



DIFERENCIA(S)

revista de teoría social contemporánea

HÉCTOR VUCETICH

EL TIEMPO EN LA COSMOLOGÍA

EN REVISTA DIFERENCIA(S)

TIEMPO - N°4 - AÑO 3 - MAYO 2017. ARGENTINA.

ISSN 2469-1100

PP. N° 19-47



EL TIEMPO EN LA COSMOLOGÍA

HÉCTOR VUCETICH

RESUMEN

La cosmología es una de las ciencias más jóvenes de la naturaleza, aunque sus ideas filosóficas sean muy antiguas. El tiempo juega un papel singular en cosmología, que involucra ideas antiguas (el tiempo universal) y muy modernas (el tiempo depende del Sistema de Referencia). Se examina el papel que todas estas ideas juegan en crear la noción de tiempo cosmológico, se intenta aclarar las ambigüedades asociadas con el tiempo en un contexto cosmológico y se examina su relación con las nociones de cambio cosmológico.

PALABRAS CLAVE COSMOLOGÍA; TIEMPO; RELATIVIDAD; FILOSOFÍA DEL TIEMPO

ABSTRACT

Cosmology is one of the youngest natural sciences, although the background philosophical ideas are very old. Time plays a unique role in cosmology, involving ancient ideas (universality of time) blended with very modern ones (time is relative to a reference system). In this paper, an examination is made on how these ideas help in the building of cosmological time, of the ambiguities emerging when time is considered in a cosmological context and the relation of time with cosmological change.

KEYWORDS COSMOLOGY; TIME; RELATIVITY; PHILOSOPHY OF TIME

INTRODUCCIÓN

La cosmología es una de las ciencias más jóvenes de la actualidad, aunque sus ideas filosóficas se cuentan entre las más antiguas del pensamiento occidental pues los filósofos presocráticos se ocuparon del *problema cosmológico*: la composición y estructura del Universo (Russell, 1978; Mondolfo, 1958).

Es sabido que los primeros presocráticos se ocuparon del problema cosmológico (Russell, 1978; Mondolfo, 1958; García Bacca, 1981), principalmente de la *sustancia fundamental* de la que se originaban las demás cosas: Tales propuso el agua, Anaxímenes el aire y Anaximandro el *ápeiron*: una sustancia ilimitada, eterna, que era capaz de transformarse en otras sustancias que conocemos.

Aunque las cosas pudieran cambiar, la concepción del Universo en la filosofía antigua fue esencialmente estática, intemporal: un Universo cuya estructura global se mantenía a través de los cambios de las cosas que lo formaban.

El cristianismo introdujo la noción semítica de un Universo con principio y fin: desde la Creación hasta el Juicio: un Universo que experimentaba el cambio bajo la acción de un Dios inmutable.

La cosmología moderna ha tomado tales ideas filosóficas y las ha desarrollado en el marco de una teoría científica, bien comprobada por la observación. El tiempo juega un papel singular en cosmología y plantea importantes problemas conceptuales.

El plan de esta exposición es el siguiente: en la sección 2 examinaremos el papel del tiempo en física, tanto clásica como relativista. En particular, la existencia de varios tiempos sincronizables es una característica de la física relativista. En la sección 3 examinaremos otra característica del tiempo: la irreversibilidad. Tras discutir brevemente los principales mecanismos que la inducen, será necesario introducir consideraciones cosmológicas para explicarlo.

En la sección 4 se hace una breve síntesis de las hipótesis cosmológicas que subyacen el modelo cosmológico actual y una breve descripción del mismo, como modelo dinámico del Universo.

Las secciones siguientes se ocupan del tiempo en la cosmología. En la sección 5 se examinan diferentes nociones de tiempo en cosmología y su arbitrariedad; en la sección 6, el ‘problema del “comienzo del tiempo” tanto en los modelos cosmológicos “clásico” e inflacionario. Finalmente, en la sección 7 se analiza el “problema del

tiempo” que presenta la paradoja de una visión parmenideana de un Universo estático confrontado con la variedad de cambios que se observan.

En toda la exposición, adoptaré una *filosofía efectiva del tiempo*, similar a la desarrollada en (Pérez-Bergliaffa et al., 1998) y que se adopta usualmente en la investigación científica: el tiempo es una propiedad emergente del cambio de las cosas. También es una filosofía realista, aunque a veces, por abuso de lenguaje, adopte expresiones de tipo operacionalista.

Finalmente, aclararé que el punto de vista de la exposición es la de un físico interesado en cuestiones filosóficas. El énfasis será puesto sobre los aspectos físicos del problema y en segundo lugar sobre sus consecuencias filosóficas. Una introducción interesante sobre la filosofía del tiempo puede verse en (Markosian et al., 2016).

EL TIEMPO EN FÍSICA.

Antes de discutir nuestro tema principal, examinemos brevemente el papel del tiempo en física, ya que las leyes de la física son parte de los presupuestos de la cosmología. Esta noción, sin embargo, ha evolucionado con el desarrollo de esa ciencia (Einstein, 1971; Vucetich, 2007).

EL TIEMPO EN FÍSICA PRERRELATIVISTA

El tiempo es una magnitud que representa una sucesión de cambios en un sistema físico. El ejemplo más simple es un cuerpo pequeño, cuyo estado está descrito por su relación con cuerpos cercanos. Estos últimos constituyen un *sistema de referencia* para el cuerpo. Su estructura suele ser irrelevante para fijar la posición r y velocidad v del mismo por lo que se lo representa como un sistema de ejes cartesianos. El tiempo, por otra parte, se representa como una variable real t y, metafóricamente, como un reloj (Figura 1).

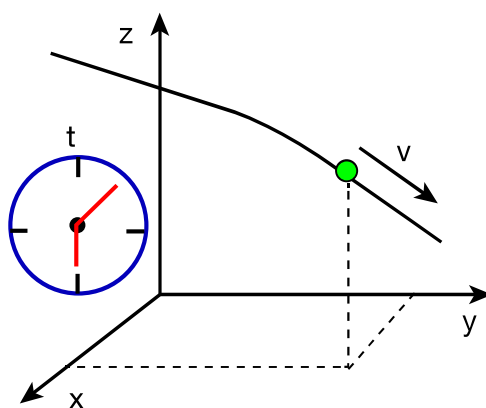


Figura 1: Un sistema de referencia

Existe una clase particular de sistemas de referencia, los *sistemas inerciales* en los que las leyes dinámicas de la física toman una forma particularmente simple. Tales leyes dinámicas describen el comportamiento de los objetos físicos (cuerpos masivos, campos, fluidos) en el tiempo bajo la acción de sus interacciones mutuas o la acción del ambiente. Por ejemplo, la ley de movimiento de Newton

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F$$

describe completamente el movimiento de un cuerpo de masa m sobre el que actúa una fuerza externa F . La trayectoria del cuerpo está descrita como una “sucesión” de posiciones del cuerpo, representada por la función continua $r(t)$ (Figura 1).

Es característico de la física prerrelativista que el tiempo t es independiente del sistema de referencia utilizado: es un invariante de la teoría. La ley que coordina los sistemas de referencia entre sí es la *transformación de Galileo*, que en su forma más simple describe la forma en que cambian las coordenadas y el tiempo entre dos sistemas de referencia S y S' , cuyos ejes sean paralelos, que se muevan a lo largo del eje x con una velocidad relativa V , en la forma:

$$x' = x + Vt, \quad t' = t$$

La transformación de Galileo deja invariante la ley de movimiento de Newton (1) y eso garantiza que las leyes de la dinámica son las mismas en todos los sistemas inerciales y este *Principio de Relatividad de Galileo* es una de las leyes fundamentales de la Mecánica Clásica (Vucetich, 2007).

