

ALAN LIGHTMAN

LUZ ANTIGUA

Nuestra cambiante visión del universo

EDITORIAL ANDRÉS BELLO

Barcelona • Buenos Aires • México D. F. • Santiago de Chile

Título de la edición original: *Anáent Light*

Traducción: Gila Sharony

Diseño de portada: Enrique Iborra

© 1991 by Alan Lightman Published by arrangement with Harvard University Press

© Editorial Andrés Bello,

noviembre 1997. Av. Ricardo Lyon 946, Santiago de Chile.

Editorial Andrés Bello Española

Enrique Granados, 113, Pral. 1^a, 08008 Barcelona

ISBN: 84-89691-23-1 Depósito legal: B-43725-1997

Impreso por Romanyá Valls, S.A. - Pl. Verdaguer, 1 - 08786 Capellades *Printed in Spain*

Edición electrónica: U.L.D

*En memoria
del rabino James Wax, de Memphis,
quien siempre tuvo la visión
más amplia*

Luz Antigua

Interrogantes Cósmicas

Las interrogantes cósmicas comienzan en nuestro interior. En algún momento de nuestra infancia nos volvemos conscientes de nuestro ser como algo independiente de lo que nos rodea; nos volvemos conscientes de nuestro cuerpo, de nuestros propios pensamientos. Luego, preguntamos. Retrocediendo en el tiempo, ¿cuánto podemos recordar a nuestros padres, o algo siquiera? ¿Cómo era todo antes de que llegásemos al mundo? ¿Cómo sería estar muerto? Observamos fotografías de nuestros tatarabuelos e intentamos imaginarlos en su diario vivir. Como en un juego, tratamos de imaginar a sus padres, y así sucesivamente, regresando en el tiempo, yendo de generación en generación, hasta que llegamos a un punto en que realmente no creemos que todo esto pueda haber ocurrido. Sin embargo, estamos aquí.

En la enseñanza primaria nos señalan que la Tierra no es plana como aparenta, sino que gira en torno a sí misma como una enorme bola moteada. Nos explican que el Sol -esa luz resplandeciente y pequeña que circunda el cielo- es, en realidad, muchísimo más grande que la Tierra. Nos dicen que los diminutos puntos de luz que vemos en el cielo también son soles. Cerramos los ojos y, mentalmente, nos deslizamos hacia una estrella a través de la oscuridad, para entonces volvernos y ver que la Tierra parece una pequeña mancha. En el espacio, cuando algo sucede, lo hace muy lentamente. El Sol se ve cada día igual. Las estrellas jamás varían. En la enorme extensión del espacio, el tiempo parece alargarse y reducirse interminablemente, absorbiéndonos a nosotros, a nuestros tatarabuelos, a todos los seres humanos, a la Tierra entera. O quizás exista algún límite, alguna gigantesca frontera que sostenga al tiempo y al espacio. ¿Siempre ha existido el universo? Si no es así, ¿cuándo comenzó? ¿Y cómo? ¿Se acabará? ¿Está cambiando el universo con el tiempo? ¿Se extiende el espacio en forma infinita en todas direcciones? ¿Cómo llegó a formarse la materia en el universo?

Todas las culturas se han hecho las mismas preguntas y de algún modo se han respondido. Cada cultura ha tenido su propia cosmología, su historia de cómo llegó a formarse el universo y hacia dónde se dirige.

Estos últimos años han sido los astrónomos y físicos quienes han intentado responder las interrogantes cósmicas. Asombrosamente, la cosmología se ha convertido en una ciencia. Pero se trata de una ciencia especulativa. La teoría cosmológica más ampliamente difundida, el modelo del big bang, descansa en cuatro hechos observacionales: el desplazamiento de las galaxias, que se alejan unas de otras a enormes velocidades (descubierto en 1929 e interpretado como evidencia de la expansión y el nacimiento explosivo del cosmos); la concordancia aproximativa entre la edad del universo -calculada por la velocidad a que las galaxias se distancian entre sí- y la edad de la Tierra, medida por la desintegración radiactiva del uranio; el baño de ondas de radio provenientes del espacio, pronosticado como el necesario remanente de un universo más joven y caliente, descubierto en 1965; y la composición química general del universo -cerca de un 25% de helio y un 75% de hidrógeno-, lo que puede explicarse en términos de procesos atómicos en el universo recién creado. Si dejamos de lado estas escasas observaciones críticas, lo que sostiene el modelo del big bang es sólo teoría, suposición e

inferencia. De todas las ciencias, la cosmología es la que requiere las extrapolaciones más extremas en el espacio y en el tiempo.

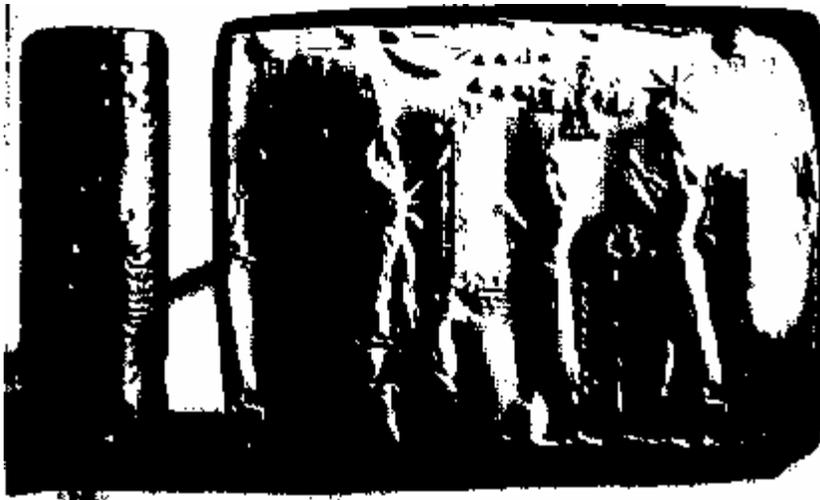
En la actualidad la cosmología atraviesa un período de trastornos. Las últimas observaciones de la ubicación y los movimientos de las galaxias han revelado un universo muchísimo más irregular de lo que se pensaba, con racimos de galaxias que recorren extensas zonas en el espacio (el modelo del big bang supone, por el contrario, un universo uniforme, cuya materia se esparce en forma pareja a través de todo el espacio). Los cosmólogos no saben a ciencia cierta cómo explicar la no uniformidad de la materia, ni tampoco si ello puede ajustarse al modelo del big bang. Además, han descubierto que por lo menos el 90% de la masa en el cosmos no emite luz alguna. Esta masa invisible, denominada materia oscura, puede detectarse por sus efectos de gravitación, pero su identidad nos es completamente desconocida. Por último, los científicos han desarrollado nuevas teorías que les permiten estudiar cómo puede haber sido el universo durante la primera billonésima de segundo de su vida, un período que antes se consideraba imposible de calcular. Puede que estas nuevas teorías no sean correctas, pero por primera vez se ha podido situar el nacimiento mismo del universo sobre una base científica. Los más brillantes cerebros científicos del mundo comienzan ahora a reflexionar acerca de interrogantes que hace sólo veinte años se consideraban excluidas del ámbito científico.

El Capítulo 2 contiene una breve descripción de las antiguas cosmologías. A lo largo de la historia, la visión que cada cultura se forma del mundo se refleja en su cosmología, y veremos cómo ciertos fragmentos de esas tempranas visiones del mundo persisten en la cosmología moderna. Aunque ésta se basa en métodos científicos, formula preguntas fundamentales que la sitúan cerca del límite entre ciencia, filosofía y religión. En el Capítulo 3 revisaremos la historia de la cosmología moderna, que se inicia alrededor de 1920; después, analizaremos las observaciones y las teorías contemporáneas, y también las diversas crisis por las que atraviesa la cosmología.

Antiguas Cosmologías

Según la *Enuma Elish*,¹ la antigua historia de la creación según los babilonios, el mundo comenzó en un caos líquido. No existía cielo ni tierra, ni siquiera una ciénaga pantanosa. Lo único que había eran Apsu, las aguas dulces, y Ti'amat, las aguas saladas. Con el tiempo, la lenta filtración del cieno formó Lahmu y Lahamu, que se extendieron hasta formar un anillo gigante que se convirtió en el horizonte. La parte superior de este anillo era el dios Anshar y la parte inferior era Kishar. De Anshar nació Anu, el cielo; de Kishar, Nudimmud, la tierra. Pero el cielo y la tierra se encontraban atrapados dentro del cuerpo de Ti'amat, que deseaba dormir en silencio. Entonces, un inquieto dios descendiente de Kishar y Anshar -Marduk- fue persuadido de combatir a Ti'amat. Ti'amat abrió su boca para tragarlo, pero Marduk introdujo en su estómago el viento del mal, lanzó una flecha directo a su corazón y acabó con ella. Luego, valiéndose de su hacha, Marduk cortó en dos el cuerpo de Ti'amat y separó el cielo de la tierra. De este modo se organizó el mundo.

La *Enuma Elish*, esculpida en piedra en lengua acadia y que se remonta por lo menos al 2000 a. C., constituye uno de los registros más antiguos de las cosmologías tempranas. Muestra el carácter antropomórfico de los personajes de los antiguos mitos cosmológicos, y su imaginaria corresponde al mundo rodeado de agua que los babilonios conocían. Mesopotamia es un país construido por el cieno, situado allí donde confluyen las aguas dulces del Tigris y el Eufrates, las que a su vez desembocan en el salado golfo Pérsico. La *Enuma Elish* trasmite el deseo humano de comprender el mundo, de narrar una historia que precise la manera en que las cosas llegaron a ocurrir.



Cilindro asirio, del 700 a. C., que muestra a un adorador entre dos dioses. Se piensa que el dios que está a la izquierda sosteniendo un hacha es Marduk.

Las leyendas budistas e hinduistas contienen muchas versiones diferentes sobre la creación. Una de ellas comienza con el dios Vishnú flotando sobre la espalda de la serpiente Ananta en las aguas primigenias. Del ombligo de Vishnú crece un loto, en cuyo interior está el dios Brahma. En el momento de su nacimiento, Brahma recita por sus cuatro bocas los textos sagrados, las cuatro Vedas, y crea el Huevo de Brahma. A partir del Huevo se forma el universo, que consta de tres capas: la tierra, un disco aplanado; la atmósfera, que se asocia con el viento y la lluvia; y los cielos, el lugar del sol y el fuego. Las cosmologías budista e hinduista contemplan ciclos infinitos de nacimiento, muerte y renacimiento. Las personas nacen, viven, mueren y vuelven a nacer en un cuerpo diferente, y lo mismo ocurre con el universo. Al final de cada 4.320.000.000 de años, un solo día en la vida de Brahma, el espíritu universal absorbe toda la materia del universo mientras Brahma duerme. Durante la noche de Brahma la materia existe sólo como potencialidad. Al amanecer, Brahma se levanta del loto y la materia reaparece. Pasados cien años de Brahma, todo se destruye, incluso el mismo Brahma. Después de otro siglo de Brahma, éste vuelve a nacer y el ciclo completo se repite.

En Occidente, poco a poco los dioses y mitos fueron reemplazados por los mecanismos físicos en las especulaciones cosmológicas. El razonamiento lógico y el físico aparecen ya en el primer pensamiento cosmológico griego conocido, el de Anaximandro² en el siglo VI a. C. Su teoría sostenía que las estrellas constituían porciones de aire comprimido y que el Sol tenía la forma de una rueda de carro, veintiocho veces el tamaño de la Tierra. El borde de esta rueda solar contenía fuego, el que escapaba a través de un orificio. Cuando el orificio se obstruía, se producía un eclipse. La Luna era un círculo diecinueve veces el tamaño de la Tierra, y también tenía la forma de una rueda de carro. El universo de Anaximandro contenía una substancia infinita y eterna. Los planetas y los mundos se formaban al separarse de esta substancia; luego perecían y ésta los volvía a absorber. Nuestro propio mundo debe su origen a que un movimiento de remolino hizo que los materiales pesados se hundieran hacia el centro, formando el disco aplanado que es la Tierra, mientras que masas de fuego rodeadas de aire fueron lanzadas hacia el perímetro, dando vida así al Sol y las estrellas. A pesar de que mundos individuales iban y venían, el cosmos como un todo era eterno, sin comienzo ni fin. Era infinito en el tiempo. Era infinito en el espacio.

Muchas de las ideas de Anaximandro se hallan en la teoría atomista de Demócrito (aprox. 460-370 a. C.). En la cosmología de este último,³ toda la materia estaba compuesta de cuerpos microscópicos indestructibles denominados átomos (de la palabra griega *átomos*, que significa indivisible). Los átomos tenían distintas propiedades -algunos eran duros y otros blandos, algunos eran suaves y otros ásperos, por ejemplo-, y estas diferencias explicaban la variedad de sustancias esparcidas en el universo. La teoría griega del atomismo entregó una explicación para todo, desde la naturaleza del viento hasta por qué los peces tienen escamas, por qué la luz puede atravesar un cuerno y la lluvia no, por qué los cadáveres huelen mal y el *azafrán* huele bien. Aun cuando las sustancias podían cambiar alterando sus átomos, los átomos en sí no podían crearse ni destruirse; eran eternos. Los átomos de Demócrito correspondían a la substancia infinita de Anaximandro.

La perspectiva atomista del mundo tenía dos grandes fortalezas, las que Lucrecio claramente expuso y alabó en su poema clásico *De la naturaleza de las cosas* (cerca del 60 a. C.).⁴ En primer lugar, como "nada puede crearse de la nada", y "nada puede destruirse para convertirse en nada", resulta imposible que las cosas ocurran sin una causa física. Por lo tanto, los seres humanos no debieran temer la intromisión caprichosa de los dioses. En segundo lugar, tampoco la gente debiera temer un castigo eterno tras su muerte, pues el alma, que al igual que todo lo demás está compuesta de átomos, se disipa como el viento. Ya no habrá una identidad a quien atormentar.

Al aplicar la teoría atomista al cosmos en general, se obtiene un universo sin proyecto ni propósito alguno. Los átomos se desplazan libre y ciegamente a través del espacio. Cuando, por casualidad, las sendas aleatorias de un gran número de átomos se

entrecruzan, se crea un planeta o una estrella. Un mundo que se forme de esta manera vivirá durante un tiempo, hasta que llegue el momento en que se desintegre y devuelva los átomos a sus vagabundeos. Todos los objetos, incluyendo la gente y los planetas, son simplemente islas de orden, temporales y accidentales, en un cosmos desordenado. Con nuestro propio planeta ocurre lo mismo, y no ocupa ningún lugar de privilegio en el universo. Al igual que el cosmos de Anaximandro, el universo atomístico no posee límite de espacio ni de tiempo. Es imposible crear o destruir un universo compuesto de átomos indestructibles.

La cosmología de Aristóteles (ca. 350 a. C.) difería en varios aspectos de la visión atomista. Aristóteles erigió el mundo a partir de cinco elementos: tierra, agua, aire, fuego y éter. Nada era casual ni accidental. Todo tenía su espacio natural y su propósito. El lugar natural de la Tierra es el centro del universo, y todas las partículas semejantes a ella que flotan en el cosmos se desplazan en esa dirección. El éter es una sustancia divina e indestructible; su espacio natural son los cielos, donde forma las estrellas y otros cuerpos celestiales. El agua, el aire y el fuego ocupan lugares intermedios. El Sol, los planetas y las estrellas están fijados a esferas rígidas, las que giran en círculos perfectos en torno a la Tierra estática. Tales rotaciones dan forma al día y la noche. La esfera exterior, la *primum mobile*, gira gracias al amor de un dios, mientras que las esferas interiores rotan armoniosamente por la misma causa. Como vemos, a diferencia de la antigua teoría atomista, el cosmos de Aristóteles tiene propósito y está limitado en el espacio, extendiéndose sólo hasta la esfera exterior. Ambas teorías concordaban en un aspecto importante: el universo era eterno. El éter, componente de los cuerpos celestiales y divinos, "es eterno, no crece ni se reduce, sino que es infinito, inalterable y permanente".⁵ El universo de Aristóteles no era solamente eterno; también era estático. Esta creencia de un cosmos inalterable dominó el pensamiento occidental hasta bien entrado el siglo XX.

