría de campos*, su colaboración para el libro conmemorativo del 70 cumpleaños de Aurel Stodola, uno de sus profesores en el Instituto Politécnico de Zúrich:

Deseamos conocer no sólo la estructura de la naturaleza (y cómo los fenómenos naturales acontecen), sino que en la medida que podamos, deseamos alcanzar una meta audaz y tal vez utópica: conocer por qué la naturaleza es como es y no de otra manera. (Einstein, 1929, p.126)

La existencia de vida en el universo plantea un grave problema a nivel cosmológico. Si se admite sin más consideración el hecho de que nuestro universo es el único existente, hay que afrontar entonces la cuestión de por qué están seleccionadas unas constantes fundamentales, condiciones iniciales y leyes de la física que permiten la vida, y no otras cualesquiera que la harían imposible.

Dos suelen ser los argumentos que se aducen para intentar resolver el problema. Por un lado, la hipótesis del diseño, que reclama la existencia de un ser sobrenatural responsable de la selección de unos parámetros físicos que han permitido la existencia de vida. Entre sus defensores destacan el filósofo Richard Swinburne¹ y el físico y

¹ Swinburne, R. (1991). *The Existence of God*. Oxford: Oxford University Press.

sacerdote anglicano John Polkinghorne². Por otro, la que concierne a este trabajo, la teoría de los multiversos, que desde un enfoque estrictamente científico establece que el universo que observamos es solo uno de entre un conjunto arbitrariamente amplio de otros universos, cada uno ajustado de manera diferente a los demás, de forma que el que habitamos es precisamente uno de aquellos en que el ajuste resultante ha permitido la evolución de organismos vivos. A estas dos podría añadirse una tercera alternativa. Que el sorprendente ajuste de los parámetros físicos que ha permitido la aparición de vida sea fruto del puro azar. Esta opción no es lógicamente imposible, pero como se verá, la probabilidad de ocurrencia es tan remota que es en todo punto explicativamente insatisfactoria.

La cuestión que se plantea por tanto es, *por qué* el universo presenta las características necesarias que han dado lugar al desarrollo de la vida y a la aparición de seres conscientes. Ya el zoólogo británico Charles Pantin resaltó en 1951 la peculiaridad de que el universo presente un conjunto de coincidencias estructurales de las que depende nuestra existencia:

Las propiedades del universo material son singularmente adecuadas para la evolución de los seres vivos [...] Si nosotros pudiéramos determinar que nuestro universo es solo uno entre un número indefinido de ellos, cada uno con diferentes propiedades, quizás pudiéramos invocar una solución análoga al principio de la selección natural, de tal modo que solo en ciertos universos, incluido el nuestro, se den las condiciones adecuadas para la existencia de vida, y a menos que esa condición se cumpla, no habrá observadores para dar cuenta de ese hecho. (Pantin, 1951, citado en Barrow & Tipler, 1986, p.250)

La exacta disposición del universo es determinante como condición de posibilidad para que en algún lugar del mismo o momento de su historia pueda aparecer algún tipo de organismo vivo. La vida, como sistema intrínsecamente complejo, necesita de unas condiciones necesarias que posibiliten su aparición y, eventualmente, su evolución hacia especies dotadas de una mente consciente que se pregunten por el sentido de su existencia. Para que esta eventualidad tenga lugar, el universo debe ser de tal naturaleza que permita se den las condiciones necesarias para que se produzca la evolución biológica.

² Polkinghorne, J.C. (1986). *One World: The Interaction of Science and Theology*. London: Society for Promoting Christian Knowledge (SPCK).

Una mayor cantidad de masa en el universo y éste hubiera colapsado sin dar tiempo a la aparición de la vida, una constante cosmológica más intensa y el universo no habría podido construir estructuras complejas como las estrellas y las galaxias, una fuerza electromagnética inexistente y no habría enlaces químicos, una interacción nuclear fuerte más débil y el único elemento que aparecería en la tabla periódica sería el hidrógeno. Y así un largo etcétera.

Si bien los físicos disponen de teorías que describen y explican la naturaleza, carecen sin embargo de una teoría que dé cuenta del valor que experimentalmente encontramos en las constantes fundamentales de la naturaleza. Unas magnitudes que como veremos, se encuentran tan finamente ajustadas que una pequeña alteración en sus valores habría impedido la aparición de vida. De acuerdo con Collins (2009), la estructura que observamos en el universo viene determinada por tres factores: 1) las leyes de la física; 2) el valor de las constantes fundamentales de la naturaleza; y 3) las condiciones iniciales del universo. Cada una de estas tres variables proponen argumentos para reclamar la existencia de un rango de valores muy estrecho que deben observar los parámetros que las determinan, para que en el universo pueda acontecer la aparición de organismos vivos.

Relacionado transversalmente con el problema del ajuste fino se encuentra el conocido como principio antrópico. Muy controvertido tanto en sus aspectos científicos como filosóficos, afirma que nuestra mera existencia como seres conscientes, o por extensión, la existencia de cualquier organismo vivo, preselecciona unos valores de las constantes fundamentales y un carácter de las leyes de la física que permiten esa existencia. Análogamente se conoce por cosmología antrópica el intento de conocer la naturaleza de un universo que permite nuestra existencia.

En 1973, antes de que se acuñara el término principio antrópico, los cosmólogos C.B. Collins y S.W. Hawking publicaron un artículo titulado *¿Por qué el universo es isótropo?* en el que sostenían que el estado de isotropía observado en el universo actual solo era posible dentro de un estrecho rango de condiciones iniciales, conjeturando como solución la posible existencia de un gran número de universos. Planteaban el problema de la planitud y enlazaban la formación de estrellas y galaxias con la existencia de observadores, todo ello en un contexto de reflexiones antrópicas: «Dado que parece que la existencia de las galaxias es una condición necesaria para el desarrollo de vida

inteligente, la respuesta a la pregunta "¿por qué el universo es isótropo?" es "porque estamos aquí"» (Collins & Hawking, 1973, p.334).

La persona que acuñó el término "principio antrópico" fue el astrofísico Brandon Carter, relacionándolo con cuestiones fundamentales subyacentes a la física. Siendo estudiante de doctorado en la Universidad de Cambridge, la lectura de los comentarios que en el libro *Cosmología* (1959) realizó Hermann Bondi sobre los trabajos de Paul Dirac, llevaron a Carter a la redacción en 1967 del artículo *La importancia de las coincidencias numéricas en la naturaleza*, en el que ponía en relación el valor de determinadas constantes fundamentales con ciertos fenómenos físicos y astronómicos, y su conexión con lo que posteriormente se conocería como principio antrópico, dentro del marco de una pluralidad de universos (Carter, 1967). Este trabajo fue el preámbulo de las charlas que en 1970 y 1973 Carter ofreció respectivamente en el *Clifford Centennial Meeting* en Princeton y en el Simposio de la Unión Astronómica Internacional celebrado en Cracovia (Polonia), como homenaje en el 500 aniversario del nacimiento de Copérnico. En oposición al denominado "principio copernicano"³ acuñó el término "principio antrópico", al que se refirió por primera vez de la siguiente forma: «Sin embargo, estas predicciones requieren el uso de lo que puede ser denominado principio antrópico, en cuanto lo que podemos esperar observar debe estar restringido por la condición necesaria de nuestra presencia como observadores» (Carter, 1974, p.292). Era también la primera vez que esta idea se presentaba desde un punto de vista científico, como una tesis asociada a las cuestiones planteadas dentro de la cosmología física. En este trabajo distinguió dos versiones del principio. La versión débil, que caracterizó diciendo: «Debemos estar preparados para tener en cuenta el hecho de que nuestra ubicación en el universo es necesariamente privilegiada en la medida de ser compatibles con nuestra existencia como observadores» (p.293). Y la versión fuerte, a la que se refirió en el sentido de que «el universo (y por tanto los parámetros fundamentales de los cuales depende) debe ser tal que admita la creación en algún momento de observadores dentro de él » (p.295). A la vista de sus consideraciones y de las ideas presentadas en la formulación de sus dos principios, Carter estaba convencido de que el universo que habitamos es especial, en cuanto las características que presenta hacen posible el

³ Este principio anuncia que la Tierra no ocupa un lugar privilegiado en el universo.

desarrollo de tipos de vida avanzados. De acuerdo a esta visión antrópica del cosmos, vivimos en un mundo como el que vemos, con sus condiciones particulares que hacen posible la existencia de seres inteligentes, precisamente porque estamos aquí para observarlo.

En 1986, el matemático y cosmólogo John Barrow y el físico Frank Tipler publicaron *The Anthropic Cosmological Principle*, una obra muy exhaustiva que se convirtió a partir de su publicación en fuente primaria y principal referencia en el estudio del principio antrópico. En ella presentaron nuevas versiones del principio más allá de las expuestas por Carter, trataron los antecedentes históricos del argumento del diseño, las relaciones entre teleología y ciencia, así como las conexiones entre el razonamiento antrópico y disciplinas como la física cuántica, la astrofísica o la biología molecular. En el texto se presentaban interpretaciones antrópicas de muy diversos tipos. A modo de ejemplo, la relación de dependencia que existe entre el desarrollo de organismos vivos y la edad del universo. Según los autores, observamos un universo que tiene una edad del orden de 10^{10} años, conteniendo una población de estrellas que se encuentran mayoritariamente en una etapa de la evolución estelar denominada secuencia principal⁴. Muy anteriormente al momento actual habría sido imposible la vida, dado que el censo de supernovas no habría sido aún suficiente como para generar la cantidad necesaria de elementos químicos pesados que caracterizan a los seres vivos. Y por otro lado, dentro de unos 10^{12} años, las estrellas habrán consumido todo su combustible nuclear y no habrá suficiente emisión de radiación para sostener la vida. Aún más allá, en 10^{18} años, todas las galaxias habrán colapsado en agujeros negros supermasivos (Barrow & Tipler, 1986). Estos límites temporales inferior y superior son la ventana de tiempo en que la vida puede existir, resultando en el universo con las características que necesariamente tenemos que observar⁵.

⁴ Las estrellas obtienen energía mediante la fusión de átomos ligeros para producir otros más pesados. A lo largo de su vida, con la sustitución por agotamiento del tipo de elementos que fusionan, van experimentando una serie de cambios en su estructura y composición, en un proceso denominado evolución estelar. La etapa en la que se fusiona hidrógeno para producir helio se conoce como secuencia principal, denominación que procede del hecho de que las estrellas permanecen aproximadamente el 90 por ciento de su vida en esta fase.

⁵ En este trabajo se utilizará muy a menudo la notación exponencial en potencias de diez con órdenes de magnitud muy altos. Propiedades físicas que presenten valores tan altos como 10^{30} o tan pequeños como 10^{-30} están fuera de nuestra capacidad de comprensión. Como auxilio, y a modo de referencia de

También destacan como en el marco del modelo del big bang, el considerable tamaño del universo tiene una interpretación antrópica. Dado que los observadores que advierten este tamaño son seres inteligentes que a su vez resultan tributarios de una química compleja, se hace necesario que las estrellas dispongan de los miles de millones de años necesarios para su formación y posterior transformación de hidrógeno y helio en elementos más pesados, tiempo durante el cual el universo ha estado expandiéndose hasta el tamaño que actualmente observamos.

Si nuestro universo contuviese sólo una galaxia como la Vía Láctea formada por cien mil millones de estrellas, en vez de contener 10^{12} de tales galaxias, podríamos considerar tal hecho como de economía cósmica, con pocas consecuencias para la vida. Pero un universo con una masa de cien mil millones de masas solares se habría expandido sólo durante un mes. Ningún observador podría haber evolucionado para ser testigo de ese universo de tamaño tan económico⁶. (Barrow & Tipler, 1986, p.385)

El principio antrópico plantea no pocas controversias científicas. Afirma Kragh (2010b):

En general se acepta que el principio antrópico, para ser considerado de valor científico, debe ser capaz de realizar predicciones de más o menos el mismo tipo que las realizadas por las teorías científicas ordinarias, preferiblemente predicciones precisas de fenómenos que son desconocidos en el momento de realizar la predicción. (p.2)

Es por esta objeción que su formulación es acusada frecuentemente de no ser más que una mera tautología, desde el momento en que su aceptación sólo permite concluir afirmaciones previamente conocidas y sin ninguna validez explicativa. A lo sumo podría ser aceptado como una regla de inferencia válida del tipo '*Si X entonces Y*', '*X*', '*entonces Y*', pero carece del carácter predictivo de las leyes de la física, ya que sólo anticipa hechos que ya conocemos. Y en su contra milita además que parece contradecir el principio copernicano. En su crítica al principio antrópico fuerte, el físico matemático Roger Penrose manifiesta que «tiende a ser invocado por los físicos teóricos siempre que

cuán grandes o pequeños pueden resultar estos números, indicar como ejemplo un orden de magnitud 18. Así, un attosegundo (10^{-18} s) es a un segundo lo que un segundo es a la edad del universo.

⁶ El cálculo expuesto en esta cita se basa en la relación matemática que existe entre el tamaño, la masa y la edad de un universo en expansión.

no tienen una buena teoría suficiente para explicar los hechos observados» (Penrose, 1991, p.538).

A pesar de que los defensores del principio antrópico hayan amparado en ocasiones sus supuestos éxitos predictivos, la forma de razonamiento circular del principio lo convierte en una falacia lógica, donde se defiende la veracidad de la proposición mediante un proceso de inferencia circular que se presenta como base de su demostración. Y es que los efectos en ningún caso pueden servir de explicación de la causa. El hecho de nuestra existencia no puede ser explicación del ajuste fino, dado que esas condiciones ya existían antes de que la humanidad o cualquier otro observador inteligente vinieran a la existencia. De la presencia de organismos vivos en el universo es posible deducir la ventana de valores que pueden adquirir las constantes fundamentales, pero de ninguna manera la existencia de estos organismos es explicación al valor de esas constantes.

Como afirma Mosterín (2004) refiriéndose al principio antrópico débil, se trata de una regla de inferencia tautológica que no permite explicar nada ni predecir nada que ya no sepamos, y en su versión fuerte es en esencia una afirmación metafísica impregnada de antropocentrismo, carente de toda base lógica y física, y del cual no puede deducirse ninguna explicación científica a nada. Cita Mosterín al físico Murray Gell-Mann, quien manifestaba que el principio antrópico fuerte aplicado a la dinámica de las partículas fundamentales y a las condiciones iniciales del universo, habría conformado las leyes fundamentales de la naturaleza de tal forma que con el tiempo terminarían produciendo seres humanos, lo cual le parecía una idea tan ridícula que no merecía más discusión.

2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

2.1. Qué se entiende por ajuste fino

Los avances científicos que han tenido lugar a lo largo del siglo veinte, particularmente en cosmología y física de partículas, han evidenciado que la estructura del cosmos está basada en los valores concretos que toman un conjunto de constantes físicas, en las relaciones cuantitativas que mantienen entre ellas, y en las condiciones iniciales que se dieron en el origen del universo. El modelo estándar de la física de partículas remite a ciertos parámetros fundamentales (como la masa o la carga eléctrica de las partículas

elementales) cuyo valor no queda determinado por la teoría, y nada dice acerca de por qué encontramos unos valores y no otros. El término ajuste fino al que se refiere este trabajo remite al hecho de que si los parámetros físicos que determinan la ordenación del universo hubieran sido solo ligeramente diferentes no habría sido posible el desarrollo de la vida, ni por consiguiente una especie inteligente como la nuestra. En este sentido, el físico Paul Davies se refiere al ajuste fino como

La estructura de muchos de los sistemas familiares observados en la naturaleza está determinada por un número relativamente pequeño de constantes universales. Si estas constantes hubieran tomado valores numéricos diferentes de los observados, la estructura de estos sistemas habría sido diferente. [...] La organización particular de nuestro mundo ha sido posible solamente por alguna forma delicada de "ajuste fino" de estos valores (Davies, 1982, p.60).

Las ecuaciones matemáticas que describen el mundo físico constan de dos tipos de magnitudes. Por un lado las variables, que toman diferentes valores en función del objeto físico y el fenómeno estudiado, y por otro las constantes, que son términos con valores fijos que permanecen invariables a lo largo del tiempo para un fenómeno dado. Se habla de constantes fundamentales cuando nos referimos a aquellas constantes que no se derivan de otras y cuyo valor solo puede ser determinado mediante experimentación. El valor de las constantes fundamentales, cuando se conecta con las leyes de la física, va a determinar la estructura básica del mundo, convirtiendo las relaciones de proporcionalidad en relaciones de igualdad. De acuerdo con la ley de la gravitación universal de Newton, la fuerza de la gravedad es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Es la inclusión de la constante de la gravitación G lo que convierte la proporción propuesta en una igualdad. Si el valor de las constantes o la relación cuantitativa que mantienen entre ellas fuesen diferentes al que realmente es, el universo sería diferente. Las condiciones iniciales, por su parte, remiten a los valores contingentes que toman las variables en el inicio de un proceso físico, en este caso los instantes iniciales del universo, cuyas diferentes magnitudes van a marcar la evolución del sistema a lo largo del tiempo.

Hay diversidad de opiniones en cuanto al número de constantes que son realmente independientes. De acuerdo con Smolin (2009), el modelo estándar de la física de partículas contempla más de 20 parámetros ajustables, desde la masa de las partículas

fundamentales a las constantes de acoplamiento entre interacciones. Flowers & Petley (2001) sólo consideran fundamentales diez constantes, y Okun (1991) las reduce a tres. No se va a discutir esta cuestión. Lo trascendente para la discusión que se trata es suscribir que existe un conjunto de constantes y relaciones entre ellas cuyos valores determinan la estructura y evolución del universo. El astrónomo Martin Rees (2000) indica en su libro *Sólo seis números*, cómo el ajuste de los siguientes parámetros y constantes físicas:

- N. Relación entre fuerza eléctrica y gravitatoria
- E. Fuerza de la interacción nuclear
- Ω . Densidad de materia en el universo
- Λ . Valor de la constante cosmológica
- Q. Amplitud de las irregularidades del universo primitivo
- D. Número de dimensiones espaciales

van a determinar si la vida pueda aparecer o no en el universo, afirmando la necesidad de unos valores extraordinariamente ajustados y perfectamente combinados entre ellos.

Lo que impresiona a muchos científicos no es tanto el hecho de que los cambios en los valores de las constantes fundamentales pudieran alterar la estructura del mundo físico, sino lo sensible que es la estructura observada del universo a estas alteraciones. Una minúscula variación de las intensidades de las fuerzas produce un cambio drástico en la estructura (Davies, 1994, p.224).

Si consideramos solo seis constantes fundamentales de la naturaleza, la constante de la gravitación universal (G), la constante de Planck (h), la carga del electrón (e), la velocidad de la luz (c) y las masas en reposo del electrón y el protón (m_e y m_p), cada subconjunto de valores de estas constantes del conjunto total que representa todas las combinaciones posibles de valores, determinan un posible universo. Sólo en un pequeño número de subconjuntos se darán las condiciones necesarias para la aparición de la vida. Dentro del conjunto de físicas posibles, el subconjunto que permite que evolucione la vida es lo que se denomina ajuste fino (Barnes, 2012).

Referirse al ajuste de una constante de la física remite al valor que una constante de la naturaleza toma dentro de un rango razonablemente factible. Para Collins (2009), si θ_a es el valor de una constante C que permite la aparición de la vida y θ_b es el rango de valores que puede tomar dicha constante, diremos que C está finamente ajustada a la

aparición de la vida si $\theta_a / \theta_b \lll 1$. Además hay que tener en cuenta que, de acuerdo con la teoría de probabilidades, si el valor de dos constantes son sucesos independientes, la probabilidad de intersección es igual al producto de las probabilidades de ambos sucesos. Por lo tanto, el ajuste fino del universo viene reforzado por cuanto existen constantes cuyo valor es independiente de cualquier otra, haciendo la probabilidad de ocurrencia conjunta aún más pequeña. Por ejemplo, hasta donde sabemos, el valor de la fuerza de la gravedad es independiente del valor de la constante cosmológica, por lo que la probabilidad de que los valores tanto de la gravedad como de la constante cosmológica caigan dentro del rango que permita la vida, es

$$\frac{\theta_a(\text{gravedad})}{\theta_b(\text{gravedad})} \cdot \frac{\theta_a(\text{cte. cosmológica})}{\theta_b(\text{cte. cosmológica})}$$

Extender este razonamiento no solo a dos sino a todas las constantes consideradas, hace que la probabilidad de ocurrencia de un universo donde pueda darse la evolución biológica sea extraordinariamente pequeña. Como de forma vehemente afirma Bostrom (2002), el ajuste fino es un *explanandum* que clama por un *explanans*.

2.2. Qué se entiende por vida

Definir qué se entiende por vida no es un asunto pacífico, ni lo es caracterizar un organismo vivo con respecto a la materia inanimada. No hay más que acercarse a la literatura especializada para constatar el gran número de definiciones que se han intentado⁷. Esta dificultad parece surgir del hecho de que no hay un criterio convenido desde el que acometer una definición. Con la intención de sistematizar las diferentes orientaciones que han inspirado las propuestas de definición, Diéguez (2008) las resume en dos clases: aquellas que ponen el énfasis en la capacidad reproductiva o replicativa de los seres vivos, el enfoque informacional, y aquellas otras que lo hacen en la capacidad de los organismos para automantenerse y constituirse como entidades autónomas, o enfoque auto-organizativo. La primera, defendida entre otros por el genetista británico John Maynard Smith, incide en mecanismos relacionados con la reproducción como la

⁷ Por ejemplo: Farmer, J.D. & Berlin, A. (1992). Artificial Life: The Coming Evolution. En Langton et al., *Artificial Life II*, 815-833. Redwood City: Addison-Wesley; Hickman, C.P., Roberts, L.S. & Parson, A. (1998). *Zoología*, Madrid: McGraw Hill; Korzenievski, B. (2001). Cybernetic Formulation of the Definition of Life. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 209, no. 3, pp. 275-286.

herencia, la adaptación al medio y la evolución; la segunda, seguida principalmente por el biólogo teórico estadounidense Stuart Kauffman, se centra en la complejidad y la autoconstrucción metabólica.

Dado que el concepto de vida al que se refiere este trabajo remite a las condiciones que hacen posible la aparición de organismos vivos en cualquier lugar del universo, hay que evitar ser demasiado restrictivos con la definición, puesto que el tratamiento que aquí se hace del concepto de vida desborda el que podamos aventurar analizando desde un punto de vista estrictamente biológico los seres vivos que habitan el planeta Tierra. Hay que trascender por tanto las especificidades biológicas, e ir a una definición de vida en contraposición de la materia inanimada que pueda servir como referente universal, en el más amplio sentido del término. Para este trabajo, por tanto, quizás pueda ayudarnos más eficientemente una caracterización del fenómeno de la vida que provenga de un enfoque más general. Aceptada esta premisa, desde una disciplina como la física, una caracterización de lo que sería la vida nos lleva a considerar el concepto de organismo vivo como aquel sistema que se encuentra alejado del equilibrio termodinámico (Prigogine, 1980, citado en Diéguez, 2008).

Según Davies (1994) «las dos características de la vida son *complejidad* y *organización*»⁸ (p.70), lo cual relaciona directamente la condición de posibilidad de los organismos vivos con conceptos centrales de la termodinámica. La metabolización de sustancias alimenticias y la generación de desechos, el crecimiento, la capacidad de respuesta a estímulos externos o la reproducción, son actividades relacionadas con la vida que requieren la vulneración local del segundo principio de la termodinámica, al crear un aumento continuo de orden interno y una disminución en la entropía⁹. A diferencia de la energía, no existe una ley que verifique la conservación de la entropía; por el contrario, en cualquier proceso físico ésta siempre aumenta, por lo que el aumento de orden que experimentan localmente los seres vivos tiene que hacerse necesariamente a costa del aumento de entropía a nivel global. Para verificar esto, se hacen imprescindibles unas estructuras como las moléculas orgánicas y unos procesos como

⁸ Cursivas en el original.

⁹ Hay que hacer notar que, dado que este principio general es inviolable, un aumento en el orden local se hace siempre a costa de un aumento en la entropía global. El concepto de entropía se tratará con más detalle en el apartado 3.1. *Boltzmann y la entropía*. Por ahora, baste decir que la entropía remite a la medida del desorden interno de un sistema.

los que tienen lugar en el interior de las células con un mínimo de complejidad y organización que favorezcan la aparición y el sostenimiento de los sistemas vitales.

En febrero de 1943 el físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) impartió tres conferencias en el *Trinity College* de Dublín, que fueron publicadas el año siguiente en forma de un libro titulado *¿Qué es la vida?* Siguiendo la línea de alejarse de conceptos estrictamente biológicos, caracteriza los organismos vivos como sistemas que son capaces de crear orden a partir del desorden, consumiendo e intercambiando energía con el entorno: «¿Cuál es el rasgo característico de la vida? ¿Cuándo puede decirse que un pedazo de materia está vivo? Cuando sigue "haciendo algo", ya sea moviéndose, intercambiando material con el medio, etc., y ello durante un período mucho más largo que el que esperaríamos que "siguiera haciéndolo" un pedazo de materia inanimada en circunstancias similares» (Schrödinger, 1983, p.109).

Para el objetivo de este trabajo no será necesario definir estrictamente la frontera entre lo vivo y lo inanimado, ni enfrascarse en discusiones sobre si la vida es o no un género natural. No es la cuestión de si algunas formas de organización pertenecen al reino de lo viviente o no lo que aquí nos ocupa. En general, la configuración que van a presentar los posibles universos en los que es imposible que pueda darse algún atisbo de vida va a ser tan radicalmente diferente a aquellos en los que eventualmente puedan aparecer seres vivos, que la consideración de si ciertos fenómenos pertenecen al ámbito de lo animado o no va a carecer por completo de significado. No hay más que imaginar un universo en el que los parámetros que determinan su estructura dicten que no sea posible la agregación de materia y que lo único que se encuentre en su interior sea radiación térmica diluida y uniformemente distribuida, o imaginar un universo en el que sus condiciones iniciales le lleven a colapsar en una fracción de segundo tras el big bang inicial. Un universo así es tan radical, que desborda la discusión sobre la frontera entre lo animado y lo inanimado.

2.3. Qué se entiende por multiverso

Terminológicamente, la expresión multiverso parece confusa. Si el universo es la totalidad del espacio-tiempo y todo su contenido, si es todo lo que existe, estrictamente cualquier entidad física que podamos imaginar debe quedar englobada necesariamente en nuestro concepto de universo. Acudiendo a la etimología del término universo, en realidad el multiverso sería el universo. Por tanto, hablar de multiverso, metaverso,

megaverso o universos paralelos parece un abuso del lenguaje. Para el propósito de este trabajo se tomará el término multiverso como el conjunto de regiones del espacio-tiempo que están desconectadas causalmente entre sí, constituyendo cada una de estas regiones un universo diferente. En principio, ningún efecto que observemos en nuestro universo puede tener causa en otro. Así

El universo que nosotros observamos es sólo una pequeña parte de la totalidad de la existencia física [...] Nuestro universo no es más que uno entre un vasto conjunto de universos realmente existentes, la totalidad de los cuales podemos llamar "multiverso". [Un universo sería] una región del espacio-tiempo grande y en general causalmente desconectada (Bostrom, 2002, p.12)

Consensuadamente, la hipótesis del multiverso verifica tres enunciados: 1) existe un conjunto muy grande de universos; 2) existe algún mecanismo que hace que cada uno de esos universos tenga unos parámetros diferentes a los demás; y 3) los subconjuntos de parámetros a los que pueden acceder los diferentes universos es muy grande. Si suponemos que hay una familia de conjuntos P de i subconjuntos de parámetros independientes de la física $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_i\}$ y otro conjunto U de n universos $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$, se verifica que ambos conjuntos son equipotentes, es decir, el número de elementos del conjunto P es igual al de elementos del conjunto U , donde cada elemento del conjunto P está relacionado con un único elemento del conjunto U y cada elemento del conjunto U está relacionado con un único elemento del conjunto P . Así, cada diferente universo del multiverso se caracteriza por un conjunto de parámetros que difieren de los parámetros del resto de universos y cada conjunto de parámetros diferentes va a generar un universo diferente.

Para aceptar el multiverso como solución al problema del ajuste fino es necesario postular la existencia real de un elevado número de universos cada uno con características diferentes, más allá de un mero concepto teórico, pues como señala Ellis (2014) esto es esencial para cualquier razonamiento antrópico. De ahí que la consistencia de las hipótesis científicas que como se verá sostienen la ocurrencia de múltiples universos, resulta definitivo para que pueda aventurarse una solución probabilística al problema del ajuste fino, en la cual se basa la solución del multiverso. Por tanto, los mecanismos físicos de generación de múltiples universos referidos en este

trabajo han de estar basados en hipótesis cimentadas en teorías científicas bien fundamentadas.

Se han propuesto diversas hipótesis sobre la naturaleza del multiverso, con mecanismos de generación de universos basados en el estudio de fenómenos físicos diferentes. Tegmark (2003) ha realizado una taxonomía de las diversas cosmologías del multiverso, que se ha convertido en fuente de referencia. Divide los multiversos en cuatro niveles. El multiverso de nivel I está formado por todas aquellas regiones del espacio que están más allá de nuestro horizonte cosmológico, es decir, aquellas regiones que están fuera de nuestro universo observable. Cada uno de estos universos se correspondería con un volumen de Hubble, una esfera cuyo límite serían aquellos objetos que se alejan a una velocidad mayor que la de la luz, y por tanto, desconectada causalmente de las demás. A este grupo pertenecen los universos burbuja de George Ellis. El multiverso de nivel II está formado por aquellos universos en los que cada instancia se corresponde a su vez con un universo de nivel I, por ejemplo, los universos oscilantes de John Wheeler y Paul Steinhardt, los universos bebés de Lee Smolin, los universos inflacionarios de Andrei Linde, los universos surgidos a partir de la teoría de cuerdas como el de Leonard Susskind y los universos brana de Lisa Randall y Raman Sundrum. El multiverso de nivel III procede de la interpretación de la mecánica cuántica de los muchos mundos de Hugh Everett, según la cual todos los estados cuánticos del universo existen simultáneamente. Por último, el multiverso de nivel IV se basa en la idea abstracta de que todas las estructuras matemáticas posibles existen realmente. Este sería el multiverso matemático de Max Tegmark.

Este trabajo se va a centrar en los multiversos de nivel II y III. Se descarta el nivel I porque no está claro que las regiones del espacio más allá de nuestro universo observable posean leyes de la física diferentes o valores distintos de las constantes fundamentales, lo cual no ayudaría en la solución del problema del ajuste fino. Y se prescinde del nivel IV, porque se trata de una idea basada en especulaciones de carácter pseudo-platónico que restan verosimilitud a la existencia física real de este tipo de multiverso.

3. EL AJUSTE FINO DEL UNIVERSO COMO PROBLEMA

3.1. Boltzmann y la entropía

La entropía constituye un concepto capital para la termodinámica, habiendo extendido su aplicación con el transcurso del tiempo a todos los procesos naturales. El concepto de entropía remite al grado de desorden o aleatoriedad de un sistema, siendo que a mayor desorden, mayor entropía.

El físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) acometió el estudio de la entropía desde un punto de vista estadístico, asumiendo que el número extraordinariamente alto de moléculas presentes en cualquier sistema macroscópico justificaba la asunción probabilística¹⁰. En 1872, basándose en los supuestos establecidos en la teoría cinética de los gases, y particularmente en un trabajo anterior del físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) de 1867¹¹, publicó el artículo *Otros estudios sobre el balance térmico entre las moléculas de un gas*¹², en el que afirmaba que el desorden de un gas tenía su causa en las colisiones entre los átomos, así como que cualquier sistema fuera del equilibrio tendería hacia el mismo, en el que sin perturbación exterior se mantendría indefinidamente.

Dado que el número de estados desordenados en que eventualmente puede encontrarse un sistema es abrumadoramente mayor que el número de estados ordenados a los que puede acceder, las situaciones de equilibrio se corresponden con los estados desordenados¹³. Como indican Solís y Sellés (2009): «A partir de un estado inicial particular, un sistema podría evolucionar tanto a una distribución uniforme como a una

¹⁰ Efectivamente, como ejemplo, en 2 g de hidrógeno (H₂) existen aproximadamente 6×10^{23} moléculas.

¹¹ Maxwell, J.C. (1867). On the Dynamical Theory of Gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 157, pp. 49-88.

¹² Boltzmann, L. (1872). Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte Akademie der Wissenschaften*, vol. 66, pp. 275-370.