Esta independencia del tiempo del sistema de referencia refleja una propiedad física importante: en la física prerrelativista es posible definir la simultaneidad entre dos eventos independientemente del sistema de referencia elegido o (en jerga) la simultaneidad es absoluta. Esta *universalidad del tiempo* fue enfatizada por Newton (1997)

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza, sin relación a nada externo fluye uniformemente y se dice con otro nombre duración. El tiempo relativo, aparente y vulgar es alguna medida sensible y exterior (precisa o desigual) de la duración mediante el movimiento, usada por el vulgo en lugar del verdadero tiempo: hora, día, mes y año son medidas semejantes.

En esta cita, “tiempo vulgar” es el referido a un sistema de referencia particular mientras que “tiempo absoluto” se refiere a la variable continua t . Esta noción newtoniana de tiempo dominó la física hasta el enunciado de la teoría especial de la relatividad.

EL TIEMPO EN LA RELATIVIDAD ESPECIAL

La física de los siglos XVIII y XIX confirmó tanto la mecánica newtoniana como su teoría de la gravitación y la validez del Principio de Relatividad de Galileo, con su consecuencia de la existencia de un tiempo absoluto. Sin embargo, las leyes electromagnéticas parecían depender del sistema de referencia y los físicos decimonónicos, con las notables excepciones de H. A. Lorentz y H. Poincaré, habían elegido aceptarlas y prescindir del Principio de Relatividad. Esto significa, entre otras cosas, que hay un sistema de referencia privilegiado, que llamaban el “éter luminífero”, en donde la luz se propaga con la misma velocidad en todas las direcciones. En otros sistemas de referencia, la velocidad de la luz dependería de la dirección de propagación de la misma forma que la velocidad del sonido depende de la dirección del viento. En la década de 1880, el físico norteamericano A. A. Michelson llevó a cabo un experimento para verificar la existencia de un “viento de éter”. Y el experimento dio un resultado enigmático: no existía el “viento de éter”.

En un trabajo de 1905 titulado “Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento”, Einstein mostró, con razonamientos muy sutiles pero sencillos, que el principio de relatividad era compatible con las leyes del electromagnetismo, en particular con la independencia de la velocidad de la luz del sistema de referencia. No hay “viento de éter” sencillamente porque no hay “éter luminífero”. Pero para ello, tuvo que arrojar por la borda dos postulados que todos los científicos habían aceptado inconscientemente desde la época de Newton: el espacio y el tiempo son absolutos. Para lograrlo, la ley de transformación de Galileo (2) se reemplaza por la *transformación de Lorentz*

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

que conecta las coordenadas (x,t) de un evento en el sistema de referencia S con las coordenadas del mismo (x',t') en otro sistema de referencia S' que se mueve respecto del primero con velocidad V .

En la nueva concepción del tiempo, cada sistema de referencia inercial tiene su propio transcurrir del tiempo y todos ellos son igualmente legítimos para describir las leyes de la naturaleza. Más aún, cada uno de nosotros, cada uno de los electrones, protones y neutrones que forman nuestro cuerpo, tienen su tiempo privado: el *tiempo propio* de dicha partícula.

El tiempo propio entre dos eventos próximos e y e' , separados por la diferencia de coordenadas (dr, dt) es igual a

$$d\tau = \sqrt{dt^2 - \frac{d\mathbf{r}^2}{c^2}} = \frac{ds}{c}$$

en donde introducimos la *distancia cronotópica* ds entre dos eventos. El tiempo propio no cambia bajo transformaciones de Lorentz y es una magnitud absoluta. Sin embargo, cada sistema de referencia S “pequeño”, asociado a un cuerpo cualquiera, tiene su tiempo propio, distinto en principio del tiempo propio de cualquier otro sistema S' .

Esta conclusión se ejemplifica con la “paradoja de los gemelos”: supongamos que uno de dos mellizos sale de viaje hacia Alfa del Centauro, en una astronave capaz de llegar a velocidades próximas a las de la luz, mientras que su hermano se queda a administrar los bienes familiares en la Tierra. A su regreso, el viajero se encontrará con que es varios años más joven que su hermano.

La impresión que produjo la formulación einsteniana de la relatividad fue muy profunda. En una conferencia en que exponía las consecuencias del principio de relatividad, el gran matemático H. Minkowski afirmó Perret and Jeffery (1952):

La visión del espacio y del tiempo que voy a exponer ha brotado del experimento y de allí nace su fuerza. Es una visión subversiva. Desde ahora, el espacio en sí y el tiempo en sí están condenados a transformarse en sombras y sólo cierta unión entre ellos preservará una existencia real.

El nuevo ente que menciona Minkowski es el *espaciotiempo*, una combinación de las dos entidades clásicas que tiene una estructura geométrica propia. Cada punto del espaciotiempo representa un evento (o suceso) que ocurre en un lugar de coordenadas r en un instante t .

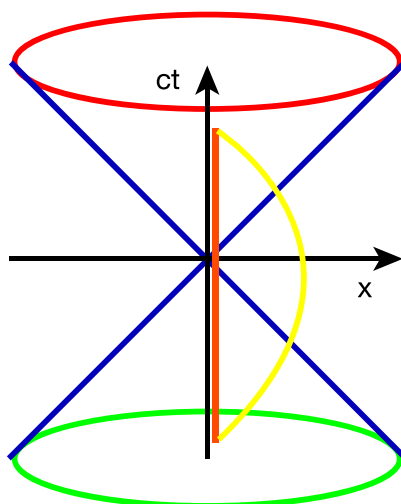


Figura 2: Esquema del Universo de Minkowski

La figura 2 muestra esquemáticamente la estructura geométrica del Universo de Minkowski. Convencionalmente, se utiliza el eje vertical de un sistema de coordenadas para representar el eje del tiempo (más precisamente, la variable $x^0 = ct$) y el horizontal (o el plano horizontal) para representar el espacio. En un sistema de referencia dado, cuyo origen de coordenadas es el evento O , existe una estructura, el *cono de luz*, que corresponde a partículas que se mueven con la velocidad de la luz c . Cualquier partícula con masa $m > 0$ debe moverse con una velocidad menor que c , en el interior del cono de luz. El manto inferior del cono representa el *pasado* del punto O mientras que el manto superior corresponde a su *futuro*. La región exterior al cono de luz no puede alcanzarse con velocidades menores que la de la luz y representa *presentes potenciales*. El conjunto de eventos simultáneos con O se representa con un plano que pasa por O : cada uno de ellos corresponde al presente asociado con un sistema de referencia dado.

Llegamos a la conclusión sorprendente: hay infinitos presentes distintos para cada evento. Esta conclusión tiene consecuencias filosóficas muy importantes. Por ejemplo, el *presentismo*, la corriente filosófica que afirma que sólo lo presente es real tiene serias dificultades con ella (Romero, 2017).

Las leyes de la física se expresan geoméricamente en el espaciotiempo donde la historia de cada partícula forma una figura estática en el mundo tetradimensional: su *línea de Universo*. Así, pues, cada uno de nosotros describe en el Universo de Minkowski una compleja figura estática: un haz de fibras (nuestros átomos individuales) que se integran y desintegran en un único objeto geométrico inmóvil, que se estira a lo largo de una dirección particular del espacio de Minkowski: el tiempo. El determinismo y la relatividad, pues, condujeron por un camino tortuoso y oscuro a reconstruir el Universo de Parménides.

EL TIEMPO EN LA RELATIVIDAD GENERAL

Desde 1905 en adelante, Einstein trató de acomodar la teoría de la gravitación, la joya de la obra newtoniana, en el marco del espaciotiempo de Minkowski. Poco a poco, guiándose por consideraciones estéticas, Einstein fue construyendo la Teoría General de la Relatividad.