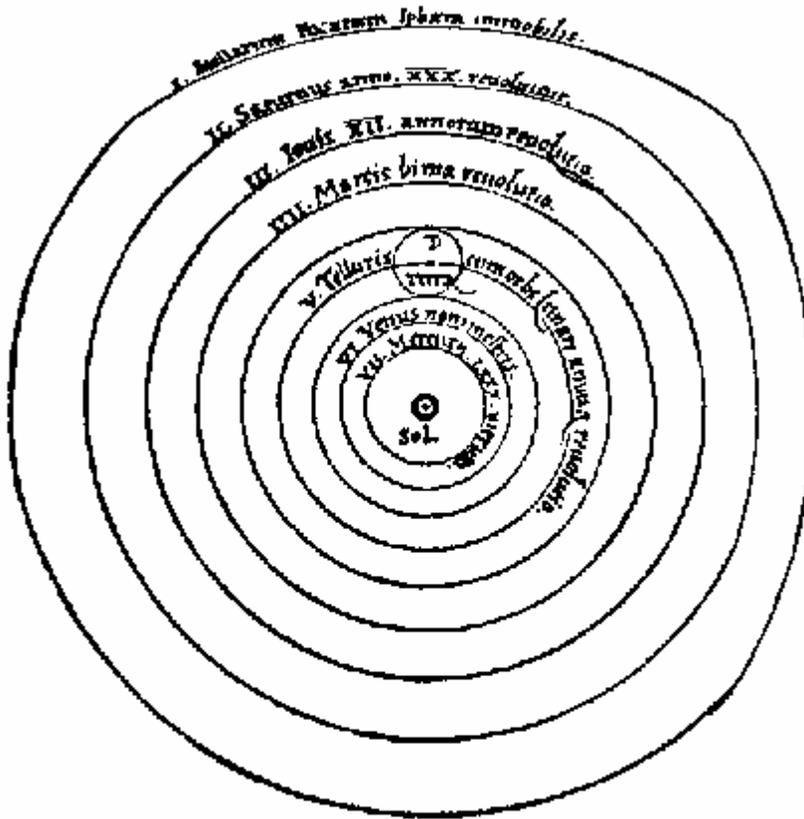
El astrónomo polaco Nicolás Copérnico, en 1543, acabó con la teoría de un cosmos geocéntrico. Degradó la Tierra, calificándola como un simple planeta que orbita alrededor del Sol. Este importante cambio introdujo una explicación muchísimo más simple para los movimientos observados de los planetas, a costa del rechazo de la sensación intuitiva de que la Tierra no se movía. Sin embargo, Copérnico no pudo desentenderse de muchas de las venerables características de la visión aristotélica. Las órbitas planetarias seguían compuestas de círculos perfectos, como dignos cuerpos celestiales. Y, a pesar de que la Tierra fue despojada de su ubicación central, nuestro Sol tomó su lugar cerca del centro del universo.

El universo aún estaba hecho para seres humanos. Tal como afirmó el gran astrónomo alemán Johannes Kepler medio siglo más tarde, nuestro propio Sol era la estrella más luminosa en el cosmos, pues "si en el cielo existen esferas similares a nuestra Tierra, ¿rivalizamos con ellas acerca de quién ocupa una mejor parte del universo? Si sus esferas son más imponentes, nosotros no somos las criaturas racionales más nobles. Entonces, ¿cómo pueden ser todas las cosas por el bien del hombre?"



Expulsión de Adán y Eva del Paraíso, de Giovanni di Paolo; representa la situación medieval y aristotélica del mundo. La Tierra descansa en el centro del sistema de esteras concéntricas.

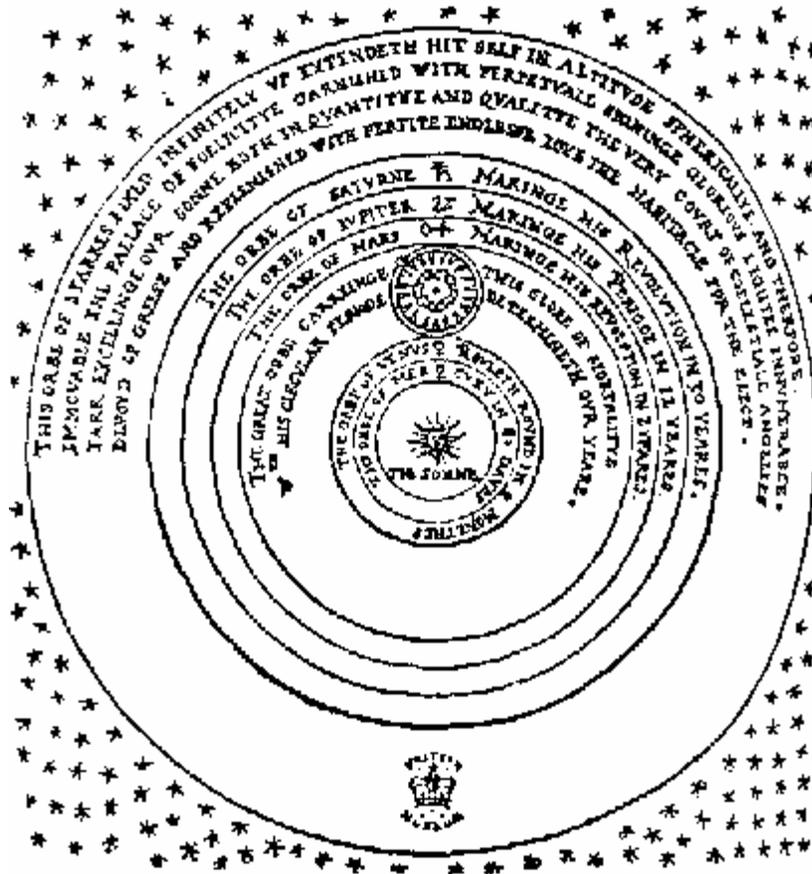
Figura 1.1. El mundo medieval.



Sistema del universo según Copérnico, de su libro *De las rotaciones de las esferas celestiales* (1543). El Sol se encuentra en el centro; la Tierra (*terra*) está en la tercera órbita en torno al Sol, y la esfera exterior se denomina *stellarum fixarum sphaera immobilis*, la esfera inmóvil de las estrellas fijas.

¿Cómo podemos ser los dueños de la obra de Dios?⁶ El universo de Copérnico aún se encontraba limitado en el aspecto espacial por una capa exterior de estrellas. Al igual que Aristóteles, Copérnico también creyó que las estrellas estaban fijas y no cambiaban. Explicó su punto de vista de la siguiente manera: "El estado de inmovilidad es considerado como más noble y divino que el de cambio e inestabilidad, el que por esa razón debiera pertenecer a la Tierra y no al universo".⁷ Como Aristóteles, Copérnico pensaba que los fenómenos terrestres correspondían a un conjunto de leyes, y que los cuerpos celestiales "divinos" se regían por otro distinto.


A perfit description of the Caelestiall Orbes,
according to the most accurate doctrine of the
Pythagoreans. &c.



Sistema del universo según Thomas Digges, de su libro *Una descripción perfecta de las orbes celestiales* (1576). Las estrellas están esparcidas por el espacio, más allá de la órbita exterior de los planetas.

El astrónomo británico Thomas Digges, discípulo de Copérnico, logró liberar las estrellas de sus esferas cristalinas y esparcirlas por el espacio infinito. Esta idea, expuesta en *Una descripción perfecta de las orbes celestiales* (1576), provocó un efecto inmensamente liberador en el pensamiento cosmológico. Ahora las estrellas podrían ser objetos físicos; estarían sujetas a las mismas leyes físicas que observamos en la Tierra.⁸

Isaac Newton elevó la universalidad de las leyes físicas a su máxima expresión. En sus *Principia* (1687), aplica por igual su nueva ley de gravedad a los arcos descritos por las balas de cañón, a las órbitas de las lunas y los planetas y a las trayectorias de los cometas, calculando sus posibles rutas en forma detallada. Pero este magistral lógico era también muy religioso. Justamente en los mismos *Principia*, Newton describe el espacio como idéntico al cuerpo de Dios: "El Dios Supremo es un Ser eterno, infinito, absolutamente perfecto... Perdura eternamente y es omnipresente; y esta existencia eterna y omnipresencia constituyen la duración y el espacio".⁹ Asimismo, Newton sostiene que "este bellissimo sistema de Sol, planetas y cometas sólo podría provenir de la sabiduría y dominio de un Ser poderoso e inteligente". Así, el universo de Newton poseía un

designio consciente. Y, considerado como un todo, era estático. En 1692, Newton argumentó en una carta al teólogo Richard Bentley¹⁰ que el universo no podía estar expandiéndose o contrayéndose globalmente, puesto que tales movimientos requieren por necesidad de un centro, tal como una explosión tiene su centro. Y la materia esparcida en un espacio *infinito* no define ningún centro. Por lo tanto, estudiando los hechos hacia el pasado, el cosmos debía ser estático. Da igual si a Newton lo convenció más este argumento lógico que sus propias creencias religiosas; terminó sustentando la tradición aristotélica de un cosmos sin alteración. Sólo a fines de la década de 1920, esa tradición, que ni siquiera Einstein desafió, se puso en duda.

El nacimiento cosmología moderna

Las teorías cosmológicas modernas se remontan a 1915, año en que Albert Einstein publicó un estudio teórico pionero.¹ Mediante su nueva ley de la gravedad, denominada teoría de la relatividad, Einstein proponía el primer modelo detallado para la estructura en gran escala del universo. Entre 1915, año de su publicación, y 1917, una sola observación probaba la teoría de la relatividad: la órbita del planeta Mercurio. La nueva teoría de gravedad de Einstein, que aclaraba un pequeñísimo efecto en la órbita que Newton no logró explicar en su antigua teoría, tuvo un éxito rotundo. Sin embargo, la aplicación de la teoría de la relatividad más allá del sistema solar siguió siendo incierta. Aunque Einstein comprendía que la gravedad era la fuerza dominante para describir el cosmos con precisión, carecía de los necesarios conocimientos de astronomía. Ni un solo número astronómico aparece en el artículo de Einstein sobre cosmología.

Einstein partió de dos supuestos críticos: el universo no cambia con el tiempo, y la materia del universo está esparcida en forma pareja a través del espacio. Gracias a estos dos supuestos y a su teoría matemática de la gravedad, pudo derivar ecuaciones hasta describir la estructura general del universo.

No existía evidencia terminante para ninguna de las hipótesis iniciales de Einstein. Si bien las observaciones astronómicas eran *coherentes* con un universo estático, muchos astrónomos de la época estaban conscientes de que lo que veían en sus enormes telescopios era solo una instantánea que no revelaba nada acerca de la evolución del cosmos en el tiempo.² Las observaciones no tenían nada que decir a este respecto. Por otra parte, el concepto de un universo estático se hallaba profundamente arraigado en el pensamiento occidental, remontándose hasta Aristóteles, y constituía una de las pocas creencias astronómicas que la revolución copernicana no desechó. El segundo supuesto de Einstein, la homogeneidad, simplificaba considerablemente las ecuaciones, pero también constituía un artículo de fe. De hecho, hasta donde los astrónomos podían ver, parecía evidente que el universo era extremadamente irregular, con la mayoría de las estrellas visibles reunidas en un gran disco denominado la Vía Láctea. Hasta 1918, los astrónomos aún no lograban calcular en forma exacta la magnitud de la Vía Láctea; hasta 1924, se cuestionaban la existencia en el espacio de otras constelaciones, otras galaxias más allá de la Vía Láctea. Einstein sencillamente supuso que, al promediar el espacio sobre un volumen lo bastante grande, aparecería liso, como ocurre al observar una playa desde una cierta distancia, pues sólo al acercarse se percibe su apariencia granosa.

Incluso hoy, para manejar las matemáticas de la cosmología se requiere de la hipótesis de la homogeneidad. Los teóricos han logrado resolver las ecuaciones de la cosmología exclusivamente para modelos homogéneos, a excepción de casos especiales e improbables. Por supuesto, las ecuaciones simples y la realidad son dos cosas diferentes. La naturaleza no tenía por qué ser tan complaciente como para evitar heterogeneidades sólo porque los físicos no logran dominar la matemática del caso.

Permitámonos una breve digresión para hablar de los modelos en la ciencia. Encontraremos varios modelos cosmológicos: el modelo del big bang, el modelo del estado continuo y el modelo del universo inflacionario. Un modelo científico comienza con

un objeto o sistema físico verdadero, sustituye el objeto original por uno más simple y luego representa el objeto simplificado con ecuaciones que describen su comportamiento. Al igual que un barco de juguete, un modelo científico es una versión a escala de un sistema físico al que le faltan algunas partes del original. Se requiere de gran juicio y habilidad para decidir qué partes no deben incluirse. Si se han omitido características esenciales, el modelo no tiene ninguna validez. Por otra parte, si nada se excluye, significa que no ha habido simplificación y el análisis resulta a menudo demasiado complicado. Al realizar un modelo para un péndulo oscilante, por ejemplo, al principio podríamos intentar incluir la forma detallada del peso que está en el extremo, la densidad y la presión del aire en la habitación, y así sucesivamente. Si consideramos tal descripción demasiado compleja, podríamos sustituir el peso por una bola redonda e ignorar el aire completamente. De hecho, este sistema muchísimo más simple funciona casi en forma exacta al original. En cambio, si dejamos la gravedad fuera, el péndulo teórico resultante no oscilaría de un lado a otro. Al resolver las ecuaciones de un modelo se puede predecir, y luego poner a prueba, el sistema físico original.

En 1922, Alexander Friedmann, un matemático y meteorólogo ruso, propuso modelos cosmológicos para un universo *cambiante*. Friedmann aceptó la teoría de la gravedad de Einstein y su hipótesis de la homogeneidad, pero rechazó el supuesto de la estasis, afirmando que no estaba comprobada y que no era esencial. Igual que Einstein, comenzó con las ecuaciones de relatividad general, pero descubrió una solución alternativa que correspondía a un universo que se iniciaba en un estado de densidad extremadamente alta y luego se expandía con el tiempo, aligerándose en el proceso. El modelo de Friedmann, redescubierto en 1927 por el sacerdote y físico belga Georges Lemaître, acabaría por llamarse el modelo del big bang.³ Einstein reconoció con renuencia la validez matemática del modelo cosmológico que Friedmann desarrollaba; sin embargo, en un principio dudó que tuviese alguna relación con el universo real.⁴ En todo caso, tanto el modelo de Einstein como el de Friedmann eran pura teoría. Las observaciones no habían contribuido con datos suficientes acerca de la estructura o evolución verdaderas del universo.

