



ALONSO SEPÚLVEDA S.

# CIENT AÑOS DE COSMOLOGÍA RELATIVISTA

El espacio de Einstein no está más próximo a la realidad que un cielo de Van Gogh. La gloria de la ciencia no está en una verdad “más absoluta” que la verdad de Bach o Tolstoi, sino en el acto de la creación misma. Los descubrimientos de los científicos imponen su propio orden en el caos, como el compositor o el pintor impone el suyo, un orden que se refiere siempre a aspectos limitados de la realidad, influido por el marco de referencia del observador, que difiere de un período a otro, de la misma manera que un desnudo de Rembrandt difiere de un desnudo de Manet.

Arthur Koestler

**E**l 18 de febrero de 1917, Albert Einstein publicó en la revista de la Academia Prusiana de Ciencias un artículo que marcó el inicio de una nueva cosmología, basada en la teoría general de relatividad, que evolucionó rápidamente. En menos de treinta años se alió con la naciente teoría de la gran explosión para configurar el primer modelo coherente del origen del universo y de su expansión, descubierta en esos años.

En los ochenta la cosmología relativista se alió con la física de las partículas elementales para configurar la que es ahora la teoría estándar sobre la evolución del cosmos.

## Los antecedentes

### I. El mundo newtoniano

De acuerdo con Newton, los acaeceres del mundo tienen lugar en un espacio eterno e infinito que no es afectado por los fenómenos que en él ocurren. Con mundo material, o sin él, el espacio es el mismo. El espacio del mundo tiene estructura euclidiana y sus propiedades geométricas no son alteradas por la materia que lo ocupa. Así, por ejemplo, la presencia del Sol no influye sobre la geometría en sus alrededores, y el movimiento de los planetas —con sus órbitas elípticas— ha de ser descrito por fuerzas que de él emanan.

El tiempo tampoco sufre la presencia de lo material. Sin él, o con él, su flujo es siempre el mismo, continuo, uniforme y eterno. Además de absolutos, el espacio y el tiempo son entidades independientes.

Es bastante conocida una representación en la que el nuevo espacio-tiempo tiene la consistencia de una lona tensa en cuyo centro se coloca una bola pesada. La superficie de la lona se curva y es posible poner en ella una canica en movimiento, la cual recorre la superficie como un planeta que orbita el Sol.

Un modelo newtoniano del universo lo imagina como una nube finita de partículas cuya densidad disminuye desde su punto central. Si el universo comenzara con una condición inicial de reposo, la gravitación de sus partes lo haría colapsar. Este es un universo dinámico. Si se considera este universo como una especie de gas, las colisiones podrían compensar la gravitación permitiendo que se expanda o contraiga o permanezca en equilibrio.

Otro modelo, también regido por la física newtoniana, supone que el universo es infinito en extensión, con una densidad promedio constante, lo que permite suponerlo eterno y de masa infinita.

### II. El mundo relativista

La teoría especial de la relatividad puede resumirse en una frase esencial: el espacio y el tiempo forman una unidad de cuatro dimensiones: el espacio-tiempo. La cuarta coordenada está asociada al tiempo y en unidades de metros se define como  $ct$ , donde  $c$  es una constante universal, correspondiente a la velocidad de la luz en el vacío, la misma en cualquier sistema de referencia no acelerado.

El espacio-tiempo es un absoluto, su geometría (a la que se asocia el nombre de Minkowski, su fundador) no se altera por la presencia de la materia, aunque diferentes observadores puedan “seccionarlo” de modo diferente en espacio y tiempo, dando lugar a diferentes medidas de longitudes e intervalos temporales.

En la relatividad especial no es posible formular un modelo cosmológico consistente porque no hay en ella una reformulación completa del fenómeno de la gravitación. Este trabajo se posterga hasta la relatividad general.

### III. La relatividad general

Esta es una teoría que no tiene parangón en la física. Es consistente con los datos, amplía en la cantidad de física que involucra y renueva, y es además una teoría hermosamente entrelazada que se compara solo a las más grandes obras de arte, como la *Novena sinfonía* o la Capilla Sixtina.