¹³ Para apreciar la mayor proporción de estados desordenados sobre los ordenados se puede hacer una analogía con un conjunto de cinco monedas. Considerando estados ordenados aquellas combinaciones en que observamos que las cinco monedas muestran cara o las cinco muestran cruz, sólo dos combinaciones producirían un estado ordenado. Dado que hay $2^5=32$ combinaciones distintas, las treinta combinaciones restantes corresponderán a estados desordenados. La proporción entre estados ordenados y desordenados se hace colosalmente grande a favor de estos últimos cuando se tienen en cuenta un número muy grande de eventos, como ocurre en los sistemas macroscópicos compuestos por un número muy grande de moléculas. Esta es la razón por la que cuando consideramos, por ejemplo, un sistema compuesto por el aire contenido en un recipiente, nunca observamos situaciones no uniformes u ordenadas, como sería aquella en la que todo el aire se situase espontáneamente en uno de los extremos, dejando vacío el resto.

no uniforme [...] Pero sucede que hay muchas más distribuciones uniformes que no uniformes, con lo que lo más probable, con mucho, es que la distribución acabe siendo uniforme» (p.866). La entropía aumenta, por tanto, al tiempo que los sistemas van transitando de estados menos probables (más ordenados o no uniformes) a otros más probables (más desordenados o uniformes), y siendo que la entropía es una medida del desorden o uniformidad de un sistema, ésta tiende a un valor máximo en la situación de equilibrio. Esta explicación constituye la interpretación estadística del segundo principio de la termodinámica.

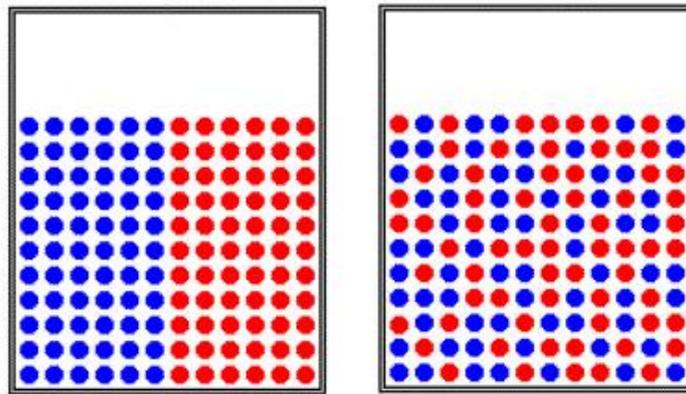


Figura 1. El recipiente de la izquierda muestra una distribución de partículas más ordenada (menos uniforme), y por tanto, una ordenación más improbable de alcanzar si se deja el sistema en libertad; su entropía es baja. El recipiente de la derecha, por el contrario, presenta una distribución más desordenada (más uniforme), y por tanto, más probable; su entropía es alta. [Créditos: www.aech.cl]

En los años siguientes Boltzmann acometió la formulación matemática del concepto de entropía, que culminó con la ecuación que lleva su nombre

$$S = k \cdot \ln W$$

donde S es la entropía, k es la constante de Boltzmann¹⁴ y $\ln W$ el logaritmo neperiano del número de microestados posibles¹⁵.

Si el segundo principio de la termodinámica afirma que la entropía de un sistema termodinámicamente aislado sólo puede incrementarse, la cantidad de entropía del

¹⁴ El valor asignado a la constante de Boltzmann por el CODATA 2014 (Committee on Data for Science and Technology) es $1,380 \times 10^{-23}$ J/K.

¹⁵ Se denomina microestado a cada una de las diferentes disposiciones que pueden tomar los elementos constituyentes de un sistema cerrado, es decir, el número de formas diferentes como las moléculas o átomos de un sistema pueden ser organizados. Así, en un volumen de gas, la velocidad y posición de todas y cada una de las moléculas del gas constituiría un microestado del sistema.

universo, por definición un sistema aislado, tiene que incrementarse con el tiempo. Esta conclusión apareja uno de los más viejos, profundos y conspicuos problemas que enfrenta la cosmología. Siendo el universo actual de naturaleza homogénea e isótropa, como observacionalmente se constata, caracterizado por un bajo nivel de entropía¹⁶, unido a su longevidad, significa que tuvo que comenzar su existencia con un estado muy especial de súper-baja entropía. Penrose (1979), basándose en la métrica Robertson-Walker¹⁷, afirma que para observar el estado actual, un segundo después del big bang el espacio-tiempo tuvo que ser notablemente uniforme, en una proporción mayor que una parte en 10^5 . Igualmente, Linde (2014) afirma que, de acuerdo a las observaciones, la radiación cósmica de microondas se desvía de la completa homogeneidad en sólo una parte en 100.000, lo cual indica que el universo tuvo que ser extremadamente uniforme cuando la radiación de fondo fue emitida. Collins & Hawking (1973) han puesto de manifiesto también la improbabilidad de unas condiciones iniciales que hayan resultado en que el universo que observamos 13.500 millones de años después de su nacimiento siga siendo isótropo y homogéneo:

Mostramos que el conjunto de modelos cosmológicos espacialmente homogéneos que son también isótropos, considerando tiempos que tienden a infinito, son de medida cero en el espacio de todos los modelos espacialmente homogéneos. Esto indica que la isotropía de los modelos Robertson-Walker es inestable a perturbaciones homogéneas y anisotrópicas. Parece por lo tanto que existe solo un pequeño conjunto de condiciones iniciales que darían lugar a modelos del universo que fuesen isótropos en los límites observados en el momento actual. (p.317)

¹⁶ Si como se ha dicho, un sistema uniforme tiene mayor entropía que un sistema no uniforme, podría parecer que a un universo homogéneo e isótropo como el nuestro le debería corresponder una alta entropía, en lugar del valor bajo que se afirma le caracteriza. El aspecto diferencial reside en la presencia de gravedad. En los sistemas anteriormente referidos la magnitud de la fuerza gravitatoria era despreciable. Sin embargo, esto no ocurre cuando se considera el universo en su conjunto. Ante la presencia de gravedad, un gas que se contrae para formar estructuras compactas, como las estrellas o los agujeros negros, aumenta su entropía, maximizándose ésta cuando toda la materia se agrupa para formar un agujero negro. De ahí que el estado uniforme e isótropo (a gran escala) del universo se corresponda con una baja entropía. Si el universo además está en expansión, la entropía alcanzará su máximo valor cuando todos los agujeros negros se hayan evaporado en forma de radiación, alcanzando entonces el universo el estado de equilibrio (Carrol, 2008).

¹⁷ La métrica Robertson-Walker, en algunos textos métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker o modelo FLRW, es una solución exacta de las ecuaciones de la relatividad general al aplicar los principios de homogeneidad e isotropía al universo. Bajo estas condiciones se describe un universo no estático en estado de expansión o contracción.

Sin este improbable y sorprendente estado finamente ajustado de baja entropía que caracterizó al universo primitivo, el cosmos debería encontrarse actualmente en el estado de muerte térmica, un estado de equilibrio y máxima entropía con la energía diluida y distribuida uniformemente en el espacio, y en el que no habría energía disponible para realizar el trabajo necesario para mantener los procesos vitales. Llevar un sistema a un estado ordenado de menor entropía no es imposible, pero su realización implica necesariamente consumir energía para revertir los cambios ya experimentados, lo cual redundaría en un aumento del valor de la entropía a nivel global. El sostenimiento de los organismos vivos requiere de una disminución local de entropía, siempre a costa de un aumento general, algo imposible de conseguir cuando el universo ha alcanzado el estado de máxima entropía.

Boltzmann ya cayó en la cuenta de este problema. Para solventarlo recurrió al azar. Las moléculas de un gas encerradas en un recipiente no se encuentran estáticas, sino que están moviéndose continuamente de manera aleatoria. Eventualmente podría ocurrir que en ciertas zonas apareciesen situaciones locales de orden, en un estado global que sigue siendo desordenado. Un curso similar de los acontecimientos podría haber ocurrido en el cosmos. Boltzmann sostenía que sería factible que lo que nosotros observemos sea una región del cosmos caracterizada por una baja entropía, dentro de un universo en conjunto que ya alcanzó el equilibrio térmico.

Supongamos que el universo entero se encuentra en equilibrio térmico. La probabilidad de que una (solamente una) parte del universo se encuentre en un cierto estado alejado de este equilibrio térmico es pequeña, y mientras más alejado se encuentre su estado de este equilibrio, más improbable es. Por otro lado, mientras más grande es el universo mismo, mayor es esta probabilidad. Si hacemos el universo suficientemente grande, podemos hacer tan alta como queramos la probabilidad de que una parte relativamente pequeña de ese universo se encuentre en un estado determinado. Así, podemos hacer grande la probabilidad de que nuestro mundo se encuentre en su estado actual, no obstante el hecho de que el universo entero se encuentre en equilibrio térmico. (Boltzmann, 1895, pp.208-209, citado en Auping, p.480)

Efectivamente, el segundo principio de la termodinámica es de carácter estadístico, y nada impide que en un sistema cerrado, que con el transcurso del tiempo tiende irremediablemente a una mayor entropía, pueda haber pequeños volúmenes del espacio

donde aleatoriamente se produzcan fluctuaciones estocásticas que resulten en una disminución de entropía, siempre que el conjunto experimente un aumento global.

El problema a esta línea de razonamiento surge debido a que las fluctuaciones que provocan una disminución de entropía decrecen exponencialmente con el aumento del volumen espontáneamente ordenado, y el volumen sobre el que nosotros estaríamos observando una baja entropía es muy grande. De hecho es del tamaño del universo observable. En estas condiciones, es tal la magnitud de la improbabilidad que según Davies (1994) el tiempo necesario para que un accidente tan absolutamente improbable tenga lugar es inconcebiblemente largo, al menos de $(\text{exp}) 10^{80}$ años. Cifra similar a la estimada por el biólogo británico John B.S. Haldane (1928), del orden de $(\text{exp}) 10^{100}$.

El argumento de Boltzmann podría prosperar si el tiempo necesario para que pudiese aparecer espontáneamente un volumen de espacio en estado ordenado, dentro de un supuesto cosmos desordenado, fuese más corto que el representado por estas extravagantes cifras. Para ello sería necesario que el volumen en el que vemos una baja entropía fuese de menor tamaño que el que observamos. Al fin y al cabo, para posibilitar el desarrollo de vida en nuestro planeta sólo habrían sido necesarios unos pocos megaparsecs de esta fluctuación entrópica, dado que el resto del universo ha tenido una influencia prácticamente nula en la aparición de la vida en la Tierra¹⁸. Pero milita contra Boltzmann el hecho de que, como afirman Davies y Haldane, lo que observamos a nuestro alrededor es una zona de baja entropía tan grande que el tiempo necesario para su aparición es extraordinariamente largo, y la probabilidad de ocurrencia, por tanto, ridículamente pequeña.

De hecho, esta zona es tan amplia que siguiendo el argumento sería más lógico considerar que las distancias cósmicas que damos por ciertas estarían totalmente equivocadas, y que en realidad el universo que observamos tendría un tamaño millones de veces menor. Este discurso es el origen de la conocida como paradoja del cerebro de Boltzmann (Albrecht & Sorbo, 2004), que postula que es tan baja la probabilidad de encontrar una zona tan extensa de baja entropía dentro de un universo en equilibrio térmico, que comparativamente es mucho más factible considerar una pequeña

¹⁸ Un pársec es una medida de longitud habitualmente utilizada en astronomía igual a 3,26 años luz. Viene definida como la distancia a la que un objeto presenta un paralaje de un segundo de arco. Un megapársec equivale por tanto a 3,26 millones de años luz.

fluctuación entrópica cuyo nivel de organización hubiese resultado en la aparición de una solitaria entidad consciente, que haya terminado por crearse falsas ideas acerca de que se encuentra rodeada por una fluctuación de gran tamaño.

3.2. Eddington y el combustible estelar

A lo largo de la segunda mitad de siglo XIX muchos geólogos y biólogos evolucionistas defendían que la edad de la Tierra debía ser del orden de varios cientos de millones de años, y por extensión estimaban que el Sol debía tener una edad de un orden de magnitud semejante. De otra manera no habría habido tiempo para verificar los cambios geológicos ni las adaptaciones evolutivas que ambos propugnaban. A raíz de ello, en el marco del conocido como debate sobre la edad de la Tierra, no era de extrañar que surgiese la pregunta acerca de dónde extraía el Sol su energía para mantener estable su nivel de emisión de luz y calor durante un plazo de tiempo tan prolongado, más allá de las primeras consideraciones de tomar al Sol como una fuente de fuego perpetuo.

Con motivo del cincuenta aniversario de la muerte de Immanuel Kant, el 7 de febrero de 1854 el físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) pronunció una conferencia en Königsberg¹⁹, donde discutió la hipótesis meteórica sobre el origen del calor del Sol apuntada en 1848 por Julius von Mayer (1814-1878) e independientemente en 1853 por John J. Waterston (1811-1883). Para Mayer la idea de que el Sol fuese un cuerpo caliente que se iba enfriando progresivamente podía ser descartada, dado que sin una fuente interna de generación de energía su temperatura habría descendido severamente en unos pocos miles de años (Tassoul & Tassoul, 2004). La hipótesis de Mayer-Waterston suponía que algunos meteoros se verían atraídos hacia el Sol por efecto de la gravedad, convirtiendo su energía cinética en luz y calor, bien por efecto de la fricción con el gas solar o por impacto contra la superficie del Sol.

El físico y matemático británico William Thomson (1824-1907) (conocido a partir de 1892 como Lord Kelvin) en un principio se adhirió a la teoría meteórica²⁰. Sin embargo, debido a que para mantener el calor irradiado por el Sol el incremento de la masa solar por la acreción de meteoros debería haber acortado el periodo anual terrestre

¹⁹ Helmholtz, H. von (1884). Über die Wechselwirkung der Naturkräfte. En H. von Helmholtz, *Vorträge und Reder*, vol. I, pp. 25-77. Braunschweig: Vieweg & Sohn.

²⁰ Thomson, W. (1854). On the Mechanical Energies of the Solar System. *Philosophical Magazine Series 4*, vol. 8, no. 54, pp. 409-430.

en un mes y medio desde el inicio de la era cristiana (Krehl, 2009), algo que no se había observado, Kelvin abandonó la hipótesis meteórica y terminó por adherirse a la nueva teoría sobre el origen del calor del Sol que por entonces ya había sugerido Helmholtz²¹.

Efectivamente, Helmholtz había desechado la hipótesis meteórica y formulado su modelo alternativo por implosión gravitacional. Siguiendo las teorías de Kant y Laplace sobre la dinámica de las nebulosas, afirmó que la contracción no se había detenido tras la formación del sistema solar, sino que por el contrario continuaba en el astro central. Su principal hipótesis consistía en afirmar que las capas exteriores gaseosas del Sol estarían cayendo hacia el centro a causa de la presión gravitatoria, comprimiendo los gases de su interior, convirtiendo la energía potencial gravitatoria en calor.

De acuerdo a la hipótesis implosional de Helmholtz, a partir de la estimación de la cantidad total de energía potencial y de la energía irradiada, calculó la edad del Sol en unos 21 millones de años. Aunque la edad del Sol estipulada por Helmholtz era mucho mayor que la apuntada por literalistas bíblicos como el arzobispo James Usher, que en el siglo XVII había establecido la edad de la Tierra en unos 5.500 años²², aún era demasiado corta para las pretensiones de biólogos y geólogos.

En las primeras décadas del siglo XX ya era conocido que la masa podía convertirse en energía. Se planteó entonces la posibilidad de que la energía del Sol proviniese de algún tipo de reacción relacionada con este fenómeno. Para ello era necesario conocer previamente la constitución química solar. Gracias a las técnicas espectroscópicas desarrolladas por Gustav Kirchhoff (1824-1887) y Robert Bunsen (1811-1899) en la segunda mitad del siglo XIX, se pudo averiguar que el Sol estaba constituido principalmente por hidrógeno y helio, en una proporción aproximada de cuatro a uno. Se había conseguido averiguar la constitución química solar, pero quedaba pendiente de resolver el problema del origen de la energía emitida por el Sol. No fue hasta 1920 que el astrofísico inglés Arthur Eddington (1882-1944) propuso los mecanismos correctos que explicarían la fuente de dicha energía. Unos mecanismos que remitían a los procesos nucleares desencadenados en el núcleo de la estrella.

²¹ Thomson, W. (1862). On the Age of the Sun's Heat. *Macmillan's Magazine*, vol. 5, pp. 288-293.

²² En su libro de 1650 *Annales Veteris Testamenti, a prima mundi origine deducti: una cum rerum Asiaticarum et Aegyptiacarum chronico, a temporis historici principio usque ad Maccabaicorum initia producto*.

Desde finales del siglo XVIII se conocía la existencia de estrellas que experimentaban cambios cíclicos temporales en su brillo relativamente estables. A estas estrellas se les conoce actualmente como estrellas cefeidas. En el año 1784, los astrónomos británicos Edward Pigott (1753–1825) y John Goodricke (1764-1786) descubrieron en un periodo de pocas semanas de forma independiente las primeras cefeidas de las que se tiene constancia, *Eta Aquilae* y *Delta Cephei* respectivamente. Fue la astrónoma estadounidense Henrietta S. Leavitt (1868-1921), trabajando en el Observatorio del Harvard College, quien después de analizar placas con imágenes de miles de estrellas de las Nubes de Magallanes descubrió en 1908 una correlación entre el periodo de pulsación y el brillo intrínseco de estas estrellas variables²³.

Faltaba describir la fenomenología física que provocaba la variación en el brillo de las cefeidas. Eddington, por entonces director del Observatorio de Cambridge, dio respuesta al problema en un trabajo publicado en 1917, donde describía cómo el cambio en la luminosidad era debido a que la estrella experimentaba fenómenos de contracción y expansión radiales, a causa de la ionización y recombinación del gas situado justo por debajo de su superficie visible (Stanley & Trimble, 2007). En este periodo realizó otras muchas contribuciones al estudio de los mecanismos del nacimiento y evolución estelar: acuñó el término “secuencia principal” para el estado preferente de las estrellas, caracterizó la ionización del gas del que estaban compuestas, determinó que la luminosidad dependía de la masa y no del tipo de fuente de energía, sugirió la naturaleza de la atmósfera estelar, etc. Eddington consiguió además gran celebridad cuando en 1919 coordinó junto a Frank Dyson las dos expediciones para observar el eclipse solar que confirmaría la desviación de la luz por efecto de la gravedad predicha por la teoría general de la relatividad de Einstein.

Todo este interés mostrado en la comprensión de la física estelar, le llevaron en la década de 1920 a enfrentar el problema hasta entonces no resuelto de la naturaleza del combustible de las estrellas. Su hipótesis expuesta en el libro *Constitución interna de las estrellas* de 1926 resultó ser correcta. A diferencia de la hipótesis del origen de la radiación solar por contracción gravitatoria conjeturada por Kelvin y Helmholtz, que

²³ Leavitt, H. (1908). 1777 variables in the Magellanic Clouds. *Annals of Harvard College Observatory*, vol. 60, no. 4, pp. 87-108. Las Nubes de Magallanes solo son visibles desde el hemisferio sur. Aunque Leavitt realizó su trabajo en Harvard (Estados Unidos), las placas fueron tomadas en el *Harvard Southern Station* de Arequipa (Perú).

daba unos tiempos de vida para las estrellas demasiado cortos, y de los arreglos dinámicos solares propuesto por James H. Jeans que postulaban un tiempo de vida demasiado largo, de entre 10^{12} y 10^{13} años (Stanley & Trimble, 2007), Eddington afirmaba que la energía emitida por el Sol tenía su origen en la energía residual procedente de los procesos nucleares de transmutación de unos elementos en otros acontecidos en el núcleo de las estrellas. Comenzó por aceptar la hipótesis de que el Sol, como las demás estrellas, era un cuerpo gaseoso. Afectado por la presión gravitatoria, tendería a hundirse por efecto de su propio peso. Afirmó que si no llegaba a colapsar era porque debía haber una fuerza expansiva interior que tendía a compensar el hundimiento gravitatorio. Especulando con el valor del campo gravitatorio solar y por ende con la masa del Sol, llegó a la conclusión de que el núcleo del Sol debía encontrarse a una temperatura de unos 15 millones de grados centígrados, temperatura suficiente para que pudiesen iniciarse los procesos de fusión nuclear.

Las estrellas nacen como consecuencia de la contracción por gravedad de nubes de polvo y gas presentes en el medio interestelar. Una vez vencida la resistencia a la contracción, debida principalmente a la energía cinética de las moléculas de la nube interestelar, la estrella inicia la contracción. La disminución de tamaño conlleva un aumento de la presión, y por consiguiente, de la temperatura. Cuando en el núcleo de la estrella se alcanzan los 15 millones de grados comienza la fusión del hidrógeno en helio, la estrella entra en equilibrio hidrodinámico y estabiliza su tamaño. Ahí permanecerá el noventa por ciento de su vida. Se dice de la estrella que ha entrado en la secuencia principal.

La expresión de la teoría general de la relatividad de Einstein para la equivalencia entre masa y energía viene dado por la ecuación

$$E = mc^2$$

que nos dice que masa y energía están relacionadas, y que lo hacen mediante un factor de conversión que es la velocidad de la luz al cuadrado. Es decir, cualquier cantidad de masa, aun en estado de reposo, conlleva la existencia de una cierta cantidad de energía.

Un núcleo de helio-4 (${}^4\text{He}$) está formado por dos protones y dos neutrones, pero su masa total es un 99,3 por ciento la masa de los dos protones y los dos neutrones por separado. Cuando dos átomos de hidrógeno se unen para formar uno de helio, el resto

0,7 por ciento de su masa (ó 0,007 en tanto por uno) es liberado en forma de energía, mediante la emisión de rayos gamma y neutrinos. Esta razón se denomina eficiencia nuclear y se representa como $\varepsilon = 0,007$. La energía liberada es lo que se conoce como energía nuclear, origen del calor que mantiene las estrellas en equilibrio hidrostático. La presión producida por la radiación generada a consecuencia de las reacciones de fusión de su interior iguala la presión de la fuerza de la gravedad que empuja la materia hacia el centro de la estrella, permaneciendo en equilibrio. La cantidad de energía liberada en el proceso de fusión del hidrógeno, y por tanto el valor de ε , depende de la magnitud de la fuerza nuclear fuerte, y su valor va a determinar la duración de la vida de las estrellas (Rees 2000). Siendo esto así, hay que tener en cuenta que las estrellas no mueren con el agotamiento del hidrógeno. Efectivamente, consumido el hidrógeno obtienen energía mediante la fusión del helio para producir carbono, y de aquí, en función de cuán masiva sea la estrella, oxígeno, neón, magnesio, silicio y otros elementos más pesados, en una cadena de fusiones y reacciones que va dejando en el interior de la estrellas concentraciones diversas de cada uno de los elementos sintetizados. Pero, dado que como ya se ha señalado, las estrellas pasan el 90 por ciento de su vida en la etapa de fusión del hidrógeno en helio, la duración de esta fase va a ser determinante en el tiempo de vida total de las estrellas.

El proceso de producción de helio a partir del hidrógeno era perfectamente conocido a principios de la década de 1950. El físico germano-norteamericano Hans Bethe (1906-2005) había propuesto en 1939 dos mecanismos por los que las estrellas extraían energía de los procesos de fusión nuclear al producir helio a partir del hidrógeno²⁴. El primero, denominado cadena protón-protón, era característico de las estrellas del tamaño del Sol o más pequeñas. Por este proceso, cuatro nucleones (protones y neutrones) y dos electrones se unen para formar un átomo de helio. El segundo, denominado ciclo CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno), fue descubierto también de forma independiente por el físico y matemático alemán Carl von Weizsäcker²⁵ (1912-2007) en 1937-38, de ahí que sea también conocido como ciclo Bethe-Weizsäcker. Es

²⁴ Bethe, A. (1939). Energy Production in Stars. *Physical Review*, vol. 55, no. 5, pp. 434-456.

²⁵ Weizsäcker, C.F. von (1937). Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. I. *Physikalische Zeitschrift*, vol. 38, pp. 176-191; Weizsäcker, C.F. von (1938). Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. II. *Physikalische Zeitschrift*, vol. 39, pp. 633-646.

este un proceso más complejo que el anterior, en el que la generación de átomos de helio requiere una transformación en seis etapas. Además exige la presencia de carbono, nitrógeno y oxígeno, que actúan a modo de catalizadores de la reacción. El ciclo CNO es característico de las estrellas masivas, con masas generalmente superiores a 1,3 masas solares (Salaris & Cassini, 2005).

Como se ha dicho, el valor de la eficiencia nuclear ε va a depender de la magnitud de la fuerza nuclear fuerte. Esta interacción es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Es responsable de mantener unidos los protones y neutrones en el núcleo, permitiendo vencer la fuerza de repulsión eléctrica de los protones cargados positivamente. A diferencia de las fuerzas gravitatoria y electromagnética su alcance es finito. A distancias por debajo de un cierto valor umbral su carácter es repulsivo, haciéndose atractiva a distancias por encima de ese valor umbral. La fuerza nuclear fuerte es independiente de la carga eléctrica, de forma que la magnitud de la fuerza entre neutrones (n-n), protones (p-p) y neutrones-protones (n-p) es la misma.

En la cadena protón-protón la formación del núcleo de helio no se lleva a cabo uniendo directamente dos protones y dos neutrones, sino que conlleva un paso intermedio por el que un átomo de hidrógeno se convierte previamente en un átomo de deuterio²⁶. La estabilidad del núcleo de deuterio está directamente conectada con el valor de la fuerza fuerte. De acuerdo con Rees (2000), si la fuerza nuclear fuerte fuese más débil, de forma que el valor de ε fuese de 0,006 en vez de 0,007, el neutrón y el protón no podrían mantenerse unidos en el átomo de deuterio, haciendo este elemento inestable. «El camino hacia la formación de helio quedaría truncado. Tendríamos un universo simple compuesto de hidrógeno, cuyos átomos consisten en un protón orbitado por un electrón, y no habría química. Las estrellas aún podrían formarse en ese tipo de universo [...] pero carecerían de combustible nuclear» (Rees, 2000, p.49).

El neutrón del deuterio se forma a partir de un protón. Este paso se lleva a cabo mediante la desintegración β , un proceso propio de la interacción débil²⁷, por la cual un

²⁶ El deuterio es un isótopo estable del hidrógeno cuyo núcleo está formado por un protón y un neutrón. Su símbolo es ²H.

²⁷ La interacción débil, también llamada fuerza nuclear débil o simplemente fuerza débil, es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Es la interacción responsable de fenómenos como la radioactividad y la desintegración β . Las partículas mediadoras de la interacción débil son los bosones

protón se transforma en un neutrón, o viceversa (Bethe, 1939). Este proceso es muy lento, tomando del orden de 10^9 años. A pesar de su lentitud, la enorme cantidad de hidrógeno presente en las estrellas y su larga vida media, es suficiente para mantener un ritmo apropiado de producción de neutrones.

La fuerza electrostática con la que se repelen dos protones en el núcleo atómico es tan intensa que la fuerza nuclear fuerte de los protones por sí sola es insuficiente para mantenerlos unidos. Es necesaria la presencia de neutrones para mantener estable el núcleo, dado que los neutrones aportan unidades de fuerza nuclear fuerte sin añadir repulsión eléctrica. Si el valor de ϵ fuese de 0,008 en vez de 0,007 resultaría en una interacción fuerte que sin necesidad de neutrones habría vencido la repulsión eléctrica de los protones del núcleo de helio, y éstos podrían formarse exclusivamente con dos protones (Rees, 2000). Al no ser necesario el lento proceso de la desintegración β , todos los átomos de hidrógeno se habrían fusionado en helio fácilmente en el universo temprano, aniquilando todo el hidrógeno disponible y eliminado la posibilidad de su utilización como combustible estelar, además de acabar con la cadena protón-protón al finiquitar el proceso de transformación de hidrógeno en deuterio, y de aquí en helio, y luego en carbono, oxígeno y los restantes elementos pesados (Auping, 2009).

La magnitud de la fuerza gravitatoria también es crucial en la determinación del ciclo de vida de una estrella. La fuerza de la gravedad controla la expansión del universo, gobierna las estructuras galácticas, dicta la órbita elíptica de los planetas y mantiene compactas las estrellas. El resultado del equilibrio hidrostático de las estrellas es la conformación de una esfera de plasma cuyo tamaño y densidad va a depender de la magnitud de la fuerza de gravitación. Una fuerza gravitatoria más fuerte implicaría una mayor densidad, niveles más altos de calor y luminosidad, y un acortamiento del ciclo de vida de las estrellas.

La gravedad constituye una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. En mecánica clásica, su valor viene dado por la ley de la gravitación universal de Newton, que dice que la fuerza se incrementa de forma directamente proporcional al producto de las masas de los objetos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa:

W^+ , W^- y Z (igualmente, los fotones los gluones y los gravitones son las partículas portadoras de las fuerzas electromagnética, fuerte y gravitatoria, respectivamente).

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

donde m_1 y m_2 son las masas de los objetos, d la distancia entre ellos y G la constante de gravitación universal.

Una característica sorprendente e inexplicada de la gravedad es su pequeño valor relativo en comparación con cualquiera de las otras tres interacciones. Por ejemplo, la fuerza nuclear fuerte es 10^{40} veces más fuerte que la gravedad (Barrow & Tipler, 1986). La fuerza gravitatoria es siempre atractiva, mientras que la fuerza eléctrica puede ser atractiva o repulsiva. Como es sabido, dos cargas eléctricas se atraerán o repelerán en función del signo de su carga; sin embargo, dos objetos masivos siempre se atraen. Dos protones ejercerán mutuamente dos tipos de fuerzas, una eléctrica de repulsión y una gravitatoria de atracción, ambas dependiendo del cuadrado de la distancia. Rees (2000) denomina N a la relación entre la magnitud de ambas interacciones, y dado que ambas dependen de la distancia del mismo modo, es independiente de este parámetro. El valor de esta relación es:

$$N = \frac{f_e}{f_g} = 10^{36}$$

donde f_e es la magnitud de la fuerza eléctrica y f_g la magnitud de la fuerza gravitatoria. El valor de ambas fuerzas está tan radicalmente desequilibrado a favor de la fuerza eléctrica que ésta es treinta y seis potencias de diez más fuerte que la fuerza de atracción entre dos protones. De ahí que en el estudio de las reacciones químicas pueda despreciarse la interacción gravitatoria. Puede sorprender a la vista de este valor tan débil, cómo resulta ser la gravedad la que determina la evolución y estructura del universo, o cómo un planeta es capaz de retener los objetos de su superficie. Esto ocurre debido a que los objetos astronómicos están formados por una ingente agregación de materia, única forma de que la contribución conjunta de todas las partículas que forman el objeto tenga unos efectos gravitatorios apreciables²⁸. Es gracias a que la gravedad es tan débil lo que da lugar a que cualquier estrella típica sea tan masiva.

²⁸ El Sol tiene una masa aproximada de $1,989 \times 10^{30}$ Kg. Considerando que las masas del protón y el neutrón son aproximadamente de unos 10^{-27} Kg, nuestra estrella tiene una masa equivalente a unos 10^{57} nucleones, un número inconcebiblemente grande.

Si la fuerza de la gravedad fuese un poco más fuerte, de modo que en vez de ser 10^{36} veces más débil que la fuerza electromagnética lo fuese en un factor de 10^{30} veces, veríamos un universo muy diferente. De acuerdo con Rees (2000), las galaxias evolucionarían mucho más rápidamente, y su tamaño sería menor del que vemos actualmente. Esto provocaría que las estrellas estuvieran mucho más cerca unas de otras, comprometiendo la estabilidad de las órbitas planetarias.

Además, dado que la fuerza gravitatoria debe igualar la presión de radiación para mantener en equilibrio las estrellas, al ser la gravedad más fuerte, las estrellas serían más densas y más calientes y verían aumentado el ritmo de conversión de átomos de hidrógeno en helio. Con el incremento de la fuerza de la interacción gravitatoria reseñado, el Sol acortaría su ciclo de vida en una proporción de un millón (Rees, 2000). Si su ciclo de vida es de unos 10.000 millones de años, habría agotado su combustible en poco más de 10.000 años, tiempo insuficiente para que la vida hubiese emergido en alguno de los planetas que orbitan a su alrededor.

Collins (2009) va mucho más lejos en la consideración del ajuste fino. Una variación de tan solo una parte en 10^{60} en la fuerza de la gravedad, más fuerte o más débil, habría provocado o bien el colapso inmediato del universo tras su nacimiento o una expansión demasiado rápida para permitir la formación de sistemas estelares. En el mismo sentido se expresa Davies (1994) cuando se refiere a cómo el carácter finamente ajustado del balance entre la fuerza expansiva del big bang y la fuerza atractiva de la gravitación ha permitido un universo viable para la existencia de organismos vivos: «En el llamado tiempo de Planck (10^{-43} segundos [tras el nacimiento del universo], el instante más remoto en el que el concepto de espacio y tiempo tienen sentido), la igualación fue exacta hasta la asombrosa precisión de una parte en 10^{60} » (p. 213).

