

# El origen del universo según la física moderna

¿Tuvo un principio el universo? Esta pregunta parece más del ámbito de la teología o la metafísica que de lo que llamamos ciencia. Sin embargo, gracias a la aparición de la física moderna a principios de este siglo y, más recientemente, de la física de partículas elementales, surge por primera vez la posibilidad de proponer una respuesta, de ofrecer un panorama de lo que podría haber sido el instante mismo de la creación.

SHAHEN HACYAN\*

*El diámetro del Aleph sería de dos o tres centímetros, pero el espacio cósmico estaba ahí, sin disminución de tamaño.*

*Jorge Luis Borges,*

El Aleph

## El universo en expansión

**E**l primer intento por construir un modelo realista del universo se debe al mismo Albert Einstein, poco después de que propusiera su teoría general de la relatividad. De acuerdo con esta teoría, el espacio en el que vivimos es curvo, en el

sentido de que los axiomas bien conocidos de la geometría clásica no se aplican exactamente en presencia de la gravitación. Expliquemos esto con un ejemplo: sabemos, porque así nos lo enseñaron en la escuela, que dos rectas paralelas nunca se intersectan, y que la distancia entre ellas se mantiene constante. Esto, sin embargo, no es un hecho sujeto a comprobación experimental, excepto en una escala muy pe-

\* Instituto de Física, UNAM.

## La gran explosión

La teoría de la gran explosión (big-bang, en inglés) es actualmente la explicación más completa que el hombre ha podido dar —desde el punto de vista científico— del principio del universo.

Toda la información proveniente de los estudios astronómicos recientes —así como

empezó a cuajar. Paso a paso, las partículas fundamentales que hoy conocemos —los bloques de los que está construida toda la materia— adquirieron su identidad presente. Las partículas se condensaron en átomos, las galaxias empezaron a crecer y se fragmentaron en estrellas como nuestro Sol.

La Tierra se formó hace poco más de cuatro mil millones de años, y el resto es historia.

A pesar de que la teoría está suficientemente respaldada, cuando se trata de contestar la pregunta fundamental —¿Cómo podrían el espacio, el tiempo, la materia y la energía haber salido de la nada?— las respuestas no son todavía suficientemente buenas.

A lo más que han podido llegar los físicos es a

tratar de describir qué ocurría con el universo cuando contaba con  $10^{-35}$  segundos de existencia —tiempo que puede ser escrito como un cero y un punto decimal seguido de 34 ceros y un 1.

A pesar de que este intervalo es excesivamente pequeño, sería equivocado creer que estando tan cerca de la creación no sería suficiente para albergar un sinnúmero de cambios. Aun cuando la estructura del universo no se modifica mucho en un millón de años, cuando éste era joven evolucionaba mucho más rápidamente.

Por ejemplo, los físicos afirman que entre el final de la primera décima de segundo y el final del primer segundo ocurrieron tantos cambios como en el intervalo de la primera centésima de segundo a la primera décima, y así sucesivamente en progresión logarítmica, hasta el verdadero principio.

(GK)

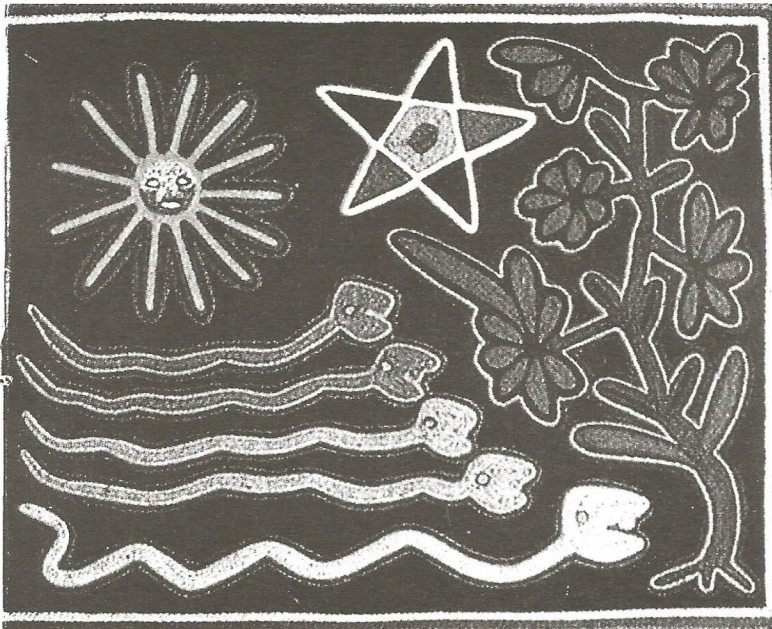


Dibujo por computadora de Norberto Pinelo

aquella ofrecida por la física de partículas elementales— tiende a confirmar paso a paso esta teoría.