En ella el espacio-tiempo, que en la relatividad especial es rígido e inalterable, se torna maleable y elástico como una superficie de caucho. Es bastante conocida una representación en la que el nuevo espacio-tiempo tiene la consistencia de una lona tensa en cuyo centro se coloca una bola pesada. La

superficie de la luna se curva y es posible poner en ella una canica en movimiento, la cual recorre la superficie como un planeta que orbita el sol.

Lo que ocurre, asegura la teoría, es que un planeta se mueve alrededor del Sol sin que este ejerza una fuerza, movimiento debido solo a que el Sol causa una especie de depresión en el espacio-tiempo en la que los planetas se mueven libremente. Esto significa que el movimiento de los planetas es inercial (sin fuerzas) y que ahora el espacio-tiempo es curvo. Los planetas a su vez —y en mucha menor proporción— causan una depresión en el espacio-tiempo circundante que hace que los satélites orbiten libremente alrededor de ellos. Los planetas junto con su depresión (y con una, mucho menor, que causa el satélite) giran alrededor del Sol.

Las predicciones de la teoría son diversas y sorprendentes; todas las que caen bajo el alcance experimental han sido verificadas. La más reciente se refiere a la existencia de las ondas gravitacionales, que no son ondulaciones *en* el espacio (como las ondas electromagnéticas), sino ondulaciones *del* espacio. Esta verificación de 2016 apunta a que las propiedades elásticas del espacio-tiempo son reales, y que en consecuencia el escenario de los fenómenos físicos es parte de la acción, no solo un fondo inalterable como en la teoría newtoniana o en la relatividad especial.

## La cosmología

### I. El universo de Einstein

Cada cuerpo material gravita, esto es, deforma, deprime, el espacio-tiempo. La gravitación no es ahora un campo de fuerzas, sino un campo de deformación del escenario en el que ocurren los fenómenos físicos.

Así, cada planeta, estrella, galaxia, crea un entorno espacio-temporal deformado. En su artículo, Einstein imagina el universo —a escala cosmológica— como un conjunto muy grande, pero *finito*, de estrellas en movimiento aleatorio, cuyo promedio, visto a esa gran escala, muestra una densidad constante, la misma en todos los puntos. Un universo finito de este tipo es inestable porque el efecto acumulativo de las “depresiones” debidas a cada cuerpo en el espacio-tiempo causa el colapso del universo entero alrededor de su centro, ya sea que se explique en un nivel newtoniano o en uno de



Universo visible

relatividad general. Por ello, Einstein introduce en su teoría el llamado *término cosmológico*, que actúa como una especie de gravedad repulsiva, es decir, que en vez de generar “depresiones” en la textura del espacio-tiempo, genera en él “colinas” que las contrarrestan.

Convencido de que el universo es en promedio *estático*, Einstein configura un modelo del universo en el que la acción atractiva es compensada en todas partes y en todo momento por la acción repulsiva asociada al término cosmológico. Se llama el *universo de Einstein*. Él mismo lo llamaría después el error más grande de su vida.

Los cálculos asociados al modelo le permiten proponer un universo esférico tridimensional de un radio y una masa determinados por la constante cosmológica.

Un universo esférico 3D es el análogo en tres dimensiones de una superficie (un objeto 2D) que se curva sobre sí misma, convirtiéndose en una esfera. Es imposible imaginar cómo nuestro espacio 3D puede curvarse y cómo puede *cerrarse* sobre sí mismo, porque no tenemos acceso a un espacio 4D desde donde podamos presenciar este acontecimiento.

Para comprenderlo mejor, acudamos a la siguiente imagen: en un espacio de Einstein podemos avanzar siempre en la misma dirección, lo más derecho posible, y regresar al punto de partida, así como podemos en la superficie de un balón, viajando a lo largo del ecuador, que es una de las líneas más directas posibles, regresar al punto original.

Así como la superficie de un balón es finita en su área y no tiene bordes, el volumen de un espacio de Einstein es finito y sin límites, puesto

que nunca podremos encontrar una frontera ni alejarnos indefinidamente, como ocurre con el espacio euclidiano. Llegamos así a la frase que condensa la propuesta y el cálculo de 1917 que inaugura —con un modelo que resultará erróneo— la cosmología relativista: *el universo de Einstein es finito e ilimitado*.