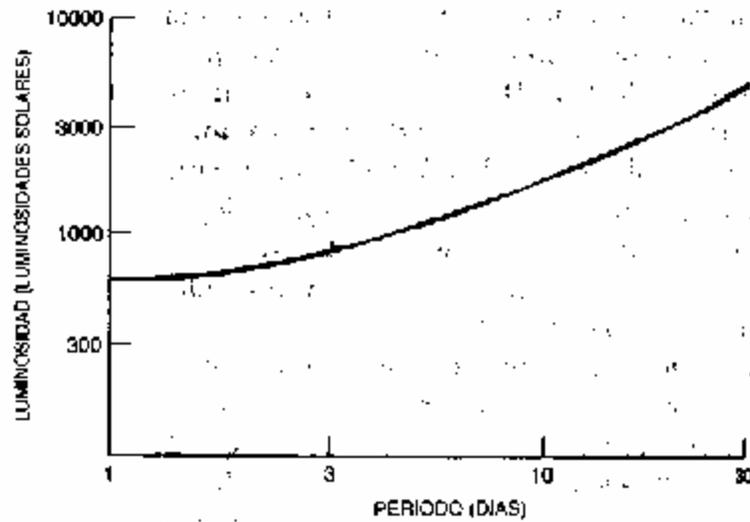
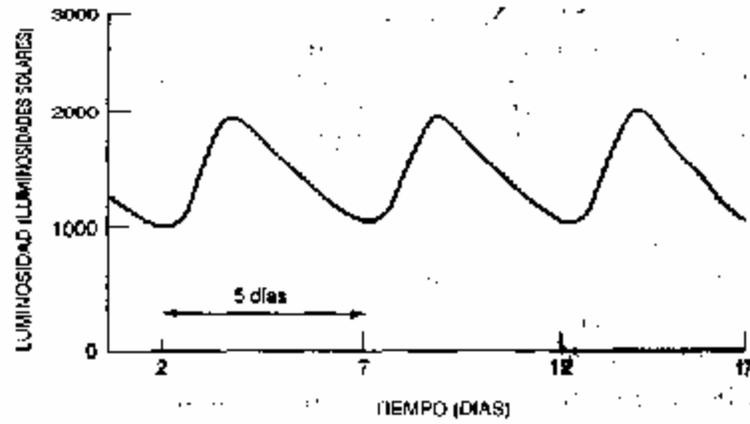
Toda la astronomía, y especialmente la cosmología, presentaba un grave obstáculo: el problema de medir las distancias a las estrellas. Si durante la noche observamos el cielo, podemos percibir amplitud y longitud, pero no profundidad. Desde nuestra ventajosa posición, las estrellas se ven como simples puntos blancos sobre un fondo negro. Ciertamente unos están más cerca que otros, pero, ¿cuáles? Las estrellas poseen una gama de luminosidades, tal como las bombillas eléctricas tienen diverso número de vatios, por lo que una estrella con una cierta luminosidad *observada* puede estar o muy cerca y ser intrínsecamente opaca, o muy lejos y ser intrínsecamente brillante.

Las medidas de las distancias astronómicas pudieron cimentarse en bases más sólidas alrededor de 1912, cuando Henrietta Leavitt, del Observatorio del Harvard College, descubrió un resultado notable para ciertas estrellas denominadas variables cefeidas.⁵ Se sabía que la luminosidad de dichas estrellas es oscilante: se tornan más opacas, luego brillantes, luego opacas nuevamente, en ciclos regulares. Leavitt analizó un grupo de cefeidas apiñadas entre sí, por lo que *se conocía que estaban a una misma distancia*. En una constelación, una estrella que *parecía* dos veces más brillante que otra era en efecto dos veces más luminosa. Leavitt descubrió que el tiempo que le tomaba a una cefeida completar un ciclo dependía de su luminosidad. Por ejemplo, las cefeidas que son mil veces más luminosas que nuestro Sol completan un ciclo de luz cada tres días. Las cefeidas diez mil veces más luminosas finalizan su ciclo cada treinta días. Una vez que se ha calibrado este comportamiento para las estrellas cefeidas cercanas, de distancia y luminosidad conocidas, puede utilizarse para medir la distancia de estrellas cefeidas lejanas. Midiendo la duración del ciclo de una estrella cefeida en particular se puede deducir su luminosidad.

Luego, al comparar la luminosidad de la estrella con su brillantez observada, se puede determinar su distancia, tal como podría inferirse la distancia de una bombilla eléctrica a partir de su vataje y brillantez observados. Con el descubrimiento de Leavitt, las cefeidas se convirtieron en postes indicadores de distancia en el espacio.

En 1918 los astrónomos lograron medir el tamaño de la Vía Láctea gracias a estrellas cefeidas encontradas en diversos puntos. En 1924, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble descubrió una cefeida en la tenue mancha de estrellas conocido como nebulosa de Andrómeda, lo que le permitió medir su distancia. Descubrió que la nebulosa de Andrómeda era una constelación situada muchísimo más allá de la Vía Láctea. Andrómeda constituía otro grupo de estrellas, una galaxia aparte. De este modo Hubble se convirtió en el padre de la astronomía extragaláctica. Durante los años siguientes, Hubble y otros astrónomos midieron las distancias a muchas nebulosas, a las que por siglos se había observado e intentado descifrar.⁶ Se descubrió que muchas eran galaxias independientes compuestas por estrellas. Gracias a tales descubrimientos, las galaxias, no las estrellas, pasaron a ser las unidades básicas de la materia en el universo.

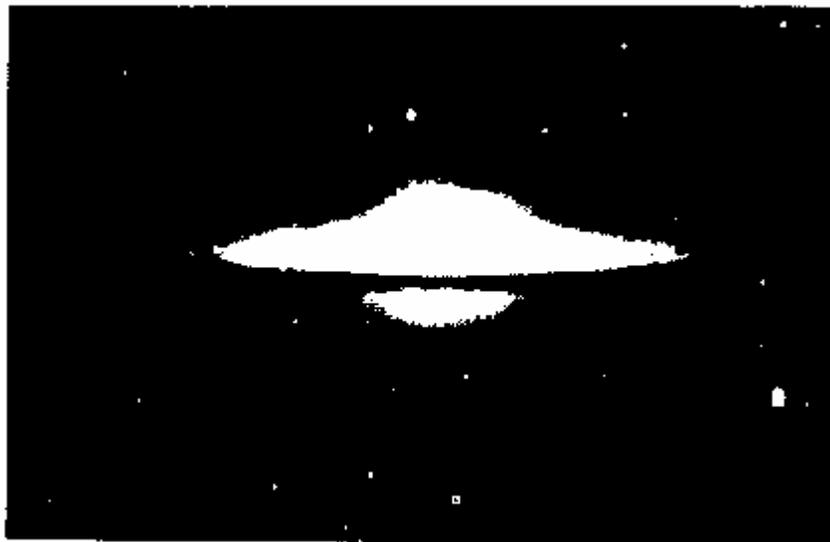
En cosmología, lo primero que nos abruma es la inmensidad del espacio. Para apreciar distancias cósmicas, podríamos empezar cerca de casa. La circunferencia de la Tierra mide alrededor de 38.400 kilómetros, la distancia a la Luna es de unos 400.000 Km. y la distancia al Sol, de casi 160 millones de Km. La distancia a la estrella más cercana al Sol, la Alfa Centauro, es de unos 40.000.000.000.000 de km. Todas estas distancias se calcularon con exactitud ya en el siglo XVIII. Para medir distancias mayores conviene utilizar el año luz, que es la distancia que recorre la luz en un año, cerca de 9.600.000.000.000 km. Según estos términos, la Alfa Centauro está a una distancia aproximada de cuatro años luz. El diámetro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, mide casi cien mil años luz. En otras palabras, un rayo de luz tarda cien mil años en atravesar la Vía Láctea de un extremo al otro. Andrómeda, la galaxia más cercana a la nuestra, está a unos dos millones de años luz.



La relación período-luminosidad para las estrellas variables cefeidas. La curva superior muestra la variación en el tiempo de la luminosidad de una cefeida típica. La luminosidad de esta estrella en especial varía de aproximadamente mil a dos mil veces en comparación a la del Sol en un ciclo cercano a los cinco días. La curva inferior muestra cómo la luminosidad *promedio* de las cefeidas varía de acuerdo a su tiempo de ciclo, o período. La estrella cefeida que aparece en la curva superior corresponde a un punto en la curva inferior.



La galaxia Andr6meda, tambi6n conocida como M31.

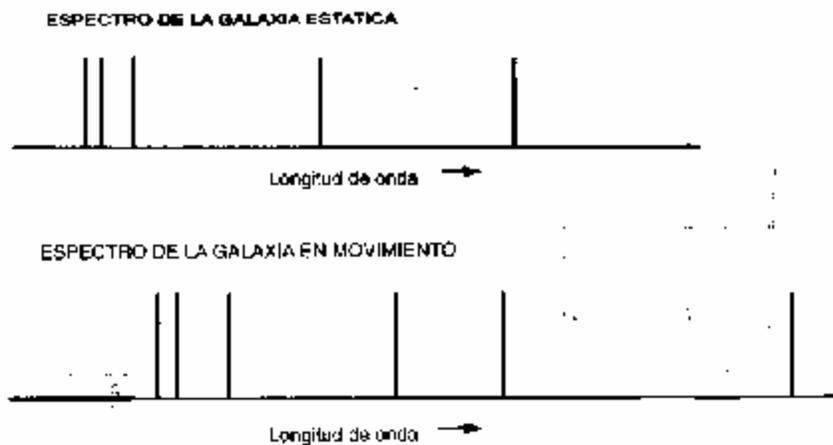


La galaxia Sombrero, tambi6n conocida como M104.

Una galaxia t6pica, como nuestra V6a L6ctea, contiene cerca de 100 mil millones de estrellas, las que se orbitan unas a otras bajo su gravedad mutua. Las galaxias tienen diversas formas. Algunas son casi esf6ricas; otras, como la V6a L6ctea, son como discos aplanados con una protuberancia en el medio. Nuestro Sol tarda aproximadamente 200 millones de a6os en completar una 6rbita alrededor del centro de la V6a L6ctea. En promedio, las galaxias est6n separadas entre s6 por una distancia de alrededor de 10 millones de a6os luz, o cien veces el di6metro de una galaxia. En consecuencia, las galaxias son como enjambres aislados de estrellas, rodeados principalmente por espacio vac6o. La hip6tesis de Einstein de la homogeneidad deber6 haberse comprobado en vol6menes de espacio que contuvieran muchas galaxias.

En 1929, Hubble realiz6 quiz6s el mayor descubrimiento de la cosmolog6a moderna: el universo se expande. Gracias a los datos obtenidos por un telescopio en el Monte Wilson, California, Hubble concluy6 que las otras galaxias se est6n alejando de nosotros en todas direcciones. Para este an6lisis se requiere de dos tipos de mediciones:

la velocidad y la distancia de galaxias vecinas. Desde comienzos de siglo se sabía que muchas de las nebulosas estaban en movimiento y se alejaban a grandes velocidades de la Tierra.⁷ Una técnica conocida como el efecto Doppler fue determinante para esta conclusión. Las galaxias, al igual que todas las fuentes luminosas, emiten luz de colores específicos (longitudes de onda), relacionados con la composición química de la galaxia. Cuando una fuente de luz está en movimiento, sus colores cambian, de manera similar a lo que ocurre cuando se altera el tono de una fuente de sonido en movimiento. El tono del silbato de un tren, por ejemplo, baja a medida que el tren se aleja y sube cuando éste se acerca. Con respecto a la luz, el análogo del tono es el color. Si una fuente de luz se acerca, sus colores se debilitan, la longitud de onda pasa a ser la del azul, en el extremo del espectro; si la fuente se aleja, sus colores se tornan más fuertes, hacia el rojo. La velocidad de la fuente de luz en movimiento se puede deducir a partir del grado de esta alteración. A pesar de que el efecto en la luz es generalmente mínimo, existen instrumentos delicados que pueden detectarlo.



El efecto de desplazamiento al rojo. Después de pasar la luz de una galaxia a través de un prisma, cada color emitido aparece como una línea vertical a una cierta longitud de onda. El movimiento de la galaxia hace que cada color emitido altere su longitud de onda en un grado fraccionario proporcional a la velocidad del movimiento. La cuarta línea a la derecha que se aprecia en la figura inferior, para la galaxia en movimiento, corresponde a un color no emitido por la galaxia estática. Sin embargo, las primeras tres líneas y su posición relativa pueden identificarse en forma inequívoca con las primeras tres líneas de la galaxia estática y así utilizarse para calcular la modificación en la longitud de onda y, por lo tanto, la velocidad de la galaxia en movimiento.

Si se supone que en todas las galaxias están presentes los mismos elementos químicos básicos, entonces los colores emitidos por las galaxias estáticas deberían ser iguales. Alrededor de 1920 se descubrió que los colores indicadores de muchas de las nebulosas habían cambiado al rojo, indicando que se alejaban de nosotros a gran

velocidad. Esta alteración del color de los objetos cósmicos llegó a denominarse desplazamiento al rojo (*redshift*).

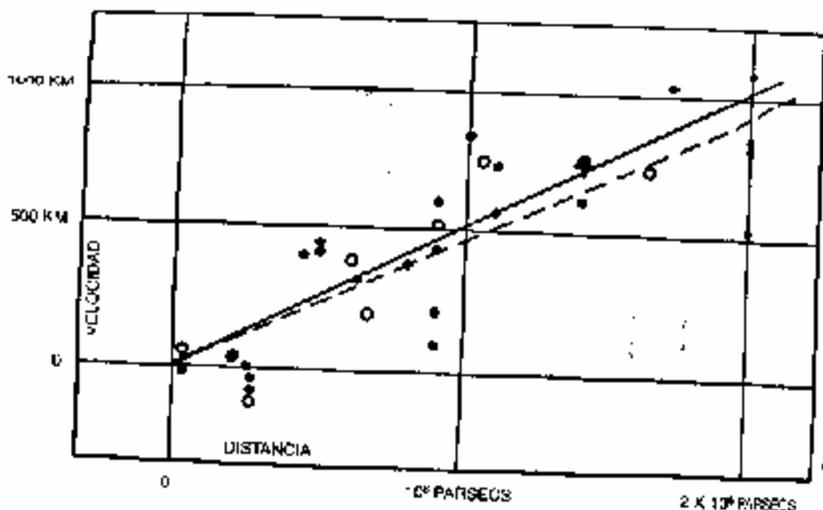
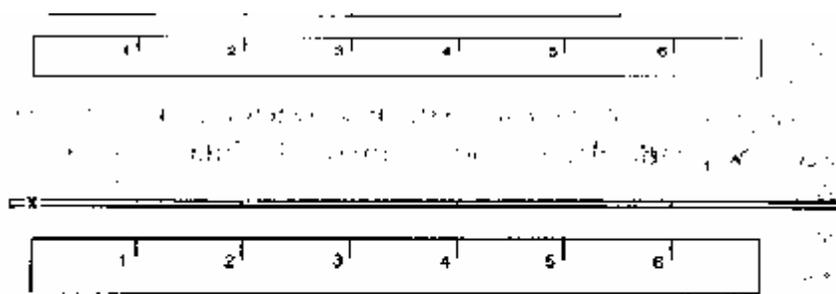


Gráfico de distancia versus velocidad para galaxias cercanas, tomado del histórico estudio de Hubble "Relación entre distancia y velocidad radial entre nebulosas extragalácticas" (1929), publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*. El eje vertical corresponde a la velocidad de alejamiento en kilómetros por segundo. El eje horizontal es la distancia, medida en parsecs (alrededor de tres años luz). Cada punto negro representa una galaxia individual; cada círculo es un grupo de galaxias. Las líneas continua y discontinua son curvas que corresponden a los datos de los puntos y los círculos. La relación lineal aproximada entre distancia y velocidad se denomina ley de Hubble.



El universo sobre una banda elástica, que demuestra la ley de Hubble como una consecuencia de un medio de estiramiento uniforme. Al estirar la banda elástica y mantener la cruz en un punto fijo como referencia, cada marca de tinta se mueve una distancia proporcional a su distancia inicial del punto de referencia.

Utilizando las estrellas cefeidas para medir las distancias de unas dieciocho nebulosas, Hubble descubrió que éstas constituían galaxias completas que descansaban más allá de la Vía Láctea. Y, más importante aún, descubrió que la distancia de cada galaxia era proporcional a su velocidad de alejamiento: una galaxia dos veces más alejada de nosotros que otra galaxia se alejaba dos veces más rápido.