Según ella, hace 15 mil millones de años, el universo en el que vivimos literalmente hizo explosión a partir de la nada. De esa inimaginable bola de fuego, todo —toda la materia, la energía, incluso el espacio y el tiempo— se creó en un preciso instante.

En los momentos iniciales de la gran explosión, el total de la materia del universo ocupaba un volumen extraordinariamente pequeño y su temperatura rebasaba las posibilidades de nuestra imaginación. Se trataba de una especie de olla hirviente formada por radiaciones electromagnéticas mezcladas con partículas microscópicas de materia —distintas de cualesquiera que pudieran encontrarse en el universo hoy en día. Conforme la bola de fuego se expandía, se enfriaba más y más, hasta que su estructura



*Pintura huichol de cera de abejas e hilaza que describe la Creación.*

queña como, por ejemplo, sobre una hoja de papel. Pero si se trazara un par de paralelas a escala de una galaxia, nada garantizaría que la distancia entre ellas se mantuviera constante. Una violación de los principios de la geometría clásica es una manifestación de que el espacio no es "plano", sino curvo. Ahora bien, según la teoría de Einstein, la fuerza de la gravedad es una manifestación de esa curvatura: el Sol, por ejemplo, atrae a los planetas porque deforma el espacio a su alrededor, y los planetas se mueven en órbitas curvas de la misma forma en que una canica desvía su trayectoria al rodar sobre una lona deformada.

La curvatura del espacio no se detecta en nuestra experiencia diaria, porque es un efecto prácticamente imperceptible para la fuerza de gravedad de la Tierra. Sin embargo, se manifiesta en toda su magnitud a escala del universo mismo.

Einstein publicó la versión definitiva de su teoría de la gravitación en 1915, y un año después propuso un modelo del universo basado en la misma. El universo de Einstein era semejante a la superficie de una esfera, en el sentido de que era finito, pero sin fronteras; un viajero hipotético podía moverse en línea recta en ese

universo y regresar eventualmente a su punto de partida. El universo propuesto por Einstein era estático (sin movimiento).

Sin embargo, en 1921, el físico ruso Alexander Fridman encontró otros posibles modelos del universo, basados también en la teoría de la relatividad general que predicen una expansión general del mismo: las galaxias se alejan unas de otras con una velocidad proporcional a la distancia entre ellas. Esa expansión seguirá indefinidamente, o se detendrá en algún momento para iniciar una contracción, según si la densidad de materia del universo es menor o no que cierto valor crítico.

Al principio, nadie, incluyendo el mismo Einstein, tomó en serio los resultados teóricos de Fridman. Sin embargo, a fines de los años veinte, el gran astrónomo estadounidense Edwin Hubble logró medir la distancia a las galaxias y descubrió que éstas se alejan de nosotros con una velocidad proporcional a su distancia, tal como en los modelos de Fridman. Hubble había descubierto, y medido, la expansión del universo.

Si el universo está actualmente en expansión, entonces su densidad de materia fue mayor en el pasado. A partir de la velocidad de expansión medida por los astrónomos se puede extrapolar hacia el pasado y determinar que toda la materia del universo debió estar concentrada a una densidad prácticamente infinita en algún momento, hace aproximadamente 15 mil millones de años, momento que corresponde a la llamada gran explosión.

Por otra parte, los radioastrónomos Penzias y Wilson descubrieron en 1967 una emisión de ondas de radio proveniente de todas las regiones del cielo que indicaba que la temperatura actual del universo es de unos 2.7 grados sobre el cero absoluto (270 grados centígrados bajo cero). Esta es una temperatura extremadamente baja; pero, si extrapolamos una vez más hacia atrás en el tiempo, resulta que el universo era más caliente en el pasado. En el límite, la temperatura era prácticamente infinita en el momento de la gran explosión.