La idea central de la teoría está contenida en el *Principio de Equivalencia*. Esta conjetura es una generalización a la vez del principio de relatividad y de la ley de caída de los cuerpos masivos, formulada por Galileo en 1637: *Todos los cuerpos masivos caen con la misma aceleración en un campo gravitacional*. El Principio de Equivalencia afirma que un sistema de referencia “pequeño” sumergido en un campo gravitacional se comporta exactamente igual que un sistema de referencia acelerado y, por lo tanto, ningún tipo de experimento físico local puede distinguir entre ambos. Razonamientos sencillos, basados sobre el Principio de Equivalencia, condujeron a Einstein a formular su teoría de la gravitación como una teoría geométrica: la presencia de un campo gravitacional altera la geometría del espaciotiempo y todos los cuerpos caen con la misma aceleración porque ésta se origina en los cambios de velocidad inducidos por la extraña geometría del espaciotiempo. Cuando un cuerpo cualquiera está en caída libre, no actúa sobre él fuerza gravitacional alguna: sólo sigue la “trayectoria más económica”, llamada *geodésica*, entre dos puntos dados del espaciotiempo.

Toda la información sobre la estructura del espaciotiempo está contenida en el *tensor métrico* $g_{\mu\nu}(x)$, que generaliza el teorema de Pitágoras para un espacio deformado, en donde x indica las coordenadas de un punto del espaciotiempo en un sistema de coordenadas elegido. Si dx^μ indica la diferencia de coordenadas entre dos puntos próximos, la distancia entre ambos puntos está dada por

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu$$

y el *Teorema Egregio* de Gauss (generalizado por Riemann) afirma que toda la geometría del espacio se puede reconstruir si se conoce $g_{\mu\nu}(x)$ en todo el espaciotiempo.

Advirtamos que ds es la distancia cronotópica entre dos eventos e y e' y ambos deben estar dentro de un mismo manto del cono de luz para que sea un número real.

En relatividad general, el transcurrir del tiempo local depende de la posición de un sistema de referencia “pequeño” dentro del campo gravitacional: el tiempo transcurre más lentamente dentro de un ascensor cercano a la planta baja, que cuando está cercano al vigésimo piso. La diferencia entre ambos relojes es muy pequeña pero detectable con experimentos sofisticados (Will, 2014). Este fenómeno es muy

importante en el sistema GPS, pues la diferencia entre los relojes que hay en los satélites artificiales que orbitan a 20200 km de altura y el receptor de un automóvil al nivel del mar es lo suficientemente importante como para que un auto se desvíe del camino y se meta en el mar o un precipicio si no se toman precauciones especiales para corregir el problema.

El problema de sincronizar estos relojes entre sí es muy complejo, pero hay un teorema sorprendente: en todo campo gravitacional existen sistemas de coordenadas en donde el tiempo transcurre uniformemente en todo el espacio.

LA “FLECHA DEL TIEMPO”

En cualquier sistema de referencia, el eje del tiempo es localmente isomorfo a la recta real. Esto significa que el conjunto de instantes está ordenado por una relación $a > b$ que puede leerse como “el instante a es *posterior* al instante b ”. Esta estructura completa y ordenada es similar a la que hay sobre la recta geométrica en donde la misma relación se leería “el punto a está *a la derecha* del punto b ”.

Sin embargo, la analogía entre los dos casos termina allí. Un móvil puede viajar desde a hasta b o en la dirección opuesta, desde b hasta a , pero ningún objeto físico puede retroceder en el tiempo. Si el evento a es posterior al evento b y se encuentran dentro del cono de luz, no es posible “retroceder” desde a hasta b . Esta imposibilidad se conoce como la *flecha del tiempo* (Zeh, 2007).

Si bien se trata de una imposibilidad conocida desde la más remota antigüedad, es muy difícil explicarla a partir de las leyes básicas de la física pues todas ellas son invariantes bajo la operación de *inversión temporal*. Esta última consiste en cambiar los intervalos temporales $\Delta t \rightarrow -\Delta t$ es decir, cambiar el orden de los instantes. Esto significa que las leyes básicas no prohíben el retroceso temporal. De hecho, la *retrodicción*, explicar los fenómenos pasados con las leyes de la física si se conoce el evento presente, es una forma muy atenuada del “retroceso temporal”.

Sin embargo, las retrodicciones pueden hacerse sólo para procesos muy particulares, llamados *procesos reversibles*. La mayoría de los procesos reales en la naturaleza son *irreversibles*. Éstos se caracterizan porque no es posible revertirlos sin alterar profundamente el sistema. La alteración más importante es que la entropía S del sistema y su ambiente crece durante el proceso.

La explicación básica es que un proceso es irreversible si pasa de un estado A de baja probabilidad a otro estado B de probabilidad mayor. La cantidad que mide estas probabilidades es la entropía: una cantidad que crece cuando aumenta el

desorden o la complejidad de un sistema. La *entropía* del sistema en cualquiera de los dos estados depende de la configuración microscópica de sus moléculas: sus posiciones y velocidades. Para cada estado microscópico $\alpha=(r,v)$, existe una cierta probabilidad $p(\alpha,t)$ de que alguna molécula lo ocupe. La entropía del sistema se define como

$$H(A, t) = -k \sum_{\alpha} p(\alpha, t) \ln p(\alpha, t)$$

El teorema H de Boltzmann (Sommerfeld, 1956) afirma que H no puede decrecer

$$\frac{dH}{dt} \geq 0$$

y por lo tanto caracteriza a los procesos irreversibles. El teorema ha recibido muchas críticas pero ha sido demostrado con hipótesis cada vez más débiles (Weinberg, 1995).

El teorema H y similares no resuelven completamente el problema de la “flecha del tiempo” porque no explican cuál ha sido el estado inicial de muy baja probabilidad (de muy baja entropía) que explica el estado actual del Universo. Es necesario usar consideraciones cosmológicas para lograrlo.

ALGO DE COSMOLOGÍA

La cosmología moderna trata de estudiar el Universo considerado como un todo. Fue introducida por Einstein (Einstein, 1917) como un intento para entender la estabilidad del Universo. La ley de gravitación de Newton postula que las fuerzas entre cuerpos son atractivas y no se comprende la existencia de grandes agrupaciones de estrellas estables, ya que bajo fuerzas atractivas los sistemas deberían ser inestables.

Einstein resolvió el problema invocando un principio de simetría: el *Principio Cosmológico*, que es un heredero lejano de las especulaciones de Anaximandro. Afirma que el Universo tiene una estructura geométrica particularmente simple y los modelos cosmológicos basados sobre el mismo se llaman *modelos de Robertson-Walker* (Friedmann, 1924; Robertson, 1935; Walker, 1937).

El modelo cosmológico estándar (Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008) se basa sobre un pequeño grupo de hipótesis que incluyen el Principio Cosmológico y por lo tanto tiene la estructura geométrica de un modelo de Robertson Walker. Pero además supone otras hipótesis adicionales, físicas y astrofísicas, que lo caracterizan. Su

buen acuerdo con las observaciones más importantes lo convierten en el modelo preferido por la mayoría de los investigadores, aunque el acuerdo no sea perfecto (Lopez-Corredoira, 2017).

En lo que sigue, examinaremos las hipótesis cosmológicas más importantes y sus conclusiones relevantes.

LAS HIPÓTESIS COSMOLÓGICAS

Toda la cosmología moderna se basa sobre un pequeño número de hipótesis muy simples. Algunas enuncian hechos observacionales bien comprobados, otras son hipótesis metodológicas y otras son hipótesis especulativas.