3.3. Milne y el principio cosmológico

El principio cosmológico remite a la idea de que el universo a escalas suficientemente grandes es espacialmente homogéneo e isótropo²⁹. Homogéneo en cuanto presenta las mismas propiedades en todos sus puntos, e isótropo en cuanto se presenta igual con independencia de la dirección en la que observemos. Es homogéneo porque el universo

²⁹ «En una escala al menos tan grande como la distancia entre cúmulos de galaxias, o sea, unos 100 millones de años luz» (Weinberg, 1977, p.17).

parece el mismo independientemente de que nos situemos en la Tierra o en una galaxia a dos millones de años luz de distancia, y es isótropo porque a grandes distancias, en cualquier lugar que nos situemos parece el mismo sin importar hacia donde miremos. Desde un punto de vista filosófico, el principio cosmológico es una extensión del principio de mediocridad, en cuanto no existen observadores ni fenómenos privilegiados.

El físico y filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916), conocido a nivel general por dar su nombre a la onda de presión que crean los cuerpos que se mueven a velocidades superiores a la del sonido, había escrito a finales del siglo XIX un libro titulado *El desarrollo de la mecánica*³⁰ en el que había postulado la idea de que la masa inercial no es una característica intrínseca de los objetos en movimiento, sino que dependía de la existencia de otros objetos con los que pudiesen interactuar. La segunda ley de Newton establecía que para que un cuerpo adquiriese una cierta aceleración alguna fuerza tenía que ejercerse sobre él. La cuestión que planteaba Mach era que para que esa aceleración tuviese sentido tenía que establecerse con respecto a algo físico, porque la exclusiva vinculación a un supuesto sistema de referencia inercial era establecer un nexo con un objeto meramente abstracto. Es decir, era necesario considerar la distribución de la materia a grandes escalas para poder establecer determinadas leyes de la física, particularmente las referidas a los movimientos absoluto y relativo.

En las primeras décadas del siglo veinte el físico alemán Albert Einstein (1879-1955) ya conocía el trabajo de Mach. Reformuló la idea de que los sistemas inerciales debían referirse necesariamente a toda la masa circundante, denominándolo principio de Mach. Esta idea sería trascendente en el devenir de los desarrollos teóricos de Einstein, desde el punto que parece claro que las ideas machianas que negaban el carácter absoluto de la inercia jugaron un importante papel en el desarrollo de la relatividad general (Lichtenegger & Mashhoon, 2007). Del mismo modo que la idea de la constancia de la velocidad de la luz fue una intuición certera para el éxito de la relatividad restringida, en el desarrollo de la relatividad general lo fue la concepción de un universo homogéneo a gran escala, con densidad suficiente como para curvar el espacio-tiempo. Cuando una teoría científica comienza a dar sus primeros pasos, suele enfrentarse a problemas epistemológicos que para enfrentarlos requieren de una

³⁰ Mach, E. (1883). *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*. Leipzig: Brockhaus.

simplificación inicial, generalmente en forma de reducción del número de grados de libertad. Una vez aceptada la teoría general de la relatividad, quedaba el reto de aplicar las nuevas ecuaciones de la gravitación al universo en su conjunto, lo cual requería simplificar el problema. Esto se llevó a cabo asumiendo alguna forma concreta de distribución de la materia, en este caso considerar al universo homogéneo e isótropo, lo cual hacía la tarea mucho más fácil que abordar su análisis considerando cualquier forma aleatoria de distribución de la materia.

En 1935 Edward Milne (1896-1950) publicó el libro *Relatividad, gravitación y estructura del mundo*³¹. En el año en que escribió el libro, Milne desarrollaba su actividad académica como profesor de la cátedra *Rouse Ball* de matemáticas del *Wadham College* de la Universidad de Oxford, donde desde 1929 se dedicaba al estudio de la estructura interna de las estrellas. Posteriormente, a partir de 1932, pasó a centrarse en cuestiones más relacionadas con el fenómeno de la expansión del universo. Dedicado a esta nueva disciplina, desarrolló un modelo cosmológico alternativo a los basados en la relatividad general, al que denominó relatividad cinemática. En su libro de 1935 presentó esta idea. Milne presumía un universo plano, un espacio euclídeo infinito y algunas consideraciones cinemáticas. Defendía que para explicar la expansión del universo sólo necesitaba de dos postulados, por un lado que la velocidad de la luz era constante y por otro el que denominó principio cosmológico, término que él mismo introdujo en 1933, y que para Milne constituía un postulado básico en su teoría (Kragh, 1996). Este concepto patrocinaba la idea de que el cosmos debía parecer el mismo para cualquier observador con independencia de su localización, incluyendo las nociones de homogeneidad e isotropía a gran escala. El principio cosmológico se vio apoyado con la formulación de la ley de Hubble y el establecimiento de una proporcionalidad entre las distancias a que se encuentran las galaxias y su velocidad de recesión.

El principio cosmológico sugerido por Milne, unido a la necesidad de unas condiciones iniciales caracterizadas por un estado de súper-baja entropía en el universo primitivo visto en el apartado anterior, son conceptos que se encuentran muy relacionados con la existencia de un parámetro que va a determinar la intensidad con que se mantienen gravitacionalmente cohesionadas las grandes estructuras del universo

³¹ Milne, E.A. (1935). *Relativity, Gravitation and World Structure*. Oxford: Oxford University Press.

(estrellas, galaxias, cúmulos galácticos, agujeros negros, etc.). De acuerdo con Rees (2000) esta fuerza de cohesión indica la intensidad con que estas estructuras se mantienen unidas. Se representa por una constante adimensional que da cuenta de la energía que sería necesaria para proceder a su disgregación en relación a su energía en reposo³²

$$Q = \frac{E_{disgregación}}{E_{reposo}}$$

Debido a que la fuerza de la gravedad es muy débil, el valor de Q resulta muy pequeño. «Para la estructuras más grandes de nuestro universo, cúmulos y súper-cúmulos de galaxias, el valor de Q es aproximadamente de una parte en cien mil» (Rees, 2000, p.106). El valor de esta constante remite en último término al grado de rugosidad del universo primitivo, y de ahí a la textura del universo actual. Las mediciones de las anisotropías del fondo cósmico de microondas efectuadas por la sonda WMAP de la NASA determinaron su casi total homogeneidad e isotropía, salvo por las pequeñas irregularidades representadas por un valor tan reducido de Q como 0,000073 (NASA/WMAP Science Team, 2014)³³.

Variaciones en este valor de Q ($7,3 \times 10^{-5}$) implicaría distintas formas de agregación de la materia. De acuerdo con Rees (2000) si el valor de Q fuese ligeramente menor que 1×10^{-5} , habría resultado en un universo repartido en estructuras más pequeñas y más disgregadas en el espacio. Las galaxias serían estructuras más diluidas, en las que el proceso de formación de estrellas sería lento e ineficiente, y en las que el material rico en elementos más pesados que el hidrógeno, necesario para la formación de sistemas planetarios óptimos para el desarrollo de la vida, habría sido expulsado y dispersado a regiones extragalácticas, excluyéndose la posibilidad de formación de estrellas y planetas. Si el valor de Q fuese de alrededor de $0,1 \times 10^{-5}$, toda la materia del universo estaría en estado gaseoso.

³² La energía en reposo de un objeto masivo viene dada por la fórmula $E=mc^2$.

³³ Este valor proviene de la medición de las fluctuaciones térmicas presentes en el fondo cósmico de microondas (CMB). Concretamente, la sonda WMAP ha determinado que la temperatura a que se encuentra el CMB es de 2,725 K, y que la fluctuación de temperatura entre las zonas más calientes y las más frías es de 0,0002 K.

Por el contrario, valores mayores de Q que 10×10^{-5} (manteniendo la misma notación) remitirían a una mayor rugosidad, resultando en galaxias altamente densas, con los sistemas estelares soportando tales inestabilidades gravitatorias que haría muy difícil la formación de sistemas planetarios. Valores muy altos de Q , podría redundar en que toda la materia quedase confinada en agujeros negros supermasivos. Por lo tanto, solo aquellos valores de Q estrechamente ligados al que observamos, permitiría la formación de galaxias, estrellas y sistemas planetarios estables, sin los cuales se hace difícil imaginar la posibilidad de aparición de organismos vivos.

3.4. Einstein y la constante cosmológica

En la primavera de 1905 Einstein escribía al matemático Konrad Habicht, su amigo y padrino de boda dos años antes: «¿Por qué no me has enviado todavía tu tesis? ¿No sabes que yo sería el único que la iba a leer con interés y placer? A cambio, te prometo cuatro artículos [...] el primero [...] es muy revolucionario» (Hoffmann, 1993, p.31). Se hace imposible sobredimensionar la importancia de los trabajos presentados por Einstein a lo largo de ese año. En el primero, el que había referido a su amigo Habicht, *Sobre un punto de vista heurístico referente a la emisión y transformación de la luz*³⁴, ofreció una explicación del efecto fotoeléctrico, introduciendo la idea de que la energía se intercambia en forma de paquetes discretos, dotando al cuanto de energía de una realidad física más allá de la utilidad matemática que había supuesto para Max Planck (1858-1947). Denominó *Lichtquanten* a estos cuantos de luz, término al que el químico estadounidense Gilbert N. Lewis (1875-1946) daría en 1926 la denominación definitiva de fotón. En el segundo, *Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario requerido por la teoría cinética molecular del calor*³⁵, estudió el conocido como efecto browniano, en el que haciendo uso de las herramientas aportadas por la incipiente mecánica estadística aportó evidencia empírica suficiente para demostrar la existencia de los átomos. El tercer trabajo, *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*³⁶, sienta las bases de la relatividad restringida, en la que

³⁴ Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, vol. 17, no. 6, pp. 132-148.

³⁵ Einstein, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, vol. 17, no. 8, pp. 549-560.

³⁶ Einstein, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, vol. 17, no. 10, pp. 891-921.

armoniza, en ausencia de interacción gravitatoria, el electromagnetismo de Maxwell con las leyes de la mecánica, postulando que la velocidad de la luz en el vacío es la misma para cualquier observador con independencia de la velocidad de la fuente emisora de luz, y que las leyes de la física son invariantes en todos los sistemas inerciales. Más tarde, en el contexto de la relatividad general, Einstein extendería la relatividad especial también a los sistemas no inerciales. En el cuarto trabajo, de solo tres páginas, *¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?*³⁷, aparece por primera vez la relación de equivalencia entre masa y energía, aunque aún no en la forma de la ecuación $E = mc^2$, que no vería la luz hasta unos años más tarde³⁸.

Los estudios sobre sistemas relativistas estaban ya muy avanzados en la primera década de 1900. Tanto el matemático francés Henri Poincaré (1854-1912) como el físico holandés Hendrik Lorentz (1853-1928) ya disponían en 1905 de todos los elementos de la relatividad especial antes de que Einstein presentara su teoría, y mostraban tan excelente comprensión de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento que les podían haber llevado a la formulación de la teoría. De hecho, como indica Hoffmann (1993), tanto en el intento de reconciliación que formuló Lorentz en 1904 entre el experimento con resultado negativo de Michelson-Morley y las ecuaciones de Maxwell, como en los dos artículos de Poincaré de 1905, titulados ambos *Sobre la dinámica del electrón*³⁹, ya aparecían prácticamente todas las fórmulas matemáticas del artículo sobre la relatividad de Einstein. Pero ni se atrevieron a abandonar el concepto de éter, ni llevaron a sus últimas consecuencias el principio de relatividad⁴⁰.

³⁷ Einstein, A. (1905). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, vol. 18, no. 13, pp. 639-641.

³⁸ En la página tres de su artículo, Einstein se refiere a esta equivalencia entre masa y energía como: "Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um L/V^2 " (Si un cuerpo emite la energía L en forma de radiación, su masa queda reducida por L/V^2), donde V es la velocidad de la luz en el vacío. La ecuación $E = mc^2$ que establecía definitivamente la equivalencia entre masa y energía apareció en un artículo de 1907 publicado en *Jahrbuch der Radioaktivität* (Anuario de la Radiactividad).

³⁹ Poincaré, H. (1906). Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, vol. 21, no. 1, pp. 129-175.

⁴⁰ Según la afirmación de George FitzGerald y Hendrik Lorentz, si A en reposo observa a B en movimiento, comprobará que las medidas longitudinales de B se acortan. Pero solo Einstein se atrevió a afirmar que para B las medidas de A también se acortarían, cuando la idea general era que B observaría que las medidas de A eran más largas que las suyas.

Gracias a una serie de trabajos que fueron publicados a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX⁴¹, Maxwell llevó a cabo avances trascendentales en el estudio de la electricidad y el magnetismo: formuló matemáticamente los conceptos geométricos de Faraday; introdujo las superficies equipotenciales; a partir del concepto de líneas de fuerza distinguió entre fuerza y flujo; sugirió una interpretación mecánica para los fenómenos asociados al electromagnetismo; formuló el conjunto de ecuaciones (ecuaciones de Maxwell) que describían el campo electromagnético; y, relacionando la densidad y la rigidez del medio elástico que había ideado sobre el que se propagaban las perturbaciones, y ésta con las permeabilidades eléctricas y magnéticas, estableció la velocidad a la que se propagaban las ondas electromagnéticas, que resultó ser de un valor muy aproximado al que anteriormente el físico francés Armand Fizeau (1819-1896) había obtenido para la luz (Solís y Sellés, 2009), lo que le llevó a identificar la luz como un fenómeno electromagnético. Sus desarrollos lograron unificar bajo una misma teoría la electricidad y el magnetismo.

Aun así, las ecuaciones de Maxwell adolecían de un problema. Cuando se les aplicaba las transformaciones de Galileo⁴² no se mantenían invariantes, como sí ocurría cuando tal transformación se aplicaba a las leyes de la mecánica clásica. Un conflicto que fue resuelto en 1904 cuando Lorentz propuso un nuevo conjunto de ecuaciones, conocidas más tarde como transformaciones de Lorentz⁴³. Corregían las transformaciones de Galileo, de modo que podían ser aplicadas a las ecuaciones de Maxwell sin que éstas cambiaran de forma cuando se cambiaba de sistema de referencia. Unas transformaciones que a bajas velocidades se reducían a las de Galileo.

⁴¹ Maxwell, J.C. (1855). On Faraday's Lines of Force. Part I. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 10, pp. 27-51; Maxwell, J.C. (1856). On Faraday's Lines of Force. Part II. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 10, pp. 51-83; Maxwell, J.C. (1861). On Physical Lines of Force. Part I. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. XXI, no. 139, pp. 161-175; Maxwell, J.C. (1862). On Physical Lines of Force. Part II. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. XXI, no. 140, pp. 281-291; Maxwell, J.C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, pp. 459-512; Maxwell, J.C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press.

⁴² Estas transformaciones son un conjunto de ecuaciones que permiten transformar las coordenadas de los sistemas de referencia inerciales, de modo que para todos ellos se verifique que las leyes de la mecánica sean invariantes.

⁴³ Lorentz, H.A. (1904). Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, vol. 6, pp. 809-831.

A finales del siglo XIX no se entendía la propagación de una onda si no era como consecuencia de la difusión de una deformación del medio sobre el que se propagaba, al estilo de como se propagan las olas en un estanque de agua. De esta idea no escapaba la naturaleza ondulatoria de la luz, que obligaba a postular la existencia de un éter cuya perturbación permitiera la propagación de las ondas electromagnéticas. Este éter era sugerido además como sistema de referencia absoluto. Pero los científicos se enfrentaban a un problema experimental que era difícil de encajar con esta hipótesis. Todos los intentos de demostrar su existencia resultaban en fracaso.

Dado que como se pensaba entonces la Tierra se está moviendo en el seno de un éter que se supone en reposo, se especulaba que debería existir una especie de "viento del éter" que se dejaría notar sobre cualquier objeto situado en la Tierra, al modo como un motorista siente el viento cuando se mueve con respecto a la atmósfera en calma. Siendo así, teniendo en cuenta que de acuerdo con Maxwell la luz se propagaba en el éter a una velocidad constante c^{44} , se pensaba que podía ser factible medir la velocidad con que la Tierra se movía con respecto al éter, mediante la comparación de la velocidad de la luz cuando ésta se mueve en la misma dirección y sentido del movimiento de la Tierra, con la velocidad medida en la dirección y sentido contrarios, dado que las leyes de la mecánica de Galileo-Newton establecían la composición del vector velocidad por adición y sustracción de velocidades relativas, algo que se pensaba también debía cumplir la luz. Algo similar a lo que le ocurre a un nadador en un río que ve variar su velocidad cuando nada a favor o en contra de la corriente del agua. Con estas premisas, en 1887 los físicos estadounidenses Albert Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923) realizaron un célebre experimento en la *Case School of Applied Science* de Cleveland, con el que buscaban medir la velocidad de la Tierra respecto del éter⁴⁵. El desenlace sin embargo resultó inesperado, al no detectarse cambio alguno en la velocidad de la luz.

⁴⁴ Esta velocidad suele tomarse aproximadamente como 3×10^8 m/s.

⁴⁵ Michelson y Morley emplearon un método de medición indirecto. Utilizaron un interferómetro diseñado por el propio Michelson que disponía de dos brazos perpendiculares sobre los que se proyectaban sendos haces de luz, los cuales se hacían reflejar cada uno en un espejo, haciéndolos coincidir nuevamente en un detector. Al hacer girar el interferómetro, se cambiaba la orientación de los brazos con respecto al movimiento del planeta. Se esperaba así medir la variación en la velocidad de la luz cuando está se propagaba en la dirección del movimiento de la Tierra con respecto a la dirección perpendicular a dicho movimiento, por medio del diagrama de interferencias generado en el detector.

Primero George Fitzgerald (1851-1901) en 1889 y más tarde, de manera independiente, Lorentz en 1892, aventuraron una explicación al resultado del experimento de Michelson y Morley. Una carga puntual en reposo genera un campo que es radial y simétrico. Sin embargo, cuando la carga experimenta un movimiento rectilíneo uniforme, el campo generado sufre una deformación, un efecto que fue calculado en 1888 por el científico británico Oliver Heaviside (1850-1925). La geometría del campo quedaba modificada de tal forma que éste se comprimía en la dirección del movimiento. Fitzgerald y Lorentz confirmaron que la contracción que sufría el campo era de la misma magnitud que el que experimentaría un objeto también en movimiento rectilíneo uniforme. Este fenómeno, en el experimento de Michelson-Morley, habría contraído el brazo del interferómetro en la dirección del viento del éter. Sugerían que, del mismo modo que el campo quedaba comprimido, las fuerzas moleculares del material en movimiento sufrían la misma deformación, resultando en el experimento citado en un acortamiento del trayecto que la luz habría tenido que recorrer, compensando el resultado que se esperaba encontrar (Solís y Sellés, 2009).

En cualquier caso, el éter seguía estando ahí, y no sería hasta el año 1905 en que Einstein acabaría con los sistemas de referencia absolutos, desechando por innecesaria la idea de la existencia del éter (Sellés, 1984).

El principio de relatividad galileano establecía que en los sistemas inerciales no existían observadores privilegiados; no hay resultado experimental posible que pueda discernir un movimiento rectilíneo uniforme del estado de reposo. Poincaré, por su parte, estaba convencido de que los fenómenos electrodinámicos tampoco violaban el principio de relatividad, un término por él introducido (DiSalle, 2014). Según este principio, las leyes de la física habían de ser las mismas para un observador fijo que para uno en movimiento uniforme respecto de él, en cuanto han de ser iguales en todos los sistemas inerciales. Como expuso en su trabajo *The Principles of Mathematical Physics* presentado en el *Congress of Arts and Science* celebrado durante la Exposición Universal de St. Louis de 1904, este principio debía ser entendido como una ley general de la naturaleza y por tanto las leyes de Maxwell también deberían ajustarse al mismo. Efectivamente, como escribió en *Ciencia y Método* en 1908: «Es imposible eludir la impresión de que el principio de relatividad es una ley general de la naturaleza, y que nunca podremos demostrar, por cualquier método imaginable, nada excepto velocidades

relativas. Y por esto no sólo me refiero a las velocidades de los cuerpos con respecto al éter, sino a las velocidades de los cuerpos con respecto a otros cuerpos» (Poincaré, 1914, p.143).

Al tiempo que se profundizaba en la comprensión del electromagnetismo, aumentaba la falta de entendimiento que se percibía entre la nueva electrodinámica de Maxwell y la mecánica newtoniana (Sánchez Ron, 2014). En su artículo de 1905 citado anteriormente, *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, Einstein enfrentó el problema discutiéndolo desde un planteamiento diferente. Partió de considerar constante la velocidad de la luz en cualquier sistema de referencia y extendió los trabajos previos de Lorentz, basados en la cinemática exclusivamente de los cuerpos cargados eléctricamente, a cualquier sistema físico, estuviese sometido o no a las leyes del electromagnetismo. Cimentó su trabajo en dos consideraciones básicas: 1) que la velocidad de la luz en el vacío es la misma para cualquier sistema de referencia inercial; y 2) que las leyes físicas adoptan la misma forma en todos los sistemas con movimiento uniforme. Con su trabajo, Einstein consiguió compatibilizar ambos paradigmas, en lo que vino a denominarse relatividad especial.

Einstein había resuelto las discrepancias entre el electromagnetismo de Maxwell y la mecánica de Newton, pero todos los sistemas a los que hacía referencia el principio de relatividad eran sistemas inerciales, es decir, sistemas en los que se verificaban movimientos uniformes, y en ese sentido se trataba de un principio de relatividad restringido. Ahora era necesario generalizar esta teoría a los cuerpos acelerados, y por analogía, a la gravitación. Una teoría de la relatividad, en este caso de carácter general, que respondiese a la pregunta de si el principio de relatividad sería también aplicable a los sistemas no inerciales, es decir, a los sistemas acelerados. Según el historiador de la ciencia Sánchez Ron (1993), en 1907 Einstein ya se estaba planteando este problema, tal y como lo expuso cuando le fue solicitado un artículo recopilatorio sobre la relatividad para la revista *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, en el que Einstein escribía:

Hasta ahora hemos aplicado el principio de relatividad -es decir, la suposición de que las leyes de la naturaleza son independientes del estado de movimiento del sistema de referencia- solamente a sistemas de referencia no acelerados. ¿Es concebible que el principio de relatividad sea válido también para sistemas acelerados entre sí? (Sánchez Ron, 1993, p.11)

Estas ideas le llevaron ese mismo año a formular el principio de equivalencia, afirmando que un sistema inmerso en un campo gravitatorio es indistinguible de un sistema de referencia no inercial acelerado. Pero acercarse a una formulación general de la relatividad iba a exigir un paso previo trascendental: interpretar geoméricamente la teoría expuesta en 1905. Este paso fue dado por el matemático geómetra lituano Hermann Minkowski (1864-1909), antiguo profesor de Einstein en el Politécnico de Zúrich, quien afirmó que la teoría especial de la relatividad podía ser entendida mejor bajo la forma de una sola entidad espacio-tiempo de cuatro dimensiones⁴⁶. De acuerdo con Hoffmann (1993), el anuncio fue hecho por Minkowski el 21 de septiembre de 1908 en el LXXX Congreso de Científicos y Físicos Alemanes, donde proclamó que: «A partir de ahora, el espacio en sí mismo y el tiempo en sí mismo están llamados a hundirse por completo en la oscuridad; solo una especie de unión entre ambos podrá conservar una existencia independiente» (p.70).

Hasta entonces siempre se había supuesto que el espacio que llenaba el universo debía ajustarse a la geometría euclidiana. En el siglo XIX, gracias a las aportaciones de Friedrich Gauss en Alemania, Nikolai Lobachevski en Rusia y János Bolyai en Hungría, ya eran conocidas sin embargo otras geometrías no-euclidianas. En 1854 el matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866) postuló que el concepto de curvatura era intrínseco al espacio, y señalaba la existencia de tres geometrías con curvatura constante: el espacio plano o euclídeo (curvatura cero), el espacio esférico (curvatura positiva) y el espacio hiperbólico (curvatura negativa).

La geometría del espacio sería una cuestión de vital importancia en la formulación de la relatividad general. De acuerdo con Kragh (2007) fue en 1912 cuando Einstein cayó en la cuenta de que las geometrías no euclídeas podían ayudarle en la búsqueda de su nueva teoría de la relatividad. Ese mismo año ya había llegado a la conclusión de que un espacio-tiempo cuya topología dependiera de la materia había de ser el fundamento de su nueva teoría de la gravitación (de Azcárraga, 2005). En un discurso que Einstein ofreció en Kyoto en 1922 recordando las vicisitudes del descubrimiento de la teoría manifestaba:

⁴⁶ El denominado espacio de Minkowski.

Hasta entonces yo no supe que Bernhard Riemann había debatido los fundamentos de la geometría profundamente. Yo recordaba las conferencias sobre geometría que en mis años de estudiante daba Carl Friedrich Geiser en las que discutía la teoría de Gauss. Me encontré que las bases de la geometría tenían un profundo significado físico en este problema. (Ono, 1982, p.47, citado en Kragh, 2007, p.129)

El tránsito hacia la formulación definitiva de la teoría le llevó también a establecer el principio de covarianza general⁴⁷. Pero su aplicación estaba enfrentando a Einstein a gravísimos problemas matemáticos. Como escribió en una carta de 29 de octubre: «Comparada con este problema, la teoría original de la relatividad es un juego de niños» (Hoffmann, 1993, p.92). Pero en estos momentos de dificultades, cuando la complejidad matemática del problema podía haberlo llevado a sucumbir, encontró el apoyo que necesitaba. Se trataba de su amigo y antiguo compañero de estudios, el matemático húngaro Marcel Grossmann (1878-1936). El trabajo de doctorado de Grossmann había versado sobre las geometrías no euclidianas, y con él emprendió Einstein el aprendizaje del cálculo tensorial⁴⁸. Con la colaboración de Grossman desarrollo en 1913 la primera teoría de tensores de la gravitación, donde aunque aún no covariantes, ya aparecían las primitivas ecuaciones de campo de la gravedad.

Después de un arduo y duro trabajo, el 25 de noviembre de 1915 Einstein finalmente publicó *Las ecuaciones de campo de la gravitación*⁴⁹, que fueron presentadas ante la Academia Prusiana de las Ciencias. Allí se encontraban las ecuaciones que con tanto ahínco había estado buscando. La relatividad general corrigió la teoría de la gravitación de Newton como teoría universal tras doscientos cincuenta años de un éxito predictivo indudable. La gravedad dejaba de ser una fuerza externa para convertirse en un efecto que la presencia de una masa provocaba en el espacio-tiempo, dentro de un universo cuatridimensional curvado. Definitivamente, la gravedad difería radicalmente de la naturaleza de las otras fuerzas conocidas. Los cuerpos no seguían trayectorias marcadas por los efectos de una fuerza de atracción, en su lugar las órbitas celestes

⁴⁷ Este principio afirma que todas las ecuaciones de la física deben tomar la misma forma con independencia del marco de referencia.

⁴⁸ Siendo una matriz una disposición bidimensional de números, un tensor es una entidad geométrica que se puede representar por medio de una matriz multidimensional.

⁴⁹ Einstein, A. (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, vol. 44, pp. 844-847.

venían determinadas por la deformación que los objetos masivos provocaban en la geometría del tejido del espacio-tiempo.

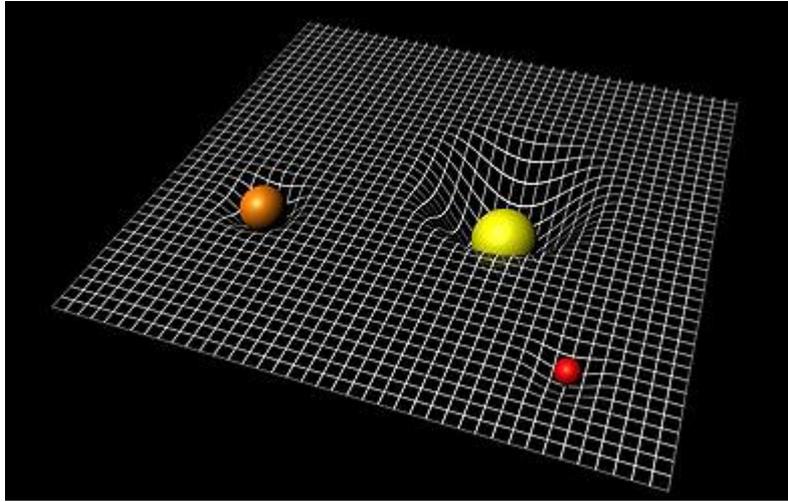


Figura 2. De acuerdo con la Teoría General de la Relatividad, la gravedad ya no es una fuerza, sino el efecto de deformación que provoca la masa en el espacio-tiempo, siendo la magnitud de la deformación proporcional a la cantidad de masa. [Créditos: ESA / C. Carreau]

La ecuación de campo es el núcleo de la relatividad general, que expresa cómo la densidad de energía del universo determina la geometría del espacio-tiempo. Viene dada por la expresión

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

El término de la izquierda representa la geometría del espacio-tiempo; contiene el tensor de Ricci $R_{\mu\nu}$, el escalar de curvatura de Ricci R y el tensor métrico $g_{\mu\nu}$. El término de la derecha da cuenta de la distribución de materia y energía; en él aparecen la constante de la gravitación de Newton G y el tensor energía-momento $T_{\mu\nu}$ ⁵⁰. La parte de la izquierda de la ecuación refleja la curvatura del espacio, la parte derecha representa la materia-energía. La ecuación nos dice que en un volumen determinado de espacio, su curvatura es proporcional a la cantidad de materia y energía presentes en ese volumen de espacio.

En 1915, el universo conocido se reducía a nuestra propia galaxia, y la presunción entre los científicos ocupados de la cosmología era que el universo era estático. Entre ellos se encontraba Einstein. Cuando de las ecuaciones de la relatividad general se puso

⁵⁰ No es de extrañar que aparezca la constante G en la ecuación, dado que la relatividad general incluye necesariamente las ecuaciones de la gravitación de Newton.

de manifiesto que el universo tenía que estar en expansión o en contracción, introdujo *ad hoc* una constante en las ecuaciones para salvar el carácter estático del universo, «una nueva fuerza “antigravitatoria”, que, al contrario que las otras fuerzas, no provenía de ninguna fuente en particular, sino que estaba inserta en la estructura misma del espacio-tiempo» (Hawking, 1988, p.66). Para hacer que las ecuaciones dieran cuenta de un universo estático, en un artículo de 1917 titulado *Consideraciones cosmológicas en la Teoría General de la Relatividad*⁵¹, Einstein añadió a la ecuación de campo un término al que denominó constante cosmológica, el cual representó mediante la letra griega Λ

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

que colocó en el lado izquierdo de la ecuación, multiplicando al tensor métrico del espacio-tiempo, dando a entender que era una propiedad del propio espacio. Como se entiende hoy día, conceptualmente ligada a la energía del vacío, la constante cosmológica correspondería colocarla en el lado derecho, en cuanto manifestación de una forma de energía. El valor del coeficiente Λ es trascendental para el destino final del universo. Si este término es de valor positivo actúa al modo de una fuerza repulsiva, resultando en una expansión acelerada del espacio; si es negativo, participa en su contracción y eventual colapso.

Sin embargo, a finales de la década de 1920 quedó afianzada la idea de que las galaxias se alejaban de nosotros con independencia de la dirección en que se observase. A ello contribuyeron decisivamente el sacerdote y profesor de física belga Georges Lemaître (1894-1966) en 1927, con su hipótesis de un universo en expansión consistente con la relatividad general, y especialmente la medición del corrimiento al rojo de la luz emitida por un gran número de galaxias que el astrónomo estadounidense Edwin Hubble (1889-1953) realizó en 1929. Quedó establecido que el universo estaba en expansión y la constante introducida por Einstein fue abandonada durante décadas.

Existen configuraciones de estrellas binarias formadas por una estrella enana blanca y una gigante roja. En estos casos la masa de la enana blanca se incrementa a costa de extraer material a la segunda. Cuando se alcanza el límite crítico de

⁵¹ Einstein, A. (1917). Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, vol. 6, pp. 142-152.

aproximadamente 1,38 masas solares, la enana blanca explota, dando lugar a lo que se conoce como supernova tipo Ia (SNIa). Como la masa de estas estrellas en explosión es siempre la misma, producen un brillo absoluto que es muy parecido entre todas ellas. Es por esto que estas supernovas se suelen utilizar como candelas estándar. De ahí, establecido espectroscópicamente que se trata de un tipo Ia y conociendo su brillo aparente, se puede estimar con bastante exactitud la distancia a la que se encuentran. En 1998, el equipo del proyecto *High-z Supernova Search Team*, dirigido por Brian Schmidt, de los Observatorios Mount Stromlo y Siding Spring de Australia, y el grupo del proyecto *Supernova Cosmology Project*, dirigido por Saul Perlmutter, del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, mediante el estudio de supernovas tipo Ia observaron que la distancia estimada de las galaxias lejanas se apartaba del valor esperado. Este descubrimiento les llevó a anunciar en sendos trabajos que la expansión del universo estaba acelerándose, y que llevaba haciéndolo durante los últimos cinco mil millones de años⁵². Constatar que el universo se estaba expandiendo de forma acelerada obligaba a postular la existencia de una supuesta energía oscura origen de una fuerza no conocida que actuaba a modo de repulsión cósmica⁵³. La constante cosmológica volvía a aparecer.