## En pos de la unificación\*

Existen en la naturaleza cuatro fuerzas fundamentales mediante las cuales la materia interactúa consigo misma. La más conocida es la fuerza de gravedad, que nos mantiene unidos a la Tierra y que a escala cósmica controla el comportamiento del universo.

Otra fuerza importante es la electromagnética, que es responsable, entre otras cosas, de la cohesión de los átomos, así como de los fenómenos eléctricos y magnéticos a los que estamos acostumbrados en nuestra experiencia diaria. Pero existen además dos fuerzas que se manifiestan sólo a nivel subatómico: la fuerza nuclear, gracias a la cual los protones y neutrones se mantienen unidos en el núcleo atómico, y la fuerza débil, que produce ciertas reacciones nucleares (como el decaimiento beta).

¿Cómo puede una partícula interactuar con otra distante? Para no recurrir al concepto vago de una "acción a distancia", los físicos desarrollaron la idea del campo. Toda partícula elemental va acompañada de un campo a su alrededor, con el que influye sobre otras partículas; el campo gravitacional y el campo electromagnético son dos ejemplos conocidos. El campo es una concentración de energía y, a nivel subatómico, esta energía está cuantizada en paquetes que, a su vez, son partículas elementales. De hecho, existen dos clases de partículas elementales en la naturaleza: los fermiones, que son las partículas de la materia (electrones, protones, neutrones, etc.), y los bosones, que son las partículas de las interacciones: los fotones median las interacciones electromagnéticas; los gluones, las nucleares; los bosones X y Z,

las débiles, y los aún hipotéticos gravitones, las gravitacionales. De todas ellas, las únicas masivas son las W y Z (con casi 100 veces la masa de un protón), las otras no poseen masa y sólo energía, por lo que se mueven siempre a la velocidad de la luz.

¿Por qué son cuatro las interacciones fundamentales de la naturaleza y no otro número? A principio de los años setenta, los físicos Steve Weinberg y Abdus Salam demostraron que las interacciones débiles y electromagnéticas son la manifestación de una única interacción, la ahora llamada electrodébil. La diferencia fundamental entre estas dos interacciones es que las débiles están mediadas por bosones extremadamente masivos, mientras que el fotón que produce las electromagnéticas no posee masa. Pero Weinberg y Salam demostraron que la enorme masa de los bosones W y Z se debe a un mecanismo particular, que describiremos a continuación, y que sin esa masa las fuerzas débiles serían indistinguibles de las electromagnéticas.

La idea básica es que las partículas W y Z se vuelven masivas por medio de un mecanismo propuesto por el físico inglés Higgs, en los años sesenta.

De acuerdo con esta concepción el espacio está lleno de un campo, o equivalentemente de partículas bosones; bajo ciertas condiciones el llamado "campo de Higgs" cede parte de su energía a las

\*Ver ICyT-159 (diciembre de 1989): "Cosmología y partículas elementales", de Shahan Hacyan.

Formalmente, la curvatura del espacio durante la gran explosión debió ser infinita, al igual que la densidad y la temperatura. A un estado así, los físicos llaman singularidad; aunque esto, más que un concepto científico, es un reconocimiento de la incapacidad de describir

tal estado. De hecho, la leyes de la física dejan de ser válidas en una singularidad de la que, entonces, puede surgir cualquier cosa, incluyendo el universo. Por supuesto, una descripción así deja mucho que desear, y los físicos se han preguntado en los últimos años si no se

partículas W y Z, para que éstas adquirieran su masa. El campo de Higgs también interactúa con las partículas normales, pero con una intensidad demasiado débil para ser detectado, por lo menos con las posibilidades experimentales de ahora.<sup>1</sup>

El concepto de un campo de Higgs parecía en un principio demasiado artificial, pero el notable éxito de la teoría de Weinberg/Salam obligó a los físicos a tomarlo en serio. El campo de Higgs evoca el "éter" del siglo pasado, aquella misteriosa sustancia que supuestamente permeaba todo el universo y servía de sustento para la propagación de la luz y la interacción gravitacional, y que la relatividad de Einstein mandó al museo de conceptos inútiles. Pero, a diferencia del éter, los físicos piensan que el campo de Higgs sí podrá ser detectado en un futuro no muy lejano.