HIPÓTESIS METODOLÓGICAS

Principio Copernicano: En una sección espacial del Universo, todos sus puntos son equivalentes. La locución “sección espacial” designa el conjunto de eventos simultáneos con un evento dado.

Esta hipótesis afirma que el Universo tiene una estructura geométrica simple y que es escrutable analizando la estructura de una región pequeña de mismo.

Principio Galileano: Las leyes naturales son las mismas en todo el Universo.

Este principio complementa el Principio Copernicano, extendiendo la uniformidad del Universo a las leyes que rigen los eventos.

Este par de hipótesis enuncian con precisión el Principio Cosmológico.

HIPÓTESIS OBSERVACIONALES

La expansión de Hubble: El Universo se expande uniforme e isotrópicamente alrededor de cada uno de sus puntos.

El descubrimiento de la expansión de Universo (Humason, 1929; Hubble, 1929) abrió las puertas a la cosmología moderna: el Universo moderno es una entidad dinámica no sólo en detalle, pues está formado por cosas cambiantes, sino que el Universo mismo cambia como un todo.

El fondo cósmico de radiación: El Universo está bañado por un fondo de radiación electromagnética con una temperatura de 3 K.

El descubrimiento de Penzías y Wilson (Penzias and Wilson, 1965; Dicke et al.,

1965) muestra otro aspecto dinámico del Universo: su composición varía a lo largo del tiempo. El fondo cósmico de radiación muestra que el Universo debió ser muy caliente en una época remota y se enfrió a lo largo de miles de millones de años hasta la temperatura actual.

La aceleración de la expansión: La expansión del Universo está acelerada en la época actual.

Este es un descubrimiento sorprendente (Riess et al., 1998; Perlmutter et al., 1999) pues la gravitación genera fuerzas siempre atractivas que tienden a retardar la expansión del Universo. Para que se originen fuerzas repulsivas (llamadas *antigravedad* en ciencia-ficción) es necesario que haya una forma de materia con propiedades muy extrañas, llamada *energía oscura* en Cosmología.

HIPÓTESIS ESPECULATIVAS

La materia oscura: Existe una forma de materia que no interacciona con la luz pero que produce campo gravitacional atractivo.

Esta forma de materia fue propuesta hace mucho tiempo (Zwicky, 1933) para explicar por qué ciertos grupos de galaxias no se desintegran. Puesto que no interacciona con la luz, su presencia sólo puede inferirse en forma indirecta.

La energía oscura: Existe una forma de materia, que sólo interactúa con el campo gravitacional pero que produce campo gravitacional repulsivo (“antigravedad”).

Esta forma de materia es heredera de la constante cosmológica introducida por Einstein (Einstein, 1917). Su naturaleza es desconocida, y existen muchos modelos de la misma. Su estructura matemática es similar a la de las fluctuaciones de vacío en *teoría cuántica de campos* y esa estructura es la que mejor explica las observaciones. Incidentalmente, esta estructura es isomorfa a la constante cosmológica.

Inflación: El Universo, en sus comienzos, pasó por una etapa de expansión acelerada llamada *inflación*.

La hipótesis inflacionaria (Guth, 1981; Linde, 1982) se propuso para explicar la homogeneidad del Universo y de su contenido usando fenómenos físicos plausibles. De ese modo no es necesario imponer condiciones iniciales “raras” sobre la estructura del Universo.

EL MODELO COSMOLÓGICO ACTUAL

Sobre la base de las hipótesis anteriores, las leyes de la Física conocidas y la observación astronómica se construyó el Modelo Cosmológico Estándar. Sus principales características son:

1. La geometría del Universo se describe con una métrica $d\sigma$ que representa la distancia entre dos puntos próximos. Esta distancia no depende de la posición del par de puntos ni de la dirección de la línea que los une.
2. Existe una manera de sincronizar el tiempo, la misma para todos los sistemas de referencia locales. Este tiempo universal t se parece al tiempo de Newton pero hay diferencias sutiles e importantes entre ambos.
3. La geometría del espacio tiempo está descrita por la distancia cronotópica, que tiene la forma

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2 d\sigma^2$$

en donde $R(t)$ es el *factor de escala* que describe la expansión del Universo.

4. Las leyes de la física, en particular la Relatividad General, exigen que el comportamiento del Universo esté determinado por su contenido de materia. Esto conduce a una ecuación de la forma

$$H^2 = \Omega_r/R^2 + \Omega_m/R + \Omega_\Lambda R + \Omega_K$$

en donde H es la tasa de expansión de Universo y las cantidades Ω representan las fracciones con que las distintas formas de materia contribuyen a la masa total de Universo en el presente.

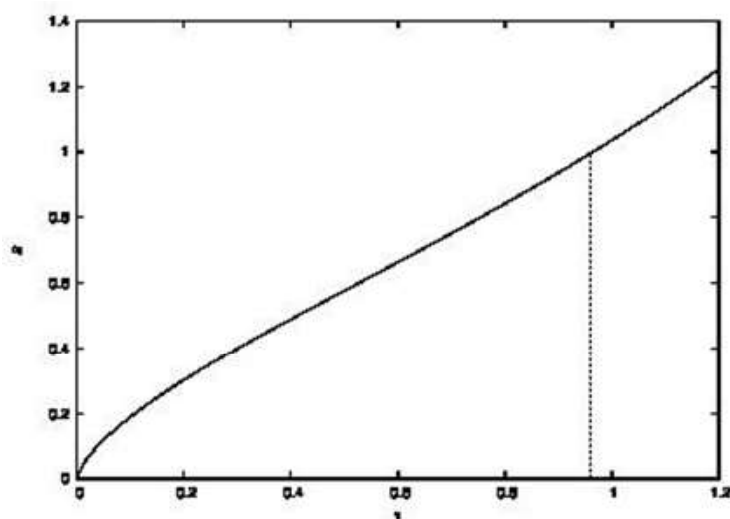


Figura 3: Factor de escala en función del tiempo universal

La figura 3 muestra la evolución del factor de escala $R(t)$, para valores típicos de los parámetros cosmológicos: 75% de energía oscura, 20% de materia oscura y sólo 5% de materia bariónica, la forma familiar que muestra el mundo visible.

TIEMPOS EN COSMOLOGÍA

Hemos mencionado que el Principio Cosmológico implica que es posible elegir un tiempo particular para todos los sistemas de referencia, que hemos llamado el *tiempo universal* t . El tiempo universal es muy cómodo para estudiar la teoría de la evolución del Universo, pero no es fácil medirlo directamente y esto limita su utilidad en la observación de eventos cosmológicos. Aunque el tiempo universal puede inferirse a partir de algunas de estas observaciones, es necesario utilizar otras variables de tiempo, más o menos cómodas para trabajar.

TIEMPOS LOCALES

Como ya hemos dicho, en Relatividad General cada sistema de referencia “pequeño” tiene su tiempo local, que no está sincronizado, en principio, con los tiempos asociados a otros sistemas de referencia “pequeños”. Pero en cosmología, como consecuencia del Principio Cosmológico, esos tiempos locales están sincronizados con el tiempo universal y por lo tanto “corren al mismo ritmo”.

Consideremos ahora un pulso de luz emitido en el instante en un tiempo posterior t_e . Durante el viaje, el Universo se ha dilatado en un factor $t_0 > t_e$ y la frecuencia de la luz emitida ha cambiado de la frecuencia original ω_0 a $R(t_0)/R(t_e)$. Pero, por el Principio Cosmológico, la frecuencia de la luz emitida está determinada por la física atómica y debe ser igual a la frecuencia emitida por los átomos locales. La comparación de ambas frecuencias muestra que

$$R(t_0)\omega_e = R(t_e)\omega_0$$

Y por lo tanto, la frecuencia observada *hoy* difiere de la frecuencia propia de la luz en la cantidad

$$\omega_0 - \omega_e = (1 + z)\omega_0$$

en donde la variable z representa el *corrimiento al rojo* de la luz. Este resultado condujo a la ley de Hubble (Sec. 4.1).