Actualmente se identifica la constante cosmológica de las ecuaciones de la relatividad general como un modelo de la energía del vacío, un tipo de energía que ya se encontraba entre las predicciones de la física cuántica. El valor de Λ viene dado por

$$\Lambda = 8\pi\rho_{\text{vac}}$$

donde ρ_{vac} es la densidad de energía del vacío. El valor de la constante cosmológica se obtiene principalmente por la agregación de dos magnitudes, la energía intrínseca del vacío debida a las fluctuaciones cuánticas⁵⁴ y la contribución de cada uno de los vacíos

⁵² Respectivamente: 1) Riess, A. et al. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, vol. 116, no. 3, pp. 1009-1038; y 2) Perlmutter, S. et al. (1999). Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal*, vol. 517, no. 2, pp. 565-586.

⁵³ La energía oscura es una forma hipotética de energía que permeabilizaría todo el espacio, produciendo una presión negativa que tiende a incrementar la aceleración de la expansión del Universo, resultando en una fuerza gravitacional repulsiva.

⁵⁴ Las fluctuaciones cuánticas del vacío son un efecto del principio de indeterminación de Heisenberg, que implica la formación de pares virtuales de partícula-antipartícula de masa m durante intervalos de tiempo muy cortos, del orden de $h/(mc^2)$, donde h es la constante de Planck y c la velocidad de la luz.

correspondientes a los campos que residen en él (Collins, 2009). Todos estos factores contribuyen de forma particular al valor total de la energía del vacío, y por ende, al de la constante cosmológica. En las escalas de los sistemas solares, galaxias y cúmulos de galaxias, la fuerza dominante es la gravedad. Pero «a escalas aún más altas, la densidad es tan baja que otra fuerza se torna como la más poderosa. El número cósmico Λ -que representa la fuerza más débil y misteriosa de la naturaleza- parece controlar la expansión del universo y su eventual destino» (Rees, 2000, p.98)

De acuerdo con Sahni (2005), la teoría predice para la constante cosmológica un valor de $\Lambda \sim 10^{66} \text{ GeV}^4$. Sorprendentemente este valor es mucho más alto que el valor realmente observado, que es de 10^{-57} GeV^4 . Esta abismal discrepancia en 123 órdenes de magnitud, junto con el valor tan ridículamente pequeño que presenta la constante, es conocido como el problema de la constante cosmológica (Weinberg, 1989). Esta discordancia constituye a día de hoy un rotundo fracaso para la ciencia, al punto que ha sido etiquetado como la peor predicción teórica de la historia de la física y probablemente el mayor problema que actualmente enfrentan la física y la cosmología. (Burgess & Moore, 2006; Collins, 2009).

El asombroso ajustado valor que presenta la constante cosmológica para sustentar un universo habitable, ha sido considerado por Jenkins & Pérez (2010), como el problema del ajuste fino más importante que se plantea a la física teórica. En este sentido, Linde (2006) determina que la vida sólo es posible en el margen establecido para un valor de la constante cosmológica Λ tal que

$$|\Lambda| \lesssim \rho_0$$

siendo ρ_0 la densidad de energía actual del vacío, que en unidades de Planck⁵⁵ tiene un valor próximo a 10^{-120} (Tyler, 1981, citado en Barrow & Tipler, 1986, p.413). Sahni (2005) muestra el mismo argumento al ofrecer una estimación del estrecho margen de valores entre los cuales el valor de la constante cosmológica permitiría que emergiera la vida en el universo, estableciendo igualmente los límites entre

⁵⁵ Las unidades de Planck o unidades naturales es un sistema de unidades donde la constante de Planck reducida (\hbar), la constante de Coulomb (K), la velocidad de la luz (c), la constante de gravitación (G) y la constante de Boltzmann (K) se hacen igual a la unidad. Una de las principales ventajas que aporta su adopción es que los resultados de las ecuaciones físicas se hacen independientes del valor de las constantes.

$$-10^{-53}\text{GeV}^4 < \Lambda < 10^{-53}\text{GeV}^4$$

Este margen tan extraordinariamente estrecho determina que para valores más negativos de Λ el universo habría colapsado inmediatamente después del inicio de la expansión, antes de que la vida pudiera emerger. Un valor de Λ más positivo habría resultado en un universo desgarrado de inmediato por una fuerza repulsiva en una expansión exponencialmente acelerada.

En una serie de trabajos más recientes, Steven Weinberg (n. 1933) ha calculado la relación antrópica necesaria entre la densidad de energía oscura ρ_Λ y la densidad de materia total ρ_M , considerando materia ordinaria y materia oscura⁵⁶ (Casas, 2015). Estima Weinberg que el rango aceptable para la densidad de energía oscura debe estar necesariamente entre

$$-10\rho_M < \rho_\Lambda < 100\rho_M$$

verificándose de acuerdo a los datos aportados por Schneider (2010) que en nuestro universo $\rho_\Lambda \sim 3\rho_M$. Un valor que procede del hecho de que la energía oscura supone aproximadamente un 75% de la densidad total, mientras la densidad de materia oscura (21%) y materia ordinaria (4%) suponen un 25%.

En lugar del valor tan extraordinariamente pequeño que presenta, la constante cosmológica podría haber tenido un valor alto y positivo o alto y negativo. En el primer caso habría actuado como una fuerza repulsiva que se habría impuesto a la gravedad en las etapas más tempranas del universo, lo cual hubiese hecho imposible las primigenias agrupaciones de materia en el universo primitivo, que fueron la semilla de las posteriores estructuras galácticas. Si su valor hubiese sido alto y negativo, habría actuado como una fuerza atractiva que habría frenado la expansión del universo, provocando un recolapso inmediato que no hubiera permitido sobrevivir al universo el tiempo suficiente para la evolución de la vida. Como señala Hawking (1988): «Si la velocidad de expansión un segundo después del big bang hubiese sido menor, incluso en una parte en cien mil millones, el universo habría colapsado de nuevo antes de que hubiese alcanzado nunca su tamaño actual» (p.167).

⁵⁶ Se denomina materia oscura a un tipo de materia de composición desconocida conjeturada para dar cuenta de los anómalos movimientos orbitales galácticos. No es visible, dado que ni emite radiación electromagnética ni interactúa con ella.

3.5. Hubble y la expansión del universo

El efecto Doppler es un fenómeno ondulatorio que se produce cuando un objeto emisor de ondas se desplaza a una cierta velocidad con respecto a un observador. Cuando la fuente se acerca al receptor, el tiempo transcurrido en la llegada entre crestas de la onda se hace menor, debido a que cada cresta tiene que recorrer una distancia más pequeña que la que le antecede, dando la impresión que la onda posee una longitud más corta y por consiguiente una frecuencia más alta. El razonamiento es análogo cuando la fuente se aleja del observador, resultando en este caso en la impresión de experimentar una frecuencia más larga.

En un texto de 1842 titulado *Sobre la luz coloreada de las estrellas dobles y otros astros del cielo*⁵⁷, el matemático austríaco Christian Doppler (1803-1853), profesor de matemáticas y geometría práctica en la *Realschule* de Praga, postuló que el color de la luz emitida por un objeto en movimiento depende de la velocidad relativa entre el observador y la fuente de luz. Doppler quiso demostrar este principio aplicándolo al color observado en las estrellas, sugiriendo que los diferentes colores que presentaban eran debidos a su movimiento relativo con respecto a la Tierra. Una idea equivocada, dado que en la época en la que Doppler aventuró su hipótesis se desconocía que el color de las estrellas depende de su temperatura y no de su velocidad relativa, que es muy pequeña en comparación con la velocidad de la luz. En diciembre de 1848, Fizeau ofreció una charla en la Sociedad Filosófica y Científica de París con el título *El efecto del movimiento sobre el tono de las vibraciones acústicas y sobre la longitud de onda de las ondas luminosas*⁵⁸, que no fue publicada hasta 1870, donde por primera vez explicó acertadamente que la causa del fenómeno del desplazamiento de las líneas espectrales observado en las estrellas era debido al efecto Doppler⁵⁹ (Shaviv, 2012). Por este descubrimiento realizado de forma independiente, este fenómeno es a veces denominado efecto Doppler-Fizeau.

Unos años antes, en 1814-15, el óptico y físico alemán Joseph Fraunhofer (1787-1826) redescubrió un fenómeno observado una década atrás por el químico inglés

⁵⁷ Doppler, C. (1843). Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels. *Abhandlungen der Königlichen Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften*, serie 5, vol. 2, pp. 465-482.

⁵⁸ Fizeau, A. (1870). Des effets du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d'onde des rayons de lumière. *Annales de Chimie et de Physique*, série 4, t. XIX, pp. 211-221.

⁵⁹ Fizeau fue también el primero en determinar la velocidad de la luz por medios terrestres.

William Wollaston (1766-1828). Realizando mediciones con su recién desarrollado espectroscopio al objeto de calcular el índice de refracción de ciertos materiales, encontró que en el espectro de la luz solar aparecían varios cientos de líneas oscuras. La anomalía espectral fue explicada por la absorción selectiva de determinadas longitudes de onda de la luz por los elementos químicos presentes en las atmósferas solar y terrestre. Las frecuencias absorbidas generaban cada una de ellas una línea oscura en el espectro, denominadas en honor a su descubridor líneas de Fraunhofer. Dado que al igual que el resto del espectro las líneas oscuras se veían desplazadas a causa del efecto Doppler, y gracias a que la medición de las longitudes de onda de las líneas espectrales es muy exacta, este fenómeno comenzó a utilizarse rápidamente como método fiable para medir la velocidad radial con la que se alejan de la Tierra los objetos astronómicos (Weinberg, 1977).

El desplazamiento al rojo del espectro electromagnético por el efecto Doppler sería lo que llevaría a Hubble a descubrir la recesión de las galaxias. Aunque suele atribuirse a Hubble el éxito en la deducción de la relación entre la distancia de las galaxias y la velocidad a la que se alejan de nosotros, lo cierto es que su trabajo fue la culminación de otros que se venían desarrollando desde años atrás. A principios del siglo XX estaba en plena efervescencia el debate sobre la naturaleza de las nebulosas. Se discutía si se trataba de objetos de nuestra galaxia o externos a ella, algo que no podría quedar determinado mientras no se dilucidara la distancia a la que se encontraban de nosotros. Y para ello era preciso disponer de un método fiable de medición.

El astrónomo estadounidense Vesto Slipher (1875-1969), trabajando en el Observatorio Lowell de Arizona, comenzó en 1910 a tomar medidas espectrográficas de la nebulosa de Andrómeda. Dos años después, en 1912, fue el primero en observar el desplazamiento de las líneas espectrales de una galaxia. La medida de este desplazamiento servía para estimar la velocidad radial a la que un objeto luminoso se mueve, y determinar si se acerca o aleja de la Tierra. Si el desplazamiento es hacia el violeta el objeto se estaría acercando a nosotros; si el desplazamiento es al rojo el objeto se estaría alejando. Slipher constató que Andrómeda se acercaba a nosotros a una velocidad media de unos 300 Km/s, que siendo un valor mucho más alto que el observado en las estrellas de la Vía Láctea, parecía sugerir que las nebulosas eran objetos ajenos a nuestra galaxia. Continuó midiendo las velocidades de otras nebulosas,

publicando sus resultados en un pequeño informe de dos páginas en el boletín del propio observatorio⁶⁰. «Hacia 1914 Slipher tenía registradas trece velocidades [...], y hacia finales de 1925 cuarenta y cinco» (North, 1990, p.21). Salvo unos pocos casos de desplazamientos hacia el violeta, la gran mayoría de las galaxias observadas presentaban desplazamientos al rojo. Pero lo más sorprendente no era que la mayoría estuvieran alejándose de nosotros, lo más llamativo era la elevada velocidad a la que lo hacían.

Hubble había estudiado matemáticas y astronomía en la Universidad de Chicago, donde en 1917 obtuvo su doctorado con la tesis titulada *Investigaciones fotográficas de nebulosas débiles*⁶¹. Finalizada la Primera Guerra Mundial, en 1919 entró a formar parte del grupo de investigadores que trabajaban con el telescopio reflector Hooker de 2,5 metros del Observatorio del Monte Wilson en California. En 1923, mediante el estudio de la relación periodo-luminosidad de variables cefeidas en varias nebulosas espirales, ya había adelantado que la distancia que les separaba de la Vía Láctea llevaba a pensar que estas nebulosas eran en realidad objetos que no pertenecían a nuestra galaxia. El carácter extragaláctico de las nebulosas quedó confirmado después de que en 1929 Hubble estableciera la relación entre velocidad y distancia de 24 galaxias cercanas a la Vía Láctea, que publicó en un trabajo titulado *Relación entre distancia y velocidad radial en nebulosas extragalácticas*⁶², en el que afirmaba que el corrimiento al rojo determinado espectroscópicamente de la luz procedente de las galaxias es aproximadamente proporcional a su distancia a nosotros, estableciendo una relación entre velocidad de recesión y distancia que hoy es conocida como ley de Hubble⁶³. La interpretación inmediata de que las galaxias se alejaban proporcionalmente a la distancia a la que se encontraban fue que el universo se estaba expandiendo.

⁶⁰ Slipher, V.M. (1913). The radial velocity of the Andromeda Nebula. *Lowell Observatory Bulletin No. 58*, vol. II, no. 8, pp. 56-57.

⁶¹ Hubble, E.P. (1920). Photographic Investigations of Faint Nebulae. *Publications of the Yerkes Observatory*, vol. 4, part II, pp. 69-852, plates III-IV.

⁶² Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 15, no. 3, pp. 168-173.

⁶³ La ley de Hubble remite a una proporcionalidad de carácter lineal que se expresa frecuentemente como $v = H_0 D$, donde v es la velocidad de recesión, D la distancia a la galaxia y H_0 la constante de Hubble. Esta constante representa el grado de expansión del universo, siendo su valor aproximado de $67 \pm 1,2$ km/s por megapársec (Planck Collaboration, 2014). En realidad el valor de la constante decrece lentamente con el tiempo, de ahí que se prefiera la denominación de parámetro de Hubble $H(t)$.

Dejando a un lado la polémica sobre la atribución del descubrimiento, sabemos desde las observaciones de Hubble que el universo se está expandiendo⁶⁴. Una expansión que va a venir determinada por dos dinámicas contrapuestas, la fuerza de la gravedad, que tiende a recolapsar el universo, y la energía oscura, que tiende a su dispersión. La cuestión de si la expansión se verificará por siempre o no va a depender de la pugna entre estas dos fuerzas.

En un escenario donde la energía oscura y por tanto la constante cosmológica era aún irrelevante, como el acontecido en los inicios de la expansión donde la aportación de la densidad de materia a la atracción gravitatoria excedía a la contribución de la energía del vacío a la expansión, los modelos que predicen un universo isótropo y homogéneo como el que observamos requieren de la consideración de dos términos, la tasa de expansión dada por la constante de Hubble y la densidad media de materia del universo (Barrow & Tipler, 1986). Que la expansión del universo se decelere o no va a depender de si el valor de la densidad media de materia del universo ρ_m es mayor o menor que

⁶⁴ Aunque el hallazgo de la recesión de las galaxias y por extensión la demostración de la expansión del universo es universalmente atribuido a Hubble, la polémica rodea a la autoría del descubrimiento. Hubble se valió para su investigación de las medidas espectroscópicas que habían realizado previamente Milton Humason y especialmente Vesto Slipher, a quienes no citó en su trabajo. El astrofísico Mario Livio (2011) afirma que el descubrimiento de la expansión del universo se debería atribuir a Georges Lemaître, quien la habría descubierto en 1927. Lemaître habría llegado a concluir un universo relativista en expansión independientemente a las soluciones que había encontrado Friedmann en 1922, poniendo de manifiesto el hecho de que las soluciones implicaban localmente la existencia de una relación entre distancia y velocidad. El artículo de Lemaître de 1927 fue publicado originalmente en francés en la revista *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*. Sin embargo, en la traducción al inglés se omitieron precisamente los párrafos donde Lemaître establecía esta relación entre distancia y velocidad de recesión, así como una primera introducción de la posteriormente denominada constante de Hubble. La interpretación de Livio es compartida por el profesor de la Universidad de Witwatersrand en Johannesburgo David L. Block quien afirma, confrontando las versiones francesa e inglesa, que se debe a Lemaître la formulación original de la relación, y que el artículo original en francés fue meticulosamente censurado en todo lo relativo al tratamiento de las velocidades y distancias, así como en la determinación empírica de la constante H, cuando la *Royal Astronomical Society* decidió imprimir la traducción inglesa en 1931. «Sería históricamente exacto decir que la comprobación de una relación lineal velocidad-distancia se debe a las meticulosas observaciones de Hubble y Humason durante los años siguientes, pero no la formulación original de esta relación.» (Block, 2011, p.2), quien carga las tintas sobre Hubble cuando se pregunta «¿No es extraño que Vesto Slipher no fuese citado *en absoluto* en el trabajo de Hubble de 1929?» (Block, 2011, p.4) (cursivas en el original). En cualquier caso hay quienes arguyen que la censura, siendo cierta, se debió más a la solicitud de un modesto Lemaître que a un gesto malintencionado del traductor. En esa dirección apuntan Nussbaumer & Bieri (2012) cuando refieren que al requerimiento del secretario de la *Royal Astronomical Society* a Lemaître para que autorizase la publicación del artículo en inglés, éste le contestó: «No encuentro aconsejable reimprimir la discusión provisional sobre las velocidades radiales, las cuales actualmente carecen claramente de interés» (p.4).

cierto valor crítico ρ_{crit} . Si es mayor, la gravedad terminará por frenar la expansión y llevará al universo a recolapsar sobre sí mismo. Si es menor, el universo se expandirá por siempre.

La fuerza de la gravedad es directamente proporcional a la cantidad de materia, por lo que el resultado de cuán masivo sea el universo va a ser definitivo para determinar si la gravedad podrá eventualmente ganar la competición contra la energía de expansión. En el año 1932 Einstein junto con el matemático y físico holandés Willem de Sitter (1872-1934) encontraron una solución particular a las ecuaciones de campo de la relatividad general para un espacio euclídeo, donde se verifica que tanto la constante cosmológica como la curvatura del espacio tienen valores nulos⁶⁵. Este modelo, llamado de Einstein-de Sitter, verifica un valor de densidad en el universo al que se denomina densidad crítica, dado que separa los modelos de universos abiertos en expansión con geometría hiperbólica, de aquellos otros universos cerrados en contracción con geometría esférica.

Existe así un cierto valor crítico de densidad de materia por encima del cual la expansión será frenada y revertida por la gravedad. A la relación numérica entre la densidad de materia del universo (ρ_m) y esta densidad crítica (ρ_{crit}) se le denomina parámetro de densidad de materia, y se representa como Ω_m

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_{crit}}$$

Si $\Omega_m > 1$, la densidad de materia del universo será mayor que la densidad crítica y el universo resultaría frenado en su expansión. Si $\Omega_m < 1$ la densidad de materia será menor que la densidad crítica y el universo se expandirá eternamente. Según Rees (2000) la densidad media del universo ρ_m se estima actualmente en unos 0,2 átomos de hidrógeno por metro cúbico, mientras que la densidad crítica ρ_{crit} tiene un valor aproximado de 5 átomos de hidrógeno por metro cúbico. Diversos métodos de observación proporcionan valores distintos para Ω_m , tomándose el valor 0,020 como

⁶⁵ Einstein, A. & de Sitter, W. (1932). On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 18, no. 3, pp. 213-214.

valor de consenso⁶⁶. Parece por tanto que el valor de Ω_m es insuficiente para frenar la expansión.

En 1933 el astrónomo suizo de origen búlgaro Fritz Zwicky (1898-1974) analizó las velocidades orbitales de las galaxias del cúmulo de Coma, relacionando la energía cinética total de las galaxias con su energía potencial gravitatoria. Encontró que las velocidades de dispersión eran más altas de lo esperado si se atendía exclusivamente la masa de la materia visible, por lo que especuló con la existencia de algún tipo de materia además de la visible cuya naturaleza denotó como oscura⁶⁷. Un trabajo que pasó bastante desapercibido entre la comunidad científica. A finales de la década de 1960, la astrónoma estadounidense Vera Rubin (n. 1928), formando equipo con el también astrónomo estadounidense Kent Ford (n. 1931), quien había diseñado un espectrómetro de alta sensibilidad, estudiaron la dinámica de las estrellas en las galaxias espirales. Encontraron que las velocidades de rotación eran mayores que las que debían corresponderles de acuerdo a la cantidad de masa de las galaxias a las que orbitaban. Algún tipo de materia no visible debía estar influenciando gravitacionalmente las galaxias estudiadas⁶⁸. Posteriores trabajos confirmaron este descubrimiento, llevando a postular la existencia de un nuevo tipo de materia a la que se denominó materia oscura, dado que no emitía radiación electromagnética y era por tanto muy difícil de detectar.

De la composición total del cosmos, según Schneider (2010), el 21 por ciento corresponde a esta materia oscura, y sólo el 4 por ciento a la materia que conocíamos hasta ahora, la materia bariónica de la que están formadas tanto las estrellas como el gas caliente intergaláctico⁶⁹. La materia oscura se constituye por tanto como la principal responsable de la influencia gravitatoria en el universo.

La existencia de la materia oscura obligó a reconsiderar el valor asignado a la densidad de materia del universo. La mayoría de los datos siguen apuntando a un valor de Ω_m que aun con la contribución de la materia oscura continúa quedando por debajo de

⁶⁶ 0,020 en Burles, Nollet, & Turner (2001); 0,039 en Turner (2002); 0,0214 en Kirkman, Tytler, Suzuki, O'Meara & Lubin (2003).

⁶⁷ Zwicky, F. (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, vol. 6, pp. 110-127.

⁶⁸ En base a la formulación matemática de Newton de la tercera ley de Kepler, la velocidad v de un objeto que orbita alrededor de una gran masa M a una distancia d es $v = \sqrt{G \cdot M/d}$. La velocidad orbital es por tanto función de la masa.

⁶⁹ Los bariones son aquellas partículas formadas por tres quarks. Las más representativas son las partículas que forman los núcleos atómicos, es decir, protones y neutrones.

la unidad. Del mismo modo que en el caso del valor del parámetro de densidad de materia cuando sólo se tenía en cuenta la materia bariónica, el valor de Ω_m varía de unos estudios a otros⁷⁰, con una estimación de consenso de 0,3, un valor que se aproxima bastante a la unidad. De acuerdo con la relatividad general, un universo plano se corresponde con un valor de $\Omega_m = 1$. Si este parámetro fuese mayor el universo sería esférico, si fuese menor sería hiperbólico. Que el valor actual sea tan aproximado a la unidad es el problema de ajuste fino denominado problema de la planitud (*flatness*).

Los modelos que describen un universo en expansión predicen que con el tiempo la geometría del universo debe ir alejándose de la planitud. Por tanto, para que transcurridos más de 13.000 millones de años desde su nacimiento aún observemos un universo que es casi plano, las condiciones iniciales debieron estar ajustadas con una precisión de al menos una parte en 10^{55} (Landsman, 2015). La búsqueda de una solución a esta cuestión fue uno de los motivos que impulsaron la formulación de la teoría de la inflación. En base a esta hipótesis, un "estiramiento" geométrico temprano suficientemente fuerte habría hecho desaparecer cualquier irregularidad previa a la inflación.

En este mismo sentido, de acuerdo con Rees (2000), el hecho de que hoy en día observemos un valor crítico de Ω_m que es tan aproximado a 1, implica que un segundo después del big bang el parámetro de densidad de materia debió estar ajustado con una precisión de 15 cifras decimales.

Resulta sorprendente que nuestro universo se iniciase con un momento tan finamente ajustado, casi con el valor exacto para compensar la tendencia de desaceleración producida por la gravedad [...] La precisión requerida es asombrosa: para verificar que el universo esté aún hoy día expandiéndose con un valor de Ω_m que no diverge considerablemente de la unidad, un segundo después del big bang, Ω_m no pudo diferir de la unidad en más de una parte en 10^{15} . (Rees, 2000, p.88)

⁷⁰ 0,30 en Bahcall (1997); 0,35 en Courteau & Dekel (2001).

3.6. Hoyle y el proceso triple-alfa

A mediados del siglo XX ya eran conocidos la práctica totalidad de los elementos que constituyen la tabla periódica⁷¹. Sin embargo era aún muy discutido el mecanismo por el que estos elementos habían sido sintetizados. En 1931 Lemaître había propuesto que el estado inicial del universo que se derivaba del modelo de Friedmann consistía en una especie de átomo primigenio. El descubrimiento del neutrón por James Chadwick (1891-1974) al año siguiente⁷² llevó a conjeturar la idea de que el átomo primitivo de Lemaître podría estar formado por un mar de neutrones, que por medio de interacciones nucleares irían desintegrándose en protones, dando lugar al conjunto de los elementos químicos conocidos (Longair, 2004).

Nacido en la ciudad de Odesa, el físico teórico y cosmólogo ucraniano George Gamow (1904-1968) realizó notables aportaciones a la teoría del big bang, al estudio de la desintegración radioactiva de los núcleos atómicos, a la evolución estelar y a lo que ahora nos interesa, al proceso de nucleosíntesis. A la edad de 30 años se trasladó a los Estados Unidos, donde se incorporó a la Universidad George Washington, en la cual desarrolló su labor académica hasta 1956, año en que se incorporó como profesor a la Universidad de Colorado.

En Estados Unidos, Gamow se acercó al problema de encontrar un mecanismo que revelara la formación de los elementos químicos y que a la vez sirviera para explicar su abundancia relativa. A partir de su hipótesis de que el universo primitivo estaba dominado por la radiación en lugar de por la materia, abordó la cuestión de la dinámica de la creación de los elementos químicos. En un trabajo de 1948 titulado *El origen de los elementos químicos*⁷³, firmado por Gamow, Bethe y el cosmólogo americano Ralph Alpher (1924-2007), entonces estudiante de doctorado, consideraron que en los procesos involucrados en el big bang, por medio de sucesivas capturas de neutrones, se formaron tanto los núcleos de hidrógeno y helio como los correspondientes a los restantes elementos más pesados. Esta idea ya había sido formulada previamente por Gamow en

⁷¹ Quedan fuera de consideración los elementos más allá del grupo de los actínidos.

⁷² Chadwick, J. (1932). Possible Existence of a Neutron. *Nature*, vol. 129, no. 3252, p. 312-312.

⁷³ Alpher, R.A., Bethe, H. & Gamow, G. (1948). The Origin of Chemical Elements. *Physical Review*, vol. 73, no. 7, pp. 803-804. Se trata del famoso artículo alfa-beta-gamma, por las iniciales de sus autores.

un trabajo de 1946 titulado *Universo en expansión y el origen de los elementos*⁷⁴, donde proponía que a partir de nubes de neutrones libres relativamente frías fueron acreciendo proto-núcleos de neutrones, que mediante subsiguientes procesos de desintegración β dieron lugar a los protones. Por adición de neutrones libres se irían formando los núcleos de los restantes elementos químicos (Peebles, 2014).

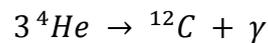
Posteriores descubrimientos relacionados con la inestabilidad de isótopos de masa atómica cinco y ocho y la disminución de la proporción de neutrones con la expansión pusieron en duda la teoría de Gamow, al hacer imposible la producción de núcleos atómicos mediante mecanismos de adición más allá del núcleo de helio. En el proceso de nucleosíntesis primordial tras el big bang, los únicos átomos que se formaron fueron hidrógeno, helio y algunas trazas de litio (Barnes, 2012). La respuesta a la producción del resto de elementos no se encontraría en la dinámica de los procesos asociados al big bang y habría que buscarla en el interior de las estrellas. Éstas no se formaron hasta pasados unos 500 millones de años tras el nacimiento del universo, por lo que hasta ese momento el cosmos quedó conformado exclusivamente por los elementos generados durante la nucleosíntesis primigenia. Sería la acumulación de hidrógeno y helio, que por contracción gravitatoria dio origen a las estrellas, la que abriría la posibilidad de que se formaran nuevos elementos químicos.

Es sabido la importancia que el carbono tiene para la vida, de ahí el interés que suscitaba conocer el proceso de su formación. Pero al igual que el del resto de elementos pesados, el procedimiento que llevaba a su producción continuaba siendo un misterio. Mientras permanecen en la secuencia principal, las estrellas fusionan hidrógeno para producir helio. Una vez que en el centro de la estrella se ha agotado el suministro de hidrógeno se detiene la fusión, disminuye por tanto la presión de radiación, y la estrella se contrae por gravitación. Esta contracción hace aumentar la temperatura en las capas exteriores de la estrella, lo cual provoca que se inicie nuevamente la fusión del hidrógeno en helio, esta vez fuera del núcleo, provocando que la estrella se expanda considerablemente. A partir de ahí se ha convertido en una gigante roja. El helio producido por fusión en las capas exteriores cae al centro de la estrella, provocando un aumento de la presión y la temperatura, que cuando supera los 10^8 K permite que se

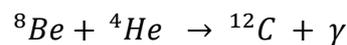
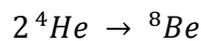
⁷⁴ Gamow, G. (1946). Expanding Universe and the Origin of Elements. *Physical Review*, vol. 70, no. 7-8, pp. 572-573.

inicie la fusión del helio para producir carbono, en un proceso denominado triple-alfa. Este nombre proviene del hecho de que son necesarios tres núcleos de helio, también llamados partículas alfa, para completar el proceso⁷⁵.

Sin embargo la explicación del mecanismo de producción de carbono a partir del helio presentaba graves problemas. En principio se postuló que el proceso triple-alfa por el que se generan los átomos de carbono-12 podría efectuarse mediante una reacción que constase de una única etapa, consistente en la fusión simultánea de tres núcleos de helio-4



El problema radicaba en que la colisión simultánea de tres núcleos era un acontecimiento poco probable, y además incapaz de explicar la abundancia relativa de carbono en el universo. Esta dificultad llevó a considerar la posibilidad de que el carbono-12 se crearía mediante un proceso en dos etapas en lugar de una. En la primera, dos núcleos de helio-4 se fusionarían para formar uno de berilio-8, y en la segunda, el núcleo de berilio-8 se fusionaría con uno de helio-4, dando lugar a la formación de un núcleo de carbono-12



Pero este nuevo planteamiento presentaba otro problema serio. El berilio-8 es un elemento muy inestable, y se desintegra nuevamente en dos núcleos de He en unos 10^{-6} segundos, por lo que no se producen concentraciones de berilio suficientes para producir carbono a las tasas requeridas.

Como de una u otra forma el carbono acaba por producirse, el astrónomo británico Fred Hoyle (1915-2001) predijo que debía existir una resonancia en el carbono-12 que facilitase el proceso al dotarle de mayor estabilidad, de tal forma que en la segunda etapa, el berilio-8 y el helio-4 tendrían la misma energía que un estado excitado de mayor energía del carbono-12. Calculó que este estado excitado tendría que estar situado

⁷⁵ Como se ha indicado anteriormente, los ciclos de fusión no terminan en el carbono, sino que continúan más allá, fusionándose también tanto el carbono como otros elementos más pesados.

7,656 MeV por encima del estado fundamental. En 1953 apareció un artículo de apenas dieciséis líneas de texto a dos columnas firmado por Hoyle en coautoría⁷⁶, en el que se daba cuenta del descubrimiento de ese estado excitado. Cuatro años más tarde, en 1957, Hoyle junto con otros tres colaboradores publicaron en la revista *Review of Modern Physics* un extenso trabajo titulado *Síntesis de los elementos en las estrellas*⁷⁷, donde tras el estudio de las reacciones nucleares que se daban en el interior de las estrellas y supernovas, explicaban la formación y abundancia de los diferentes elementos químicos.