Aquí conviene mencionar una propiedad que, como veremos más adelante, es de gran importancia para la cosmología. El campo de Higgs no transfiere masa a los bosones W y Z, si la temperatura del medio es superior a unos  $10^{16}$  grados Kelvin<sup>2</sup>. Es decir, por encima de esa enorme temperatura esos bosones ya no poseen masa y son indistinguibles de los fotones; por tanto, desaparece toda diferencia entre electromagnetismo e interacciones débiles. Si dos de las interacciones aparentemente fundamentales de la naturaleza pueden unificarse en una sola, ¿por qué no unificar una tercera con ellas? A raíz del éxito de

Weinberg y Salam, algunos físicos empezaron a especular que las fuerzas nucleares también se pueden unificar con las electrodébiles y, para ello, elaboraron una teoría de la gran unificación (TGU, o en inglés: GUT). Esta teoría postula la existencia de un campo de Higgs, semejante al que mencionamos en relación con las interacciones electrodébiles, pero que cede su energía a unas hipotéticas partículas X cuyas masas son miles de millones de veces superiores a la masa de un protón y cuya vida media es tan extremadamente corta que son imposibles de detectar en un laboratorio terrestre. Hay que reconocer que las teorías de gran unificación son hasta ahora muy especulativas; su única predicción factible de confirmarse en la Tierra es que el protón no es absolutamente estable, sino que debe decaer en partículas más ligeras en un tiempo promedio de  $10^{30}$  años o más (muy superior a la edad del universo), según los detalles de la teoría. Esto implica que en un conjunto de  $10^{30}$  protones, uno al año debería de decaer en promedio; se han hecho experimentos para detectar tal decaimiento, pero hasta ahora no se cuenta con ninguna evidencia confiable.

Además, como en el caso de las interacciones electrodébiles, existe una temperatura crítica por encima de la cual el campo de Higgs no transfiere masa a las partículas X. Esa temperatura es del orden de  $10^{27}$  grados Kelvin; a una temperatura mayor que esa, las interacciones nucleares son indistinguibles de las electromagnéticas y las débiles; la unificación de esas tres fuerzas fundamentales es perfecta.

Shahen Hacyan

<sup>1</sup>Ver ICyT 159 (diciembre, 1989): "La cacería de los bosones de Higgs", Miguel Angel Pérez Angón.

<sup>2</sup>Para pasar de grados Kelvin a grados centígrados, réstese simplemente 273 grados. El cero absoluto (-273 grados centígrados) es el cero de la escala Kelvin.

puede afirmar algo más concreto sobre el nacimiento del universo.

En primer lugar, hay que reconocer que la relatividad general no puede describir fenómenos a nivel cuántico, es decir subatómico, pues aún no disponemos de una teoría cuántica de

la gravitación. En espera de tal teoría, sólo podemos afirmar que la relatividad es válida para escalas de tiempo mayores que el llamado tiempo de Planck. Esta es la única unidad fundamental de tiempo que se puede construir con las tres constantes fundamentales de la

naturaleza:  $G$  (constante de la gravitación),  $c$  (velocidad de la luz) y  $h$  (constante de Planck). El tiempo de Planck es  $(G/hc^5)^{1/2}$  y equivale a  $10^{-44}$  segundos (cero punto 43 ceros y 1 segundo).

Antes de ese tiempo, efectos cuánticos aún desconocidos debieron regir la creación del universo, por lo que no tiene sentido hablar estrictamente del tiempo cero. Sin embargo, la limitación del tiempo de Planck es extremadamente generosa, por lo que muchos físicos no resisten la tentación de elaborar teorías sobre el universo cuando su edad apenas excedía ese tiempo.

Pero, ¿qué había antes del tiempo de Planck? Para dar una respuesta posible a tal pregunta, la física de partículas elementales ha aportado información invaluable (ver recuadro).