Este último resultado cuantitativo fue exactamente como se había predicho para un universo homogéneo y en expansión uniforme. Y un simple ejemplo, con equipamiento

casero, puede explicar por qué. Pinte marcas de tinta espaciadas de forma regular sobre una banda elástica; una marca de tinta será su punto de referencia (por ejemplo, la Vía Láctea); mida todas las distancias y movimientos que se relacionen con esa marca. Mantenga la marca de referencia fija contra una regla, digamos en el centímetro cero, y luego extienda ambos extremos de la banda elástica. Al estirarse la banda, notará que cada marca de tinta se mueve una distancia proporcional a su distancia inicial de la marca de referencia. Por ejemplo, cuando la marca de tinta que inicialmente está a una distancia de un centímetro se mueve dos centímetros, la marca de tinta que en un comienzo está a dos centímetros se mueve cuatro centímetros. Como este incremento de la distancia se obtiene en el mismo lapso, la segunda marca de tinta se mueve dos veces más rápido que la primera. La velocidad es proporcional a la distancia. De hecho, *cualquier* material que se estire de manera uniforme cumple con la ley de la velocidad proporcional a la distancia. Si el material es irregular, de modo que algunas partes se estiran más rápido que otras, entonces la velocidad ya no es proporcional a la distancia. A la inversa, la proporcionalidad de la velocidad a la distancia significa que el material se estira de manera uniforme. También se puede observar fácilmente que la extensión carece de una posición central o privilegiada. Se puede elegir cualquier marca de tinta como marco de referencia y el resultado sigue siendo el mismo: las otras marcas de tinta se alejan de ella a velocidades proporcionales a sus distancias. Ninguna marca de tinta es especial. El resultado es igual para todas.

Sustituya ahora las marcas de tinta por galaxias y la banda elástica por el espacio del universo: llegará al resultado de Hubble. Las galaxias se alejan de nosotros porque el espacio se expande uniformemente en todas direcciones, y en este proceso arrastra a las galaxias. El descubrimiento de Hubble de 1929 brindó un fuerte apoyo observacional a los modelos cosmológicos en los que el universo se expande de manera uniforme. El universo estático de Einstein fue desechado. Se respaldó el modelo del big bang de Friedmann y Lemaître.

Si las galaxias hoy se alejan unas de otras, significa que en el pasado debieron haber estado más juntas. Antiguamente, el universo era más denso. Si suponemos que esta extrapolación hacia el pasado puede prolongarse, entonces alguna vez existió un momento en que toda la materia del universo se concentraba en un estado de densidad casi infinita. A partir de la velocidad de expansión, los astrónomos pueden calcular cuándo ocurrió este punto en el tiempo: hace entre diez y quince mil millones de años. Se le llama el comienzo del universo, o el big bang. Los cálculos originales de Hubble, erróneos debido a diversos problemas técnicos, estimaban en cerca de dos mil millones de años la edad del universo. Para simplificar, de aquí en adelante supondremos que se trata de diez mil millones.

Para determinar la edad del universo⁸ existe un método completamente independiente, que involucra a la Tierra. El fechado radiactivo del mineral de uranio terrestre, desarrollado unas dos décadas antes del descubrimiento de Hubble, sugiere que la edad de la Tierra es de cerca de cuatro mil millones de años. ¿Qué relación podría tener esto con la edad del universo? Gran parte de las teorías de la formación de estrellas y planetas indican que nuestro sistema solar no podría ser mucho más joven que el universo. En astronomía, donde las edades se expresan en muchos factores de diez, cuatro mil millones de años es casi lo mismo que diez mil millones de años. La correspondencia es buena. Así, con dos métodos totalmente distintos, uno relacionado con los movimientos de las galaxias y el otro con rocas bajo nuestros pies, los científicos han deducido edades comparables para el universo. Esta concordancia ha sido un argumento de peso en favor del modelo del big bang.

La cosmología y la geología tienen mucho en común. Penetrar en las capas más profundas de la Tierra es como viajar en el tiempo hacia atrás, hacia nuestro pasado humano. Fijar la vista en las enormes distancias del espacio es también viajar atrás en el tiempo. Cuando nuestros telescopios detectan una galaxia a una distancia de diez millones

de años luz, vemos esa galaxia como era hace diez millones de años; vemos luz antigua, que ha estado viajando diez millones de años hasta llegar aquí. Cuando detectamos una galaxia más lejana, contemplamos una imagen aún más antigua, vemos luz incluso más antigua. La observación cosmológica es una especie de excavación, una búsqueda de los orígenes, un vistazo, no a una Tierra más antigua, sino a un universo más antiguo.

Kosmologische Betrachtungen Zur Allgemeinen Relativitätstheorie.

Von A. EINSTEIN.

Es ist wohlbekannt, daß die Poissonsche Differentialgleichung

$$\Delta\varphi = 4\pi K\rho \quad (1)$$

in Verbindung mit der Bewegungsgleichung des materiellen Punktes die NEWTONsche Fernwirkungstheorie noch nicht vollständig ersetzt. Es muß noch die Bedingung hinzutreten, daß im räumlich Unendlichen das Potential φ einem festen Grenzwerte zustrebt. Analog verhält es sich bei der Gravitationstheorie der allgemeinen Relativität; auch hier müssen zu den Differentialgleichungen Grenzbedingungen hinzutreten für das räumlich Unendlich, falls man die Welt wirklich als räumlich unendlich ausgedehnt anzusehen hat.

Bei der Behandlung des Planetenproblems habe ich diese Grenzbedingungen in Gestalt folgender Annahme gewählt: Es ist möglich, ein Bezugssystem so zu wählen, daß sämtliche Gravitationspotentiale g_m im räumlich Unendlichen konstant werden. Es ist aber a priori durchaus nicht evident, daß man dieselben Grenzbedingungen ansetzen darf, wenn man größere Partien der Körperwelt ins Auge fassen will. Im folgenden sollen die Überlegungen angegeben werden, welche ich bisher über diese prinzipiell wichtige Frage angestellt habe.

§ I Die NEWTONsche Theorie.

Es ist wohlbekannt, daß die NEWTONsche Grenzbedingung des konstanten Limes für φ im räumlich Unendlichen zu der Auffassung hinführt, daß die Dichte der Materie im Unendlichen zu null wird. Wir denken uns nämlich, es lasse sich ein Ort im Weltraum finden, um den herum das Gravitationsfeld der Materie, im großen betrachtet, Kugelsymmetrie besitzt (Mittelpunkt). Dann folgt aus der Poissonschen

Gleichung, daß die mittlere Dichte ρ rascher als $1/r^2$ mit wachsender Entfernung r vom Mittelpunkt zu null herabsinken muß, damit φ im

Primera página del histórico estudio de Einstein acerca de cosmología, del periódico *Sitzungsberichte der Preussische Akademie der Wissenschaften* (1917). Su título es "Consideraciones cosmológicas sobre la teoría de la relatividad".

ALBERT EINSTEIN

Albert Einstein (1879-1955) nació en Ulm, Alemania. Su padre dirigía una pequeña planta electroquímica. No le gustaba la reglamentación de la escuela, pero aprendió

mucho de los libros de matemáticas y ciencias que leía por su cuenta. Finalizó sus estudios secundarios en Aarau, Suiza, y luego se inició en la física y las matemáticas en el Politécnico de Zurich. No logró obtener un trabajo académico, y en 1902 lo contrataron como examinador en la Oficina de Patentes suiza en Berna. Durante los siete años en que desempeñó este trabajo, Einstein sentó las bases para gran parte de la física del siglo XX, publicando artículos grandiosos de mecánica estadística, mecánica cuántica y relatividad especial. En 1905 recibió su doctorado de la Universidad de Zurich. Unos años después ya era una celebridad y recibía múltiples ofrecimientos para el cargo de profesor universitario. En 1914, y después de haber trabajado en la Universidad Alemana de Praga y en el Politécnico de Zurich, se convirtió en director del Instituto de Física Kaiser Guillermo en Berlín. Allí publicó su obra sobre la teoría de la relatividad y, en 1917, su artículo pionero sobre cosmología. Después de la Primera Guerra Mundial, comenzó a ser víctima de ataques antisemitas cada vez más graves, hasta que en 1932 se trasladó al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Estados Unidos, donde permaneció por el resto de su vida. Einstein siempre mantuvo convicciones profundas acerca de la libertad y la humanidad, pero se encontraba aislado de la vida mundana. En un discurso pronunciado en 1918, afirmó: "Creo, con Schopenhauer, que uno de los motivos más fuertes que lleva a los hombres al arte y la ciencia es escapar de la vida diaria, con su dolorosa crudeza y su melancolía irremediable, huir de lo que nos impide realizar nuestros propios deseos en constante cambio". En su filosofía científica, Einstein creía fervientemente en la belleza de la naturaleza y en la capacidad de la mente humana para descubrir sus verdades. Sin embargo, este descubrimiento no podría lograrse por medio de experimentos, sino que sería más bien el resultado de la "libre invención de la mente humana", que después se comprobaría mediante experimentos y se juzgaría de modo adecuado.

ALEXANDER FRIEDMANN

Alexander Aleksandrovich Friedmann (1888-1925), hijo de un compositor de música, nació en San Petersburgo, Rusia. Estudió matemáticas y física en la Universidad de San Petersburgo y se graduó en 1910 con medalla de oro por sus trabajos inéditos de matemáticas. En 1922 recibiría su doctorado. En 1913 comenzó a trabajar en meteorología, el principal interés científico de su vida, y desarrolló nuevos métodos para el análisis teórico de los movimientos de masas de aire en la atmósfera. Durante la Primera Guerra Mundial trabajó en la aviación rusa, y posteriormente se convirtió en director de la primera industria rusa para instrumentos de aviación. Después de 1920, Friedmann colaboró en el observatorio de física de la Academia de Ciencias en Petrogrado. Fue director de investigaciones en el departamento de meteorología teórica del Laboratorio Geofísico Principal. En 1922, publicó su histórico estudio sobre cosmología, en el que exponía la primera base teórica para un universo en expansión. Friedmann consideraba que la teoría de la relatividad era esencial para una educación en física. Los cursos que impartía en universidades de Petrogrado eran famosos por su originalidad; sus textos incluyen *Experimentos en la hidrodinámica de líquidos comprimibles* y *El mundo como espacio y tiempo*. Friedmann falleció de fiebre tifoidea a los 37 años.

GEORGES LEMAÎTRE

Georges Lemaître (1894-1966) nació en Charleroi, Bélgica. En 1920 obtuvo su doctorado en ciencias y matemáticas en Lovaina; luego siguió estudios eclesiásticos en el

seminario de Malinas, culminando con su ordenación en 1923. Mientras estuvo en el seminario, milagrosamente encontró tiempo para elaborar, sin supervisión alguna, una segunda tesis sobre la nueva teoría de la gravedad de Einstein. Durante el año académico de 1924-1925, Lemaître trabajó en el Observatorio del Harvard College en su posdoctorado. Ese año asistió a una reunión en Washington en la que oyó acerca del descubrimiento de Hubble de que la nebulosa de Andrómeda estaba fuera de nuestra galaxia. Ya se sabía que la mayoría de las nebulosas se alejaban de nosotros a grandes velocidades, por lo que Lemaître interpretó el resultado de Hubble como evidencia de un universo en movimiento. Se apresuró a regresar a Bélgica, donde descubrió una nueva solución a las ecuaciones de Einstein, que describía un universo en expansión. En su trascendental artículo teórico de 1927, predijo que la velocidad de alejamiento de cada galaxia debía ser proporcional a su distancia de nosotros: una conclusión simple de la que no se hacía mención en el previo y aún desconocido artículo de Alexander Friedmann sobre un universo en expansión. Por este trabajo, Lemaître es en ocasiones considerado el padre del modelo del big bang. En 1931, propuso que el universo completo comenzó como un átomo único y gigantesco, el "átomo primigenio", cuyas desintegraciones graduales en trozos cada vez más pequeños formaron las nebulosas, las estrellas y finalmente los rayos cósmicos. Lemaître, siempre jovial y robusto, fue muy querido por sus alumnos, quienes lo llamaban "el principito".

HENRIETTA LEAVITT

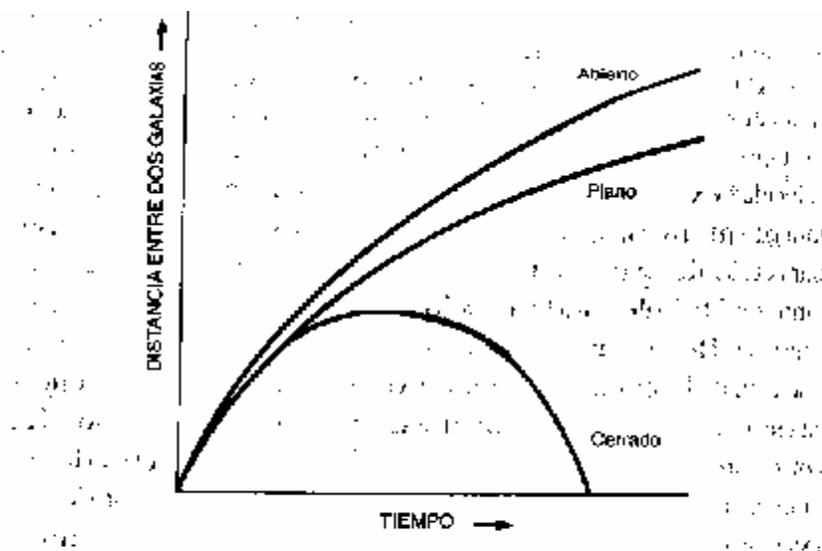
Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) nació en Lancaster, Massachusetts, una de los siete hijos de un prominente ministro congregacionalista. Estudió astronomía en lo que es hoy el Radcliffe College, donde en 1892 recibió su grado de bachiller. Unos cuantos años después ingresó al Observatorio del Harvard College, donde trabajó por el resto de su vida. Edward Pickering, director del observatorio, le sugirió un cierto programa gracias al cual ella se convirtió en uno de los primeros astrónomos en comparar en forma sistemática la luminosidad de las estrellas utilizando láminas fotográficas, las que tienen una sensibilidad mucho mayor frente a la luz azul que la del ojo humano. El interés específico de Leavitt eran las estrellas variables; éstas pueden variar su luminosidad en un período de días a meses. Durante su carrera descubrió 2.400 estrellas variables. Su mayor descubrimiento fue la relación entre período y luminosidad para las variables cefeidas, la que muchos astrónomos han utilizado para medir distancias cósmicas. Henrietta Leavitt fue una de varias mujeres, incluyendo a Williamina Fleming y Annie Jump Cannon, que trabajaron en el Observatorio del Harvard College durante los primeros años del siglo XX. Al igual que Cannon, Leavitt era sorda. Su trabajo en relación a las estrellas variables, aunque de vital importancia, carecía de toda espectacularidad; exigía un estudio extremadamente meticuloso e incansable de cientos de láminas fotográficas para hallar la luminosidad y oscuridad de aquellos diminutos puntos que eran las estrellas. Leavitt fue durante toda su vida una persona disciplinada y religiosa y se guió según los valores estrictos de sus antepasados puritanos.