Reitero que es la existencia de tiempos locales sincronizados con el tiempo universal lo que caracteriza el resultado (10).

TIEMPOS CÓSMICOS

Si bien el tiempo universal t es el que mejor representa un universo que satisface el Principio Cosmológico, en Relatividad General toda variable $\tau=f(t)$ razonable es una variable temporal admisible y todas ellas son representaciones válidas del tiempo universal.

Un ejemplo de esas variables es el *tiempo conforme* η , definido por la ecuación

$$H_0 dt = R(t) d\eta$$

en donde H_0 es la *constante de Hubble*: la tasa actual de expansión del Universo. El tiempo conforme tiene la característica de “haber corrido más rápido” que el tiempo universal cuando el Universo era más joven. Es muy útil para describir en detalle acontecimientos en el universo primitivo, cuando la tasa de expansión era mucho mayor.

Otro ejemplo la da el *tiempo logarítmico*

$$\hat{t} = t_0 \log(t/t_0)$$

que tiene características similares al tiempo conforme, pero que no tiene un “origen del tiempo”: usando este tiempo el Big Bang ocurrió en $\hat{t}=-\infty$ y el Universo ha durado desde siempre.

EL COMIENZO DEL TIEMPO

Uno de los problemas que puede resolver un modelo cosmológico es el del *comienzo del tiempo*: ¿tuvo el Universo un principio en el tiempo o ha existido desde siempre? El problema es complejo y ya San Agustín lo comprendió. En el Libro XI de las *Confesiones* estudió el problema (San Agustín, L. XI, Cap. xii, 14)

He aquí que yo respondo al que preguntaba: “¿Qué hacía Dios antes que hiciese el cielo y la tierra?”. Y respondo, no lo que se dice haber respondido alguien bromeando y eludiendo lo peliagudo de la cuestión: “Preparaba —contestó— castigos (gehennas) para los que escudriñan profundidades”

Más adelante, Agustín examina la noción de “comienzo” para concluir que (Agustín, 401, L. XI, Cap. xiii, 15)

Pero si la mente volandera de alguno, vagando por las imágenes de los tiempos anteriores [a la creación], se admirase de que tú, Dios omnipotente, y omni-

creante, y omniteniente, artífice del cielo y de la tierra, dejaste pasar un sinnúmero de siglos antes de que hicieses tan gran obra, despierte y advierta que admira cosas falsas. Porque ¿cómo habían de pasar innumerables siglos, cuando aún no los habías hecho tú, autor y creador de los siglos? . . . Porque tú habías hecho el tiempo mismo; ni pudieron pasar los tiempos antes de que hicieses los tiempos. . . Porque realmente no había tiempo donde no había entonces.

El problema existe también en la cosmología moderna y distintos modelos cosmológicos dan distintas soluciones al mismo.

EL COMIENZO EN EL MODELO COSMOLÓGICO “CLÁSICO”

En el modelo cosmológico estándar, pero sin incluir la hipótesis de inflación, la solución es muy parecida a la propuesta por Agustín: el tiempo se originó junto con el resto del Universo, durante el “Big Bang”. La curva de la figura 3 muestra que el origen del Universo ocurrió en algún momento, en un pasado distante pero finito. De hecho, el estudio de los datos observacionales da una edad del Universo de unos 14 mil millones de años.

En el modelo cosmológico clásico, el origen del Universo coincide con una *singularidad* del espaciotiempo: la geometría se reduce a un punto y toda la materia se concentra en ese punto, formando una cosa con densidad infinita. En ese estado, el espacio y tiempo no están definidos, como intuyera el poeta (Calvino, 1967)

Naturalmente que estábamos todos allí —*dijo el viejo Qfwfq*—, ¿y dónde íbamos a estar si no? Que pudiese haber espacio, nadie lo sabía todavía. Y el tiempo ídem: ¿qué quieren que hiciéramos con el tiempo, allí apretados como sardinas?

En una época cercana al origen, el Universo estaba dominado por la radiación cuya densidad era mayor que la de todas las otras formas de materia. Posteriormente, estuvo dominado por la materia oscura hasta que la energía oscura se hizo importante, en una época reciente. El estudio de esos cambios en la composición de Universo puede hacerse aplicando la física conocida en el laboratorio, dado que una pequeña región de Universo se comporta como un sistema de referencia inercial. Los resultados de esos cambios quedaron impresos en el fondo cósmico de radiación y en la distribución de galaxias en el Universo, cuyo estudio permitió a su vez estudiar su evolución. Esa secuencia de cambios define *relojes cósmicos* que marcan la marcha del tiempo universal.

El Universo, pues, tiene una dinámica propia, descrita por las ecuaciones (8) y (9) y que

influye, además, sobre la materia que lo forma. La figura 4, tomada de referencia (Team, 2009), muestra un esquema de los cambios principales que hemos mencionado.

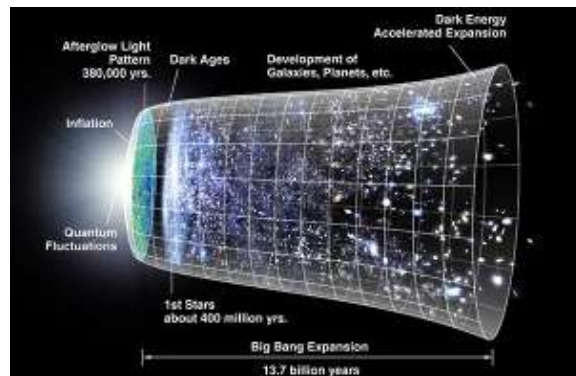


Figura 4: Esquema de los cambios importantes en el Universo

El estado inicial del Universo que propone el modelo cosmológico estándar no es un estado de baja entropía. En realidad, la evolución del Universo en el modelo no es una transición de estados ordenados a desordenados sino una evolución *isentrópica*: la evolución se produce casi sin alterar el orden y todos los procesos astrofísicos añaden una cantidad insignificante al desorden inicial.

EL COMIENZO EN UN UNIVERSO INFLACIONARIO

Para enfrentar las dificultades mencionadas en la sección anterior, se introdujo la noción de un Universo inflacionario: el origen del Universo (y del tiempo) se produjo *antes* de una etapa en la que el Universo se expandió enormemente: la *etapa inflacionaria*.

El mecanismo físico supone que en esa etapa del Universo existió una forma de “energía oscura inflacionaria” que produjo una expansión exponencial durante un tiempo t muy breve

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

Existen muchos mecanismos de inflación propuestos, de los cuales mencionaremos la existencia de un campo escalar cuasiestático (Guth, 1981; Linde, 1982), llamado generalmente el *inflatón*, y correcciones cuánticas a la Relatividad General (Starobinsky, 1980). Todos ellos producen efectos similares, aunque pocos están de acuerdo con la observación.

La inflación tuvo una consecuencia sorprendente: la entropía del Universo *disminuyó*. Una explicación intuitiva es que durante la expansión acelerada se diluyó la entropía contenida en un sector pequeño del espaciotiempo repartiéndola sobre un volumen inmensamente mayor que el inicial. Cualquier desorden inicial fue borrado, tal como desaparecen las arrugas de una sábana al extenderla. Sólo la “energía os-

cura” que produjo la inflación sobrevivió casi intacta. Al final de la etapa inflacionaria, el Universo estaba vacío y ordenado: el estado inicial de baja entropía requerido para explicar la flecha del tiempo. Esta *flecha del tiempo cosmológica* es una consecuencia natural de la inflación.