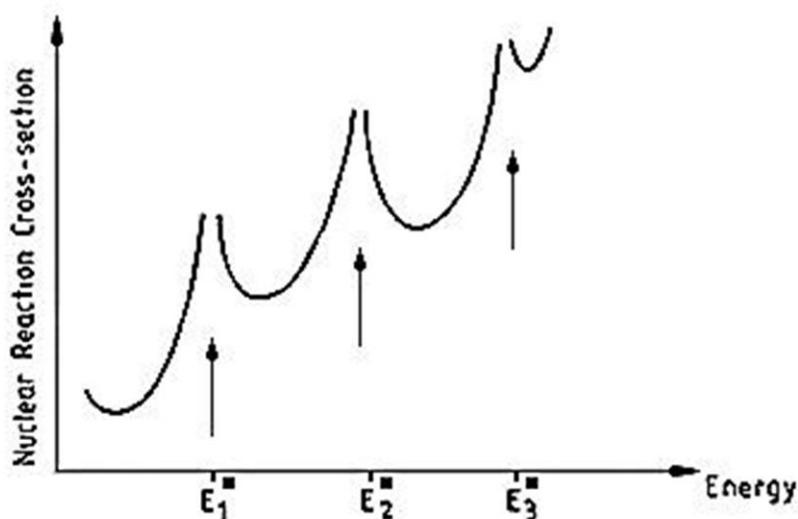


Figura 3. Una reacción resonante se caracteriza porque la energía de los elementos que intervienen en ella iguala a la energía del producto de la reacción, haciéndola mucho más probable. Esta coincidencia acontece en la reacción por la cual el berilio-8 y el helio-4 se unen para formar carbono-12. El gráfico en sección cruzada muestra, por unidad de tiempo, cómo una reacción es más probable en ciertos estados resonantes correspondientes a los niveles excitados de energía E_1 , E_2 y E_3 . [Créditos: Barrow & Tipler (1986)]

El descubrimiento del estado excitado del carbono es a menudo considerado como una predicción exitosa de la aplicación del principio antrópico, arguyéndose que Hoyle debió razonar desde el efecto a la causa, considerando que nuestra base bioquímica basada en el carbono hacía necesaria la existencia de un estado resonante del carbono

⁷⁶ Hoyle, F., Dunbar, D.N.F., Wenzel, W.A. & Whaling, W. (1953). A state in ^{12}C predicted from astrophysical evidence. *Physical Review*, vol. 92, 1095.

⁷⁷ Burbidge, E.M., Burbidge, G.R., Fowler, W.A. & Hoyle, F. (1957). Synthesis of the Elements in Stars. *Reviews of Modern Physics*, vol. 29, no. 4, pp. 547-650.

que facilitase su generación⁷⁸. Kragh (2010a) sin embargo discrepa abiertamente de este argumento, considerando la relación entre la historia del descubrimiento y el principio antrópico un mito, y que fue en realidad una mirada retrospectiva a partir de la emergencia del principio antrópico en la década de 1980 lo que concedió al descubrimiento su carácter de predicción antrópica.

El carbono es un elemento cardinal en la química orgánica y la eficiencia del proceso triple-alfa resulta trascendental para la posibilidad de aparición de organismos vivos. En un universo donde exclusivamente existieran los átomos generados en el big bang, hidrógeno, helio y litio, solo podrían hallarse dos compuestos químicos, el hidrógeno molecular (H_2) y el hidruro de litio (LiH). La medida de la importancia del carbono para la vida nos la ofrece el hecho de que contando exclusivamente con hidrógeno y carbono el número de elementos químicos diferentes que pueden llegar a formarse es de unos 2.300.

El estado fundamental del carbono-12 está 7,336 MeV por debajo de la energía del berilio-8 y el helio-4, debido a lo cual la fusión de estos dos núcleos sería un proceso muy improbable. Es gracias a la existencia del estado excitado a 7,656 MeV que el proceso puede llevarse a cabo de manera óptima. De acuerdo con Livio, Hollowell, Weiss & Truran (1989), un proceso de producción de carbono eficiente requiere necesariamente la existencia de un estado excitado del carbono-12, que debe encontrarse además estrechamente ajustado entre 7,596 MeV y 7,716 MeV. Fuera de estos márgenes el proceso de producción de carbono habrá sido ineficaz, resultando en una cantidad de carbono insuficiente, haciendo imposible la aparición de la vida.

3.7. Sakharov y la bariogénesis

El físico teórico inglés Paul Dirac (1902-1984) es considerado uno de los científicos más influyentes del siglo XX. El conjunto de trabajos que publicó en el periodo 1925-1935 fueron fundamentales en los primeros desarrollos de la teoría cuántica. Su graduación en ingeniería eléctrica y matemáticas le permitió disponer de unos conocimientos combinados de electricidad, física, electrónica, matemáticas y electromagnetismo que le

⁷⁸ Por ejemplo: Scerri, E.R. (2007). *The Periodic Table: Its Story and Its Significance*. Oxford: Oxford University Press.

permitirían dedicarse con éxito a los dos campos que suscitaron su interés prioritario: la mecánica cuántica y la relatividad general.

En 1925 Schrödinger había formulado la ecuación que lleva su nombre, la cual describía la evolución temporal que experimentan los sistemas cuánticos. Dado que para su formulación Schrödinger había partido de una ecuación que relacionaba el momento de una partícula con una expresión no relativista de la energía, la ecuación era de aplicación exclusiva a partículas no relativistas, es decir, partículas que se mueven muy por debajo de la velocidad de la luz. Era evidente que para disponer de una descripción completa de la dinámica de un sistema cuántico había que reformular la teoría para incluir los fenómenos relativistas. En su artículo *La teoría cuántica del electrón*⁷⁹ publicado en 1928, Dirac hizo pública una ecuación que efectivamente combinaba la mecánica cuántica con la relatividad especial, conocida desde entonces como ecuación de Dirac.

Su formulación daba cuenta del valor del momento magnético del electrón, y explicaba situaciones paradójicas como por qué las partículas con espín $\frac{1}{2}$ (como el propio electrón) tenían que girar dos vueltas para volver a parecer la misma⁸⁰. La ecuación, sin embargo, presentaba un problema. Cuando se procedía a su solución emergían dos resultados, uno correspondiente a un electrón con energía positiva y otro correspondiente a un electrón con energía negativa. Desde el punto de vista de la física clásica esto era incongruente, dado que todos los valores esperados para la energía tenían siempre signo positivo. La interpretación que dio Dirac para las soluciones negativas de su ecuación fue predecir la existencia de un antielectrón, una partícula idéntica al electrón pero con carga positiva. Aunque Dirac no utilizó el término antimateria, se considera que la predicción del antielectrón marcó la fecha de su nacimiento. En 1932 el físico estadounidense Carl Anderson (1905-1991), por entonces profesor del Instituto Caltech de California, informó que estudiando la absorción de rayos cósmicos por láminas metálicas, había detectado partículas cargadas positivamente que tenían la

⁷⁹ Dirac, P. (1928). The quantum theory of the electron. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, vol. 117, no. 778, pp. 610-624.

⁸⁰ Una forma de ver el espín es atendiendo a cómo aparece una partícula cuando se le gira. Las de espín 0 como el bosón de Higgs son similares a un punto, parecen siempre la misma con independencia del giro que se les aplique; las de espín 1 como el fotón son similares a una flecha, solo parecen la misma cuando se les gira 360°; las de espín 2 como el gravitón son similares a una flecha con dos puntas, vuelven a parecer la misma cuando se les gira 180° (Hawking, 1988).

misma masa que el electrón. Anderson escribía en su artículo que «para interpretar estos resultados parece necesario suponer una partícula cargada positivamente con una masa comparable a la de un electrón» (Anderson, 1932, p.239), partícula que pasaría a conocerse como positrón. La existencia de la antimateria quedaba comprobada experimentalmente.

La antimateria es una forma de materia compuesta por antipartículas. Del mismo modo que las partículas forman átomos, las antipartículas forman anti-átomos. La gran mayoría de las partículas que forman la materia tienen su contrapartida en una antipartícula, que es idéntica en masa pero que difiere en otras propiedades, como la carga eléctrica, el momento magnético o el espín. Un protón y un antiprotón son idénticos, excepto que el primero tiene carga positiva y el segundo tiene carga negativa; un neutrón y un antineutrón tienen la misma masa, pero difieren en el signo de su momento magnético⁸¹.

Materia y antimateria no pueden coexistir en contacto mutuo. Cuando una partícula se encuentra con una antipartícula se aniquilan mutuamente, convirtiendo su masa en energía, de acuerdo a la ecuación de la relatividad de Einstein $E = mc^2$, principalmente en forma de rayos gamma. Esta reacción es de una eficiencia energética máxima. Si en las reacciones de fusión nuclear dos átomos de hidrógeno se unen para formar uno de helio con una eficiencia energética del 0,7 por cien, en la aniquilación de materia y antimateria la eficiencia es del 100 por cien.

Todas las partículas que encontramos, salvo algunas trazas de antimateria creadas en los aceleradores de partículas y los antiprotones generados en los rayos cósmicos, son materia. Y dado que es muy difícil conjeturar un mecanismo que separara la materia de la antimateria en el universo primitivo, es razonable admitir que el universo actual está formado exclusivamente por materia.

Respondiendo a las leyes de la simetría, no parece haber nada en las leyes del universo que tras el big bang beneficiara la creación de materia sobre la antimateria. Si en el universo primigenio se hubiese creado el mismo número de partículas y antipartículas, teniendo en cuenta las condiciones de densidad iniciales, nada hubiera impedido que se hubiesen aniquilado totalmente entre ellas, dejando el universo

⁸¹ Esta particularidad se extiende también a las partículas fundamentales. Así, del mismo modo que los protones están constituidos por quarks, los antiprotones están constituidos por antiquarks.

constituido únicamente por un océano de radiación, sin materia ni antimateria disponible para formar estrellas y galaxias. Unas condiciones en las que hubiese sido imposible la aparición de la vida.

En el universo hay unas 10^{80} partículas de materia. Si el elevado grado de densidad que se produjo en el big bang propició el aniquilamiento de la materia y la antimateria, y aun así ha quedado el gran exceso de materia que observamos, es presumible suponer la existencia de algún tipo de asimetría, bien en las condiciones iniciales, bien en las leyes de la física. Resolver esta incógnita constituye uno de los grandes problemas planteados a la cosmología actual. Los procesos que intentan explicar por qué en los primeros instantes del universo se creó más materia que antimateria se conocen como bariogénesis⁸².

Antes de 1954 se creía que las leyes de la física eran invariantes a transformaciones que supusieran inversiones de carga (C), de paridad (P) y del sentido del tiempo (T). Este principio se denomina simetría CPT. Este tipo de simetría implica que la evolución de un proceso no sufre variación si se sustituyen las partículas por antipartículas (simetría C), se reemplazan las partículas por su imagen especular (simetría P) y se invierte el sentido del tiempo (simetría T). Sin embargo en 1956 los físicos chinos Tsung-Dao Lee (n. 1926) y Chen Ning Yang (n. 1922) señalaron que la interacción débil no conservaba la simetría P⁸³. Este descubrimiento les valió al año siguiente el premio Nobel de Física, convirtiéndose por entonces en los hombres más jóvenes agraciados con dicho galardón. En 1964 los físicos estadounidenses de la Universidad de Princeton James Cronin (n. 1931) y Val Fitch (1923-2015), realizaron un experimento en el Laboratorio Nacional de Brookhaven en Estados Unidos en el que pretendían estudiar la desintegración de una partícula inestable denominada kaón neutro K^0 . Los inesperados resultados obtenidos demostraron que la interacción débil tampoco verificaba la simetría conjunta CP⁸⁴. Denominaron a este fenómeno violación CP.

⁸² Estos procesos son inmediatamente anteriores al de nucleosíntesis primordial, que explican la formación de los núcleos atómicos más sencillos y que están mucho mejor explicados por la física actual. De hecho, el proceso de bariogénesis no es aún bien comprendido ni está totalmente explicado por la teoría, de ahí que sea necesario ser cautos con las conclusiones.

⁸³ Lee, T.D. & Yang, C.N. (1957). Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino. *Physical Review*, vol. 105, no. 5, pp. 1671-1675.

⁸⁴ Christenson, J.H., Cronin, J.W., Fitch, V.L. & Turlay, R. (1964). Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson. *Physical Review Letters*, vol. 13, no. 4, p. 138-140.

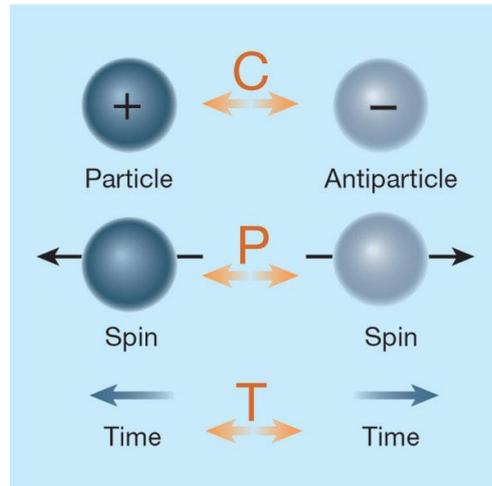


Figura 4. La simetría CPT es un principio de la naturaleza que establece que bajo transformaciones simultáneas que involucren la inversión de la carga eléctrica (C), la paridad (P) y el sentido del tiempo (T) las leyes de la física permanecen invariantes [Créditos: Nature].

De acuerdo a las leyes por entonces conocidas de la física, era de esperar que en el universo hubiese la misma cantidad de materia que de antimateria. Sin embargo era un hecho observado que, al menos en nuestra vecindad cósmica, no había rastros de antimateria. Alentado por el descubrimiento que en 1964 habían realizado Cronin y Fitch sobre la violación de la simetría CP, el físico nuclear soviético Andrei Sakharov (1921-1989) emprendió la tarea de extrapolar las consecuencias que esa violación tendría a escala cosmológica (Gould, 2010).

En 1967 publicó un artículo donde expuso los criterios que podrían permitir la ruptura de la simetría a favor de la materia en defecto de la antimateria, es decir, determinar las condiciones que provocarían que se formase más materia que antimateria. Estos criterios son conocidos como condiciones de Sakharov: 1) un escenario que permita la creación o destrucción de bariones; 2) violación de las simetrías C y CP; y 3) inexistencia de equilibrio térmico. En su artículo, Sakharov afirmaba que estas condiciones aparecieron particularmente «como consecuencia de la violación CP durante la expansión no estacionaria de un universo caliente en la etapa superdensa» (Sakharov, 1967, p.25).

La ruptura de la simetría en la fuerza electrodébil se concreta en el llamado parámetro de asimetría bariónica (η), que relaciona la diferencia de densidad global del número de bariones (η_B) y antibariones ($\eta_{\bar{B}}$) con la densidad del número de fotones de la radiación del fondo cósmico (η_γ)

$$\eta = \frac{\eta_B - \eta_{\bar{B}}}{\eta_\gamma}$$

Esta ecuación nos da una medida de la magnitud de la asimetría materia-antimateria. De acuerdo con la teoría de la nucleosíntesis primordial y los datos aportados por la sonda WMAP, se deduce que en el universo hay en promedio aproximadamente mil millones de veces más fotones que protones y neutrones, con un valor de $\eta = 6,1 \times 10^{-10}$ (Quirós, 2011). Esto quiere decir que en el universo primitivo, por cada mil millones de fotones y mil millones de antiquarks tuvo que haber mil millones más un quark (10^9 frente a $10^9 + 1$), sobreviviendo este último a la aniquilación mutua.

Siendo así, resulta que la totalidad de la materia luminosa que existe en el universo, y por tanto la vida tal y como la conocemos, surgió por un sesgo de una milmillonésima parte a favor de la materia sobre la antimateria.

El valor de la masa de las partículas subatómicas también muestra un ajuste que ha permitido que la vida se desarrolle en el universo. Los protones y neutrones son partículas subatómicas compuestas por tres quarks. El protón está formado por la unión estable de dos quarks up y un quark down (uud). El neutrón está constituido por dos quarks down y un quark up (udd). El hecho de que el quark down sea un poco más pesado que el quark up, hace que los neutrones sean más pesados que los protones⁸⁵. Por otro lado, destacar que los neutrones aislados se desintegran en un protón, un electrón y un antineutrino⁸⁶. Según Vilenkin (2011), si la distribución de masas entre los quarks fuese tal que la masa del neutrón resultase solo un 1 por ciento más alta de lo que es, llegaría a ser tan masivo que se desintegraría incluso en el interior del núcleo atómico, convirtiéndose en un protón. Sin neutrones, ni siquiera la fuerza nuclear fuerte podría mantener unidos los protones en el núcleo contra la repulsión eléctrica, y los átomos con masa atómica igual o mayor que 2 serían inestables. El único átomo permitido sería el formado por un protón y un electrón.

Si por el contrario el protón fuese más pesado que el neutrón, Jenkins & Pérez (2010) estiman que el protón del núcleo del átomo de hidrógeno capturaría el electrón en órbita, convirtiéndose en un neutrón, haciendo desaparecer cualquier posibilidad de

⁸⁵ Masa del quark down: $m_d \sim 4,8$ MeV; Masa del quark up: $m_u \sim 2,3$ MeV (Olive et al., 2014).

⁸⁶ Los neutrones del núcleo no se desintegran como consecuencia de la estabilización proporcionada por la fuerza nuclear fuerte.

formación de átomos de hidrógeno-1. Una variación en la masa de más de un 2 por ciento, y todas las otras formas del hidrógeno (hidrógeno- 2 e hidrógeno-3) serían inestables⁸⁷.

4. EL MULTIVERSO COMO SOLUCIÓN

En la primera parte se ha visto cómo pequeñas variaciones en el valor de las constantes fundamentales dan lugar a universos de características diferentes al que conocemos, la mayoría de ellos presentando propiedades incompatibles con el desarrollo de la vida. La hipótesis del multiverso intenta salvar la dificultad de explicar que vivamos en un universo apto para la vida, a pesar de su improbabilidad de ocurrencia, alegando la existencia de un gran número de universos. Siendo así, lo que cabe preguntarse es si estos hipotéticos universos alternativos son una mera ficción teórica o si hay bases físicas razonables para sospechar de su existencia real.

El modelo cosmológico estándar Λ CDM nos ofrece la perspectiva de un único universo que nace con el big bang⁸⁸. Sin embargo, la teoría de los multiversos se basa en la hipótesis de que existen regiones del espacio-tiempo desconectadas causalmente entre sí, cada una de ellas constituyendo un universo diferente, eventualmente con diferentes condiciones iniciales, valores distintos para las constantes fundamentales y diferentes leyes físicas.

La teoría de los multiversos es solución al problema del ajuste fino en cuanto elimina la improbabilidad epistémica de la concurrencia simultánea de dos factores, un único universo por un lado, y unos parámetros exactamente ajustados para el desarrollo de organismos vivos por otro, presentando como argumento la existencia de un número suficientemente elevado de universos como para hacer probable que al menos algunos de ellos presenten condiciones que hagan viable la existencia de vida. De hecho, postular la eventualidad de múltiples universos se presenta como la solución científica más coherente a la extrañeza y desconcierto que presenta el ajuste fino. Es cierto que algunas

⁸⁷ El hidrógeno se presenta en la forma de tres isótopos naturales, cada uno de ellos con 0, 1 y 2 neutrones en el núcleo. Respectivamente, protio (hidrógeno-1, 1H ó ^1H), deuterio (hidrógeno-2, 2H ó ^2H) y tritio (hidrógeno-3, 3H ó ^3H).

⁸⁸El modelo Λ CDM o Lambda-CDM es el modelo estándar del big bang que incluye una constante cosmológica (Λ) y la materia oscura fría (CDM -*Cold Dark Matter*-).

teorías científicas que sirven de fundamento a la posible existencia del multiverso carecen de soporte experimental. Se les acusa en ocasiones de ser meros constructos matemáticos basados en especulaciones metaempíricas. Pero esa consideración corre el riesgo de depreciar el prestigio del que gozan las matemáticas en el campo de las ciencias físicas. En el contexto de esta discusión, los cosmólogos Levon Pogosian y Alexander Vilenkin escriben:

Los parámetros que llamamos constantes de la naturaleza pueden ser de hecho variables estocásticas que toman valores diferentes en distintas partes del universo. Los valores observados son por tanto determinados por el azar y por selección antrópica. Los desarrollos recientes en teoría de cuerdas, en combinación con la teoría de la inflación eterna, nos han llevado al paradigma del “paisaje de la teoría de cuerdas”, que facilita una base teórica de este punto de vista. Y la exitosa predicción de una constante cosmológica no cero puede ser nuestra primera evidencia de la existencia de un enorme universo más allá de nuestro propio horizonte. (Pogosian & Vilenkin, 2007, p.2)

4.1. Mundos cuánticos de Everett

En 1925 los físicos alemanes Werner Heisenberg (1901-1976), Max Born (1882-1970) y Pascual Jordan (1902-1980) presentaban su formulación de la mecánica cuántica matricial, una representación completa, autónoma y lógicamente consistente de la mecánica cuántica. Ese mismo año, Schrödinger desarrolló la denominada mecánica ondulatoria. En ella sugería que si de acuerdo con el postulado de de Broglie el movimiento de una partícula lleva asociada una onda, necesariamente debería existir una función que describiera el estado cuántico del sistema. Esta ecuación, en mecánica cuántica, se denomina función de onda Ψ , un objeto matemático que representa el estado cuántico de un sistema de partículas. Al igual que las ecuaciones del campo eléctrico y magnético toman valores en el espacio físico, la función Ψ toma valores en el espacio de fases⁸⁹. Introdujo a este respecto una ecuación que daba cuenta de la evolución dinámica

⁸⁹ Si tenemos un sistema compuesto por una sola partícula que queda caracterizada por el valor de dos variables p y q , la representación gráfica de los valores instantáneos que en cada momento pueden tomar ambas variables se denomina curva de fase, la cual viene dibujada en un plano determinado por los ejes p y q , denominado plano de fase. Cada punto de la curva contiene toda la información sobre el estado instantáneo del sistema. Si en vez de una sola partícula tenemos n partículas, la representación ya no se limita a un plano, sino que viene dada por un espacio multidimensional al que se conoce como espacio de fases.

de la función, la conocida como ecuación de Schrödinger, que describe cómo esa función de onda evoluciona en el tiempo. Si la mecánica clásica especificaba el estado del universo en función de la posición y velocidad exacta de las partículas que constituyen un sistema, la mecánica cuántica lo iba a hacer por medio de la función de onda.

Esta nueva mecánica ondulatoria iba a constituir una teoría cuántica completa e independiente de la mecánica matricial de Heisenberg. La formulación de Schrödinger fue publicada en 1926 en cuatro trabajos independientes⁹⁰. La mecánica ondulatoria presentaba una ecuación de onda que experimentaba una evolución determinista, a diferencia de la interpretación probabilística ortodoxa (o de Copenhague) ofrecida en 1927 por Heisenberg y el físico danés Niels Bohr (1885-1962), y pretendía restaurar la continuidad del cambio, algo que Planck había desterrado (Universidad de Granada [UGR], 2014). Sin embargo, aunque las formulaciones de Heisenberg y Schrödinger eran completas, sólo daban explicación del movimiento de las partículas a bajas velocidades. Eran por tanto soluciones no relativistas. Hubo que esperar a la ecuación de Dirac de 1928 para disponer de una ecuación que describiera el comportamiento del electrón a velocidades cercanas a la de la luz, combinando la mecánica cuántica y la relatividad especial.

Max Born, de acuerdo con la afirmación de Heisenberg de que en el mundo microscópico las leyes de la mecánica cuántica ofrecían solo probabilidades en los fenómenos que podíamos medir, sugirió en 1926 que el determinismo clásico había de ser sustituido por la perspectiva probabilística propia de la mecánica cuántica⁹¹. Para Born, la función de onda contiene toda la información sobre el estado cuántico del sistema, pero los resultados que se pueden obtener de una observación individual están gobernados por las leyes de la probabilidad y dependen puramente del azar. El resultado de la observación, por tanto, no revela ninguna propiedad del sistema fijada con antelación a la medida y en su lugar depende azarosamente de ésta.

⁹⁰ Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung). *Annalen de Physik*, vol. 79, pp. 361-376; Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem (Zweite Mitteilung). *Annalen de Physik*, vol. 79, pp. 489-527; Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem (Dritte Mitteilung). *Annalen de Physik*, vol. 80, pp. 436-490; Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem (Vierte Mitteilung). *Annalen der Physik*, vol. 81, pp. 109-139.

⁹¹ Born, M. (1926). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, vol. 37, no. 12, pp. 863-867.

Por su parte, el estudio del formalismo rival de Schrödinger y el análisis de los resultados de eventos cuánticos individuales, condujeron a Heisenberg en marzo de 1927 a la formulación del denominado principio de indeterminación, que apareció por primera vez en un trabajo titulado *Sobre el contenido intuitivo de la cinemática y la mecánica cuánticas*⁹². De acuerdo a este principio, es imposible la medida precisa y simultánea de variables conjugadas como el momento y la posición [1] o la energía y el tiempo [2]. Matemáticamente

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq h \quad [1] \qquad \Delta E \cdot \Delta t \geq h \quad [2]$$

con h la constante de Planck. Las implicaciones científicas y filosóficas de este principio fueron enormes, dado que si no era posible conocer con exactitud las condiciones iniciales de un sistema tampoco se podría predecir su evolución futura. Por muy extraño que se antojase, no se podían obviar las consecuencias de este enunciado, dado que el principio de indeterminación no es un axioma de la teoría cuántica sino un teorema, y por tanto una proposición matemática demostrable a partir de la base axiomática de la teoría, siendo que su violación conllevaría necesariamente la renuncia o modificación de algunos de los postulados de la mecánica cuántica (UGR, 2014). En su artículo de 1927 Heisenberg introdujo también el concepto de colapso de la función de onda, aunque él utilizó el término "reducción". Este concepto remitía al fenómeno según el cual el evento de la medida selecciona aleatoriamente uno de los posibles resultados para el observable, determinando el estado actualizado de entre todos los estados cuánticos posibles.

Los problemas interpretativos que surgieron a partir de qué representaba la función de onda y cómo entender el colapso hicieron divergir la interpretación probabilística de Bohr-Heisenberg de la determinista de Schrödinger. La elegancia y simplicidad que aportaba la mecánica ondulatoria de Schrödinger en comparación al arduo tratamiento matemático asociado a la mecánica matricial de Heisenberg, hizo que fuese adoptada de forma general por la mayoría de los físicos de la época. Pero sin embargo esta preferencia formal no se hizo extensiva a su interpretación ontológica, que siguió siendo potestad de la interpretación de Copenhague. Bajo esta interpretación la descripción de

⁹² Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, vol. 43, no. 3, pp 172-198.

la naturaleza se hizo probabilística, se perdió la noción de determinismo clásico y la idea de causalidad quedó seriamente debilitada.

Como Heisenberg dejó claro en su artículo de 1929, el concepto clásico de causalidad tenía que ser abandonado, no porque fuese ilegítimo inferir de una causa presente un efecto futuro, sino porque un sistema físico nunca podía ser definido con precisión. Dado que nosotros solo podemos conocer el presente dentro de las limitaciones dadas por la mecánica cuántica, igualmente solo podemos conocer el futuro sin exactitud. (Kragh, 1999, p.209)

Las interpretaciones de Bohr-Heisenberg y Schrödinger no fueron las únicas. Con el trasfondo de la rivalidad entre ellas, apareció a mediados del siglo XX una nueva interpretación. Se trataba de la conocida como teoría de los muchos mundos. Tenía su raíz en los procesos aleatorios propios de la mecánica cuántica, que de acuerdo con esta teoría daban lugar a la ramificación del universo en múltiples copias, cada una de ellas correspondiéndose con cada uno de los resultados posibles de una determinada observación.

Si el universo newtoniano queda especificado por la posición y el movimiento de cada partícula, el universo cuántico queda explicado por una función de onda, una entidad de carácter matemático que representa el estado físico del sistema de partículas. Como cualquier teoría física, especialmente aquellas que se sostienen en un fuerte aparato matemático, la mecánica cuántica está conformada por dos vertientes, el formalismo matemático por un lado, y la interpretación que se da a ese formalismo por otro. Una problemática asociada con ciertas funciones de onda de la mecánica cuántica es el hecho de que al ser contraintuitivas presentan situaciones que son difícilmente interpretables. Es en estos casos donde la exégesis de la teoría toma un mayor protagonismo. Para atajar los problemas explicativos sobrevenidos a causa de los sorprendentes escenarios abiertos por el formalismo matemático, se introdujeron una serie de postulados al objeto de establecer relaciones entre los símbolos matemáticos de la teoría y el mundo físico. De este modo, los defensores de la interpretación de Copenhague introdujeron seis postulados. De ellos, el postulado IV hacía referencia al colapso de la función de onda. Según el mismo, la función de onda colapsaba inmediatamente cuando se realizaba una observación, transformándose la superposición de estados previa en un solo estado de naturaleza definida, al modo de los resultados clásicos. Es en este contexto donde la célebre paradoja del gato de Schrödinger se

articula como el ejemplo más famoso de las consecuencias de la superposición de estados y su nexa con el problema de la observación, un experimento mental con el que Schrödinger quería poner de manifiesto las incongruencias que la interpretación de Copenhague presentaba cuando se aplicaba a sistemas macroscópicos. Con anterioridad a la observación, la función de onda describiría al mismo tiempo la superposición de los estados vivo y muerto del gato, que coexistirían simultáneamente, y solo sería la intervención de un observador lo que desencadenaría el proceso de selección de uno de los dos estados.

Pero dado que la naturaleza del colapso era desconocida, la proposición del postulado IV no resolvía completamente el problema. Aunque el formalismo de la teoría cuántica era compartido, no resultaba así con la interpretación de la teoría. En 1957 el físico estadounidense Hugh Everett III (1930-1982) publicó su trabajo de tesis doctoral bajo el título *Formulación del Estado Relativo de la mecánica cuántica*⁹³, en el cual examinaba profusamente el postulado del colapso, articulando una nueva interpretación de las consecuencias que la superposición de estados implicaba en el mundo físico macroscópico. Su teoría del "estado relativo" fue rebautizada por Bryce DeWitt como "interpretación de los muchos mundos" (IMM), denominación con la que ha pasado a conocerse⁹⁴.

Everett estimó que el postulado IV era superfluo y podía ser abandonado. La función de onda informa de la probabilidad de obtener en una medición un resultado determinado, pero es incapaz de adelantar el valor concreto que vamos a obtener. Según la interpretación ortodoxa, será a partir del colapso provocado por la medida cuando quedará determinado el valor preciso. La interpretación de los muchos mundos era muy diferente. Everett afirmaba que el proceso de medida no fija un estado u otro, sino que cada observación provoca ramificaciones diferentes de la función de onda, de forma que cada uno de los posibles valores de la medida hace aparecer una rama distinta de la realidad, que a partir de aquí evoluciona independientemente. La función de onda no colapsa, con lo que la aleatoriedad quedaba eliminada. Una vez que Everett descartó la

⁹³ Everett, H. (1957). "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, vol. 29, no. 3, pp. 454-462.

⁹⁴ DeWitt, B. (1971). The Many-Universes Interpretation of Quantum Mechanics. *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi" (Course 1L): Foundations of Quantum Mechanics*, pp. 211-262. New York: Academic Press.

contingencia del colapso, que pasa a ser ahora solo aparente para cada copia del observador, se deja libertad a que la realidad vaya superponiendo distintos estados constituidos por realidades clásicas. A nuestro universo se van agregando copias del mismo de manera incesante en un número creciente de historias paralelas, dando lugar al multiverso de Everett. Las superposiciones se corresponden con cada uno de los universos paralelos sin posibilidad de contacto mutuo. Volviendo al gato de Schrödinger, si seguimos la interpretación de Everett al realizar la observación el universo se dividirá en dos, uno en el que el gato está vivo y otro en el que está muerto. Y ambos mundos son igualmente reales.

Según los partidarios de la interpretación de los “muchos mundos”, todas las ramificaciones de la función de onda son igualmente reales. En cada cruce el mundo se escinde en dos o más universos, que viven para siempre uno al lado del otro, [pero] de tal manera que las diferentes ramas nunca interactúan una con la otra después de haberse separado. (Susskind, 2006, p.320)

Una de las preguntas que deja abierta la hipótesis de Everett es por qué razón no vemos en nuestro mundo este cúmulo de superposiciones macroscópicas. El físico teórico alemán Heinz-Dieter Zeh (n. 1932) de la Universidad de Heidelberg propuso una explicación en un artículo seminal de 1970, basándose en un concepto denominado decoherencia, que fue ampliado y depurado en 1991 por el físico americano de origen polaco Wojciech H. Zurek⁹⁵ (n. 1951). La decoherencia daba cuenta de por qué un sistema físico que responde a un comportamiento cuántico deja de exhibir esos efectos y pasa a presentar un comportamiento clásico, es decir, por qué el mundo que vemos se nos presenta como clásico y no cuántico. La hipótesis propone un mecanismo por el que las superposiciones coherentes decaen cuando interactúan con el ambiente, disipando (decohesionando) el carácter cuántico de las superposiciones, provocando la ruina de la función de onda (Tegmark & Wheeler, 2001).

El universo de los muchos mundos de Everett como solución al problema del ajuste fino es una cuestión que precisa ser matizada. Desde luego, una vez establecidas las condiciones iniciales del universo y el valor de las constantes fundamentales, todas las ramificaciones alternativas consecuencia de la superposición de estados comparten

⁹⁵ Zurek, W.H. (1991). Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. *Physics Today*, vol. 44, no. 10, pp. 36-44.

las mismas propiedades, por lo que, por muy alto que sea el número de universos diferentes, al ser copias del ya existente, no aportan solución al problema. Sin embargo, remontándonos a los momentos iniciales del universo «[las fluctuaciones cuánticas] no generaron en tal caso condiciones iniciales aleatorias, sino una superposición cuántica de todas las posibles condiciones iniciales, que coexistieron simultáneamente» (Tegmark, 2003, p.15). Como de acuerdo con la interpretación de Everett no hay colapso de la función de onda, todos y cada uno de estos estados iniciales habrían dado lugar a una ramificación diferente, trayendo a la existencia universos con propiedades distintas. En algunos de ellos, unas condiciones iniciales desfavorables habrán dado lugar a universos cuyas propiedades imposibilitarán la aparición de la vida, mientras que en otros, las condiciones iniciales habrán sido propicias para hacer evolucionar el universo de forma que haya sido posible la aparición de organismos vivos.