EDWIN HUBBLE

Edwin Powell Hubble (1889-1953) nació en Marshfield, Missouri. Su padre era abogado y trabajaba en el negocio de los seguros. Durante sus estudios en la Universidad de Chicago, Hubble sobresalió en matemáticas, astronomía y boxeo. Un promotor de boxeo se ofreció para entrenar al fuerte y robusto Hubble con el fin de que éste se enfrentase a Jack Johnson, campeón mundial de peso pesado; en lugar de ello, Hubble partió a la universidad de Oxford y allí decidió estudiar derecho en Rhodes. A su regreso a Estados Unidos, en 1913, abrió un bufete en Louisville, Kentucky, pero pronto se decidió a realizar su posgrado en astronomía en la Universidad de Chicago. Durante la Primera Guerra, Hubble se enlistó como soldado raso y terminó como mayor. Pasada la guerra, a los treinta años, Hubble comenzó a trabajar en su famosa obra en el telescopio de cien pulgadas del Monte Wilson, California. Su primer descubrimiento importante fue una variable cefeida en la nebulosa de Andrómeda, estableciendo aquel objeto como la primera galaxia conocida fuera de la Vía Láctea. Asimismo, creó un esquema de clasificación de galaxias según sus formas. En 1929, Hubble hizo su gran descubrimiento: la relación de velocidad proporcional a la distancia para galaxias que se alejan, lo que indicaba que el universo se expande. Este hallazgo vino a confirmar la predicción teórica de Georges Lemaître. Después de la Segunda Guerra Mundial, Hubble dedicó gran parte de su esfuerzo al futuro programa del telescopio de doscientas pulgadas en el monte Palomar; éste se concluyó en 1949 y Hubble fue el primero en utilizarlo; allí continuó sus estudios de medición de distancias cósmicas. Otros intereses de Hubble, además de la ciencia, eran el arte, el atletismo y la pesca con mosca, y solía ir de pesca a las Montañas Rocosas. En lo que a ciencia se refería, creía en la uniformidad de la naturaleza y la universalidad de los principios físicos. En su estudio de galaxias a distancias de miles de millones de años luz, Hubble llevó esta filosofía hasta el límite. Acerca de ella afirmó que "es la suposición fundamental en todas las extrapolaciones más allá de los límites de los datos conocidos y observables, y todas las especulaciones que siguen su guía son legítimas hasta que se contradigan".

El modelo del big bang

El modelo del big bang, que presenta una descripción matemática para la evolución del universo, sigue la lógica de la teoría de la gravedad de Einstein y de unos cuantos supuestos adicionales. Según este modelo, fue algo similar a una explosión lo que hizo nacer el universo, que en un comienzo tenía una densidad y una temperatura infinitas, y que desde entonces se ha estado expandiendo sin cesar, volviéndose menos denso y enfriándose. Pero no fue una explosión común y corriente, en la que los fragmentos salen disparados hacia una región circundante de espacio estático. El big bang ocurrió en todas partes. No había espacio circundante alguno hacia donde pudiera desplazarse el universo, ya que cualquier espacio formaría parte del universo. Es algo muy difícil de visualizar; se nos hace un poco más fácil si imaginamos partículas individuales en el universo. Desde que ocurrió el big bang, todas las partículas en el universo han estado apartándose unas de otras, siendo arrastradas por la expansión del espacio, como sucede con las marcas de tinta que se distancian sobre una banda elástica. (Para ser más precisos, todas las partículas *suficientemente distantes* han estado alejándose unas de otras desde que ocurrió el big bang. Las partículas que están muy cercanas o apiñadas se ven afectadas por sus respectivas fuerzas de atracción y no intervienen en la expansión global del universo. Por ejemplo, fuerzas eléctricas mantienen en su lugar los átomos del cuerpo humano, que no se alejan unos de otros. De igual modo, las estrellas en una galaxia mantienen siempre su misma posición gracias a su mutua atracción gravitacional, que les impide distanciarse unas de otras.)



La expansión del universo en el tiempo para cosmologías cerradas, abiertas y planas. La expansión podría medirse por la distancia entre dos galaxias distantes cualesquiera. En un universo cerrado, el universo se expande al principio y luego se contrae.

Aun cuando el universo se expande, sus partes se arrastran entre sí debido a la atracción gravitacional, lo cual ralentiza la expansión. La competencia entre el movimiento centrífugo de expansión y la fuerza centrípeta de la gravedad da tres posibilidades al destino final del universo. Existe la probabilidad de que el universo siga expandiéndose eternamente, con su movimiento centrífugo superando siempre la fuerza centrípeta de la gravedad, tal como sucedería con una piedra que se lance hacia arriba con la velocidad suficiente como para escapar a la gravedad de la Tierra y permanecer viajando eternamente. Un universo de esas características se denomina universo abierto. Una segunda posibilidad es que la fuerza de gravedad interna sea lo suficientemente fuerte como para detener y revertir la expansión, como ocurriría al lanzar una piedra hacia arriba pero no a una velocidad suficiente, lo que la haría alcanzar una altura máxima para luego volver a caer a la Tierra. Un universo de este tipo, llamado universo cerrado, alcanza un tamaño máximo y entonces comienza a colapsar, hacia una especie de big bang invertido. Ambos universos tienen principio y fin en el tiempo. La última posibilidad, denominada universo plano, se encuentra justo entre un universo cerrado y uno abierto, y es análogo a la piedra lanzada hacia arriba precisamente con la velocidad mínima necesaria para escapar a la gravedad terrestre. Los universos planos, como los universos abiertos, siguen expandiéndose eternamente.

El modelo del big bang acepta estas tres posibilidades. Cuál sea la verdadera para nuestro universo depende de la forma en que se inició la expansión cósmica, de igual modo que la trayectoria de la piedra depende de su velocidad inicial relativa a la fuerza de la gravedad de la Tierra. Para la piedra, la velocidad inicial crítica es de 11,2 km por segundo. Si se lanza hacia arriba una piedra a una velocidad inferior a ésta, volverá a caer a la Tierra; las piedras con una mayor velocidad inicial jamás volverán. Así también, el destino del universo quedó determinado por su velocidad inicial de expansión relativa a su gravedad. Incluso sin conocer estas condiciones iniciales podemos deducir el destino de nuestro universo: comparando su tasa de expansión *actual* con su densidad promedio *actual*. Si la densidad es mayor que el valor crítico, determinado por la velocidad de expansión actual, entonces es la gravedad la que predomina; el universo es cerrado y está predestinado a desintegrarse en algún momento en el futuro. Si la densidad es inferior al valor crítico, el universo es abierto. Si es exactamente igual al valor crítico, es plano. La relación densidad real-densidad crítica se denomina omega. Así, el universo es abierto, plano o cerrado dependiendo de si omega es inferior a 1, igual a 1 o mayor que 1, respectivamente.

En principio, es posible medir omega. Para calcular la velocidad de expansión del universo se debe medir la velocidad de alejamiento de una galaxia distante (hallada por su desplazamiento al rojo) y dividirla por la distancia a la galaxia. En un universo de expansión uniforme, como ya hemos visto, la velocidad externa de cualquier galaxia es proporcional a su distancia; entonces, la relación velocidad-distancia es la misma para cualquier galaxia. La cifra resultante, denominada la constante de Hubble, mide la velocidad actual de expansión del universo. De acuerdo a las mediciones más precisas, la velocidad actual de expansión del universo es tal que éste duplicará su tamaño en aproximadamente diez mil millones de años. Esto corresponde a una densidad crítica de materia de cerca de 10^{-29} gramos por centímetro cúbico, la densidad que se obtiene al esparcir la masa de una semilla de amapola por sobre un volumen del tamaño de la Tierra. (10^{-29} representa un punto decimal seguido por veintiocho ceros y un uno; 10^{15} se refiere a un uno seguido por quince ceros, y así.) El valor de medición más preciso para la densidad promedio real -que se obtuvo gracias a la observación telescópica de un gigantesco volumen de espacio que contenía muchas galaxias, en que se estimó la cantidad de masa de aquel volumen por sus efectos gravitacionales, y luego se la dividió por el tamaño del volumen- es de aproximadamente 10^{-30} gramos por centímetro cúbico, o cerca de un décimo del valor crítico. Este resultado, al igual que otras observaciones, sugiere que nuestro universo es abierto.¹

Sin embargo, existe cierta incertidumbre con respecto a estas cifras -relacionada principalmente con la heterogeneidad del universo- y también hay dudas en lo que a distancias cósmicas se refiere; en la práctica, resulta difícil medir ω . Si el universo fuese enteramente homogéneo y estuviese expandiéndose de manera uniforme, entonces su velocidad de expansión podría determinarse midiendo la velocidad de alejamiento y la distancia de cualquier galaxia, cercana o lejana. Y, viceversa, la distancia a cualquier galaxia podría determinarse a partir de su desplazamiento al rojo y la aplicación de la ley de Hubble. (Hablando en forma aproximativa, la distancia a una galaxia es diez mil millones de años luz multiplicado por el aumento fraccionario en la longitud de onda de su luz detectada.) Pero sucede que el universo no es completamente homogéneo. Debido a la presencia de heterogeneidades locales, la velocidad de expansión del universo y la densidad promedio de la materia debieran medirse sobre una región lo más grande posible, y entonces suponer que dicha región es característica de cualquier volumen considerable del universo. Ambas mediciones requieren de distancias precisas a las galaxias. La tasa de expansión cósmica, por ejemplo, se obtiene dividiendo la velocidad de alejamiento de una galaxia por su distancia, si se conoce esta última. Para medir distancias que sobrepasan los 30 millones de años luz, más o menos, las estrellas cefeidas individuales no sirven porque se tornan demasiado opacas. En lugar de ello, se deben utilizar galaxias enteras como "medidas estándar de luz", es decir, objetos de luminosidad conocida. Por desgracia, las galaxias, al igual que las estrellas, son de luminosidad extremadamente variables. No existen las "medidas estándar de luz". Lo único que se puede hacer es buscar alguna relación empírica entre la luminosidad de una galaxia y otra propiedad observada, como podría serlo la velocidad orbital de sus estrellas. (Tales relaciones son análogas a la relación entre la luminosidad y el período de luz de una cefeida.) Después de determinar y calibrar dicha relación para galaxias cercanas, donde las distancias pueden medirse a través de otros medios, el método puede entonces aplicarse a galaxias mucho más lejanas.²

El problema es que mirar a mayores distancias en el espacio es equivalente a mirar hacia atrás en el tiempo. La luz que hoy vemos al observar galaxias distantes fue emitida por éstas cuando eran mucho más jóvenes, y ha estado viajando cientos de millones o miles de millones de años hasta alcanzarnos. Por el contrario, la luz que emiten las galaxias más cercanas ha estado viajando por un tiempo mucho más breve y, por lo tanto, se las puede observar en un período más tardío de su evolución. En otras palabras, una galaxia distante *como hoy se observa* puede ser totalmente diferente a las galaxias cercanas más maduras que se han utilizado para calibrar la relación de velocidad entre la luminosidad y la órbita, y existe la posibilidad de que la relación no sea suficientemente válida para la galaxia distante. Es como intentar aplicar a personas de veinte años la relación entre altura y peso que se encontró para la gente de sesenta años. Muchos astrónomos modernos se han dedicado a la comprensión de los cambios que las galaxias han experimentado en el largo plazo. Sin embargo, no hemos logrado encontrar ni un solo objeto astronómico tan bien conocido y confiable como las estrellas cefeidas para su uso como unidades luminosas estándar.

Nuestra capacidad para determinar la densidad promedio del universo se ve asimismo limitada por la dificultad de medir grandes distancias. La densidad promedio de la masa en los mayores volúmenes del espacio que hemos medido, cuyo tamaño alcanza unos cuantos cientos de millones de años luz, se calcula según el grado en que los movimientos de las galaxias se vean afectados por concentraciones locales de masa. Si la masa del universo estuviese esparcida en forma pareja, cada galaxia se desplazaría directamente en dirección inversa a nosotros, a una velocidad exactamente proporcional a la distancia. En cierto modo, esto es lo que vemos. No obstante, en regiones "locales", de diez o cien millones de años luz, la masa cósmica se condensa en galaxias y racimos de galaxias. La gravedad "irregular" de dichos grupos de masa tuerce y altera el curso de galaxias cercanas, tal como ocurre, por ejemplo, cuando la bola en una máquina *pinball* se desvía en distintas direcciones al chocar con los resortes, aun cuando en promedio siga

cayendo. Una comparación entre los movimientos "peculiares" de las galaxias y los movimientos "normales" esperados para un universo completamente uniforme, además de un conocimiento de los "resortes" que provocan los movimientos irregulares, determina la densidad promedio de la materia en la región.



Allan Sandage nació en Iowa City en 1926, estudió en la Universidad de Illinois y en el Instituto de Tecnología de California; hoy forma parte del equipo que trabaja en los observatorios de Monte Wilson y Las Campanas. Sandage se ha encargado de una serie de extensos programas para medir las distancias a las galaxias, la velocidad de expansión del universo y la desaceleración de la expansión. A comienzos de la década de 1950, en su calidad de joven graduado, Sandage fue ayudante de Edwin Hubble.

El problema reside en que solamente se puede medir el movimiento *total* de dichas galaxias; para saber cuánto es propio y cuánto es normal, se debe conocer la velocidad de expansión del universo y la distancia a las galaxias. (Hay que recordar que la velocidad exterior normal corresponde a la proporción de expansión multiplicada por la distancia.) Si no se conoce la distancia con exactitud, la velocidad normal de expansión tampoco será precisa.

Existe un método diferente para determinar ω , que implica calcular cómo ha ido disminuyendo la velocidad de expansión del universo en el tiempo. Se vincula estrechamente a la medición tanto de la velocidad de expansión como de la densidad promedio de la materia, pues la gravedad de esta última es la supuesta causa de dicha disminución. En la práctica, la velocidad de expansión se mide a distancias cada vez mayores, lo cual sondea el universo en épocas cada vez más antiguas. Fue Edwin Hubble quien en la década de 1930 inició estas mediciones;³ en los años 50 le siguió Allan Sandage, de los observatorios del Monte Wilson; desafortunadamente, las mediciones requieren determinar distancias precisas para objetos muy distantes, o bien encontrar una

serie de unidades estándar de una luminosidad conocida. Así, ellos también sufrieron las dificultades de medir grandes distancias en el cosmos sin contar con unidades luminosas estándar.

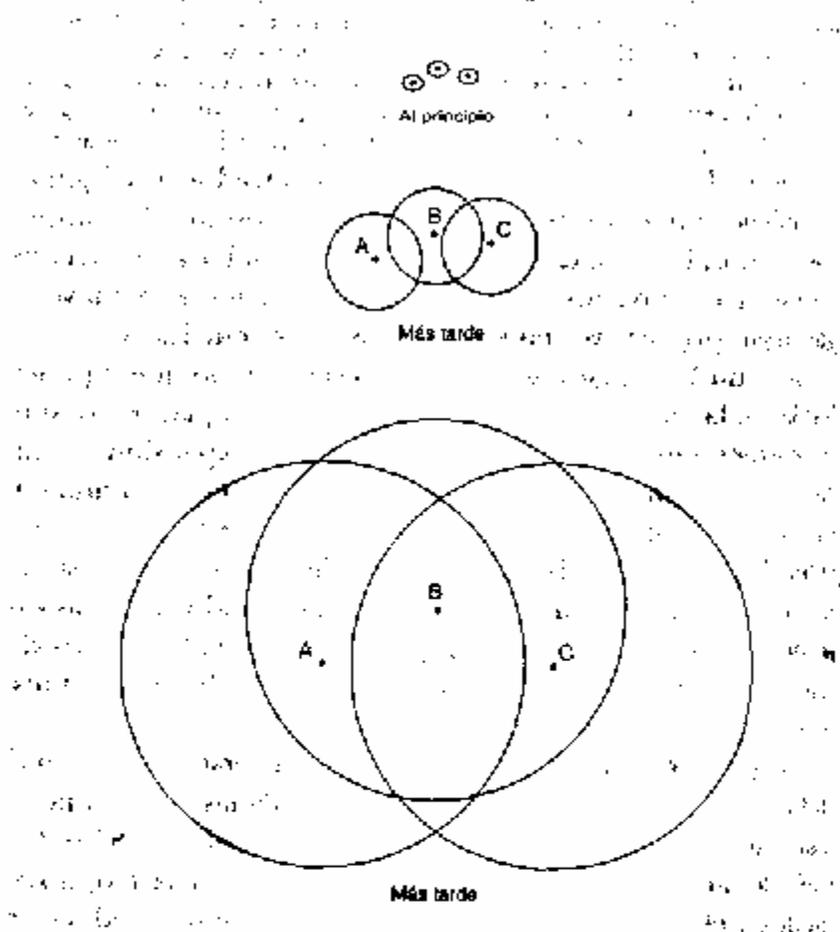
A pesar de estas incertidumbres, los cosmólogos están bastante seguros de que el valor de omega oscila entre 0,1 y 2,0. Se ha identificado suficiente materia como para que omega no sea inferior a 0,1. En el extremo superior, un omega mayor que 2, unido a la velocidad actual de expansión, se traduciría en una edad del universo inferior a la edad de la Tierra según determina el fechado radiactivo.