En una etapa posterior, posiblemente poco después del fin de la etapa inflacionaria, la “energía oscura inflacionaria” se convirtió en calor elevando la entropía del Universo a valores cercanos al actual. Todavía no está claro el mecanismo para explicar este *calentamiento del Universo*, aunque abundan los modelos plausibles (Allahverdi et al., 2010).

En consecuencia, a costa de dejar el problema del origen de lado, el modelo inflacionario proporciona un estado inicial para el mecanismo de Boltzmann de la flecha del tiempo.

“ANTES” DE LA ETAPA INFLACIONARIA

Se han buscado otras soluciones al problema del comienzo del tiempo de las que mencionaremos dos “anteriores” a la etapa inflacionaria.

En primer lugar, están las “cosmologías con rebote” (Novello and Bergliaffa, 2008): nuestro Universo es el sucesor de otro que colapsó. La referencia anterior examina numerosas versiones de las mismas, algunas de las cuales pueden ser viables. El problema del origen del tiempo, en estas cosmologías, desaparece: en una encarnación u otra, el tiempo ha existido siempre, siguiendo el colapso y renacimiento del Universo.

La cosmología cuántica ofrece otra versión del comienzo del tiempo: el Universo nació, como en la intuición del poeta, “From a wild weird clime that lieth, sublime, Out of SPACE—Out of TIME” (Poe, 1841).

Los correspondientes modelos cosmológicos (Hartle and Hawking, 1983; Vilenkin, 1984) se originan en eventos que ocurren en el *tiempo complejo*. El estado inicial se elige para satisfacer condiciones geométricas razonables en la primera referencia y la condición de volumen nulo en la segunda y a éste último estado se le da el nombre pintoresco de “la Nada”. La transición desde el estado inicial a un Universo dinámico, con tiempo real, se hace por el fenómeno cuántico del *efecto túnel* y a veces se lo llama “creación cuántica”.

La existencia de estos fenómenos genera algunas dificultades para una teoría sustancialista del espaciotiempo (Romero, 2017) que para resolverlas requieren introducir nociones de Mecánica Cuántica en la estructura espaciotemporal.

EL “PROBLEMA DEL TIEMPO”

El *problema del tiempo* consiste en que la *formulación hamiltoniana* de la teoría cosmológica, el tiempo desaparece: el *hamiltoniano*, que es el generador infinitesimal de traslaciones temporales, se anula idénticamente y por lo tanto la teoría predice que el tiempo no transcurre. Pero ya mencionamos en la sección 6.1 que hay cambios tanto en la materia que forma el Universo como en su misma estructura geométrica y teoría y observación parecen contradecirse.

La introducción anterior parece destinada a espantar a los lectores, de modo que hacemos una breve introducción a las ideas de la formulación hamiltoniana de la mecánica (Véase (Vucetich, 2007) para una exposición más completa). Una referencia muy completa sobre el problema del tiempo puede verse en (Anderson, 2012).

ALGO SOBRE LA FORMULACIÓN HAMILTONIANA

La mecánica clásica se formula fundamentalmente en la forma Newtoniana, con la ecuación de movimiento (1), que se puede escribir también en la forma

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}, \quad \mathbf{p} = \mathbf{F}$$

en donde hemos introducido el *impulso* de la partícula p . La misma ley puede obtenerse en la *formulación Lagrangeana* de la mecánica, solicitando que la *acción* del sistema, definida por la ecuación (por sencillez, nos restringiremos al movimiento en una dimensión)

$$S = \int_{x_0, t_0}^{x_1, t_1} L(\dot{x}, x, t) dt, \quad L(\dot{x}, x, t) = \frac{m}{2} \dot{x}^2 - V(x)$$

sea mínima. Definiendo el *impulso canónico conjugado* de la coordenada x de la partícula y la *fuerza generalizada* como

$$p = \frac{\partial L}{\partial \dot{x}}, \quad F = \frac{\partial L}{\partial x}$$

se obtiene la *forma lagrangeana de la ecuación de movimiento*

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x}$$

La formulación lagrangeana puede aplicarse a sistemas de muchas partículas o de campos continuos y, con mucho cuidado, a la mecánica cuántica. En lo que sigue, usaremos la notación tradicional para las coordenadas e impulsos generalizados: (q_i, p_i) respectivamente.

Las ecuaciones de Lagrange tienen una propiedad muy importante: conservan su forma bajo cambios generales de coordenadas (Vucetich, 2007). De este modo, pueden usarse sistemas de coordenadas más cómodos para resolver determinados problemas. Sin embargo, esta generalidad no es suficiente para ciertas aplicaciones y la formulación hamiltoniana permite lograr esa generalización.

La formulación hamiltoniana trata a coordenadas e impulsos en un pie de igualdad. Se define una operación llamada el *corchete de Poisson* en mecánica clásica (o el *conmutador*, en mecánica cuántica) que debe satisfacer ciertas propiedades formales (Vucetich, 2007) y se define el *hamiltoniano del sistema* con la ecuación

$$H(q_i, p_i, t) = \sum_i P_i \dot{q}_i - L(q_i, \dot{q}_i, t)$$

Las ecuaciones de movimiento toman la forma

$$\dot{q}_i = [H, q_i], \quad \dot{p}_i = [H, p_i]$$

y se puede demostrar que para cualquier propiedad del sistema $F(q,p,t)$ que sea una función de las coordenadas e impulsos generalizados (q_i, p_i) su cambio con el tiempo se puede expresar en la forma

$$\dot{F} = [H, F] + \frac{\partial F}{\partial t}$$

que es la expresión de que el Hamiltoniano genera traslaciones infinitesimales en el tiempo.

SISTEMAS CON HAMILTONIANO NULO

Existe un cierto tipo de sistemas que en la formulación lagrangeana no parecen tener problemas, pero que en la formulación hamiltoniana su generador de traslaciones temporales $H=0$. Este es un ejemplo de *sistemas hamiltonianos singulares* (Vucetich, 2007).

Un ejemplo de estos sistemas es el movimiento de una partícula relativista. La acción correspondiente en función del tiempo propio es

$$S = \int ds = \int \sqrt{c^2 \dot{t}^2 - \dot{\mathbf{r}}^2} d\lambda$$

en donde las derivadas se toman con respecto de *cualquier parámetro* λ , incluido el tiempo propio s . No es difícil demostrar que el hamiltoniano correspondiente es $H=0$. Los resultados de la sección 7.1 nos muestran que el cambio del estado del cuerpo es nulo en la formulación hamiltoniana, pero sin embargo en la formulación

lagrangeana no hay problemas; por ejemplo, las coordenadas y velocidades del sistema son funciones simples del tiempo propio.

Esta aparente contradicción se explica observando que la formulación hamiltoniana habitual no es aplicable en esos casos. Dirac (2001; Vucetich, 2007) ha desarrollado una generalización de la formulación hamiltoniana que es capaz de resolver, en principio estos problemas en sistemas singulares clásicos. La técnica introducida por Dirac utiliza el método de multiplicadores de Lagrange para imponer condiciones de vínculo tales como $H=0$, fingiendo (en un sentido muy técnico) que estas cantidades no se anulan.

La dificultad es mayor aun en sistemas singulares cuánticos pues, a pesar de la similitud formal con los sistemas singulares clásicos, encierran dificultades técnicas mucho mayores. Y en el caso de sistemas gravitacionales cuánticos el problema no está resuelto todavía.

En lo que sigue daremos una descripción cualitativa del problema, algunas de las soluciones propuestas y algunas analogías esclarecedoras.