## El universo inflacionario

Ante las enormes dificultades para comprobar las teorías de la gran unificación en laboratorios terrestres, los físicos enfocaron su atención hacia lo que fue el laboratorio más energético que jamás haya existido: el universo en el momento de la gran explosión. Si la gran unificación es un hecho real, debió tener consecuen-

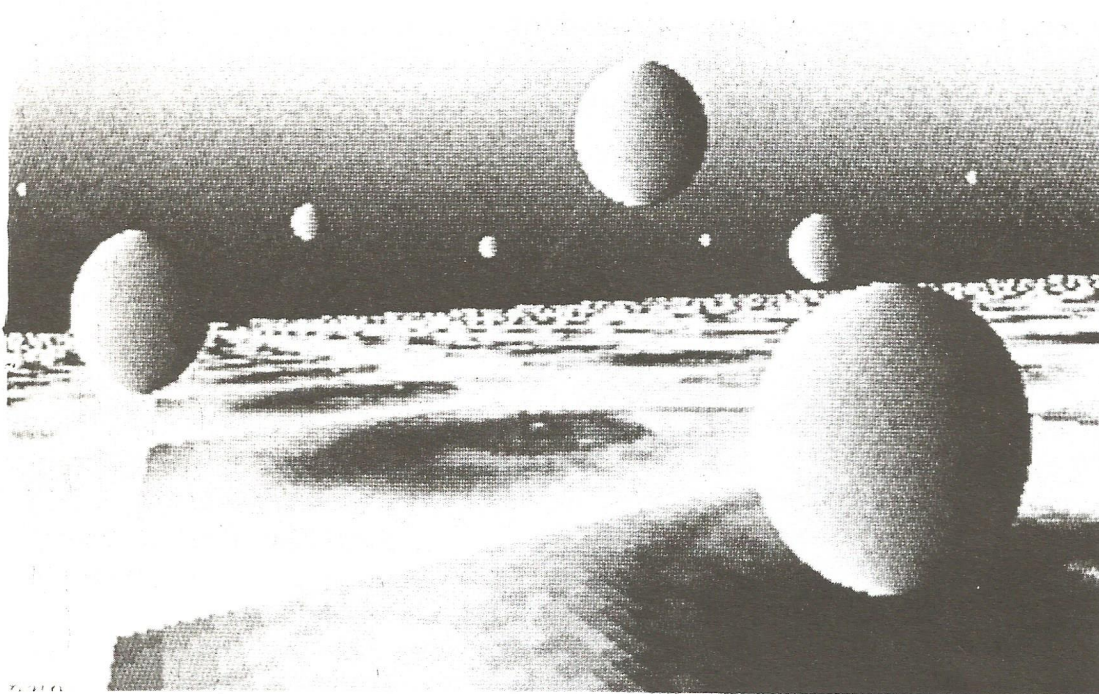
cias extremadamente importantes para la evolución del universo, como veremos a continuación.

Imaginemos el universo al tiempo de Planck. La temperatura en ese periodo debió ser gigantesca; para tener una idea de cuál era esa temperatura, recurramos una vez más a las tres constantes fundamentales de la naturaleza,  $G$ ,  $h$  y  $c$ , y notemos que con ellas sólo podemos construir una cantidad con unidades de temperatura de Planck, que debió ser la prevaleciente en la era de Planck, en el principio del universo. A esa increíble temperatura, el campo de Higgs no proporcionaba masa a ningún bosón, por lo que las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles estaban unificadas en una sola.

Pero el universo se expandía y su temperatura iba bajando. Aproximadamente  $10^{-34}$  segundos después de la era de Planck, la temperatura bajó a  $10^{27}$  grados, y ocurrió entonces la liberación más violenta de energía en la historia del universo. La energía del campo de Higgs súbitamente dominó la expansión del universo, y éste aumentó su tamaño por un factor de  $10^{60}$  o más en sólo  $10^{-34}$  segundos; este periodo de expansión violenta es el que se conoce como *inflación*, propuesta en su forma actual por el físico estadounidense Alan Guth



*Nebulosa Cabeza de Caballo en la región de Orión.*



(Dibujo por computadora de Norberto Pinelo)

en 1981. De acuerdo con esta teoría, todo el universo que en la actualidad nos es visible estaba concentrado antes de la inflación en una región que apenas medía unos 10 centímetros. Además, al terminar la inflación, el campo de Higgs cedió su energía para formar la masa de los bosones  $X$ , los cuales decayeron rápidamente en partículas más livianas.