## II. Los modelos cosmológicos

Pronto fue descubierto por el astrónomo ruso Alexander Friedmann que el universo de Einstein es inestable, vale decir que, si se somete a fluctuaciones de densidad, se expande —o se contrae—, alejándose siempre de su situación original, diferente a lo que ocurre con una canica ubicada en una concavidad, que siempre regresa a su posición original si se le desplaza ligeramente.

De este modo pudo comprenderse que el universo de Einstein es el miembro inestable de una infinidad de soluciones a las ecuaciones del espacio-tiempo que comprenden universos en expansión o contracción, con o sin el término cosmológico, e incluso sin materia. Este último modelo cosmológico lleva el nombre de De Sitter y consiste en espacio puro curvo y en expansión, con un tiempo que fluye de modo uniforme. Estos modelos fueron propuestos por la primera generación de cosmólogos relativistas, entre quienes sobresalen Friedmann, De Sitter, el abate Lemaitre, Eddington y Gamow.

### La expansión del universo

En la década del veinte, Edwin Hubble, con su gran telescopio reflector del monte Wilson, realizó una cuidadosa medida de las distancias a las nebulosas espirales y elípticas, conectando sus resultados con las medidas de velocidades de tales nebulosas, algunas de ellas realizadas en la primera década del siglo xx por Vesto Slipher. Las nebulosas espirales llevan modernamente el nombre de galaxias espirales.

La inesperada conclusión de Hubble fue que las galaxias se alejan y su velocidad de alejamiento  $v$  es proporcional a su distancia  $d$  a nosotros. Esta es la ley de Hubble:  $v=Hd$ , donde  $H$  es la constante de Hubble. Resulta entonces que *el universo está en expansión*.

Apareció en ese momento un modelo basado en la relatividad general, que considera un

universo homogéneo con un espacio que se expande y del cual puede deducirse la ley de Hubble. Este modelo, asociado al nombre de Robertson-Walker, asegura que la llamada expansión del universo no es otra cosa que *expansión del espacio*.

La ley de Hubble resulta ser entonces una consecuencia del carácter elástico del espacio: las galaxias no se mueven de sus posiciones, conservan sus coordenadas, pero el espacio entre ellas crece con el tiempo, dando lugar a la ilusión observacional de la expansión del universo.

### Epílogo: la cosmología actual

A partir de los años cincuenta, y en rápida sucesión, comenzaron a descubrirse partículas y familias de partículas, lo que se extendió hasta los años sesenta y setenta. La tabla de “partículas elementales” (que incluía el protón y el neutrón) llegó a contener unas 400, lo que parecía bastante escandaloso, teniendo en cuenta que el número de elementos químicos, incluyendo los artificiales, no pasaba del centenar.

Con el surgimiento de la teoría de los quarks, en 1964, la situación llegó a una especie de final sensato, pues partiendo de 12 quarks (o 24, contando los antiquarks) logró describirse el conjunto de más de 400 e incluso predecirse otras nuevas. La teoría de los quarks, en alianza con la teoría de los leptones (que incluye el electrón), permitió generar el *modelo estándar de las partículas elementales* que, en forma plena, está en boga desde los años ochenta. Este modelo se integró a la cosmología, dando lugar al *modelo cosmológico estándar*.

A finales del siglo xx se descubrió que la expansión del universo se realiza de modo acelerado, evento en el que la constante cosmológica —abandonada en los años cincuenta— ha participado en los intentos de explicación.

El anterior panorama nos indica que la cosmología relativista no ha dejado de estar presente, desde su nacimiento, en la configuración de nuestro conocimiento del mundo. ■

---

Alonso Sepúlveda S. (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia. Realizó estudios de posgrado en el Hunter College de Nueva York. Fue investigador del Centro Internacional de Astrofísica de la Universidad Sapienza de Roma desde 1990 hasta 2009. Ha publicado, entre otros, *Estética y simetrías* (2003), *Un viaje en el espacio y en el tiempo* (2010), *El instante luminoso* (2012) y *Bases de astrofísica* (2014).