EL PROBLEMA COSMOLÓGICO DEL TIEMPO

La formulación lagrangeana de la Relatividad General (basada sobre el Lagrangeano de Einstein-Hilbert) admite un grupo general de cambios de coordenadas (reparametrizaciones). Como consecuencia de esta invarianza, el hamiltoniano correspondiente también se anula, así como otros invariantes. Por ello, en una versión ingenua de la relatividad general en forma hamiltoniana, no hay transcurso del tiempo en el sentido hamiltoniano, de la ecuación (21).

Una solución formal del problema fue propuesta en la década del '60 (Arnowitt et al., 1962), la *descomposición ADM* que usaba multiplicadores de Lagrange con la técnica de Dirac. Estos multiplicadores representaban traslaciones temporales y espaciales, restaurando el movimiento en una interpretación Parmenideana de la dinámica relativista.

La solución anterior no parece suficiente cuando se consideran procesos cuánticos en el Universo temprano. Si esa etapa cuántica existió, debe usarse la Mecánica Cuántica para estudiarla y en ese caso la descomposición ADM no parece suficiente. El vínculo hamiltoniano toma la forma de una ecuación de Schrödinger, la *ecuación de Wheeler-DeWitt*, cuya solución debería conectarse con la probabilidad de que la métrica del Universo tenga determinada estructura. Además de las dificultades matemáticas, las de interpretación con enormes, en particular porque la solución de la ecuación de Wheeler-DeWitt no puede interpretarse como una amplitud de probabilidad.

A pesar de esto, con algunas restricciones y en modelos cosmológicos simplificados, es posible definir variables de tiempo basadas sobre la evolución de sistemas físicos internos tales que la “función de onda del Universo” tenga una interpretación consistente (Shestakova and Simeone, 2004a, 2004b). En otras palabras, el Universo evoluciona porque está formado por materia cuya secuencia de cambios originan un tiempo isomorfo con el tiempo universal.

UNA ANALOGÍA CON SISTEMAS CUÁNTICOS

Una idea interesante, similar a la expuesta al final de la sección 7.3, fue propuesta a principios de la década de los '80 (Page and Wootters, 1983). La idea de Page y Wootters fue que aunque el tiempo universal, que es una coordenada para eventos, no sea un parámetro de evolución, el cambio en un sistema físico A puede usarse para generar un tiempo para el sistema físico B .

Esta idea, modificada para resolver ciertas dificultades con la original (Gambini et.al., 2009), fue utilizada para definir un experimento que simula la evolución de un sistema cerrado estacionario U con dos subsistemas A y B , en función de un *tiempo reloj* externo al sistema y la evolución del subsistema A en función de un *tiempo interno*, definido usando la evolución de B (Moreva et al., 2014).

Como sistema U se utilizó un par de fotones polarizados A y B en un *estado enredado estacionario*. A todos los efectos prácticos, se trata de un estado independiente del “tiempo reloj”. Sin embargo, el enredamiento introduce correlaciones entre el estado del subsistema A y el subsistema B que pueden usarse para definir un “tiempo interno” para cualquiera de los dos subsistemas.

El resultado del experimento muestra que tanto el estado de U como los estados internos de A y B son independientes del “tiempo reloj”, pero que el estado de A varía en función del “tiempo interno” definido por el estado de B .

U es un modelo de juguete del Universo embrionario, y A y B lo son de un reloj local y una “oreja” que escucha el *tic-tac*. En esencia, el tiempo emerge del cambio, como fue propuesto por Leibniz (Alexander, 1983).

CONCLUSIÓN

El examen del tiempo en la cosmología moderna muestra varias facetas interesantes, algunas de las cuales tienen connotaciones filosóficas importantes. Examinemos muy brevemente estas conexiones.

Definir el presente: La noción de *tiempo presente* es de mucha importancia en filosofía y también en física (Romero, 2015). La noción de “época actual” reemplaza la noción de presente en física, pero se trata de una elección arbitraria del origen del tiempo. En cosmología, la época actual (“hoy”) se suele indicar añadiendo un sufijo “0” a las propiedades actuales del Universo. Incidentalmente, observemos que el “presente especioso” para el universo (42 millones de años) es mucho mayor que la existencia del hombre sobre la Tierra.

Invarianzas y tiempo: La existencia de un tiempo universal puede inferirse de las hipótesis cosmológicas y de hecho, el tiempo universal es un buen parámetro para ordenar distintos eventos en el Universo.

Comienzo del tiempo: Las observaciones muestran que el Universo evolucionó desde un estado primitivo sumamente caliente al estado actual. La edad del Universo inferida (usando tiempo Universal) es de 13799 ± 21 millones de años (Planck Collaboration et al., 2016). Pero la invarianza bajo reparametrizaciones en Relatividad General permite que cualquier variable u pueda usarse en lugar del tiempo universal. Esto hace que el problema del “Comienzo del tiempo” o la “Edad del Universo” quede mal definido.

Especulaciones: La hipótesis de inflación, a costa de escamotear el problema del “Comienzo”, permite explicar la homogeneidad del Universo y la existencia de un estado inicial “frio”, de alto orden y baja entropía, para el Universo.

Cambio y permanencia: La descripción de cambio y permanencia en cosmología depende de la existencia de alguna variable ordenadora, algún “tiempo”. Pero en la formulación hamiltoniana de un modelo cosmológico la variable ordenadora “tiempo coordinado” desaparece, debido a la invarianza bajo reparametrizaciones de la teoría: el hamiltoniano es idénticamente nulo. Sin embargo, los cambios relativos de las cosas que componen el Universo permiten definir un “tiempo interno” que en Universo tardío coincide con el tiempo Universal.

Si bien la cosmología ha sido capaz de dar algunas repuestas a la indagación de la naturaleza, muchas dependen de hipótesis especulativas, que sólo están débilmente confirmadas. Nuestro conocimiento pende del hilo de la imaginación, como lo advirtió hace mil años un astrónomo, geómetra, filósofo y poeta (Jayyam, 1998)

Al periodo al cual llegamos y partimos
ni se le ve el comienzo ni el fin se le vislumbra;
y no hay nadie que pueda decirnos de verdad
de dónde procedemos y a dónde partiremos.

Los de mayor saber y mejores maneras
la reunión de los sabios con su luz alumbraron;
no hallaron un camino hacia el día en la noche,
sólo contaron cuentos y después se durmieron.

BIBLIOGRAFÍA

San Agustín (s/f). Las confesiones. Recuperadas de http://www.augustinus.it/spagnolo/confessioni/conf_01_libro.htm

Alexander, H. G. (1983) *Leibniz-Clarke Correspondence*, UK: Manchester University Press.

Allahverdi, R., Brandenberger, R., Cyr-Racine, F.-Y. and Mazumdar, A. (2010) "Reheating in Inflationary Cosmology: Theory and Applications", *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 60: 27–51, Nov. 2010. 10.1146/annurev.nucl.012809.104511.

Anderson, E. (2012) "The problem of time in quantum gravity", en V. Frignanni (ed.), *Classical and Quantum Gravity: Theory, Analysis and Applications*, chapter 4. New York: Nova.

Arnowitt, R., Deser, S. and Misner, C. W. (1962) "The dynamics of general relativity", en L. Witten (ed.), *Gravitation: an introduction to current research*, chapter 7, pp. 227–264. New York: Wiley.

Calvino, I. (1967) *Las cósmicas*. Buenos Aires: Minotauro.

Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G. and Wilkinson, D. T. (1965) "Cosmic Black-Body Radiation". *Astroph. J.*, 142: 414–419, July 1965. 10.1086/148306.