El éxito del modelo inflacionario se debe a que explica de una manera natural varias incógnitas aparentemente inconexas de la cosmología moderna. La primera es la homogeneidad e isotropía del universo a gran escala: el universo presenta la misma apariencia en direcciones diametralmente opuestas que, de acuerdo con los modelos clásicos de Fridman, no tuvieron tiempo de interactuar entre sí. Pero el modelo inflacionario implica que esas regiones ahora tan alejadas estuvieron muchísimo más cerca antes de la inflación, y tuvieron tiempo de sobra para homogeneizarse.

Otro problema es el de la densidad de materia del universo; ésta, de acuerdo con las observaciones, parece no diferir drásticamente de la densidad crítica que distingue entre un univer-

so que se expande para siempre y uno que vuelve a comprimirse. El modelo de la inflación predice que la densidad real debe ser prácticamente la crítica, en cuyo caso nuestro universo se expandiría indefinidamente.<sup>1</sup>

También es posible explicar por qué nuestro universo contiene materia y no antimateria. Como señalamos anteriormente, los bosones  $X$  que adquirieron

masa al término de

la inflación se desintegraron en partículas más ligeras. El número de bosones y antibosones debió ser idéntico, pero el proceso por el que decaen no es exactamente el mismo; los físicos han descubierto que existe en la naturaleza una ligera asimetría entre las propiedades de la materia y la antimateria,<sup>2</sup> lo cual podría explicar por qué, después del decaimiento de los bosones  $X$ , hubo un ligero exceso de materia sobre antimateria, exceso del que están hechos todos los cuerpos que vemos actualmente en el universo, incluidos nosotros mismos.

Así, de acuerdo con la física moderna, el universo que conocemos se produjo a partir de un campo de Higgs primordial, pero este campo fue más bien el detonador para la creación del universo. En efecto, la energía y la materia que vemos hoy en día pudieron crearse de la nada sin violar ninguna ley de conservación. El hecho clave es que la energía gravitacional

<sup>1</sup>Ver el artículo de Miguel Angel Herrera sobre el futuro del universo, en este número.

<sup>2</sup>Ver ICyT 159 (diciembre de 1989): "Las simetrías del microcosmos", de Manuel Torres Labansat.



*México en la nebulosa Norte América.*

siempre es negativa, lo cual implica, en términos simples, que es necesario invertir energía para separar dos cuerpos unidos por su mutua atracción gravitacional (como, por ejemplo, la Tierra y la Luna). Por otra parte, todo cuerpo posee energía positiva debido a la famosa equivalencia entre masa y energía descubierta por Einstein. Ahora bien, un cálculo simple muestra que para cualquier cuerpo masivo, la energía gravitacional debida a la atracción de toda la materia en el universo es comparable a su energía en forma de masa, aunque de signo contrario, por lo que su energía total bien pue-

pos de Higgs, es muy distinto del vacío inerte de la mecánica clásica. El vacío cuántico es tan activo que pudo originar al mismo universo en una fluctuación.

Es evidente que lo expuesto hasta ahora es muy especulativo y habrá que esperar algunos años para comprobarlo. Queremos insistir, sin embargo, en que estas especulaciones se basan en teorías físicas consistentes.

Será el propio universo —nuestro laboratorio más vasto— el que permita confirmar, o refutar lo dicho.

de ser nula. La implicación de este hecho notable es que, bajo "condiciones apropiadas", la materia se puede crear de la nada sin que eso implique invertir energía alguna. Esas condiciones apropiadas pudieron, en principio, darse en la era de Planck.

De acuerdo con la mecánica cuántica, se producen continuamente "fluctuaciones" del vacío, consistentes en la creación y destrucción de partículas en un tiempo tan corto que no se pueden detectar. Esa indetectabilidad se debe a principios fundamentales del mundo cuántico, y no a limitaciones de nuestros aparatos de medición. Podemos afirmar que el vacío de la física moderna, con sus fluctuaciones cuánticas y sus cam-