4.2. Universo cíclico de Steinhardt

Entre las diversas teorías que especulan sobre la posibilidad de existencia de un número arbitrariamente alto de universos se encuentran los llamados modelos cíclicos u oscilantes. En general, remiten a aquellos modelos cosmológicos en los que se verifica un universo que experimenta una cadena indefinida de ciclos autosostenidos.

En el modelo cosmológico de Friedmann, con geometría cerrada y constante cosmológica igual a cero, se verifica que la evolución del universo parte de un escenario big bang donde el universo se expande hasta un determinado tamaño. Alcanzado el radio máximo, la expansión se revierte hasta finalizar colapsando en un big crunch, que a su vez podrá ser el inicio de un nuevo ciclo de expansión y contracción (Penrose, 2010). Este escenario se repite de manera infinita, resultando en una serie indefinida de universos desconectados causalmente entre sí.

Los problemas con este modelo surgieron inmediatamente. Tuvo que enfrentar la cuestión de si el universo contaba con suficiente masa crítica como para frenar la expansión, y especialmente con las objeciones que surgían de las condiciones que imponía la segunda ley de la termodinámica, en cuanto se hacía inevitable el aumento de entropía entre un ciclo y otro. En 1934 el físico estadounidense Richard Tolman (1881-1948) publicó un libro al que tituló *Relatividad, termodinámica y cosmología*, en el que formulaba las dificultades que la termodinámica imponía a los universos oscilantes. Alegaba Tolman que la entropía de un ciclo se sumaría a la entropía del siguiente, con lo

que a medida que la entropía fuese aumentando entre ciclos consecutivos los universos resultantes experimentarían tiempos de vida y radios máximos cada vez mayores. Analizando la situación retrospectivamente, el modelo conducía a universos cada vez más pequeños y de menor duración, llegando a un punto en el que todos los ciclos culminaban en un primer big bang, arruinando el modelo.

Esta objeción dio lugar a que las teorías de los universos oscilantes fueran abandonadas. En 1973 el físico teórico estadounidense John Wheeler (1911-2008) publicó un trabajo titulado *De la relatividad a la mutabilidad* en el que partiendo de que nuestro universo es cerrado, pronosticaba un colapso gravitatorio que haría sucumbir el universo en un agujero negro supermasivo. Los efectos de la gravedad cuántica revertirían el colapso, resultando en un nuevo big bang que daría lugar a la aparición de un nuevo universo con leyes de la física distintas al anterior. A este fenómeno lo denominó mutabilidad (*mutability*).

Pero los problemas con la entropía y la masa crítica seguían sin solución. El descubrimiento en 1998 de la energía oscura y la expansión acelerada del universo propició la reformulación del modelo. En los inicios de la década del año 2000 aparecieron algunas propuestas de solución al callejón sin salida a que el segundo principio de la termodinámica conducía al modelo cíclico. El físico británico Paul Frampton (n. 1943) propuso en 2006 que el incesante incremento del valor de la energía oscura «arrastra [al universo] a un big rip en un tiempo futuro finito, lo cual dará lugar a la aparición de unas condiciones extraordinarias de densidad y causalidad» (Frampton, 2006, p.1). Estas especiales condiciones, afirma Frampton, propiciarían que la expansión cambie de signo y se inicie un proceso de contracción en un tiempo muy cercano al big rip, unos 10^{-27} s antes, cuando el universo ya habría sido fraccionado en sectores causalmente independientes. Cada uno de estos sectores experimentaría una contracción separada, resultando en la aparición de nuevos universos. Durante la contracción los universos estarían prácticamente vacíos de materia, por lo que su entropía sería extremadamente pequeña. Alcanzado el tamaño mínimo, en el subsiguiente rebote, el campo inflacionario volvería a inyectar entropía al sistema. Este tipo de propuestas, que proponían mecanismos por los que un universo en expansión podía liberarse de la insoslayable muerte térmica y aportaban soluciones al problema del incremento de entropía entre ciclos, aportaron nuevas esperanzas a los modelos oscilantes.

La teoría de cuerdas predice la existencia de unos objetos elementales denominados cuerdas, de modo que todas las partículas fundamentales no serían más que modos de vibración de esas cuerdas. Las cuerdas son filamentos de una sola dimensión, que pueden presentar una topología cerrada o abierta. Estos dos tipos de topología dan lugar a su vez a los dos tipos de cuerdas existentes, las cerradas y las abiertas. En 1989, Joseph Polchinski (n. 1954), Robert Leigh (n. 1964) y Jin Dai (n. ?), de la Universidad de Texas, e independientemente el físico checo Petr Hořava (n. 1963), afirmaron que una teoría de cuerdas que fuese consistente con la existencia de cuerdas abiertas tenía necesariamente que incluir a unos objetos a los que esas cuerdas pudiesen quedar ancladas por sus extremos⁹⁶. A estas estructuras se les denominó D-branas, unos objetos físicos asemejados a una lámina o membrana, pero que eventualmente pueden ser de naturaleza multidimensional. Dentro de la teoría, estos objetos se muestran muy útiles, dado que generalizan el concepto de punto material a objetos de múltiples dimensiones. De este modo, al igual que ciertos sistemas físicos pueden reducirse a objetos puntuales sin dimensión para facilitar su estudio, como el caso de los planetas en el estudio de los sistemas gravitatorios o de las cargas eléctricas en los sistemas electrostáticos, el concepto de brana participa de un rol semejante, pero extendido a un número superior de dimensiones. Así, una partícula puntual podría considerarse como una brana de dimensión cero, una cuerda como una brana de dimensión uno, etc.

Una consecuencia del concepto de brana es lo que se conoce como cosmología de branas. La teoría M predice la existencia de once dimensiones, las cuatro dimensiones espaciotemporales que observamos y otras siete dimensiones extras compactadas, de tamaño microscópico. Si alguna de estas dimensiones extra no está compactada, es decir posee una gran extensión (eventualmente infinita), daría lugar a una especie de sustrato extenso (denominado a veces *bulk*) sobre el que podrían moverse las branas multidimensionales. Cada brana contendría un universo constituido por las tres dimensiones espaciales junto con la dimensión temporal que experimentamos, además del resto de dimensiones, éstas compactadas, con excepción de la que formaría el sustrato. La correspondencia entre el conjunto de branas y el conjunto de universos es

⁹⁶ Dai, J., Leigh, R.G. & Polchinski, J. (1989). New connections between string theories. *Modern Physics Letters A*, vol. 4, no. 21, pp. 2073-2083; Hořava, P. (1989). Strings on world-sheet orbifolds. *Nuclear Physics B*, vol. 327, no. 2, pp. 461-484.

unívoca, es decir, cada brana contendría un solo universo, y cada universo estaría asociado a una única brana. Nuestro universo no sería excepcional, y también estaría confinado a su propia brana.

Las branas están desconectadas unas de otras, siendo la gravedad la única interacción que pueden intercambiar. Ello es debido a que el gravitón, la partícula portadora de la fuerza de la gravedad, se corresponde con el modo de vibración de una cuerda cerrada, y este tipo de cuerdas, al carecer de extremos y no estar ancladas a las branas, pueden moverse libremente entre ellas. Las cuerdas abiertas, que dan lugar a las partículas portadoras del resto de las fuerzas, están ancladas por sus extremos a las branas, y por tanto confinadas a ellas. El hecho de que la gravedad sea la única interacción que puede escapar de las branas, que es equivalente a decir que puede escapar de los universos, daría explicación al hecho de que esta fuerza sea mucho más débil que las demás.

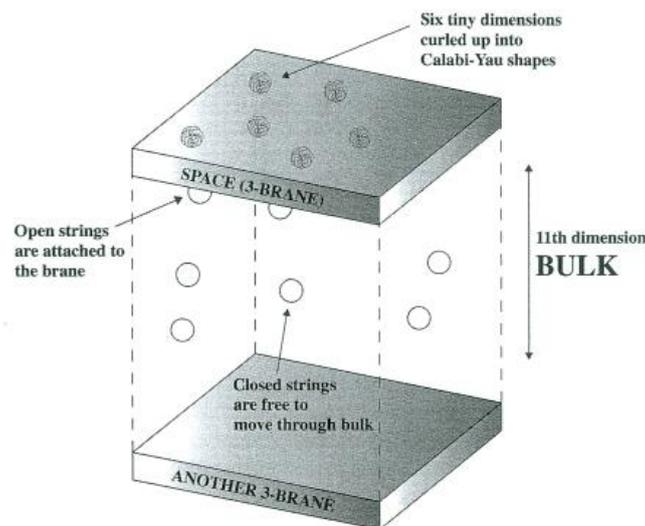


Figura 5. En cosmología de branas, cada universo estaría confinado a una brana multidimensional. De las once dimensiones postuladas por la Teoría M, las tres dimensiones espaciales macroscópicas, la dimensión temporal (no indicada en la figura), y seis dimensiones compactadas se encuentran en la brana. La undécima dimensión sería extensa, y constituiría el sustrato (*bulk*) sobre el que se mueven las branas. Las cuerdas abiertas se encuentran ligadas por sus extremos a las branas, mientras que las cuerdas cerradas pueden moverse por el sustrato, permitiendo la interacción entre branas [Créditos: Bill Halman / The Simple Physicist].

El cosmólogo estadounidense Paul Steinhardt (n. 1952), actualmente profesor Albert Einstein en el Centro de Física Teórica de Princeton, destacó en la década de 1980 por ser uno de los impulsores de la teoría inflacionaria, siendo especialmente relevantes sus trabajos sobre el análisis numérico de la transición de la expansión

inflacionaria del universo a la no-inflacionaria⁹⁷ y sobre la posibilidad de nucleación de burbujas una vez finalizada la fase de inflación⁹⁸. Su sobresaliente participación en el desarrollo de la teoría inflacionaria le llevó a conseguir el Premio Dirac en 2002, compartido con Alan Guth y Andrei Linde.

En esta idea de brana se basó el trabajo del que Steinhardt en el año 2001 fue coautor junto a Justin Khoury, Burt A. Ovrut y Neil Turok, que llevaba por título *El universo ecpirótico: colisiones de branas y el origen del big bang caliente*. Presentó un escenario cosmológico en el cual el big bang sobrevendría como consecuencia de la colisión de dos branas que estarían flotando en un sustrato a lo largo de una dimensión extra. La citada colisión provocaría la conversión de un fragmento de sus energías cinéticas en radiación y materia. La propia colisión de las branas sería lo que entendemos por big bang. En referencia a la ecpirosis de la escuela estoica, denominaron a su modelo universo ecpirótico.

La idea inmediata de que la otra brana se encuentra muy alejada de la nuestra y que nos es inaccesible a la observación es sugerida como errónea. Al contrario, las branas están muy cercas unas de otras y son paralelas entre sí, siendo la imposibilidad de observación directa solo consecuencia de que están desplazadas a una dimensión superior (Tegmark, 2003).

El desconcierto en la comunidad científica sobrevino cuando Steinhardt, que había sido uno de los pioneros de la teoría inflacionaria como solución a los problemas de planitud, isotropía y homogeneidad del universo, prescindió en su nueva teoría del proceso inflacionario afirmando:

La inflación es una teoría de notable éxito. Pero a pesar de veinte años de esfuerzo no existe ningún vínculo con teorías de gravedad cuántica como la teoría M. [Por contra] presentamos un escenario cosmológico que solventa estos problemas sin involucrar la inflación. En su lugar, apelamos un nuevo fenómeno físico que surge naturalmente en las teorías basadas en dimensiones extras y branas. (Khoury, Ovrut, Steinhardt, & Turok, 2001, p.2)

⁹⁷ Ver por ejemplo: Albrecht, A., Steinhardt, P., Turner, M.S. & Wilczek, F. (1982). Reheating an Inflationary Universe. *Physical Review Letters*, vol. 48, no. 20, pp. 1437-1440.

⁹⁸ La, D. & Steinhardt, P. (1988). Extended Inflationary Cosmology. *Physical Review Letters*, vol. 62, no. 4, pp. 376-378.

Una vez planteada la idea de un big bang consecuencia de una colisión de branas, el paso siguiente en la evolución de su teoría llevó a Steinhardt, en esta ocasión sólo con Turok, a plantear a finales de 2001 un modelo cíclico de universo. Esta idea quedó plasmada en un trabajo publicado bajo el título *Un modelo cíclico del universo*, según el cual el cosmos estaría sometido a una interminable secuencia de procesos de expansión y contracción. Basado íntegramente en el modelo ecpirótico, rechazaba la inflación por no ofrecer explicaciones convincentes al origen del tiempo, a la determinación de las condiciones iniciales, ni a la evolución del cosmos a largo plazo. En su modelo cíclico, la homogeneidad y planitud del universo quedaban explicadas por la combinación de dos procesos, uno de lenta expansión acelerada, seguido por otro de lenta contracción.

Según los autores, la teoría M sostiene un universo que estaría formado por dos branas que se mueven libremente por un sustrato extradimensional. Las branas están mutuamente desconectadas al intercambio de cualquier interacción de la naturaleza, dado que todas las partículas tienen sus movimientos restringidos a su propia brana, excepción hecha de la gravedad. Debido al potencial interbrana, éstas se van acercando progresivamente una a la otra hasta que terminan por colisionar⁹⁹. Tras cada colisión las branas rebotan y se separan. Transcurrido un tiempo muy largo pero finito, las branas vuelven a acercarse, provocando una nueva colisión. «[Es la] fuerza interbrana la que ocasionaría que las branas repetidamente se acerquen, colisionen y se vuelvan a separar» (Steinhardt & Turok, 2001, p.7). La fuerza atractiva entre las branas es muy débil cuando ambas se encuentran a una distancia equivalente a miles de longitudes de Planck, y se incrementa progresivamente al tiempo que las branas se aproximan. Cada colisión entre las branas es un nuevo big bang, inyectando en el universo materia y radiación (Steinhardt & Turok, 2005). En el momento de la colisión, la dimensión extra que separa las branas desaparece, para reaparecer inmediatamente tras el encuentro. Las branas existen antes, durante y después de la colisión. Las propias branas no se contraen ni se expanden, es la distancia entre ellas en la dimensión extra la que se reduce hasta hacerse cero. Es precisamente este detalle el que solventa el problema del incremento de entropía

⁹⁹ Según Steinhardt & Turok (2001) su modelo cíclico puede ser descrito en términos de la evolución de un campo escalar φ , donde el potencial interbrana $V(\varphi)$ es una función de ese campo escalar. En su modelo, las dos branas no son idénticas, dado que una posee tensión positiva (brana) y la otra tensión negativa (antibrana). De acuerdo con la teoría de cuerdas, debido al intercambio de gravitones, el potencial de un sistema brana-antibrana resulta en una fuerza atractiva entre ambas branas (Burgess et al., 2001).

entre ciclos, pues según afirman los autores: «la entropía creada en un ciclo [...] no se incrementa de nuevo en la fase de contracción. La simple razón es que las branas en sí mismas no se contraen. Solo las dimensiones extras se contraen» (Steinhardt & Turok, 2005, p.46)

En el momento que presentaron su teoría no enfrentaron directamente el problema del ajuste fino. Fue en un libro publicado en 2007 donde se refirieron expresamente a este problema. En el mismo sostienen que el modelo cíclico abre la posibilidad de un universo que marca una frontera temporal anterior mucho más lejana que la establecida por la teoría del big bang. El modelo respalda que cada ciclo está caracterizado por unas propiedades físicas ligeramente diferentes a las existentes en el anterior, dando lugar a sucesivos universos que evolucionan lentamente por medio de pequeños cambios en los valores de las constantes fundamentales (Steinhardt & Turok, 2007). Una idea compartida por Wheeler cuando afirmaba que cada universo nacido con cada nuevo ciclo presentaría propiedades diferentes a los demás, agotando con el tiempo todas las posibles configuraciones:

Una sugerencia debida a Wheeler es que las contracciones y explosiones tienen el efecto de “reprocesar” el Cosmos. Lo que esto significa es que cada nuevo ciclo es una especie de “nueva aventura” en que las condiciones físicas se barajan aleatoriamente [...] El universo podría explorar todas sus posibilidades al cabo de un número suficiente de ciclos. (Davies, 1994, p.204)

4.3. Inflación eterna de Linde

La teoría del big bang quedó establecida desde mediados de la década de 1960 como el paradigma de consenso entre la comunidad científica para explicar al origen y evolución del universo. Aun así, la teoría presentaba serias dificultades para explicar problemas como la homogeneidad de la radiación de fondo, la planitud de la geometría del universo o las irregularidades presentes en la densidad del universo primitivo. Para enfrentar estos problemas, a finales de los años 1970 apareció una nueva teoría según la cual el universo habría surgido de una región minúscula en un vacío primordial que experimentó un crecimiento exponencial en un tiempo muy corto. Un proceso denominado inflación.

En esta línea el cosmólogo ruso Alexei Starobinsky (n. 1948), que en 1979 desarrollaba sus investigaciones en el Instituto Landau de Física Teórica de Moscú, y

participante destacado del grupo de investigación del acreditado físico bielorruso Yákov Zeldóvich (1914-1987), en dos artículos titulados *Espectro de la radiación gravitacional residual y el estado temprano del universo* y *Nuevo tipo de modelos cosmológicos isótropos sin singularidad*¹⁰⁰, de diciembre de 1979 y marzo de 1980 respectivamente, presentó unos modelos fenomenológicos en los que proponía un escenario primigenio caracterizado por un universo homogéneo e isótropo sin singularidad, la cual era sustituida por un estado de expansión exponencial.

Unos meses después del segundo artículo de Starobinsky, el astrofísico griego Demostenes Kazanas (n. 1950), del Laboratorio de Astrofísica de Altas Energías del Centro Goddard de la NASA, publicó el trabajo *Dinámica del universo y ruptura espontánea de la simetría*¹⁰¹. En él adelantaba una idea que tendría gran alcance en el desarrollo final de la teoría de la inflación. Indicaba la importancia de la presencia de transiciones de fase en la historia temprana del universo, determinantes para su dinámica y evolución, y de acuerdo con lo ya apuntado por Starobinsky, presentaba la forma en cómo bajo ciertas condiciones las leyes de la expansión adoptan una evolución exponencial.

Estos cambios de fase están directamente relacionados con un concepto que resulta trascendental en los procesos inflacionarios, y que remiten a un fenómeno básico en cosmología física: el estado de falso vacío. Un concepto de la mecánica cuántica que se corresponde con un estado metaestable del espacio con gran densidad de energía, pero desprovisto de toda materia y sin ningún campo en su interior. Estos vacíos se encuentran en un estado similar al superenfriamiento que experimentan los líquidos que son enfriados por debajo de su temperatura de congelación, y que solo cristalizan cuando en su interior aparece alguna perturbación que provoque su nucleación. En el caso del universo primigenio la nucleación sobrevino por causa de las fluctuaciones cuánticas.

¹⁰⁰ Starobinsky, A. (1979). Spectrum of Relict Gravitational Radiation and the Early State of the Universe. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, vol. 30, no. 11, pp. 682-685; Starobinsky, A. (1980). A new type of isotropic cosmological models without singularity. *Physics Letters B*, vol. 91, no. 1, pp. 99-102

¹⁰¹ Kazanas, D. (1980). Dynamics of the universe and spontaneous symmetry breaking. *Astrophysical Journal Part 2 - Letters to the Editor*, vol. 241, pp. L59-L63.

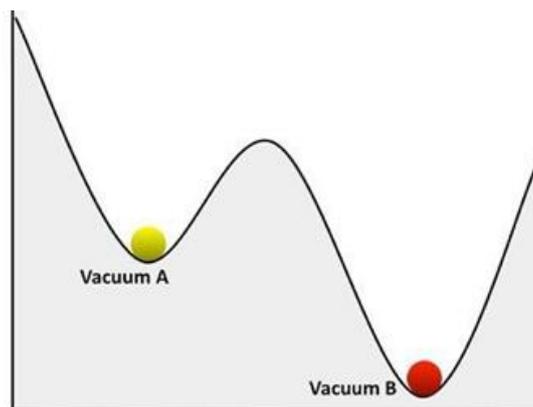


Figura 6. En el gráfico, el punto *Vacuum A* se corresponde con el falso vacío, el cual posee un estado de mayor energía que el *Vacuum B*, estado que remite al vacío verdadero (el que percibimos en nuestra experiencia ordinaria). El falso vacío es metaestable, en cuanto puede permanecer en ese estado indefinidamente, pero que sin embargo puede salvar la barrera que le separa del vacío verdadero bajo la acción de una perturbación externa. Las fluctuaciones cuánticas son la perturbación que provoca la transición del falso vacío al vacío verdadero, un fenómeno denominado nucleación [Créditos: Universidad Federal de Kazán].

Al tiempo que las hipótesis iban refinándose, los modelos inflacionarios se aproximaban a la solución sintética que posteriormente ofrecería Alan Guth. El profesor del Departamento de Física de la Universidad de Kyoto Katsuhiko Sato (n. 1943) cosmólogo japonés interesado en los fenómenos inflacionarios acaecidos durante el universo temprano, propuso en un artículo en coautoría un modelo de expansión exponencial muy similar al de Guth, sobre las bases de una teoría unificada de las interacciones. El artículo se publicó en mayo de 1981 bajo el título *Producción de monopolos en el universo primitivo en una transición de fase de primer orden*¹⁰².

Basándose en la idea clave de las transiciones de fase, en ese mismo año el físico norteamericano Alan Guth (n. 1947), del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), publicó un artículo prácticamente coetáneo con el de Sato¹⁰³ titulado *El universo inflacionario: una posible solución a los problemas del horizonte y la planitud*¹⁰⁴ donde presentó su teoría de la inflación, aunque ya la había expuesto anteriormente en un seminario en el *Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)* el 23 de enero de 1980¹⁰⁵. La idea básica es que el universo primitivo habría estado sometido a un estado de

¹⁰² Einhorn, M.B. & Sato, K. (1981). Monopole production in the very early universe in a first-order phase transition. *Nuclear Physics B*, vol. 180, no. 3, pp. 385-404.

¹⁰³ El artículo de de Guth fue publicado el 15 de enero y el de Einhorn-Sato el 25 de mayo.

¹⁰⁴ Guth, A. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems, *Physical Review D*, vol. 23, no. 2, pp. 347-356.

¹⁰⁵ Seminario que llevaba por nombre 10^{-35} seconds after the Big Bang.

superenfriamiento, con temperaturas veintiocho órdenes de magnitud por debajo de la temperatura crítica que tendría que haber provocado el cambio de fase. Este estado dio lugar a que el universo quedase atrapado en un estado de falso vacío, una situación inestable que habría caído por nucleación, provocando la expansión exponencial del espacio por repulsión gravitacional. A esta expansión es a lo que Guth denominó "inflación". La inflación daba cuenta de dos problemas cuya solución se había resistido durante décadas: 1) El problema del horizonte. No había explicación a por qué podemos apreciar que todas las regiones del universo observable tienen la misma temperatura y densidad, si el universo se había expandido tan rápidamente que no había sido posible que todas las regiones intercambiaran materia y energía; y 2) El problema de la planitud. El universo a gran escala parece plano, pero según el modelo cosmológico estándar cualquier universo que en su inicio sea curvo, por mínimo que sea el grado de la curvatura, debe divergir de la planitud al tiempo que se expande. Con su teoría inflacionaria Guth dio una explicación aceptable a ambos problemas.

El vacío no es la nada. De acuerdo a la moderna teoría de partículas, se trata de un ente físico dotado de energía y que ejerce cierta presión, generando una peculiar fuerza gravitatoria de carácter repulsivo. Como se ha visto, los falsos vacíos son inestables (de ahí su denominación de falso), y de acuerdo a las ecuaciones de la relatividad general, una vez que el universo abandona este estado, se expande exponencialmente a un ritmo tal que

$$a(t) \sim e^{Ht}$$

siendo $a(t)$ el factor de escala del universo y H el parámetro de Hubble (Linde, 1984, p.928). De acuerdo con la teoría de la inflación, en algún instante anterior a los 10^{-35} s ocurrió una transición de fase. En un periodo de tiempo que duró hasta los 10^{-30} s el universo creció en un factor de al menos 10^{30} (Lineweaver, 2005).

[Dependiendo del modelo considerado, en unos 330 periodos de 10^{-37} s] el tamaño del universo creció en un factor de 10^{100} . No importa cuál fuese su tamaño inicial, el universo se hizo enorme muy rápidamente. Dado que el falso vacío es inestable, cayó, produciendo una bola de fuego primordial, constituyendo ese momento el final de la inflación. La bola de fuego continuó expandiéndose por la inercia y evolucionó de acuerdo con las líneas generales de la cosmología estándar del big bang. (Vilenkin, 2011, p.2-3)

Como señala Vilenkin en la cita, los estados de falso vacío terminan cayendo en vacíos de baja energía (como los que nos son familiares) donde el exceso de energía resulta en una concentración de materia y energía superdensas en expansión, continuando a partir de ahí el universo su evolución de acuerdo al modelo previsto por la teoría del big bang.

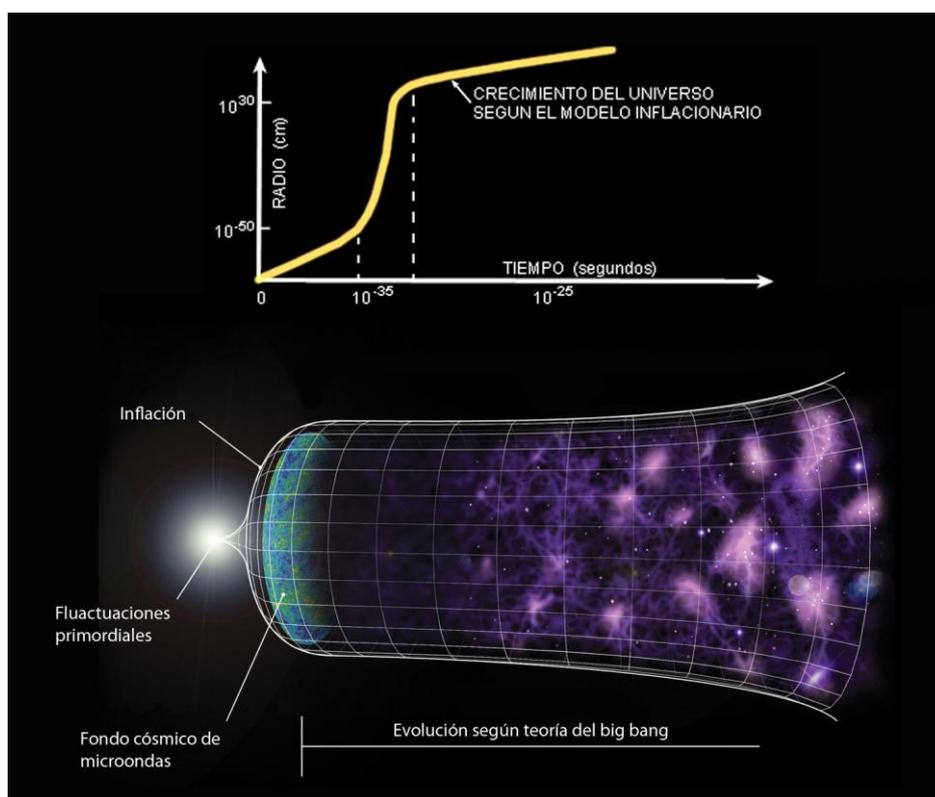


Figura 7. Según el modelo inflacionario, tras una transición de fase del falso vacío al vacío verdadero provocada por fluctuaciones cuánticas primordiales, el universo experimentó un crecimiento exponencial en un tiempo muy corto, un fenómeno denominado inflación cósmica. Finalizada esta etapa, el universo evolucionó de acuerdo a lo previsto por la teoría del big bang [Créditos: Emilio Silvera & Middlebury College].

Pero inmediatamente los físicos cayeron en la cuenta de que si bien la inflación daba cuenta de la uniformidad observada, esto no implicaba que esa uniformidad tuviese que extenderse a todo el universo, más allá de nuestro horizonte cosmológico.

Andrei Linde (n. 1948), físico teórico nacido en Rusia y afincado en Estados Unidos, donde ejerce como profesor en la Universidad de Stanford, comenzó sus trabajos formulando relaciones entre la física de partículas y la cosmología. Según Linde (1984), la caída del falso vacío a un estado de menor energía daría lugar mediante un proceso de nucleación a la aparición de una burbuja, una estructura que el propio Linde

asemeja en su formación y expansión a las producidas en el agua en ebullición, pero cuyo espacio interior está «lleno de materia depositada por la energía del campo que causó la inflación» (Tegmark, 2003, p.10). Estas burbujas se expanden a velocidades próximas a la de la luz, mientras que el falso vacío se expande exponencialmente. Por consiguiente, existen regiones en el falso vacío que se están separando de las burbujas a velocidades más rápidas que las velocidades a las que se expanden las propias burbujas. Así, el espacio creado en el proceso de inflación es siempre mayor que el que ocupan las burbujas, de modo que la inflación nunca finaliza (Linde, 1986). Este proceso se conoce como inflación eterna. De acuerdo a sus investigaciones, la nucleación de burbujas se desencadena aleatoriamente en innumerables ocasiones dentro del falso vacío, por procesos cuánticos probabilísticos que no ocurren en todos los lugares a la vez. Este proceso de aparición incesante de nuevas burbujas conlleva la generación permanente de nuevos universos, dado que cada burbuja contiene un universo embrionario desconectado de los demás.

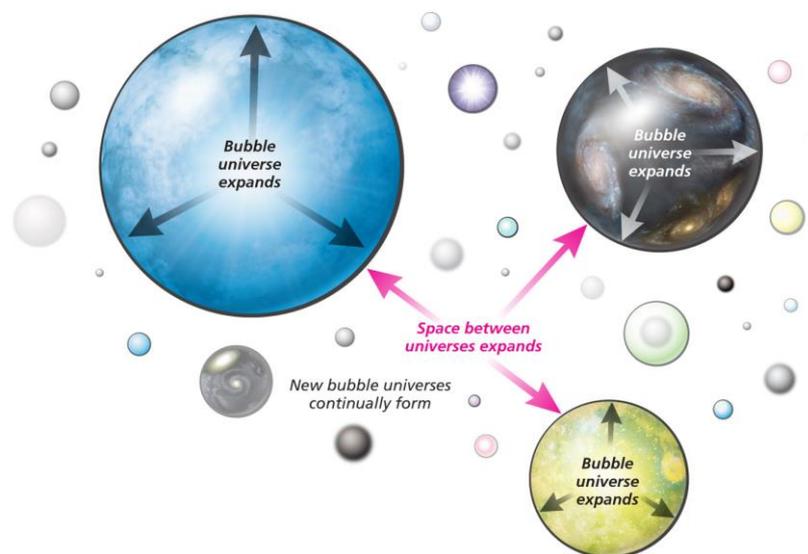


Figura 8. En el modelo de inflación eterna de Andrei Linde, la generación de universos burbuja independientes es incesante. Siempre hay regiones en el falso vacío disponibles para la nucleación de nuevas burbujas, dado que mientras las burbujas se expanden a velocidades cercanas a la de la luz, el falso vacío lo hace aún más rápidamente [Créditos: Discover Magazine].

De este modo, mientras la inflación continúa en otros lugares, hace 13.700 millones de años una caída del falso vacío dio lugar a nuestro universo. En este escenario de multiverso inflacionario, el big bang que dio origen a nuestro universo fue tan solo el origen de una burbuja como muchas otras.

En cada una de estas regiones, los procesos cuánticos aleatorios que tienen lugar durante la inflación dan lugar a unas condiciones iniciales diferentes en cada burbuja, de modo que las propiedades de cada universo difieren de las propiedades de los demás. La mayoría de estos ajustes serán desfavorables para la aparición de vida, pero en algunos de ellos, como en el nuestro, han sido tales que han permitido la evolución biológica.

Cada una de las fluctuaciones cuánticas genera perturbaciones diferentes, las cuales quedan impresas en el fondo cosmológico, determinando el contenido de materia y la estructura del universo a gran escala. Estas perturbaciones dan lugar a diferentes condiciones iniciales en diferentes partes del universo. Dado que estas condiciones iniciales de carácter clásico pueden variar continuamente, se podría esperar que esto conduzca a un número infinito de diferentes resultados, que si resultan en valores muy cercanos unos a otros, no sería posible distinguirlos entre ellos, debido al principio de indeterminación cuántico. (Linde, 2014, p.58)

Con su teoría del multiverso inflacionario Linde proporcionó una explicación científica al principio cosmológico antrópico.