La teoría de la gravedad de Einstein, que sustenta el modelo del big bang, presenta una conexión teórica entre la evolución del universo y su tamaño. Según esta teoría, si el universo es cerrado, entonces posee un tamaño limitado. Uno podría preguntarse qué hay más allá de los límites de un universo que tiene una extensión limitada. La respuesta es que un universo cerrado no posee límite alguno. Se pliega sobre sí mismo, tal como la superficie de una esfera se pliega sobre sí misma. Si comenzamos a caminar en línea recta, volveremos al punto de partida. Viajamos alrededor de todo el mundo, cubriendo una distancia finita, pero jamás caemos de un borde ni tropezamos con un límite. En tres dimensiones, esta imagen se resiste a la imaginación, pero puede expresarse en forma matemática. Los universos abiertos y planos, por el contrario, poseen un tamaño ilimitado y se extienden de manera infinita en todas direcciones. Existe una diferencia más entre los universos cerrados, planos y abiertos. Los universos planos cumplen con la geometría euclidiana. Por ejemplo, los tres ángulos de un triángulo que se forma al conectar tres galaxias por medio de líneas rectas suman 180 grados. En los universos cerrados, los ángulos del mismo triángulo suman más de 180 grados; en los universos abiertos, la suma es inferior a 180 grados. La geometría de los universos cerrados y abiertos, que los matemáticos investigaron por primera vez en el siglo XIX, no es euclidiana.

A menudo la gente se confunde acerca de lo que significa hablar de la expansión de universos abiertos o planos, los que ya se extienden infinitamente en el espacio. Expansión significa que la distancia entre dos galaxias cualquiera está aumentando. Al afirmar que el universo hoy se expande a una velocidad tal que en 10 mil millones de años duplicará su tamaño, queremos decir que la distancia entre dos galaxias extremadamente separadas se duplicará en 10 mil millones de años. Esta definición es aplicable a universos abiertos, planos, o cerrados.

La geometría o tamaño general del universo no se ha medido en forma directa. Las cantidades calculadas corresponden a la velocidad de expansión y la densidad promedio. Sólo después de haber combinado estas cantidades con la teoría del modelo del big bang y sus matemáticas, podemos deducir la geometría y el destino del universo. Así pues, no es poco lo que depende de la teoría y de sus supuestos básicos.

HORIZONTES EN UN UNIVERSO EN EXPANSION



Horizontes en un universo en expansión. El círculo que rodea cada punto representa el horizonte para ese punto, la región más distante con la que éste puede haberse comunicado desde el big bang. Apenas el horizonte de un punto cubre otro punto, ambos puntos se comunican y pueden verse entre sí. A medida que el universo se expande, diversos puntos —como los representados por las letras A, B y C— se separan unos de otros, pero el horizonte de cada punto se expande aún más rápido, de modo que los puntos que en un comienzo estaban localizados fuera del horizonte del otro finalmente llegan a comunicarse. El horizonte de cada punto (ubicación) marca en cualquier momento el borde del universo observable desde dicha ubicación.

También es importante considerar que, aun si el universo es infinito, sólo un determinado volumen —denominado el universo observable— es *visible* ante nosotros en algún momento. Alcanzamos a ver solamente hasta donde la luz puede haber viajado desde el big bang. Si nos adentramos en el espacio con la mirada, vemos luz que ha estado viajando más tiempo para alcanzarnos y que por lo tanto fue emitida mucho antes. Si observamos la galaxia de Andrómeda, por ejemplo, vemos una luz que se emitió hace 2 millones de años; si observamos el grupo de galaxias de Virgo, vemos una luz que se emitió hace 50 millones de años. Finalmente, a cierta distancia, la luz que recién ahora nos llega se emitió al momento del big bang. La distancia marca el borde del universo observable en la actualidad. No podemos ver más allá, porque la luz no ha tenido tiempo de viajar hasta aquí tras el big bang. Hoy, el universo observable alcanza a unos 10 mil

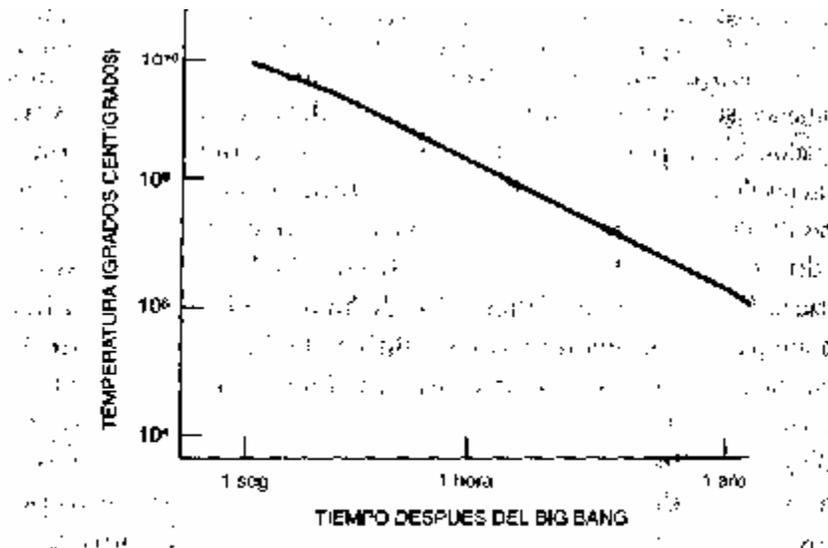
millones de años luz, es decir, la distancia que la luz puede recorrer en 10 mil millones de años. En mil millones más, cuando el universo tenga 11 mil millones de años, el universo observable se ampliará a 11 mil millones de años luz; si los seres humanos aún siguen existiendo, podrán ver a una distancia de 11 mil millones de años luz. Regiones del universo que hoy están más allá de nuestro horizonte aparecerán frente a nosotros. Jamás podremos regresar en el tiempo y ver más atrás del big bang; sin embargo, a medida que pasan los años logramos ver más y más aspectos del universo tal como era en el momento del big bang. Cada día el universo observable crece un poco más. Cada día, la luz que emiten objetos un poco más distantes tiene más tiempo para alcanzar nuestros telescopios.⁴

El modelo del big bang no sólo relaciona la evolución del universo con su geometría y densidad de masa; también describe la larga historia del universo. Imaginemos una película de la evolución cósmica proyectada hacia atrás a partir de hoy. El universo se contrae. Las galaxias se desplazan acercándose cada vez más, hasta que se convierten en informes burbujas de gas; a medida que el universo se vuelve más y más denso, estas masas se absorben unas a otras. Las galaxias individuales e incluso las estrellas individuales pierden su identidad, y la materia del universo comienza a adquirir la apariencia de un gas. Como ocurre al condensarse cualquier tipo de gas, el gas cósmico se calienta cada vez más. Finalmente, a una temperatura de cerca de diez mil (10^4) grados centígrados, el calor es tan intenso que los átomos no logran retener sus electrones y se desintegran en núcleos atómicos y electrones que vagan libremente. En una etapa más temprana aún, a medida que el big bang se acerca, los mismos núcleos atómicos se desintegran en protones y neutrones bajo el intenso calor. Más atrás todavía, cuando la temperatura llega a cerca de 10^{13} grados centígrados, cada protón y neutrón se desintegra en tres partículas elementales denominadas cuarks. El universo se transforma en una cascada de partículas subatómicas.

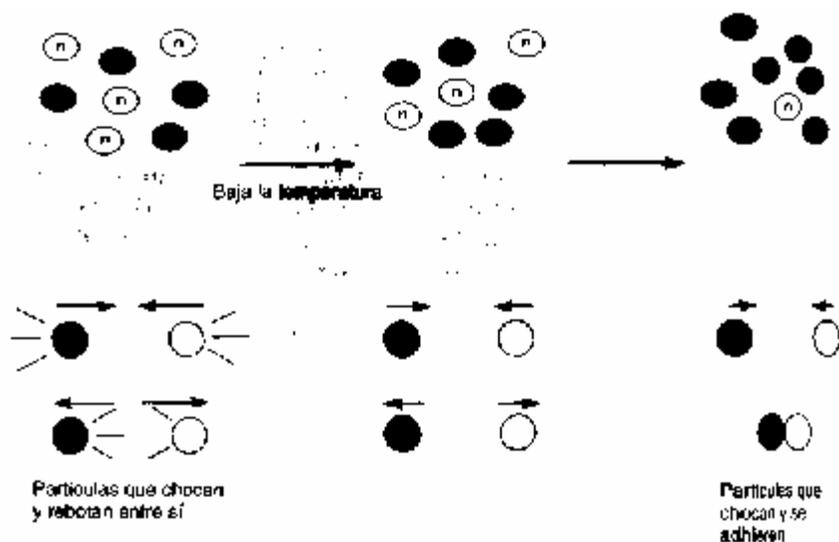
El modelo del big bang es cuantitativo;⁵ especifica la densidad promedio, la velocidad de expansión y la temperatura del universo en cada punto en el tiempo, dados los valores calculados hoy de dichas cantidades. Según la teoría, un segundo después del big bang la temperatura del universo era de cerca de diez mil millones (10^{10}) de grados centígrados, y su densidad, de unos cien mil (10^5) gramos por centímetro cúbico. En ese momento, el universo se componía de un gas extremadamente caliente, compuesto por partículas subatómicas que llenaban el espacio de manera uniforme. Para cuando el universo tenía unos 30 millones de años -la edad que algunos científicos consideraban más o menos la del inicio de la formación de las primeras galaxias-, su temperatura y densidad habían descendido a cerca de 0 grado centígrado y 10^{-25} gr/cc, respectivamente. (El cero absoluto es -273 grados centígrados. En la actualidad, la temperatura cósmica calculada es de unos -270 grados centígrados, o tres grados sobre el cero absoluto, y aún sigue descendiendo.)

El modelo del big bang, junto con presentar una explicación para la expansión y edad observadas del universo, ha superado exitosamente otras dos importantes pruebas verificadas por observaciones. Puede explicar por qué el universo está compuesto más o menos por un 75% de hidrógeno y un 25% de helio (los elementos químicos más pesados, como el oxígeno y el carbono, constituyen una cantidad ínfima de la masa total en el universo). El modelo del big bang también predijo que un tipo especial de ondas radioeléctricas, creadas en una etapa del universo muchísimo más antigua, debían llenar el espacio. El descubrimiento de estas ondas cósmicas radioeléctricas, denominadas radiación cósmica de fondo, tuvo lugar en 1965, después de que se las predijera. El éxito del modelo con el helio y las ondas cósmicas radioeléctricas -el primero, una buena explicación de un fenómeno previamente conocido; el segundo, una predicción de un descubrimiento futuro- resultó decisivo no sólo para la ciencia, sino para la actitud de los científicos. La concordancia entre la teoría y la observación en estos dos fenómenos convenció a muchos científicos, por primera vez, de que la cosmología tenía algún contacto con la realidad, de que era una ciencia legítima.

El modelo del big bang sostiene que en alguna época el universo fue tan caliente que, a excepción del hidrógeno, el elemento más liviano, ninguno de los elementos químicos podía existir. El hidrógeno sólo es una partícula subatómica, un protón. Todos los demás elementos resultan de una fusión de dos o más partículas subatómicas, que no hubieran podido mantenerse unidas bajo el intenso calor del universo recién creado. A la expansión del universo la acompañó su enfriamiento. Cuando la edad del universo alcanzaba sólo unos cuantos minutos, su temperatura había descendido a mil millones de grados, la temperatura crítica en que las partículas subatómicas pueden comenzar a mantenerse unidas mediante las fuerzas de atracción nuclear que existen entre ellas. Según los cálculos teóricos de Fred Hoyle y Roger Tayler, de la Universidad de Cambridge, en 1964, y los de Yakov Zel'dovich, del Instituto para la Investigación Cósmica de Moscú, durante la misma época (y posteriormente perfeccionados por James Peebles en la Universidad de Princeton en 1966, y por Robert Wagoner, William Fowler y Fred Hoyle en el Instituto de Tecnología de California en 1967), la fusión nuclear de unos pocos minutos posteriores al big bang debería haber convertido cerca del 25% de la masa del universo en helio, el segundo elemento más liviano después del hidrógeno. En la década de 1980, David Schramm y algunos colaboradores en la Universidad de Chicago -dedicados a revisar el trabajo previo de Wagoner, Fowler y Hoyle- calcularon meticulosamente la cantidad esperada de litio que se habría producido en el big bang. El litio es el siguiente elemento químico más liviano, y constituye sólo un 0,0000001% de la masa observada del universo. Se piensa que todos los elementos más pesados que el litio se crearon mucho más tarde, en las reacciones nucleares del centro de las estrellas. Resulta impresionante que la contabilidad teórica de hidrógeno, helio y litio concuerde tan claramente con la enorme abundancia observada de dichos elementos en el espacio.⁶



La temperatura del universo durante el primer año después del big bang, según se calculó en su modelo correspondiente. (No se indica la temperatura antes del primer segundo.)



Determinación de la proporción de helio a hidrógeno en el universo recién creado. Los círculos negros son los protones; los neutrones son los círculos con la letra n. Un núcleo de hidrógeno posee 1 protón; un núcleo de helio posee 2 protones y 2 neutrones. En épocas antiguas existía igual número de neutrones y protones. Cuando estas partículas colisionaban, no logran fusionarse ni mantenerse unidas porque la temperatura era demasiado alta. Con el tiempo ocurrieron dos cosas: los neutrones comenzaron a convertirse en protones, reduciendo gradualmente la proporción de neutrón a protón, y la temperatura siguió descendiendo en forma ininterrumpida. En un momento crítico, cuando la edad del universo era de alrededor de un minuto y cuando la temperatura cósmica había descendido a unos mil millones de grados, los neutrones y los protones lograron mantenerse unidos al colisionar, creando el helio. Entonces, todos los neutrones disponibles quedaron encerrados en núcleos de helio, con dos protones emparejados con dos neutrones. Los protones restantes se convirtieron en hidrógeno. La fracción resultante de hidrógeno a helio se determinaría por la proporción de neutrones a protones justo en el momento previo al inicio de la fusión.