Dirac, P. A. M. (2001) *Lectures on Quantum Mechanics*, New York: Dover Publications.

Einstein, A. (1917) "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie", *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, Seite 142-152.

Einstein, A. (1971) *El significado de la relatividad*. Madrid: Espasa-Calpe.

Friedmann, A. (1924) "Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, 21: 326–332, Dec. 10.1007/BF01328280.

Gambini, R., Porto, R. A., Pullin, J. and Tortorolo, S. (2009) "Conditional probabilities with Dirac observables and the problem of time in quantum gravity", *Phys. Rev. D*, 79 (4): 041501, Feb. 10.1103/PhysRevD.79.041501.

García Bacca, J. D. (ed.) (1981) *Los Presocráticos*. Fondo de Cultura Económica, México.

Guth, A. H. (1981) "Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems", *Phys. Rev. D*, 23: 347–356, Jan. 10.1103/PhysRevD.23.347.

Hartle, J. B. and Hawking S. W. (1983) "Wave function of the Universe", *Phys. Rev. D*, 28: 2960–2975, Dec. 10.1103/PhysRevD.28.2960.

Hubble, E. (1929) "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", *Proceedings of the National Academy of Science*, 15: 168–173, Mar. 10.1073/pnas.15.3.168.

Humason, M. L. (1929) "The Large Radial Velocity of N. G. C. 7619", *Proceedings of the National Academy of Science*, 15: 167–168, Mar. 10.1073/pnas.15.3.167.

Jayyam, O. (1998) *Robaiyyat, Hiperión*, 2a edición, Madrid. Traducción de Zara Benham y Jesús Munarriz.

Linde, A. D. (1982) "A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems", *Physics Letters B*, 108: 389–393, Feb. 10.1016/0370-2693(82)91219-9.

Lopez-Corredoira, M. (2017) "Tests and problems of the standard model in Cosmology", *ArXiv e-prints*, 1701.08720.

Markosian, N., Sullivan, M. and Emery N. (2016) "Time", en E. N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Metaphysics Research Lab, California: Stanford University, fall 2016 edition.

Mondolfo, R. (1958) *El pensamiento antiguo*, Buenos Aires: Editorial Losada.

Moreva, E., Brida, G., Gramegna, M., Giovannetti, V., Maccone, L. and Genovese, M. (2014) "Time from quantum entanglement: An experimental illustration", *Phys. Rev. A*, 89 (5): 052122,

- May. 10.1103/PhysRevA.89.052122.
- Mukhanov, V. (2005) *Physical Foundations of Cosmology*. Cambridge U. P. New York.
- Newton, I. (1997) *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*, Barcelona: Altaya.
- Novello, M. and Bergliaffa, S. E. P. (2008) “Bouncing cosmologies”, *Phys. Rep.*, 463: 127–213, July. 10.1016/j.physrep.2008.04.006.
- Page, D.N. and Wootters, W. K. (1983) “Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables”, *Phys. Rev. D*, 27: 2885–2892, June. 10.1103/PhysRevD.27.2885.
- Penzias, A. A. and Wilson, R. W. (1965). “A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s”, *Astroph. J.*, 142: 419–421, July. 10.1086/148307.
- Pérez-Bergliaffa, S., Romero, G. and Vucetich, H. (1998) “Steps towards an axiomatic pregeometry of space-time”, *Int. J. Theor. Phys*, 37: 2281.
- Perlmutter, S., G. Aldering, G. Goldhaber, et al. (1999) “Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae”, *Astroph. J.*, 517: 565–586, June. 10.1086/307221.
- Perret, W. and Jeffery, G. B. (ed.) (1952) *The principle of relativity*. New York: Dover.
- Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, R. B. Barreiro, J. G. Bartlett, et al. (2016). “Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters”, *Astron. Astroph.*, 594: A13, Sept. 10.1051/0004-6361/201525830.
- Poe, E. A. (1841) *Dreamland*. The Poetry Foundation. Recuperado de: <https://www.poetryfoundation.org/poems-and-poets/poems/detail/48631>.
- Riess, A. G., A. V. Filippenko, P. Challis, et al. (1998). “Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant”, *Astron. J.*, 116: 1009–1038, Sept. 10.1086/300499.
- Robertson, H. P. (1935) “Kinematics and World-Structure”, *Astroph. J.*, 82: 284, Nov. 10.1086/143681.
- Romero, G. E. (2015) “Present time”, *Foundations of Science*, 20 (2): 135–145. 10.1007/s10699-014-9356-0.
- Romero, G. E. (2017) “On the ontology of spacetime: Substantivalism, relationism, eternalism, and emergence”, *Foundations of Science*, 22: 141–159. 10.1007/s10699-015-9476-1.
- Russell, B. (1978) *Historia de la Filosofía Occidental*, volume 1. Madrid: Espasa-Calpe S.A., 3 edición.
- Shestakova, T. P. and Simeone, C. (2004a). “Review: The problem of time and gauge invariance. I. Canonical quantization methods”, *Gravitation and Cosmology*, 10: 161–176, Sept.
- Shestakova, T. P. and Simeone, C. (2004b) “Review: The Problem of Time and Gauge Invariance. II. Recent developments in the path integral approach”, *Gravitation and Cosmology*, 10: 257–268, Dec.
- Sommerfeld, A. (1956) *Thermodynamics and Statistical Mechanics*, New York: Academic Press.
- Starobinsky, A. A. (1980) “A new type of isotropic cosmological models without singularity”. *Physics Letters B*, 91: 99–102, Mar. 10.1016/0370-2693(80)90670-X.
- Team, W. (2009) “Cambios en el universo”. Recuperado de: [http://astrosociety.org/wp-content/uploads/2012/10/1-CMB's\do6\(T\)imeline300's\do6\(n\)o's\do6\(W\)MAP-300x195.jpg](http://astrosociety.org/wp-content/uploads/2012/10/1-CMB's\do6(T)imeline300's\do6(n)o's\do6(W)MAP-300x195.jpg).
- Vilenkin, A. (1984) “Quantum creation of universes”, *Phys. Rev. D*, 30: 509–511, July. 10.1103/PhysRevD.30.509.
- Vucetich, H. (2007) *Introducción a la Mecánica Analítica*. Manuales. Buenos Aires: Eudeba.
- Walker, A. G. (1937) “On milne’s theory of world-structure”, *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-42 (1): 90. 10.1112/plms/s2-42.1.90.
- Weinberg, S. (1995) *The quantum theory of fields*, volume 1, UK: Cambridge U. P.
- Weinberg, S. (2008) *Cosmology*. UK: Oxford University Press.
- Will, C. M. (2014) “The Confrontation between General Relativity and Experiment”, *Living Re-*

views in Relativity, 17: 4, Dec. 10.12942/lrr-2014-4.

Zeh, H. D. (2007) The physical basis of the direction of time. Frontiers. Springer, Berlin Heidelberg, 5 edition.

Zwicky, F. (1933) "Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln", Helvetica Physica Acta, 6: 110–127.

SOBRE EL AUTOR

Héctor Vucetich

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata. Profesor Emérito de la Universidad Nacional de La Plata. Ha desarrollado investigaciones sobre Teoría Cuántica de Campos, Gravitación, Cosmología y Fundamentos de la Física. Ha sido Investigador Principal del Conicet. En sus ratos libres escribe relatos fantásticos y dibuja.

Email: vucetich@fcaglp.unlp.edu.ar

Agradecimientos

El autor agradece a Gustavo E. Romero y Sergio Tonkonoff por su amable invitación a presentar este trabajo para el número temático sobre el tiempo de la Revista Diferencia(s).

Artículo

RECIBIDO 21/02/2017

APROBADO 31/03/2017