El universo inflacionario proporciona las condiciones necesarias para la implementación del principio antrópico. Después de la inflación, nuestro universo se dividió en una gran cantidad de dominios (mini-universos), cada uno de ellos presentando propiedades diferentes en las partículas elementales, distintos valores para la energía del vacío (el término cosmológico) e incluso un número variable de dimensiones, de tal forma que los organismos vivos solo pueden existir en aquellos mini-universos que son susceptibles de albergar vida. (Linde, 1984, p.969)

El estado de superenfriamiento del universo pre-primigenio resulta en un congelamiento de las cuatro fuerzas fundamentales, lo que va a determinar la fijación contingente del valor de ciertos parámetros que en nuestro universo nos parecen finamente ajustados. Así, cada universo inflacionario experimenta una transición de fase que da lugar a la asignación de unos valores aleatorios a determinados parámetros fundamentales (Rees, 2000). Por tanto, cada uno de ellos va a presentar unos valores diferentes de las constantes físicas, de las fuerzas de la naturaleza, y de la dimensionalidad espacio-temporal, siendo solo unos pocos universos los que permitirían la formación de seres vivos complejos, mientras que la gran mayoría lo imposibilitarían absolutamente. Como el propio Linde señala:

Desconocemos si la vida puede evolucionar para siempre en cada una de estas regiones, pero lo que sí sabemos con certeza es que la vida aparecerá una y otra vez en diferentes regiones del universo y en todas las formas posibles. Este cambio en nuestras nociones de la estructura global del universo y nuestro lugar en él es una de las consecuencias más importantes de la cosmología inflacionaria. (Linde, 1990, p.244)

4.4. Multiverso selectivo de Smolin

Ya se ha visto que una estrella se mantiene en equilibrio mientras la presión de la radiación equilibre la contracción gravitatoria. Por tanto, se mantendrá estable mientras en su interior se produzcan reacciones termonucleares en magnitud suficiente como para compensar la presión ejercida por su propio peso. Inevitablemente, con el tiempo la estrella irá consumiendo su combustible, se enfriará y comenzará a contraerse. Lo que sobrevendría a partir de ese momento era desconocido en 1930, año en que un joven físico hindú nacido en la ciudad de Lahore llegó a la Universidad de Cambridge. Su nombre era Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), con el tiempo reconocido por sus estudios sobre evolución estelar¹⁰⁶. Agotado el combustible, la estrella comienza a contraerse y aumenta su densidad. La elevada masa provoca una contracción muy intensa, que lleva a la densidad a valores tan altos que obliga a los electrones de los orbitales atómicos a mantener una extrema proximidad. En ese momento la contracción se detiene, al entrar en juego el principio de exclusión de Pauli. La presión a que se ven sometidos los átomos de los elementos químicos que constituyen la estrella, hace que los estados energéticos más bajos accesibles a los electrones sean todos ocupados, obligando al resto a adquirir estados energéticos muy elevados, generando lo que se denomina presión de degeneración electrónica. Una vez que la presión debida al principio de exclusión compensa la contracción por gravitación, la estrella vuelve a estabilizarse. En el ínterin, la estrella se ha convertido en una enana blanca.

¹⁰⁶ Sus investigaciones quedaron plasmados en una serie de trabajos publicados en los primeros años de la década de 1930: Chandrasekhar, S. (1931). The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs. *Astrophysical Journal*, vol. 74, no. 1, pp. 81-82; Chandrasekhar, S. (1931). The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 91, pp. 456-466; Chandrasekhar, S. (1931). The Density of White Dwarf Stars. *Philosophical Magazine Series 7*, vol. 11, no. 70, pp. 592-596; Chandrasekhar, S. (1934). Stellar Configurations with degenerate Cores. *The Observatory*, vol. 57, pp. 373-377; Chandrasekhar, S. (1935). The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass (second paper). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 95, pp. 207-225.

El punto de equilibrio va a depender de la presión gravitatoria de la estrella, y por tanto, de la cantidad de masa que posea. Chandrasekhar conjeturó que debía existir una cantidad de materia límite por encima de la cual la presión que mantenía a raya a la gravedad gracias a la degeneración de los electrones cedería, haciéndose ineludible el colapso de la estrella. Esta cantidad de masa máxima es conocida como límite de Chandrasekhar y equivale aproximadamente a 1,44 masas solares. Si la masa de la estrella se sitúa por encima de este límite, la presión de degeneración electrónica es superada por la gravedad. Debido a que la mayor parte del átomo es espacio vacío, la materia se derrumba sobre sí misma y continúa el colapso.

En este escenario, el núcleo de la estrella soporta presiones y temperaturas tan elevadas que favorecen la aparición de un proceso denominado captura electrónica. Por este proceso un protón del núcleo atómico se combina con un electrón de las capas interiores del átomo, transformándose en un neutrón. Esta transformación fue descrita en 1934 por el físico italiano Gian Carlo Wick¹⁰⁷ (1909-1992) y observada por primera vez en 1937 por el físico experimental estadounidense Luis W. Alvarez¹⁰⁸ (1911-1988). La estructura heterogénea del núcleo estelar va desapareciendo, al tiempo que se va transformando en lo que se denomina una estrella de neutrones. Las capas exteriores de la estrella van hundiéndose y compactando el núcleo neutrónico, hasta que de nuevo el principio de exclusión de Pauli evita el colapso final. En este caso gracias a la degeneración neutrónica¹⁰⁹. Análogamente al límite de Chandrasekhar, también en estas condiciones existe una frontera superior que la presión de degeneración no podrá soportar, el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff. Basándose en un trabajo anterior de Tolman¹¹⁰, en 1939 los también físicos J. Robert Oppenheimer (1904-1967) y George Volkoff (1914-2000) predijeron la existencia de un límite superior de masa cuyo peso gravitatorio podría soportar una estrella de neutrones¹¹¹. En su trabajo establecían un límite máximo que era 3/4 partes de la masa solar. Cálculos posteriores más exactos han

¹⁰⁷ Wick, G.C. (1934). Sugli elementi radioattivi di F. Joliot e I. Curie. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei*, vol. 19, pp. 319-324.

¹⁰⁸ Alvarez, L.W. (1937). Nuclear K Electron Capture. *Physical Review*, vol. 52, no. 2, pp. 134-135.

¹⁰⁹ En realidad, las presiones de degeneración electrónica y neutrónica son aspectos parciales de un mismo fenómeno, denominado presión de degeneración de los fermiones.

¹¹⁰ Tolman, R. (1939). Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid. *Physical Review*, vol. 55, no. 4, pp. 364-373.

¹¹¹ Oppenheimer, J.R. & Volkoff, G.M. (1939). On Massive Neutron Cores. *Physical Review*, vol. 55, no. 4, pp. 374--381.

establecido este límite entre 1,5 y 3 masas solares aproximadamente¹¹² (Bombaci, 1996). Por encima de este valor, la presión de degeneración neutrónica también cede y la estrella colapsa definitivamente. El campo gravitatorio se hace ahora tan intenso que la deformación del tejido del espacio-tiempo impide que nada pueda escapar de su interior, ni siquiera la radiación electromagnética. Esta región del espacio limitada por el horizonte de sucesos se ha convertido en un agujero negro. En su centro, de acuerdo a la relatividad general, se ha formado una singularidad gravitacional, una región del espacio caracterizada por un volumen cero y curvatura infinita. Contiene toda la masa del agujero negro y por tanto posee densidad infinita.

Roger Penrose (n. 1931) realizó a lo largo de su carrera importantes aportaciones al conocimiento de la topología de los agujeros negros. Formuló en 1965 el primer teorema de la singularidad¹¹³, y en 1970 en coautoría con el también cosmólogo británico Stephen Hawking (n. 1942), el llamado teorema de la singularidad de Penrose-Hawking¹¹⁴. En ellos se afirmaba que en cualquier cuerpo que experimente un colapso gravitatorio debe aparecer en su centro una singularidad espacio-temporal. Era por tanto aplicable a los agujeros negros. En este escenario las limitaciones de la relatividad general se hacen manifiestas. La predicción de magnitudes infinitas es prueba suficiente de que la teoría ha dejado de ser coherente y encuentra su frontera de aplicabilidad en condiciones tan extremas. Una teoría clásica como la relatividad es incapaz de explicar los fenómenos que surgen a escalas de distancia tan pequeñas y de densidad de energía tan altas, dado que en estas condiciones los efectos cuánticos se hacen muy relevantes. Describir los fenómenos que aparecen en estas condiciones tan extremas hace necesario la utilización de herramientas que solo puede proporcionar un nuevo paradigma de la física, en un marco que armonice la relatividad general con la mecánica cuántica. Una teoría de la que por el momento carecemos.

Para poder predecir qué ocurre en estos escenarios físicos tan radicales, donde la relatividad general y la mecánica cuántica por separado son inútiles, se han propuesto

¹¹² Si pueden parecer cantidades de masa no tan altas como para formar una estrella de neutrones, es debido a las características propias de la evolución estelar. De hecho, estas cifras se corresponden con una masa estelar original comprendida entre 15 y 20 masas solares.

¹¹³ Penrose, R. (1965). Gravitational collapse and space-time singularities. *Physical Review Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 57-59.

¹¹⁴ Hawking, S.W. & Penrose, R. (1970). The singularities of gravitational collapse and cosmology. *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 314, no. 1519, pp. 529-548.

algunas teorías de unificación que están siendo objeto de interés por parte de los físicos teóricos. Una de ellas es la denominada gravedad cuántica de bucles (LQC). Está basada en postular que, del mismo modo que la energía está cuantizada en forma de fotones y la materia lo está en forma de partículas fundamentales, el espacio y el tiempo también deben ser entes discretos, existiendo un volumen de espacio y un lapso de tiempo mínimos que no pueden ser divididos. Son los denominados átomos del espacio-tiempo.

El volumen más pequeño distinto de cero es una longitud de Planck al cubo, 10^{-99} cm³. Por lo tanto, la teoría predice que hay aproximadamente 10^{99} átomos de volumen en cada centímetro cúbico del espacio. El cuanto de volumen es por tanto tan pequeño que hay más de tales cuantos en un centímetro cúbico que centímetros cúbicos hay en el universo visible (10^{85}) (Smolin, 2004, p.48).

Con toda la materia de la estrella colapsando hacia un volumen cada vez más pequeño, la LQC nos dice que el fin de la contracción se produce cuando la curvatura del espacio-tiempo se aproxima a las escalas de Planck, momento en el que según Ostriker & Steinhardt (2001) el espacio alcanza un tamaño mínimo y no puede soportar más contracción. El espacio es ya incapaz de almacenar más energía. En esta situación la gravedad se vuelve repulsiva, evitando el colapso final hacia la singularidad y provocando el llamado rebote cuántico.

Mientras que el carácter repulsivo de la gravedad consecuencia de su naturaleza cuántica es insignificante en condiciones normales, se vuelve dominante cuando la curvatura se aproxima a las escalas de Planck, y detiene el colapso que clásicamente daba lugar a la singularidad. La sugerencia de la LQC es que una nueva fuerza de repulsión asociada con la naturaleza cuántica de la geometría del espacio-tiempo entra en juego y es lo suficientemente fuerte como para contrarrestar la atracción gravitatoria clásica, con independencia de lo grande que sea la masa. Es esta fuerza la que impide la formación de singularidades (Ashtekar, 2009, p.727).

Sin entrar en más detalles, consignar que en teoría de cuerdas, la otra gran aproximación a la gravedad cuántica, el tamaño finito e indivisible de las cuerdas también establece un límite inferior que la contracción gravitatoria no puede superar, impidiendo igualmente la aparición de singularidades.

Uno de los principales especialistas en gravedad cuántica de bucles es el físico neoyorquino Lee Smolin (n. 1955). Adscrito al Instituto Perimeter de Física Teórica,

desarrolla su actividad académica como profesor adjunto de física en la Universidad de Waterloo y es miembro del departamento de filosofía de la Universidad de Toronto. Además de a la LQC, sus investigaciones le han llevado a realizar también importantes contribuciones en cosmología y en teoría cuántica de campos, y son reconocidas sus aportaciones a la filosofía de la ciencia.

Smolin no se plantea el problema del ajuste fino como una cuestión estrictamente antrópica. La pregunta que pretende responder no es por qué el universo presenta unas características que han permitido la aparición del ser humano, o por extensión, del resto de organismos vivos. La cuestión que él suscita es «por qué las leyes de la física y las condiciones iniciales del universo son tales que han permitido la existencia de las estrellas» (Smolin, 1992, p.174), dando por supuesto que sin estrellas no habría habido posibilidad de sintetizar elementos químicos pesados ni de mantener determinadas regiones del universo fuera del equilibrio térmico, condiciones indispensables para «dar cuenta de la enorme variedad de fenómenos que encontramos en nuestro universo» (p.174), entre los cuales, aunque sin referirlo explícitamente, habría que incluir la aparición de la vida. La razón por la que Smolin dirige su exposición directamente a la existencia de estrellas es porque, como sistemas que pueden colapsar gravitatoriamente, son la condición de posibilidad de la formación de agujeros negros, elemento central de su hipótesis del multiverso.

El mecanismo de generación de nuevos universos de Smolin se fundamenta en dos postulados: 1) cada singularidad final es seguida por una singularidad inicial, que evoluciona hacia un nuevo universo, o como se defiende desde la LQC, cada rebote lleva, por un proceso de tunelación cuántica¹¹⁵, hacia una nueva región del espacio-tiempo; y 2) con cada singularidad (o suceso de tunelación) las constantes de la física cambian ligeramente de valor de manera aleatoria, determinando un universo de características diferentes al universo progenitor (Smolin, 1992).

El resultado del rebote experimentado en el interior de los agujeros negros resulta en «la creación de una nueva región del espacio-tiempo en expansión, que puede crecer

¹¹⁵ El efecto túnel puede explicarse mediante el principio de indeterminación de Heisenberg. La inecuación $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$ permite que un sistema cuántico pueda incrementar su energía en una cantidad significativa siempre que sea durante un corto intervalo de tiempo, o recíprocamente, incrementar muy poco su energía un periodo de tiempo significativamente largo. La tunelación corresponde al primer caso.

y convertirse a todos los efectos prácticos en un nuevo universo.» (Smolin, 2009, p.337). Así, afirma Smolin que el big bang que dio origen a nuestro universo habría sido el resultado del colapso que se produjo en un agujero negro situado en una región de otro universo. Del mismo modo, en el nuestro, estima que se habrán generado al menos 10^{18} nuevos universos, que si poseen las características apropiadas, habrán dado lugar a su vez cada uno de ellos a un número aproximadamente igual de otros universos.

Apoyando la tesis de Smolin, afirman también Gambini & Pullin (2003), que han presentado cálculos basados en gravedad cuántica, que las constantes de la física cambian aleatoriamente cuando se verifica un proceso de rebote por tunelación cuántica, en escenarios próximos a una singularidad. Así, con cada nuevo universo las constantes fundamentales toman valores ligeramente diferentes, dando lugar a sucesivas generaciones de universos que van experimentando una especie de proceso evolutivo, debido a las pequeñas variaciones que con cada generación experimentan los parámetros de la física. Smolin (1999) defiende asimismo, como una pieza clave de su hipótesis, que en el proceso de reproducción de nuevos universos se verifica un proceso de selección darwiniano, que ajusta los valores de las constantes físicas de tal forma que son seleccionados aquellos universos que maximizan la probabilidad de formación de estrellas, y por tanto, de agujeros negros, dado que tales universos se reproducen más eficientemente¹¹⁶. De este modo, su propuesta de multiverso, al asegurar mediante un mecanismo similar a la selección natural la existencia de un alto número de universos caracterizados por contener una elevada población de estrellas, da cuenta del ajuste que observamos en los parámetros de la física, al haber facilitado indirectamente las condiciones necesarias para la aparición de organismos vivos.

4.5. Multiverso paisaje de Susskind

Si en el apartado anterior el foco de interés estaba puesto en la gravedad cuántica de bucles, es ahora la teoría de cuerdas como la otra gran tentativa para la formulación de una teoría cuantizada de la gravedad la que nos ocupa.

Los primeros pasos que con el tiempo llevarían a lo que hoy conocemos como teoría de cuerdas hay que buscarlos en el artículo de 1968 *Construction of a crossing-*

¹¹⁶ De ahí la denominación de multiverso selectivo.

*symmetric Regge-behaved amplitude for linearly rising Regge trajectories*¹¹⁷ que el físico italiano Gabriele Veneziano (n. 1942) publicó en la revista italiana *Il Nuovo Cimento* (hoy publicada bajo el nombre *The European Physical Journal Plus*), en el que presentaba el llamado modelo de resonancia dual, una formulación que capturaba un modelo de dualidad característico de las interacciones fuertes¹¹⁸. La historia temprana de la introducción del término "cuerda" es una narración lejos de estar aclarada. Si atendemos a lo que sostiene Schwarz (2000), uno de los fundadores de la teoría, las primeras ideas acerca de la existencia de un objeto extenso unidimensional o cuerda habría que atribuirlo a tres investigadores, Yoichiro Nambu (1921-2015) de la Universidad de Chicago, Holger Bech Nielsen (n. 1941) del Instituto Niels Bohr de Copenhague y Leonard Susskind (n. 1940) de la Universidad de Stanford, quienes de forma independiente a lo largo de los dos años siguientes al artículo de Veneziano comprendieron que lo que en realidad describía el modelo dual eran las propiedades de una cuerda unidimensional en estado de vibración. La fuerza nuclear fuerte podía representarse mediante el estado de vibración de uno de estos filamentos. En concreto, Nambu se refirió a ellas en una conferencia sobre simetrías y modelos de quarks celebrada en 1969 en la *Wayne State University* de Detroit¹¹⁹, en la que parece ser la primera alusión a la idea de cuerda.

Las primeras formulaciones de la teoría de cuerdas estaban referidas únicamente a las partículas hadrónicas y las cuerdas de gluones, ambas protagonistas de la interacción fuerte¹²⁰. Por la propiedad de libertad asintótica, algunas partículas como los quarks se caracterizan por tener una fuerza de interacción que aumenta con la distancia, debilitándose asintóticamente cuando la distancia entre ellos tiende a cero¹²¹. Por otro lado, por la propiedad denominada confinamiento, se observa que los quarks nunca aparecen aislados en la naturaleza. A efectos de visualizar ambas propiedades, la de

¹¹⁷ Veneziano, G. (1968). Construction of a crossing-symmetric Regge-behaved amplitude for linearly rising Regge trajectories. *Il Nuovo Cimento A*, vol. 57, no. 1, pp. 190-197.

¹¹⁸ Aquí el término "dualidad" se refiere a que diferentes diagramas que parecen representar procesos distintos, son en realidad aproximaciones del mismo proceso.

¹¹⁹ Nambu, Y. (1969). Quark Model and the Factorization of the Veneziano Model. *Proceedings of International Conference on Symmetries and Quark Models*, Wayne State University, p. 269.

¹²⁰ Los hadrones son partículas subatómicas formadas por quarks. Se dividen en bariones (tres quarks o tres antiquarks) y mesones (un quark y un antiquark). El gluón es la partícula portadora de la interacción fuerte.

¹²¹ Este comportamiento de la interacción fuerte es contrario y antiintuitivo para nuestro conocimiento ordinario, donde campos como el eléctrico, el magnético o el gravitatorio decrecen con la distancia.

libertad asintótica y la de confinamiento, podemos imaginar un protón, formado por dos quarks up y un quark down, como tres esferas (quarks) que se encuentran rodeadas por partículas mucho más pequeñas, los gluones, formando una especie de caparazón alrededor de los quarks. Este conjunto de partículas (los tres quarks en el centro y los gluones alrededor) es lo que desde fuera se observa como un protón¹²². Si se intenta separar un quark de otro quark, la nube de gluones se adapta a esa separación y se transforma en un tubo que mantiene unidos a ambos quarks. Al tiempo que aumentamos la separación, el tubo se va haciendo más y más estrecho, tendiendo a formar una cuerda de gluones, con una tensión que va en aumento con el incremento de la distancia entre los quarks, dificultando la separación. De este modo «en el primer modelo de cuerda de los hadrones, la cuerda tiene una tensión tal que cuando pares de quarks incrementan su distancia uno del otro (estirando la cuerda) la cuerda almacena energía potencial [...] [requiriéndose] energía infinita para separar completamente dos quarks» (Rickles, 2014, p.11). Este modelo daba cuenta de la interacción fuerte, y explicaba por qué no se observan quarks aislados en la naturaleza.

Las cuerdas vibran con diferentes modos y frecuencias, siendo las partículas fundamentales modos cuantizados de esa oscilación. Estructuralmente son filamentos unidimensionales, pueden ser de topología abierta o cerrada, y tienen un tamaño finito del orden de la longitud de Planck, 10^{-35} m (Bousso & Polchinski, 2004).

En 1974 Tamiaki Yoneya (n. 1947), Jöel Scherk (1946-1980) y John Schwarz (n. 1941) descubrieron que algunos estados de vibración de las cuerdas presentaban propiedades similares a las que se suponía debía tener el gravitón, la partícula mediadora de la interacción gravitatoria. Este descubrimiento llevó a que la teoría haya evolucionado desde los primeros modelos que se limitaban a explicar la interacción fuerte a ser en la actualidad un proyecto mucho más amplio, en un intento de formular una teoría cuántica de la gravedad que unifique a todas las interacciones.

Las soluciones de las primeras versiones de la teoría demostraron ser inestables y además solo incluían a los bosones¹²³. Dejaba fuera partículas como el electrón y los

¹²² Esta configuración explica por qué las masas del protón y del neutrón son mucho mayores que exclusivamente la suma de las masas de los tres quarks.

¹²³ Las partículas fundamentales se dividen en dos tipos: los bosones, caracterizados por tener espín entero (0, 1, 2,...), y los fermiones, caracterizados por tener espín fraccionario (1/2, 3/2, 5/2,...). Son bosones el fotón, el gluón, los bosones W y Z, el bosón de Higgs y el gravitón.

quarks. Para solventar los inconvenientes que emergían de esta versión reducida de la teoría, se desarrolló una nueva versión ampliada denominada teoría de las supercuerdas. Para que pudiese describir también a los fermiones hubo que introducir la hipótesis de la supersimetría (SUSY)¹²⁴ (Rickles, 2014). De ahí que a veces también se le denomine teoría de supercuerdas o teoría de cuerdas supersimétricas. Estos desarrollos tuvieron lugar durante los años que transcurrieron entre 1984 y 1994, periodo que suele denominarse Primera Revolución de las Supercuerdas.

El nuevo modelo parecía bastante completo, en cuanto era capaz de describir todas las partículas e interacciones fundamentales. Este aparente éxito llevó a muchos físicos teóricos a trabajar en su desarrollo. Pero nuevamente surgieron problemas cuando en pocos años se había perdido la unicidad de la teoría, habiéndose construido cinco teorías de supercuerdas separadas, denominadas genéricamente I, IIA, IIB, heteróticas HO y heteróticas HE. Habiendo diferencias entre ellas, todas compartían sin embargo la noción de un espacio-tiempo de diez dimensiones, cuatro correspondientes al espacio-tiempo de Minkowski ordinario y otras seis dimensiones extra compactadas en un tamaño muy pequeño.

La solución a este desorden vino de la mano del físico y matemático norteamericano Edward Witten (n. 1951), que ya había destacado en sus trabajos para desarrollar métodos matemáticos para su aplicación a los problemas de la física¹²⁵. En vez de buscar, como ya hacían algunos, cuál de las cinco teorías propuestas debía ser la verdadera, Witten sorprendió a la comunidad de físicos teóricos cuando en un congreso sobre cuerdas (STRINGS 95) celebrado en la primavera de 1995 en la Universidad del Sur de California, sugirió que las cinco teorías no eran diferentes unas de otras, sino que

¹²⁴ La supersimetría (SUSY) es una propuesta que predice la existencia de partículas simétricas tanto para las partículas de espín semientero (fermiones) como para las de espín entero (bosones). Así, cada bosón debe tener asociado un fermión supersimétrico, y cada fermión un bosón supersimétrico. Estas partículas suelen denominarse supercompañeras. Ejemplos de superpartículas son el neutralino, el fotino, el gluino y el gravitino. Todas las esperanzas puestas en encontrar en el LHC alguna de estas partículas han resultado infructuosas, en lo que se denomina rotura de la simetría. Empieza por tanto a dudarse del acierto de la supersimetría. Como la teoría de las supercuerdas incluye la supersimetría, los fracasos en verificar las predicciones de esta última redundan en la confianza en la teoría de supercuerdas, lo que ha dado nuevos ánimos a los defensores de su teoría rival, la gravedad cuántica de bucles.

¹²⁵ Que uno de los principales protagonistas en el desarrollo de la teoría de cuerdas sea, además de físico, un matemático de la talla de Edward Witten, ganador de la medalla Fields, da idea de la complejísima formulación matemática que caracteriza a la teoría.

todas eran al fin y al cabo el límite matemático de una misma teoría¹²⁶. Witten denominó esta propuesta Teoría M¹²⁷. Este descubrimiento inició el periodo que a partir de 1995 es denominado como Segunda Revolución de las Supercuerdas. En lugar de diez, la nueva teoría M postulaba once dimensiones y entre otras descripciones incluía el concepto de brana multidimensional y supergravedad (SUGRA), una combinación de gravedad y supersimetría. La teoría M mantiene la misma aspiración que tenía la teoría de cuerdas, constituirse como la teoría unificada de todas las interacciones, aunque aún carece de una formulación completa. En el contexto de la teoría han tomado relevancia en los últimos años vertientes como su aplicación al estudio de la entropía de los agujeros negros, la llamada conjetura de Maldacena¹²⁸ y lo que ahora nos interesa, el paisaje de la teoría de cuerdas.

Sobre los puntos de nuestro espacio-tiempo cotidiano de cuatro dimensiones se arrollan las dimensiones extras propuestas por la teoría de cuerdas. Estas dimensiones extras son diminutas, y se compactan formando topologías muy diversas (una esfera, un toroide, tres toroides unidos, etc.) llamadas variedades Calabi-Yau, cada una con parámetros diferentes que van a determinar su forma y tamaño. Como se verá más adelante, será precisamente el tipo de compactación de estas seis minúsculas dimensiones lo que va a determinar las características del universo a la escala de nuestras cuatro dimensiones (Lüst, 2010).

Las soluciones a las ecuaciones de la teoría de cuerdas describen unos estados fundamentales denominados *vacíos*, asociados a cada configuración topológica Calabi-Yau. Existe un número extraordinariamente grande de tales vacíos. Cada uno de ellos tiene una energía potencial denominada energía del vacío. Todo universo que venga a la existencia, incluido el nuestro, debe corresponderse con uno de estos vacíos, siendo a su vez que cada uno de ellos van a determinar los diferentes tipos de partículas y fuerzas de

¹²⁶ Witten, E. (1995). *Some comments on string dynamics*. Contribution to STRINGS 95: Conference on Future Perspectives in String Theory, University of Southern California, Los Angeles, 1995.

¹²⁷ Curiosamente, en muchas fuentes se tilda de enigmático el origen de la denominación M para esta teoría, cuando el propio Witten en un trabajo de 1998 titulado *Magic, mystery, and matrix* indica textualmente en el resumen inicial: «[...] and finally M-theory, where M stands for magic, mystery or matrix».

¹²⁸ Se trata de una conjetura por la que el físico argentino Juan Martín Maldacena aventuró en el año 1997 una dualidad entre la gravedad y la teoría de campos, la correspondencia AdS/CFT. Sugiere que algunas teorías de la gravedad (a las que remite el acrónimo AdS -anti de Sitter-) son equivalentes a algunas teorías cuánticas de campo (a las que remite el acrónimo CFT -Teoría de Campos Conforme-).

interacción que aparecerán en ese universo (Bousso & Polchinski, 2004). En definitiva, la geometría de las dimensiones adicionales determina la energía del vacío, y ésta la fenomenología del mundo macroscópico.

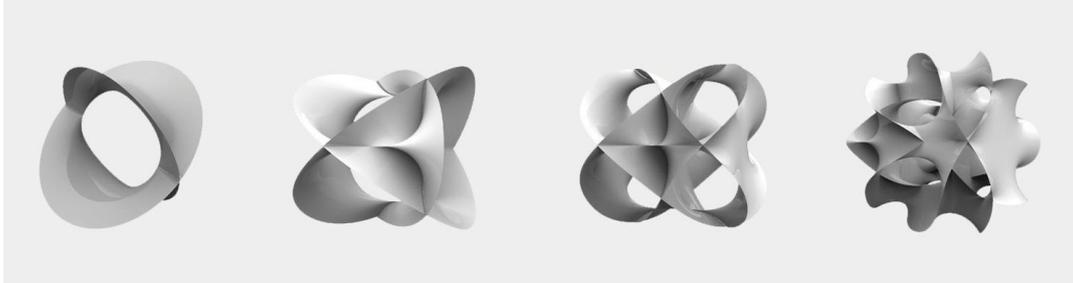


Figura 9. Simulación de distintas variedades Calabi-Yau obtenidas mediante modelado matemático [Créditos: PCH Innovations].

El nacimiento del paisaje de la teoría de cuerdas se remonta al año 1986, cuando se descubrió el elevado número de vacíos consistentes y coherentes con la teoría de cuerdas. Este descubrimiento vio la luz en un trabajo del físico teórico estadounidense y profesor de la Universidad de Harvard Andrew Strominger (n. 1955), que llevaba por título *Supercuerdas con torsión*¹²⁹. Strominger se había doctorado en Física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1982 y desde el inicio de su carrera estuvo trabajando en el estudio de la teoría de cuerdas como candidata a una teoría unificada de la naturaleza.

Los físicos muestran en ocasiones las soluciones a una teoría representando los resultados en un espacio tridimensional en forma de valles y montañas. La similitud de este tipo de representación con un paisaje de los que se observan en el medio natural, llevó a Susskind, a utilizar por primera vez en el año 2003 el término paisaje al referirse al conjunto de energías del vacío, en un trabajo titulado *El paisaje antrópico de la teoría de cuerdas*: «A partir de ahora denominaré al espacio de todos los vacíos de la teoría de cuerdas el *paisaje*»¹³⁰ (Susskind, 2003, p.2). Así, la totalidad de las soluciones a las ecuaciones de la teoría de cuerdas, las cuales nos dan el conjunto de todos los vacíos estables, se denomina paisaje de la teoría de cuerdas. El número estimado de estos vacíos, como se ha indicado, es extraordinariamente grande, del orden de 10^{500} (Ashok & Douglas, 2004; Rickles, 2014).

¹²⁹ Strominger, A. (1986). Superstrings with Torsion. *Nuclear Physics B*, vol. 274, no. 2, pp. 253-284.

¹³⁰ Cursivas en el original.

Los valles del paisaje se corresponden con los estados de baja energía del vacío, los cuales, como en el mundo macroscópico, son los más estables. En nuestro universo, cada punto del espacio encierra las seis dimensiones ocultas, las cuales poseen una topología que como se ha referido se corresponden cada una con un vacío estable. Pero esta configuración puede eventualmente evolucionar hacia otro vacío estable, hacia otro valle del paisaje, y hacerlo a través de una montaña con mayor energía potencial. En el mundo macroscópico las montañas que rodean un valle impiden ese tránsito. Sería como si una piedra pudiera subir espontáneamente por la falda de una colina hasta situarse en su cima, para caer por el lado opuesto. Pero en un escenario microscópico, por medio del fenómeno de la tunelación cuántica, la transición de un estado a otro a través de uno intermedio de mayor energía es posible. Un punto del espacio que al azar tunele hacia un nuevo vacío estable, generará una burbuja que contendrá una topología de dimensiones ocultas diferente, una variedad diferente de vacío, que si tiene energía positiva, se expandirá rápidamente, resultando en un nuevo universo. Esta nueva burbuja arbitrariamente grande dispondrá de diferentes leyes de la física, distintos tipos de partículas y otras interacciones fundamentales. Este nuevo universo verá cómo en algún momento de su evolución, en algún punto de su espacio, aparecerá una nueva burbuja por tunelación de un vacío cuántico a otro.

Como los túneles cuánticos son cosa del azar, lugares muy separados del universo se desarrollarán siguiendo diferentes series de vacíos. De esta manera, el paisaje se explora completamente; cada vacío estable existe en muchos lugares diferentes del universo.