La otra confirmación experimental importante de la teoría del big bang, la radiación cósmica de fondo, fue predicha por Ralph Alpher, George Gamow y Robert Herman en la Universidad de George Washington en 1948; posteriormente, en 1965, lo hicieron en forma independiente Robert Dicke, James Peebles, P. G. Roll y David Wilkinson, de la Universidad de Princeton.⁷ Ambos grupos sostuvieron que un tipo especial de radiación - denominada radiación antirradiante- se habría producido en todo el espacio cuando el universo tenía unos pocos segundos y era más joven. Esta radiación surge en cualquier sistema de partículas subatómicas que choquen entre sí a grandes velocidades, como habría sido el caso en el intenso calor del universo recién creado. En la actualidad también se producen pequeñas cantidades de radiación antirradiante, tanto en regiones aisladas como en estrellas; sin embargo, el universo está ahora demasiado frío como para producir una radiación antirradiante que llene todo el espacio. Dicha radiación puede identificarse fácilmente por su espectro universal de colores, es decir, por la cantidad de energía en cada longitud de onda. Existe un solo parámetro que puede caracterizar de manera singular la radiación antirradiante: la temperatura de la radiación. De acuerdo a cálculos teóricos, la radiación antirradiante debió haberse creado de manera uniforme a través del espacio en el universo temprano y habría continuado rebotando en partículas subatómicas

hasta que el universo alcanzó una edad de aproximadamente 300 mil años, cuando los electrones y los núcleos atómicos se combinaron para formar átomos. Después, la radiación habría viajado libremente por el espacio, apareciendo hoy con una longitud de onda dominante, que corresponde a las ondas radioeléctricas y con una temperatura de alrededor de tres grados sobre el cero absoluto. En 1965, Roll y Wilkinson, los colaboradores de Dicke, acababan de construir un aparato para rastrear sus pronosticadas ondas cósmicas radioeléctricas cuando, por casualidad, Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron la radiación en el Laboratorio Bell de Nueva Jersey. Por su descubrimiento, Penzias y Wilson recibieron el Premio Nobel en 1978.⁸ Hasta la fecha, las mediciones más precisas de la radiación cósmica de fondo provienen del Explorador de Fondo Cósmico, un satélite lanzado a fines de 1989 y que ha confirmado que el espectro de la radiación cósmica de fondo es extraordinariamente cercano al que predijo el modelo del big bang.

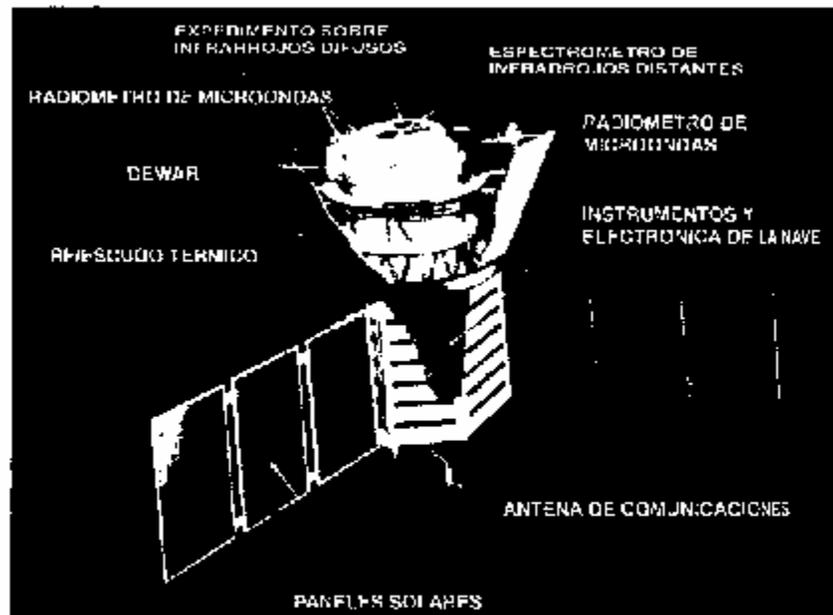


James Peebles nació en Winnipeg, Canadá, en 1935. Realizó sus estudios en la Universidad de Manitoba y en Princeton, donde actualmente se desempeña como profesor de física. Peebles ha hecho diversas contribuciones a la cosmología, entre ellas sus cálculos pioneros de acumulación gravitacional de materia. Se ha convertido en un importante teórico del modelo de "jerarquía gravitacional" de la formación de estructuras. Peebles fue discípulo de Robert Dicke.



Robert Dicke nació en St. Louis, Missouri, en 1916. Realizó sus estudios en la Universidad de Rochester y en Princeton, donde hoy es profesor emérito. Las diversas contribuciones de Dicke a la cosmología incluyen la predicción de la radiación cósmica de fondo, la primera utilización del principio antrópico y el primer planteamiento del problema de la cosmología plana. Dicke forma parte del escaso grupo de físicos que sobresalen tanto en el trabajo teórico como en la observación.

Fred Hoyle nació en Bingley, Yorkshire, Inglaterra, en 1915. Estudió en Cambridge y actualmente vive en Bournemouth, Inglaterra. Fue un pionero en el cálculo teórico de la producción de helio en el universo temprano, y también el autor del modelo de estado continuo, que rivalizó con el modelo del big bang. Defensor del modelo de estado continuo durante gran parte de su carrera, Hoyle creó la expresión *big bang* durante una serie de conversaciones radiales que sostuvo en Inglaterra a fines de la década de 1940.



El Explorador del Ruido de Fondo Cósmico (COBE), satélite lanzado en 1989 para estudiar la radiación del ruido de fondo cósmico.



Arno Penzias (en primer plano) y Robert Wilson, cerca de la antena de radio que fue la primera en detectar la radiación cósmica de fondo, en 1965.

El descubrimiento de la radiación cósmica del ruido de fondo en 1965 brindó un fuerte apoyo a la idea de que el universo fue muchísimo más caliente en el pasado. Igualmente importante es la radiación cósmica observada, que parece confirmar la hipótesis de una homogeneidad en gran escala del universo. La radiación posee la misma intensidad desde todas las direcciones en el espacio, es decir, es isotrópica. Si suponemos que no ocupamos un lugar inusual en el universo, entonces podemos deducir que la radiación cósmica de fondo es isotrópica en *cualquier punto* del universo. Esto significa que el universo era muy homogéneo la última vez que la radiación chocó con la materia, unos 300 mil años después del big bang. Si en el universo hubiera habido irregularidades o una temperatura no uniforme en dicha época, la radiación cósmica se habría dispersado de estas acumulaciones en intensidades y direcciones irregulares y hoy no parecería tan uniforme. Como ha estado viajando desde que el universo tenía sólo 300 mil años, la radiación cósmica que hoy detectamos ha viajado mucho más allá de la distancia a las galaxias visibles, lo que revela mucho acerca de la uniformidad del universo en una escala mayor.

La confirmación práctica de la homogeneidad en gran escala del universo es vital para el modelo estándar del big bang, y quizás para todos los modelos cosmológicos tratables. Ya en 1933 el cosmólogo británico Edward Arthur Milne sugirió que el supuesto de una homogeneidad en gran escala podría ser lógicamente necesario para cualquier modelo cosmológico.⁹ Milne dio a esta suposición el nombre de principio cosmológico, el que desde entonces se convirtió en el punto de partida de gran parte del trabajo teórico en cosmología, y hasta ahora ha demostrado ser una simplificación necesaria para resolver las difíciles ecuaciones de este tópico. Si las observaciones futuras ponen en duda la suposición de una homogeneidad en gran escala, las características generales del modelo del big bang todavía podrían ser correctas, pero sin duda los detalles no lo serían.

¿Por qué los científicos no asumieron inmediatamente las predicciones originales de Alpher, Gamow y Herman? (De hecho, Dicke no conocía tales predicciones y llegó a sus conclusiones en forma por completo independiente.) Pueden existir varias razones.¹⁰ Se pensaba que las ondas cósmicas radioeléctricas pronosticadas no podían detectarse con los instrumentos de que se disponía en la década de 1950. Además, como recuerdan Alpher y Herman, "algunos científicos tenían una predilección filosófica por un universo de

estado continuo".¹¹ En dicho universo, la temperatura siempre sería la misma, jamás lo bastante alta como para producir una radiación antirradiante. Finalmente, en las décadas de 1940 y 1950, la mayoría de los científicos consideraba que la cosmología era un asunto demasiado especulativo como para considerarlo con seriedad. En la práctica no existía contacto alguno entre la teoría y el experimento

Otros modelos cosmológicos

Richard Tolman, del Instituto de Tecnología de California, fue el primero que analizó a fondo una variación del modelo del big bang, el modelo del universo oscilante, a comienzos de la década de 1930. Un universo oscilante es cerrado, pero no se pierde después de colapsar, sino que inicia una nueva dilatación; el proceso de expansión y contracción se repite y pasa por numerosos ciclos. Si nuestro universo fuese oscilante, podría ser muchísimo más antiguo que su edad calculada en 10 mil millones de años, cálculo que sólo mide el tiempo transcurrido desde el inicio del último ciclo de expansión.

Este modelo presenta una dificultad evidente de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, una ley fundamental de la física que obliga a cualquier sistema aislado a adquirir un grado de desorganización cada vez mayor, hasta alcanzar un estado de máximo desorden. Después de numerosos ciclos, se esperaría que un universo oscilante fuese mucho más caótico que el universo que observamos. Tolman conocía este problema, pero sostenía que una definición de "estado de máximo desorden" sería casi imposible de aplicar al universo como un todo; la objeción quedó en la incertidumbre. Tolman llegó a la conclusión de que "sería sensato no volver a afirmar que los principios de la termodinámica exigen necesariamente un universo creado en un tiempo finito en el pasado y cuyo destino es la inactividad y la muerte".¹ Aun hoy los físicos siguen dudando si la segunda ley de la termodinámica podría descartar teóricamente un universo oscilante, o si se aplica al universo como un todo.

El auge del modelo del universo oscilante ocurrió entre fines de los años 50 y comienzos de los 60. De hecho, su preferencia por un universo oscilante llevó a Robert Dicke a predecir la existencia de la radiación cósmica de fondo. Dicke y sus colaboradores comenzaban su clásico artículo en el *Astrophysical Journal* en 1965 afirmando que un universo oscilante, con su existencia eterna, "nos libera de la necesidad de comprender el origen de la materia en cualquier punto finito en el pasado".² Tomando este modelo como hipótesis de trabajo, Dicke argumentó que si nuestro universo realmente ha atravesado numerosos ciclos de expansión y contracción, su temperatura tendría que llegar por lo menos a 10 mil millones de grados al alcanzar cada punto de contracción máxima, con el fin de desintegrar todos los elementos pesados creados en las estrellas durante el ciclo previo y reconvertir la materia del universo a hidrógeno puro. De lo contrario, las reacciones nucleares en las estrellas ya habrían transformado gran parte de la materia del universo en elementos pesados, lo que contradice las observaciones. Dicke afirmó entonces que, a una temperatura de 10 mil millones de grados, las reacciones de las partículas subatómicas serían lo bastante rápidas como para producir una radiación antirradiante. (En realidad, la producción de esta radiación *no exige* la oscilación del universo; simplemente precisa que la temperatura cósmica alguna vez haya sido suficientemente alta.)

En la década de 1960, más allá de su posible violación de la segunda ley de la termodinámica, el modelo del universo oscilante cayó en desgracia cuando el trabajo teórico de Roger Penrose y Stephen Hawking, ambos en la Universidad de Cambridge en ese momento, probó que no existía ningún mecanismo plausible capaz de producir oscilaciones. En términos específicos, Penrose y Hawking demostraron que el universo debía haberse originado a una densidad muchísimo mayor de la que se había contemplado

y propuesto para el "rebote" de cada ciclo de un universo oscilante. En realidad, el trabajo de Penrose y Hawking no eliminó los universos oscilantes; simplemente suprimió todos los modelos existentes de universos oscilantes, anulando de este modo la justificación científica para creer en ellos.

En 1948, un grupo de inquietos y jóvenes astrofísicos teóricos de la Universidad de Cambridge, insatisfechos con el modelo del big bang en cualquiera de sus formas y en busca de otras posibilidades, elaboraron el modelo del estado continuo. Este modelo cosmológico, concebido por Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle, no era precisamente una variación del modelo del big bang. Proponía que el universo en realidad no cambia con el paso del tiempo; por ejemplo, la densidad promedio de la materia no se altera con el tiempo, y la temperatura tampoco. Filosóficamente, el modelo del estado continuo de Bondi, Gold y Hoyle significó un redescubrimiento del universo estático de Aristóteles, al que se le añadía una rigurosa formulación matemática y el conocimiento de la física del siglo XX. El modelo del estado continuo se reconcilia con las observaciones de Hubble sobre el movimiento centrífugo de las galaxias, postulando que, constantemente, se crean en todo el espacio materia y galaxias nuevas, que compensan la separación de las galaxias individuales y permiten que el promedio de galaxias por unidad de volumen de espacio permanezca constante. De este modo el universo mantiene un estado continuo.³

Martin Rees nació en Inglaterra en 1942. Estudió en Cambridge, y hoy es profesor de astronomía en esa institución. El trabajo de Rees se ha relacionado con la formación y aglomeración de las galaxias y con el origen de la radiación del ruido de fondo cósmico, entre otros temas. Se distingue por su rapidez, ingenio y capacidad de retener al mismo tiempo en su cabeza diversas teorías contradictorias entre sí.



Maarten Schmidt nació en 1929 en Groningen, Holanda. Estudió en la Universidad de Groningen y en Leiden; actualmente es profesor de astronomía en el Instituto de Tecnología de California. Schmidt saltó a la fama gracias a su descubrimiento de los cuásars. Le agrada concentrarse en pocos temas y comprenderlos a cabalidad.

Maarten Schmidt nació en 1929 en Groningen, Holanda. Estudió en la Universidad de Groningen y en Leiden; actualmente es profesor de astronomía en el Instituto de Tecnología de California. Schmidt saltó a la fama gracias a su descubrimiento de los cuásars. Le agrada concentrarse en pocos temas y comprenderlos a cabalidad.

Bondi, Gold y Hoyle mencionan en sus documentos de 1948 varias razones que los llevaron a proponer este modelo. Por una parte, expresan su insatisfacción, por cuanto el modelo del big bang obliga a los físicos a aplicar a un lejano punto en el pasado las leyes de la física tal como hoy se las observa, cuando las condiciones del universo pueden haber sido totalmente distintas. En el modelo del big bang no existe forma de saber con certeza si las leyes de aquel entonces eran las mismas que consideramos hoy, pero todos los cálculos así lo suponen. Por otra parte, señalan estos científicos, un universo de estado

continuo resulta "forzoso, pues sólo en un universo de esas características existe alguna base para suponer que las leyes de la física son constantes". En el modelo del estado continuo, el universo de ayer era igual al universo de hoy. Una segunda motivación para el modelo del estado continuo era más cuantitativa: la velocidad de expansión del universo, calculada mediante las técnicas relativamente dudosas de que se disponía en la década de 1940, tradujo su edad estimada en sólo 2 mil millones de años, lo que era inferior a la edad geológica de la Tierra. Algunos lo consideraron un problema para el modelo del big bang. El modelo del estado continuo también resultó atractivo para muchos científicos, puesto que, al igual que el modelo del universo oscilante, eliminaba la necesidad de confrontar el nacimiento del universo y todas las incertidumbres y aspectos incalculables de dicho comienzo. En el modelo del estado continuo el universo no tiene principio ni fin. No es necesario especificar ni aceptar las condiciones iniciales. Asimismo, algunos físicos y astrónomos pensaban que el rango de posibilidades en un universo de esas características sería muchísimo más limitado que en el modelo del big bang y, por ende, más fácil de calcular. Esta era otra de las ventajas del modelo del estado continuo. La mayoría de los físicos prefieren las teorías que permiten una consideración y un cálculo completos. El modelo del estado continuo fue muy popular en los años 50 y a principios de los 60; se consideró el principal competidor del modelo del big bang y de su variación, el modelo del universo oscilante.

Hoy, la mayoría de los cosmólogos ha descartado el modelo del estado continuo. Además de la falta de pruebas que demuestren la creación continua de masa a partir de la nada, y de la carencia de una explicación de cómo puede ocurrir dicho proceso, el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo y otras observaciones que sugieren que el universo fue muy distinto en el pasado, han refutado el modelo. Por ejemplo, la ubicación de ciertos objetos astronómicos denominados cuásares (de *quasars*, *quasi-stellar radio sources*: "fuentes de radio cuasiestelares") sugiere enfáticamente que el universo ha cambiado con el paso del tiempo. Maarten Schmidt, del Instituto de Tecnología de California, descubrió en 1963 estas diminutas fuentes de energía tremendamente luminosas y distantes.⁴ Un cuasar típico se encuentra a una distancia de 2 a 10 mil millones de años luz y posee la luminosidad de cien galaxias. En 1965, Martin Rees y Dennis Sciama, de la Universidad de Cambridge, analizaron los datos de los cuásares conocidos hasta ese momento, y descubrieron que su número por volumen de espacio aumentaba proporcionalmente a su distancia de la Vía Láctea.⁵ Puesto que mirar a lo lejos grandes distancias es lo mismo que mirar hacia atrás en el tiempo, aquello significaba que hubo más cuásares en el pasado. Rees, Sciama y otros interpretaron sus resultados como contradictorios con la teoría del estado continuo, que exige que el universo no cambie de una época en otra y, por ende, que no pueda alterar su número de cuásares ni de galaxias ni de ninguna otra cosa.