El universo entero es, por tanto, una espuma de burbujas en expansión dentro de otras burbujas, cada una con sus propias leyes de la física. De entre ellas, son poquísimas las apropiadas para la formación de estructuras complejas, como las galaxias y la vida. (Bousso & Polchinski, 2004, p.66)

Cada universo es la cuna de muchos otros, en una sucesión jerárquica de universos anidados. Este proceso solo se detiene cuando el túnel cuántico conduce a un valle con energía negativa, en cuyo caso no se produce la expansión. Siendo así, solo los valles con una energía del vacío apropiada, aquella que no resulte en un universo que colapse instantáneamente (energía del vacío negativa) o en otro que se expanda demasiado rápidamente (energía del vacío demasiado alta), podrán ser susceptibles de generar un universo aceptablemente estable. Gracias a que el número de vacíos predicho por la

teoría es tan ingente como 10^{500} , aun eliminando los inapropiados, según Bousso & Polchinski (2004) todavía «unos 10^{380} vacíos proporcionan buenas condiciones» (p.64). Así, el recorrido aleatorio por todos los vacíos establece las condiciones necesarias para que en alguno de los escenarios surgidos a partir de una determinada instancia del paisaje de la teoría de cuerdas, se den las condiciones tan particulares e improbables que justifiquen una particular configuración del universo que permita la aparición de la vida.

5. CONCLUSIONES

Una característica que la cosmología no comparte con ninguna otra ciencia es el carácter único de su objeto de estudio, que además es inasible a la experimentación. Podemos investigar diferentes facetas del universo, pero todos los programas tendrán en común el mismo objeto de estudio: el universo que conocemos. Esta realidad, unido a su carácter de ciencia histórica, hace difícil discernir el carácter necesario de las leyes que lo gobiernan. Quizás no estemos enfrentados a una ciencia nomotética sino a una ciencia de carácter ideográfico. Y como dificultad añadida, muchas de las cuestiones remiten al tradicional problema filosófico del azar y la necesidad, a la posibilidad de distinguir qué es accidental y qué es necesario.

El paradigma newtoniano nos permite extraer leyes generales gracias a que modificando las condiciones iniciales, podemos observar qué aspectos de la evolución de un fenómeno son universales y cuáles dependen de forma contingente de la elección del estado inicial (Smolin, 2012). Pero este método, que se ha mostrado tan exitoso cuando ha sido aplicado a parcelas restringidas del universo, puede ser puesto en entredicho cuando pretendemos aplicarlo al universo en su totalidad, dado que en este caso tratamos con un sistema que tiene una historia única al que no podemos realizar modificaciones en sus condiciones iniciales. Es al menos cuestionable, por tanto, que podamos extraer conclusiones sustanciales acerca de qué es universal y qué es particular.

El estudio de la cosmología arrastra problemas epistemológicos graves. La escala tan vasta del universo hace muy restrictiva nuestra capacidad de observación del conjunto; es imposible realizar estudios comparativos porque únicamente conocemos un universo; sólo podemos explorar el universo desde un lugar y un tiempo concretos, el que nos corresponde por nuestra ubicación; la imposibilidad de estudiar el universo más

allá del horizonte de sucesos cosmológico, debido a las limitaciones impuestas por la velocidad de la luz y la expansión acelerada del universo; los instantes iniciales del universo están fuera del alcance de la observación, pues la radiación aún no se había desacoplado de la materia¹³¹, etc. Por todo ello, a menudo hay que establecer hipótesis teóricas basadas en desarrollos matemáticos que no se prestan a una inmediata verificación empírica. La dificultad estriba en aceptar unas hipótesis que están basadas en un andamiaje matemático admirable, pero que carecen de corroboración experimental. No se debe olvidar que la consistencia lógico-matemática es algo necesario en cualquier teoría científica, pero que en ningún caso puede ser condición suficiente. A ese tipo de teorías habría que exigir además predicciones que pudieran refutarse empíricamente.

El ajuste fino remite a la cuestión de por qué las constantes universales se encuentran dentro de un determinado rango de valores. Afirmar que el valor de una constante es más o menos probable que otro no puede quedar al arbitrio de quien plantea el problema, y debería por contra basarse en algún mecanismo cuantitativo que pueda ofrecer una medida de tales probabilidades. Que un número arbitrariamente elevado de universos cancele la alta improbabilidad del ajuste fino, exige un estudio cuantitativo confiable que dé cuenta del número de universos realmente existentes frente al rango de ajuste de las constantes fundamentales. Pero esto es algo que a día de hoy no tenemos. Del mismo modo, tampoco conocemos con exactitud en qué medida las leyes de la física, las condiciones iniciales del universo y el valor de las constantes de la naturaleza son variables independientes. Quizás haya algún mecanismo subyacente que haga que fijada una, determine a las demás, y resulte en un dominio de variables a ajustar mucho más reducido. Pero esto es algo que tampoco conocemos.

Se arguye a veces que en la consideración de las posibles formas de vida que pueden evolucionar en el universo pecamos de un alto grado de antropocentrismo, al considerar que cualquier forma de vida ha de ser similar a la que ha evolucionado en nuestro planeta. Pero si bien es cierto que esta réplica nos obliga a ser cautos y que la vida podría abrirse paso en formas que nos podrían resultar difíciles de imaginar, no se

¹³¹ El reciente descubrimiento de las ondas gravitatorias abre la posibilidad de acercarnos aún más a la observación de los acontecimientos acaecidos en las primeras etapas del universo de lo que permite el estudio de la radiación electromagnética, dado que el acoplamiento de materia y radiación que hace opaco el universo para la luz, no afecta a la propagación de las ondas gravitatorias.

puede obviar que en cualquier caso el desarrollo de formas vivientes ha de requerir un mínimo de complejidad y organización, necesitando de unas condiciones adecuadas en las que aparecer y evolucionar.

Los defensores de la idea del multiverso no se conforman solo con ser una solución teórica al problema del ajuste fino. También esgrimen argumentos empíricos con los que pretenden demostrar la existencia de otros dominios distintos al nuestro. En su afán de obtener respaldo observacional, se refieren a los rastros que la colisión con otras burbujas podría haber dejado en el fondo cósmico de microondas, la posible verificación de la variación del valor de las constantes fundamentales a lo largo del tiempo, la medición de la geometría del universo para comprobar su no esfericidad, o la existencia de patrones recurrentes en el espacio. En definitiva, dejar de ser una especulación para convertirse en una cuestión de exploración. Una pretensión que debería ser más acuciante para aquellas hipótesis del multiverso que se asientan sobre teorías que se encuentran aún pendientes de confirmación, como la inflación cósmica o la teoría de cuerdas. La cautela por tanto se hace necesaria.

La científicidad de la teoría del multiverso no es una cuestión pacífica. Las críticas proceden de la consideración de que ideas como la de los universos paralelos, por su carácter no verificable, desbordan el marco de la ciencia. La física teórica se estaría aproximando así a la metafísica, en su carácter más etimológico, apartándose del empirismo como uno de los fundamentos metodológicos de la ciencia. El problema no residiría tanto en que existan postulados en algunas teorías que puedan ser difíciles de someter a experimentación, puesto que se asume que la cosmología enfrenta los límites del conocimiento humano, sino en que se presenten hipótesis que a priori sean imposibles de comprobar. La aparente imposibilidad de contrastar experimentalmente la existencia de otros universos, ha llevado a que científicos tan prestigiosos como George Ellis consideren la teoría de los multiversos como acientífica, por su carácter no verificable (Vilenkin, 2011). Desde este punto de vista al menos, compartirían las palabras de Kragh (2011) cuando en su libro dedicado a las denominadas teorías del todo escribe que «muchos físicos [...] muestran una tendencia a realizar extrapolaciones irrestrictas de la física hacia dominios que de acuerdo con el punto de vista tradicional son inaccesibles a los métodos de la física» (p.367). O las de Barnes (2012), cuando afirma que la idea del multiverso no es una deducción directa de nuestro conocimiento

de la naturaleza, sino que se hace a través de un paso intermedio de carácter más hipotético que positivo. En vez de Física conocida → Multiverso, lo que tendríamos sería Física conocida → Física hipotética → Multiverso.

Unas objeciones que, en definitiva, conducen al debate metodológico que suele plantearse en los primeros pasos de las nuevas disciplinas científicas, como ocurrió con la cosmología física en la década de 1930-40 (Gale, 2015), y que aún hoy en día sigue abierto. Se discutía entonces (y ahora) sobre cuál era el estatuto epistemológico de la nueva cosmología, enfrentando a quienes defendían el enfoque empirista, en cuanto las observaciones deberían ser la base sobre la que construir hipótesis que posteriormente eran sometidas a verificación, y de ahí, si los datos apoyaban la hipótesis, a una generalización lógica de carácter inductivo, contra aquellos que se alineaban con una metodología racionalista, en cuanto pensaban que la mejor manera de hacer cosmología (y ciencia en general) era construir hipótesis partiendo de principios racionales generales, y a partir de ahí, realizar predicciones mediante un estricto razonamiento analítico, que con posterioridad eran sometidas a comprobación; la denominada lógica deductiva. La hipótesis del multiverso ha reabierto con fuerza este debate. El papel jugado por un racionalista como Milne y un empirista como Dingle lo vemos hoy reflejado en científicos como Susskind y Ellis, involucrados en la controversia sobre la caracterización de la metodología apropiada para enfrentar la hipótesis del multiverso.

Efectivamente, el principal hándicap para aceptar la hipótesis del multiverso como una teoría propia del ámbito de la ciencia es que la comunidad científica sigue considerando la necesidad de verificación experimental como un valor epistémico insoslayable. Algunos cosmólogos por su parte parecen compartir un sentido laxo del concepto popperiano de falsación, y hay ciertos principios que ponen en duda. Por citar algunos, plantean cuestiones como si es necesario que una teoría científica debe ser verificable en el momento que se formula o es suficiente con que se pueda verificar en algún tiempo futuro; si la consistencia matemática puede sustituir a la observación y la experimentación; si los experimentos reales pueden ser sustituidos por experimentos mentales; si las teorías o los programas de investigación deben poder ser verificables desde sus primeras formulaciones o es factible poder esperar a versiones futuras; si es preferible una teoría fácilmente verificable pero con pobre poder explicativo que una teoría no verificable pero con gran poder explicativo (Kragh, 2014). Plantean así que la

falsabilidad de una teoría puede ser un requisito importante, pero que quizás sea demasiado exigente convertirlo en un requisito único, un requisito necesario y suficiente.

Si caracterizar una teoría como científica requiere soporte observacional y/o experimental, por el momento carecemos de la posibilidad de exigir ese soporte a entidades ajenas a nuestro universo. Los defensores del multiverso no son indiferentes a estas críticas, y basan muchos de sus argumentos en el poder explicativo extrínseco de la teoría, alegando que no hay otra solución plausible al fenómeno del ajuste fino (Ellis, 2014). Desde luego no sería la primera vez que una teoría cosmológica se construye sin base en la observación. Como indicó Richard Tolman en la charla que ofreció en 1932 en el Club Filosófico de la Universidad de California en Los Ángeles, hay dos formas de construir los modelos cosmológicos, aquellos basados directamente en los datos ofrecidos por la observación, como la ley de Hubble, y otros que llegan a la explicación de fenómenos naturales a partir de consideraciones puramente matemáticas, como la relatividad general o la ecuación de onda relativista de Dirac (Tolman, 1932).

En una línea similar, científicos como Susskind (2006) esgrimen que es irrelevante el hecho de si el multiverso puede ser o no detectado, le basta con que sean objetos consistentes con las leyes de la física. Por contra, considera Susskind que la confirmación debería incluir la consistencia matemática, alegando que se trata de un método que no debería ser subestimado. Una idea con la que se alinea Hawking, quien «enaltece el poder de la elegancia matemática y autoconsistencia lógica en la construcción de teorías» (Kragh, 2014, p.53). Y Einstein, para quien siendo necesaria la experiencia y la observación en la tarea del desarrollo de la física, concedía a las matemáticas el papel de antorcha que debía iluminar el camino a seguir por la física teórica.

En su búsqueda de una teoría, el científico teórico se ve compelido a guiarse, en grado creciente, por consideraciones puramente matemáticas, formales, porque la experiencia física del experimentador no puede conducirlo hasta las más elevadas regiones de la abstracción [...] También en este caso el hecho observado es el árbitro supremo, aunque no podrá pronunciar sentencia hasta tanto no se haya construido un puente de intensa y sostenida actividad pensante para atravesar la amplia brecha que separa los axiomas de sus consecuencias verificables (Einstein, 1934, citado en Rivadulla, 2011, pp.372-373)

Podría parecer que, más allá de tener que afirmar la existencia de múltiples universos, una formulación completa de la física, si es que esto es posible, quizás trajese una explicación más económica al problema del ajuste fino. Pero aunque el problema pudiera ser explicado en términos de unas determinadas leyes de la física que den cuenta de todos los valores de las constantes y de las condiciones de contorno del universo, la cuestión no habrá hecho más que ascender un peldaño, dado que el problema se trasladará a considerar por qué esas leyes y no otras. Destaca Smith (1990) cómo algunos filósofos rechazan esa escalera de causas y efectos, al considerar que el universo en su totalidad es un objeto que escapa al principio filosófico de razón suficiente, no pudiendo ser explicado en términos de condiciones iniciales y leyes naturales, porque «las leyes menos fundamentales de la naturaleza pueden ser explicadas en términos de otras leyes más fundamentales, pero que las leyes más básicas de nuestro universo no pueden ser explicadas de forma natural» (p.22). Un razonamiento que planteado así lo sitúa fuera del ámbito de la ciencia, dado que por definición, las explicaciones sobrenaturales no pueden ser objeto del ámbito científico.

El recurso al azar tampoco ayuda. Es un hecho en principio admitido que la condición de posibilidad de estructuras cósmicas complejas está en el valor ajustado de unas pocas constantes físicas, y que la aparición de la vida en el seno del universo depende directamente de esos valores y de las relaciones cuantitativas que entre ellas mantienen. Dada la improbabilidad de ocurrencia de un universo apto para la vida, debido al gran número de arreglos que lo harían inviable, una explicación que acuda al recurso del mero azar repugna a la lógica. En referencia a esta cuestión, «en mi opinión, la ocurrencia de un suceso con una probabilidad tan pequeña es algo que no puede quedar sin explicación. La suerte no es aceptable en este caso; necesitamos una explicación racional de por qué sucedió algo tan improbable» (Smolin, 1999, p.45).

De este modo, el problema del ajuste fino clama por una explicación en el marco de la racionalidad científica, de ahí que la solución basada en los multiversos sea del agrado de muchos investigadores, porque si bien es cierto que uno de los graves inconvenientes epistemológicos de la hipótesis es carecer de sustento empírico, no lo es menos que cuenta a su favor con la baza de la capacidad explicativa. En este sentido, la teoría del multiverso formaría parte de lo que damos en llamar inferencia a la mejor explicación. No es una inferencia deductiva en cuanto que de las premisas en que se

basa, aun siendo ciertas, no se sigue necesariamente la verdad de sus propuestas. Tampoco inductiva, pues el carácter único del universo no nos permite apelar a criterios estadísticos. Se trataría más bien de una inferencia abductiva, en cuanto supone la mejor explicación científica, si no la única, que disponemos por el momento. En este sentido, la idea de los multiversos no es más extraña a la pura lógica que considerar el campo de Higgs la mejor explicación a la masa de las partículas fundamentales o la materia oscura a las anomalías gravitacionales de las galaxias espirales.

La teoría general de la relatividad fue desarrollada bajo la directriz de un fuerte formalismo matemático que precisó años de experimentos y observaciones para ser verificada. Del mismo modo, la hipótesis del multiverso se fundamenta en nuevas líneas de investigación científicas que en muchos casos son, por el momento, solo constructos matemáticos sin posibilidad de corroboración experimental. Pero el ejemplo de la relatividad general debería obligarnos a ser prudentes antes de tachar a dichas teorías como acientíficas. Porque como apuntó Steven Weinberg en la charla *Viviendo en el Multiverso* que ofreció en septiembre de 2005 en el *Trinity College* de Cambridge, quizás estemos enfrentados a un punto de inflexión radical en lo que debería considerarse una teoría física legítima.

Los partidarios de la hipótesis del multiverso alegan a su favor el potencial explicativo de algunas teorías en que se fundamenta, como la teoría de cuerdas o la inflación cósmica, reforzado por la ausencia de alternativas científicas que den cuenta del problema del ajuste. Descartar ideas surgidas en el campo de la física porque en principio puedan parecer absurdas o paradójicas es algo de lo que se debería recelar. Conceptos como el espacio curvo, los campos de fuerza invisibles o la dilatación del tiempo, que en su momento podían parecer fuera de toda lógica, con el tiempo han quedado plenamente confirmados. En este sentido ayudaría al reconocimiento de la hipótesis del multiverso encontrar mecanismos físicos confiables que puedan hacer factible la generación de nuevos universos, lo cual abriría el camino a que lo que es pura especulación pueda llegar a ser una posibilidad cierta. Aunque la posible existencia de otros universos pueda parecer extravagante, la nueva física presenta indicios que parecen obligarnos a convivir con este nuevo paradigma.

Porque como escribe Linde (1986) en el párrafo final de su trabajo *Eternally Existing Self-reproducing Chaotic Inflationary Universe*: «La vieja cuestión de por qué

nuestro universo es el único posible ha sido reemplazada por la cuestión de en qué teorías la existencia de mini-universos del tipo como el nuestro es posible. Esta pregunta es aún muy difícil, pero es mucho más fácil que la anterior» (p.399).

REFERENCIAS

- Albrecht, A. & Sorbo, L. (2004). Can the universe afford inflation? *Physical Review D*, 70(6), 63528-63538.
- Anderson, C. (1932). The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives. *Science*, 76, 238-239.
- Ashok, S., & Douglas, M. (2004). Counting Flux Vacua. *Journal of High Energy Physics*, 2004(1), 1-60.
- Ashtekar, A. (2009). Loop Quantum Cosmology: An Overview. *General Relativity and Gravitation*, 41(4), 707-741.
- Auping Birch, J. (2009). *Una revisión de las teorías sobre el origen y la evolución del Universo*. México DF: Universidad Iberoamericana, A.C.
- Bahcall, N. (1997). *Tracing the Universe with Clusters of Galaxies*. arXiv:astro-ph/9711062, 1-13.
- Barnes, L. (2012). The Fine-Tuning of the Universe for Intelligent Life. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 29(4), 529-564.
- Barrow, J., & Tipler, F. (1986). *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford: Oxford University Press.
- Bethe, H. (1939). Energy Production in Stars. *Physical Review*, 55, 434-456.
- Block, D. (2011). *A Hubble Eclipse: Lemaitre and Censorship*. arXiv:1106.3928, 1-6.
- Boltzmann, L. (1895), On Certain Questions of the Theory of Gases. En B.F. McGuinness (Ed.), *Theoretical Physics and Philosophical Problems* (págs. 201-209). Dordrecht: Reidel Publishing Company
- Bombaci, I. (1996). The Maximum Mass of a Neutron Star. *Astronomy and Astrophysics*, 305(3), 871-877.
- Bostrom, N. (2002). *Anthropic bias: Observation selection effects in science and philosophy*. New York: Routledge.
- Bousso, R., & Polchinski, J. (2004). El paisaje de la teoría de cuerdas. *Investigación y Ciencia*, 338, 59-67.
- Burgess, C.P., Majumdar, M., Nolte, D., Quevedo, F., Rajesh, G. & Zhang, R.-J (2001). *The Inflationary Brane-Antibrane Universe*. arXiv:hep-th/0105204, 1-21.

- Burgess, C.P., & Moore, G. (2006). *The Standard Model: A Primer*. Cambridge (UK): Cambridge University Press.
- Burles, S., Nollet, K., & Turner, M.S. (2001). Big Bang Nucleosynthesis Predictions for Precision Cosmology. *The Astrophysical Journal Letters*, 552(1), L1-L5.
- Carrol, S.M (2008). El origen cósmico de la flecha del tiempo. *Investigación y Ciencia*, 383, 18-25.
- Carter, B. (1967). *The significance of numerical coincidences in nature*. arXiv:0710.3543, 1-73.
- Carter, B. (1974). Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology. En M. Longair (Ed.), *Proceedings of IAU Symposium No. 63, Confrontation of cosmological theories with observational data* (págs. 291-298). Dordrecht: Reidel Publishing Company.
- Casas, A. (2015). *La materia oscura*. Barcelona: RBA.
- Collins, C., & Hawking, S. (1973). Why is the universe isotropic? *The Astrophysical Journal*, 180, 317-334.
- Collins, R. (2009). The teleological argument: an exploration of the fine-tuning of the cosmos. En W. Craig, & J. Moreland (Eds.), *The Blackwell Companion to Natural Theology* (págs. 202-280). Oxford: Wiley-Blackwell.
- Courteau, S., & Dekel, A. (2001). Cosmic Flows: A Status Report. En T. von Hippel, C. Simpson, & N. Manset (Eds.), *Astrophysical Ages and Time Scales* (vol. 245, págs. 584-592). Hawaii (USA): Astronomical Society of the Pacific.
- Davies, P. (1982). *The accidental Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Davies, P. (1994). *Dios y la nueva física*. Barcelona: Salvat Editores.
- de Azcárraga, J. (2005). Albert Einstein (1879-1955) y su Ciencia. *Revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física*, 1, 35-53.
- Diéguez, A. (2008). ¿Es la vida un género natural? Dificultades para lograr una definición del concepto de vida. *ArtefaCToS*, 1(1), 81-100.
- DiSalle, R. (2014). Poincaré on the Construction of Space-Time. En M. de Paz, & R. Disalle (Eds.), *Poincaré, Philosopher of Science* (págs. 167-183). Dordrecht: Springer.
- Einstein, A. (1929). Über den gegenwärtigen Stand der Feld-Theorie. En E. Honegger (Ed.), *Festschrift Prof. Dr. A. Stodola zum 70* (págs. 126-132). Zürich / Leipzig: Orell Füssli.

- Einstein, A. (1934). El problema del espacio, el éter y el campo, en la física. En A. Einstein, *Mis ideas y opiniones*, 2000 (págs. 248-260). Barcelona: Bon Ton.
- Ellis, G. (2014). On the philosophy of cosmology. *Studies in History and Philosophy of Science: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 46(A), 5-23.
- Flowers, J., & Petley, B. (2001). Progress in our knowledge of the fundamental constants of physics. *Reports on Progress in Physics*, 64(10), 1191-1246.
- Frampton, P. (2006). *On Cyclic Universes*. arXiv:astro-ph/0612243, 1-7.
- Gale, G. (2015). Cosmology: Methodological Debates in the 1930s and 1940s. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (Ed.). En línea, disponible en: <http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/cosmology-30s/>
- Gambini, R., & Pullin, J. (2003). *Discrete quantum gravity: a mechanism for selecting the value of fundamental constants*. arXiv:gr-qc/0306095, 1-5.
- Gould, A. (2010). *Anthropic Argument for Three Generations*. arXiv:1011.2761, 1-5.
- Haldane, J.B.S. (1928). The Universe and Irreversibility. *Nature*, 122, 808-809.
- Hawking, S. (1988). *Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros*. Madrid: Alianza Editorial.
- Hoffmann, B. (1993). *Einstein*. Barcelona: Salvat.
- Jenkins, A., & Pérez, G. (2010). Buscando vida en el multiverso. *Investigación y Ciencia*, 402, 12-19.
- Khoury, J., Ovrut, B., Steinhardt, P., & Turok, N. (2001). *Ekpyrotic universe: Colliding branes and the origin of the hot big bang*. arXiv:hep-th/0103239, 1-67.
- Kirkman, D., Tytler, D., Suzuki, N., O'Meara, J., & Lubin, D. (2003). The cosmological baryon density from the deuterium to hydrogen ratio towards QSO absorption systems: D/H towards Q1243+3047. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 149, 1-28.
- Kragh, H. (1996). *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press.
- Kragh, H. (1999). *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton: Princeton University Press.
- Kragh, H. (2007). *Conceptions of Cosmos. From Myths to the Accelerating Universe: A History of Cosmology*. New York: Oxford University Press.

- Kragh, H. (2010a). An anthropic myth: Fred Hoyle's carbon-12 resonance level. *Archive for History of Exact Sciences*, 64(6), 721-751.
- Kragh, H. (2010b). *When is a prediction anthropic? Fred Hoyle and the 7.65 MeV carbon resonance*. En línea, disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/5332>, 1-36.
- Kragh, H. (2011). *Higher speculations: Grand theories and failed revolutions in physics and cosmology*. Oxford: Oxford University Press.
- Kragh, H. (2014). Testability and epistemic shifts in modern cosmology. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 46, 48-56.
- Krehl, P. (2009). *History of Shock Waves, Explosions and Impact: A Chronological and Biographical Reference*. Berlín: Springer.
- Kuznetsov, B. (1972). *Einstein and Dostoyevsky: A study of the relation of modern physics to the main ethical and aesthetic problems of the 19th century*. Londres: Hutchinson Educational.
- Landsman, K. (2015). *The Fine-Tuning Argument*. En línea, disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/11399>, 1-16.
- Lichtenegger, H., & Mashhoon, B. (2007). Mach's Principle. En L. Iorio (Ed.), *The Measurement of Gravitomagnetism: A Challenging Enterprise* (págs. 13-25). New York: Nova Science.
- Linde, A. (1984). The inflationary Universe. *Reports on Progress in Physics*, 47(8), 925-986.
- Linde, A. (1986). Eternally existing self-reproducing chaotic inflationary universe. *Physics Letters B*, 175(4), 395-400.
- Linde, A. (1990). *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. Chur (Sw): Harwood Academic Publishers.
- Linde, A. (2006). *Sinks in the Landscape, Boltzmann Brains, and the Cosmological Constant Problem*. arXiv:hep-th/0611043, 1-41.
- Linde, A. (2014). *Inflationary Cosmology after Planck 2013*. arXiv:1402.0526, 1-84.
- Lineveaver, C. (2005). Inflation and the Cosmic Microwave Background. En M. Colles (Ed.), *The New Cosmology* (págs. 31-65). Singapore: World Scientific.
- Livio, M. (2011). Lost in translation: Mystery of the missing text solved. *Nature*, 479, 171-173.

- Livio, M., Hollowell, D., Weiss, A., & Truran, J. (1989). The anthropic significance of the existence of an excited state of ^{12}C . *Nature*, 340, 281-284.
- Longair, M. (2004). A Brief History of Cosmology. En W. Freedman (Ed.), *Carnegie Observatories Astrophysics Series, Vol. 2: Measuring and Modeling the Universe* (págs. 1-17). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lüst, P. (2010). ¿Es la teoría de cuerdas una ciencia? *Investigación y Ciencia*, 408, 82-87.
- Mosterín, J. (2004). *Anthropic Explanations in Cosmology*. En línea, disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/1658>, 1-42.
- NASA/WMAP Science Team (2014). *WMAP's Universe. Fluctuations in the Cosmic Microwave Background*. En línea, disponible en: http://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/bb_cosmo_fluct.html
- North, J. (1990). The early years. En B. Bertotti, R. Balbinot, S. Bergia, & A. Messina (Eds.), *Modern Cosmology in Retrospect* (págs. 11-30). Cambridge, Gran Bretaña: Cambridge University Press.
- Nussbaumer, H., & Bieri, L. (2012). *Who discovered the expanding universe?* arXiv:1107.2281, 1-7.
- Okun, L. (1991). The fundamental constants of physics. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 161, 177-194.
- Ono, Y. (1982). How I Created the Theory of Relativity. *Physics Today*, 35(8), 45-47.
- Ostriker, J., & Steinhardt, P. (2001). El universo y su quintaesencia. *Investigación y Ciencia*, 294, 66-74.
- Pantin, C. (1951). Organic design. *Advanced Science*, 8, 138-150.
- Peebles, P. (2014). Discovery of the hot Big Bang: What happened in 1948. *The European Physical Journal H*, 39(2), 205-223.
- Penrose, R. (1979). Singularities and time asymmetry. En S. Hawking, & W. Israel (Eds.), *General Relativity: An Einstein centenary survey* (págs. 581-638). Cambridge: Cambridge University Press.
- Penrose, R. (1991). *La nueva mente del emperador*. Barcelona: Grijalbo Mondadori.
- Penrose, R. (2010). *Cycles of Time. An Extraordinary New View of the Universe*. Londres: The Bodley Head.
- Planck Collaboration (2014). Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results. *Astronomy & Astrophysics*, 571(A1), 1-48.

- Pogosian, L., & Vilenkin, A. (2007). Anthropic predictions for vacuum energy and neutrino masses in the light of WMAP-3. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2007(1), 1-15.
- Poincaré, H. (1914). *Ciencia y Método*. E. Méndez Pinto (Trad.). Edición digital para la Biblioteca Digital del ILCE. Cosimo Classics.
- Prigogine, I. (1980). *From Being to Becoming*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Quirós, M. (2011). El origen de la materia: bariogénesis. *Revista Española de Física*, 25(4), 9-18.
- Rees, M. (2000). *Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe*. New York: Basic Books.
- Rickles, D. (2014). *A Brief History of String Theory: From Dual Models to M-Theory*. Berlin: Springer.
- Rivadulla, A. (2011). Albert Einstein y la filosofía actual de la ciencia. En *Einstein. Científico y filósofo* (págs. 365-381). Cali: Universidad del Valle.
- Sahni, V. (2005). Dark Matter and Dark Energy. *Lecture Notes in Physics*, 653, 141-179.
- Sakharov, A. (1967). Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)*, 5, 24-27.
- Salaris, M., & Cassini, S. (2005). *Evolution of stars and stellar populations*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Sánchez Ron, J. (1993). *Espacio, tiempo y átomos. Relatividad y mecánica cuántica*. Madrid: Akal.
- Sánchez Ron, J. (2014). *El mundo después de la revolución: la física de la segunda mitad del siglo XX*. Barcelona: Pasado & Presente.
- Schneider, P. (2010). Cuestiones fundamentales de cosmología. *Investigación y Ciencia*, 405, 60-68.
- Schrödinger, E. (1983). *Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets.
- Schwarz, J. (2000). *String Theory: The Early Years*. arXiv:hep-th/0007118, 1-9.
- Sellés, M. (1984). *En torno a la génesis de la teoría especial de la relatividad*. Madrid: CSIC. Instituto Arnau de Vilanova.
- Shaviv, G. (2012). *The Synthesis of the elements*. Berlín: Springer.

- Smith, Q. (1990). A natural explanation of the existence and laws of our universe. *Australasian Journal of Philosophy*, 68(1), 22-43.
- Smolin, L. (1992). Did the Universe evolve? *Classical and Quantum Gravity*, 9(1), 173-191.
- Smolin, L. (1999). *The Life of the Cosmos*. New York: Oxford University Press.
- Smolin, L. (2004). Atoms of Space and Time. *Scientific American: Extreme Physics*, 12 (online), 43-52.
- Smolin, L. (2009). Scientific alternatives to the anthropic principle. En B. Carr (Ed.), *Universe or Multiverse?* (págs. 323-366). Cambridge: Cambridge University Press.
- Smolin, L. (2012). A Perspective on the Landscape Problem. *Foundations of Physics*, 43(1), 21-45.
- Solís, C. y Sellés, M. (2009). *Historia de la Ciencia*. Madrid: Espasa
- Stanley, M., & Trimble, V. (2007). Eddington, Arthur Stanley. En T. Hockey et al. (Eds.), *The Biographical Encyclopedia of Astronomers* (págs. 325-327). New York: Springer.
- Steinhardt, P., & Turok, N. (2001). *A Cyclic Model of the Universe*. arXiv:hep-th/0111030, 1-16.
- Steinhardt, P., & Turok, N. (2005). The cyclic model simplified. *New Astronomy Reviews*, 49(2-6), 43-57.
- Steinhardt, P., & Turok, N. (2007). *Endless universe: Beyond the Big Bang*. New York: Doubleday.
- Susskind, L. (2003). *The Anthropic Landscape of String Theory*. arXiv:hep-th/0302219v1, 1-21.
- Susskind, L. (2006). *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design*. New York: Little, Brown & Co.
- Tassoul, J., & Tassoul, M. (2004). *A Concise History of Solar and Stellar Physics*. Princeton: Princeton University Press.
- Tegmark, M. (2003). Universos paralelos. *Investigación y Ciencia*, 322, 6-18.
- Tegmark, M., & Wheeler, J. (2001). Cien años de misterios cuánticos. *Investigación y Ciencia*, 295, 48-56.
- Tolman, R. (1932). Models of the physical universe. *Science*, 75, 367-373.

Turner, M.S. (2002). The case for $\Omega (M) = 0.33 \pm 0.035$. *Astrophysical Journal*, 576(2), L101-L104.

Tyler, D. (1981). Demise of the Lemaitre cosmological models and objects at large redshift. *Nature*, 291, 289-292.

Universidad de Granada (2014). *La función de onda ψ , su ecuación y su interpretación probabilística*. Física Cuántica. Quantum. En línea, disponible en: <http://wdb.ugr.es/~bosca/Fisica-Cuantica/?cat=47>

Vilenkin, A. (2011). *The Principle of Mediocrity*. arXiv:1108.4990, 1-14.

Weinberg, S. (1977). *Los tres primeros minutos del universo*. Barcelona: Salvat Editores.

Weinberg, S. (1989). The cosmological constant problem. *Reviews of Modern Physics*, 61(1), 1-23.