Huelga decir que tanto el modelo del universo oscilante como el modelo del estado continuo involucran perspectivas acerca del mundo que son radicalmente diferentes a las del modelo "único" del big bang. En los dos modelos anteriores el universo no tiene principio. Como veremos en el Capítulo 10, algunos modelos cosmológicos muy recientes han incorporado la misma idea

Dificultades con el modelo del big bang

A pesar de sus éxitos, el modelo del big bang ha enfrentado una serie de dificultades. Irónicamente, uno de los aspectos más desconcertantes es por qué el universo se ve tan uniforme en gran escala. En particular, la radiación cósmica de fondo que captamos es notablemente uniforme en todas direcciones, con una variación de intensidad de menos de una parte en diez mil en distintas regiones del cielo. La homogeneidad que se observa en esta radiación indica que la última vez que chocó con el gas material del universo, unos 300 mil años después del big bang, el gas tenía una densidad y una temperatura casi parejas. Aunque el modelo del big bang *supone* dicha uniformidad, todavía falta explicarla, o por lo menos hacerla plausible.

Existen dos explicaciones posibles. O el universo *comenzó* con un alto grado de homogeneidad, o bien cualquier heterogeneidad inicial acabó por diluirse, tal como ocurre en una bañera cuando el agua fría y el agua caliente alcanzan una misma temperatura por intercambio térmico. No obstante, el intercambio de calor toma tiempo. Las regiones del espacio que produjeron la radiación cósmica, cuando el universo tenía 300 mil años, se encontraban entonces separadas por unos 50 millones de años luz, esto es, demasiado lejos para haber alcanzado a intercambiar calor y homogenizarse desde el big bang. Por consiguiente, esta segunda explicación no sirve para el modelo del big bang. En cuanto a la primera, algunos científicos la hallan poco satisfactoria porque parece evadir el problema, relegándolo a procesos desconocidos y actualmente incalculables, cualquiera sea su naturaleza, que habrían determinado las condiciones iniciales del universo. Más aún, para muchos científicos resulta poco probable que el universo se haya creado en forma tan homogénea. Como mínimo, las fluctuaciones en la materia y la energía que se producen a partir de los procesos cuánticos (los veremos más adelante) con toda seguridad habrían producido desigualdad e irregularidad en la primera etapa del universo.

Charles Misner nació en 1932 en Jackson, Michigan. Estudió en la Universidad de Notre Dame y en Princeton, y actualmente enseña física en la Universidad de Maryland, College Park. Misner fue el primero en plantear el problema del horizonte y en promover una serie de estudios cuyo objetivo era explicar las propiedades del universo en términos de procesos físicos conocidos y no a través de supuestos y condiciones iniciales ad hoc.



La compleja explicación de la uniformidad en gran escala del universo se ha denominado el *problema del horizonte*. Podemos imaginar cada punto en el espacio rodeado por un volumen esférico que podría haberse homogenizado con el punto central desde el big bang. El borde exterior de aquella esfera se denomina horizonte del punto central. Cada punto posee su propia esfera de homogenización y su propio horizonte.

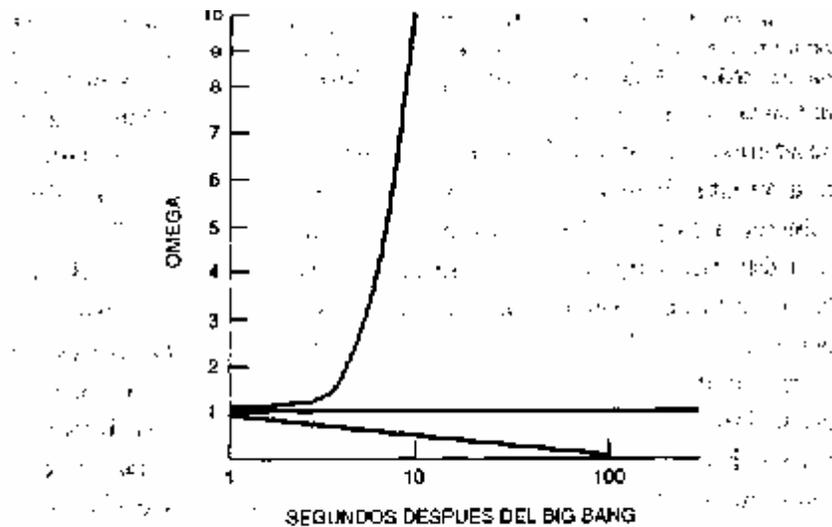
Como el intercambio de calor, o cualquier otro proceso homogenizador, no puede desplazarse a una velocidad mayor que la de la luz, en ningún momento el horizonte de un punto puede extenderse más allá de la distancia que la luz podría haber recorrido desde el big bang. Por ejemplo, el tamaño del horizonte 300 mil años después del big bang era de aproximadamente 300 mil años luz. Así, 300 mil años después de la gran explosión, cada punto en el espacio podría haberse homogenizado con una región esférica a su alrededor de una extensión de sólo 300 mil años luz. Si hubiese existido una distancia superior a los 300 mil años luz desde cualquier punto dado, ni la luz ni el calor, ni cualquier otra señal, habrían tenido el tiempo suficiente para cubrir dicha distancia desde el principio del universo. El horizonte abarca un volumen de espacio que en ocasiones se denomina el universo observable, ya que corresponde a la región de espacio que el punto central puede ver en cualquier momento dado. Hoy, el universo observable es una esfera de un radio de 10 mil millones de años luz. El horizonte de cualquier punto aumenta con el paso del tiempo, y lo mismo ocurre con el tamaño del universo observable. El "problema del horizonte" surgió porque la uniformidad de la radiación cósmica de fondo sugiere que distintas regiones del universo separadas por *algo más* que su propio horizonte (alrededor de 150 veces más) deben haber intercambiado calor.

Charles Misner, de la Universidad de Maryland, fue al parecer el primero en exponer claramente y por escrito el problema del horizonte, en 1969.¹ Aunque Einstein partía suponiendo una homogeneidad en gran escala, no habría tenido problemas en explicar cómo se produjo. Como también suponía que el universo existe desde y para siempre, dos regiones cualesquiera, arbitrariamente muy distanciadas, habrían tenido muchísimo tiempo para intercambiar calor y homogenizarse. Pero esta explicación no puede aplicarse al modelo del big bang.

Otro tema estrechamente relacionado, y más polémico, es *el problema de la cosmología plana*: ¿por qué debería estar hoy el universo tan cerca del límite entre abierto y cerrado, es decir, ser casi plano? En otras palabras, ¿por qué el valor calculado de omega -la proporción entre la densidad de masa cósmica y la densidad crítica que se requiere para cerrar el universo- se acerca hoy tanto al 1? Del modelo del big bang se seguía que con el tiempo omega debía diferir cada vez más de 1, a menos que comenzara exactamente en 1, en cuyo caso seguiría siendo 1. En un universo abierto, omega comienza siendo inferior a 1 y va disminuyendo con el tiempo; en un universo cerrado, omega empieza siendo mayor a 1 y aumenta cada vez más.

Omega es análogo a la proporción entre la energía gravitacional y la energía cinética del movimiento de una piedra que se lanza hacia arriba desde la Tierra.² Si se lanza la piedra con la velocidad crítica exacta, la proporción comenzará en 1 y se quedará en 1. Si se lanza la piedra con una velocidad inferior a la crítica, la proporción comenzará en una cifra mayor a 1 y continuará aumentando, convirtiéndose en infinita justo en el momento en que la piedra alcance la altura máxima y esté a punto de volver a caer a la Tierra. En este punto, la velocidad de la piedra es cero, su energía cinética de movimiento es cero y, por lo tanto, la proporción entre la energía gravitacional y la energía cinética es infinita. Por el contrario, si se lanza la piedra a una velocidad mayor a la crítica, la proporción comenzará en una cifra inferior a 1 y disminuirá continuamente, acercándose al cero a medida que la piedra escapa por completo a la gravedad de la Tierra y comienza a viajar por el espacio exterior. El que el omega cósmico se encuentre hoy tan cerca del 1, cuando ya ha transcurrido tanto tiempo desde el big bang, es análogo a divisar la piedra mucho tiempo después de su lanzamiento, a una enorme distancia de la Tierra, y descubrir que su energía gravitacional y su energía cinética de movimiento son casi iguales. Es muy poco probable que algo así ocurra, pues requeriría haber equilibrado ambas energías con una precisión extraordinaria en el momento del lanzamiento. Por ejemplo, si se lanza hacia arriba una piedra con una proporción inicial de energía de 0,75, dicha proporción habrá descendido a 0,1 para cuando la piedra alcance una distancia de 27 radios terrestres; para una proporción inicial de 0,9, la proporción habrá descendido a 0,1 a una distancia de 81 radios de la Tierra. Para que la piedra alcance mil veces (10^6) su

distancia inicial antes que la proporción baje a 0,1, la proporción inicial tendría que ser 0,999991. Los números tienen un comportamiento similar para las proporciones mayores a 1.



Comportamiento de omega versus tiempo para tres valores iniciales representativos: mayor a 1, 1 y menor a 1.

Los físicos consideran que las condiciones iniciales del universo quedaron establecidas cuando éste tenía aproximadamente 10^{-43} segundos. Para que el valor de omega siga oscilando entre 0,1 y 10,0 hoy, después de 10 mil millones de años y tras haber expandido el universo a 10^{30} veces su tamaño inicial en el momento del "lanzamiento", el valor inicial de omega tuvo que fluctuar entre $1 - 10^{-59}$ y $1 + 10^{-59}$. De manera equivalente, la energía cinética y la energía gravitacional del universo debieron ser inicialmente iguales a una parte en 10^{59} . ¿Qué procesos físicos pudieron haber establecido un equilibrio tan exquisito? Y hay otro enigma. Si la energía gravitacional y la cinética no son hoy día exactamente iguales, ¿por qué se están desequilibrando en este preciso momento del tiempo cósmico, justamente cuando sucede que surge el *Homo sapiens*?

Robert Dicke parece haber sido el primero en plantear claramente y poner por escrito el problema de la cosmología plana, en 1969.³ A pesar de que poco después varios cosmólogos británicos, entre ellos Brandon Carter y Stephen Hawking, lo abordaron en forma independiente, el problema sólo experimentó una vasta difusión y comprensión cuando Dicke y Peebles volvieron a exponerlo en un artículo publicado en 1979.

Existe un amplio rango de actitudes con respecto al problema de la cosmología plana. Algunos científicos consideran que el valor inicial de omega es una propiedad accidental de nuestro universo, un valor que debiera aceptarse como un hecho dado; para este grupo de cosmólogos el problema de la cosmología plana no es un problema, sino un asunto que sobrepasa el dominio de la ciencia. Otros concuerdan con Dicke y Peebles en cuanto a que las condiciones iniciales requeridas parecen demasiado especiales para ser accidentales, por lo que se precisa de una explicación física más profunda. Entre los integrantes de este último grupo se cuentan los científicos que afirman que, por alguna razón, la energía gravitacional y la energía cinética deben haberse equilibrado en forma exacta. Omega fue y es exactamente 1. Esta perspectiva requiere de la existencia de una enorme cantidad de masa no detectada. Debido a que hemos observado sólo una masa

suficiente por volumen de espacio para que omega tenga un valor cercano a 0,1, creer que omega es en verdad exactamente igual a 1 exige que en promedio exista una masa unas diez veces igual a la que se ha observado en cada año luz cúbico de espacio.

Antes de 1980, la mayoría de los cosmólogos dejaba de lado o no prestaba mucha atención al problema de la cosmología plana. Después que una importante modificación del modelo del big bang (que adoptó el nombre de modelo del universo inflacionario; lo veremos en el capítulo 10) diera una solución natural al problema, muchos científicos ahora lo consideraron relevante. Un artículo de Alan Guth sobre este nuevo modelo destina un apéndice a convencer a los escépticos de no descartar el tópico, lo que demuestra el controvertido status del problema de la cosmología plana.⁴ Aun hoy persiste el desacuerdo sobre el significado o la profundidad de dicho problema.

Otro antiguo problema cosmológico ha sido la carencia de una buena explicación para el número medio de partículas de radiación, denominadas fotones, en relación al número de bariones (ejemplos de bariones son los protones y los neutrones, que constituyen los núcleos de los átomos). No conocemos el número total de fotones o bariones en el universo, pero se puede calcular la proporción de las cantidades si se cuentan los fotones y bariones que hay en un gran volumen de espacio y después se supone que dicho volumen es típico del universo en su totalidad. La proporción calculada es de aproximadamente mil millones de fotones por cada barión. Lo que hace de esta proporción algo fundamental es que, según la teoría, debiera ser constante en el tiempo. Es una propiedad fija del universo. Pero, ¿qué determinó su valor? Como en el problema de la cosmología plana, algunos científicos invocan el accidente de las condiciones iniciales para explicar por qué la proporción entre fotones y bariones tiene el valor que tiene, afirmando que, en efecto, el número corresponde a mil millones hoy porque correspondía a mil millones entonces. Otros científicos consideran que esta cifra debería poder calcularse a partir de principios básicos. El mismo modelo del big bang no requiere que la proporción entre fotones y bariones tenga algún valor en especial, como tampoco requiere que el valor inicial de omega haya sido alguno en particular.

Finalmente, el modelo del big bang enfrenta una dificultad que hasta hace poco se consideró secundaria; se trata de un problema relacionado con la entropía del universo. En el siglo XIX, los científicos descubrieron la segunda ley de la termodinámica, que establece que cualquier sistema físico aislado sujeto a alteraciones aleatorias se tornará naturalmente más desordenado con el tiempo, es decir, que aumentará naturalmente su entropía. La entropía es una medida cuantitativa del desorden de un sistema físico. Por ejemplo, un mazo de naipes con todas las cartas dispuestas según su palo es algo muy organizado; se dice que un mazo tan bien ordenado tiene una baja entropía. Por el contrario, un mazo que se ha barajado varias veces, con sus naipes ocupando posiciones aleatorias, posee una alta entropía. Intuitivamente, la segunda ley de la termodinámica tiene sentido. Si comenzamos con un mazo de naipes ordenados según su palo y número y los dejamos caer al suelo, existe una mayor probabilidad de que al reunir nuevamente los naipes el orden resulte alterado. Por otra parte, si comenzamos con un mazo ordenado al azar y lo barajamos diez veces, existen muy pocas posibilidades de que en el mazo los naipes queden dispuestos en orden ascendente. De manera similar, los huevos suelen romperse, pero jamás retoman su forma, las estelas formadas por un barco en el mar se desvanecen y jamás regresan, las habitaciones desocupadas acumulan polvo y nunca se limpian solas. Cualquier sistema aislado evoluciona en una sola dirección, del orden al desorden.

En una serie de trabajos que inició en 1974, Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, aplicó la segunda ley de la termodinámica al universo como un todo. Más específicamente, Penrose⁵ evaluó la entropía o nivel de desorden del universo observable y descubrió que era increíblemente pequeña en comparación con el valor que teóricamente podría tener (por ejemplo, si gran parte de la masa cósmica tuviese la forma de un enorme agujero negro y no de galaxias). Al analizar la evolución cósmica hacia

atrás en el tiempo, la segunda ley de la termodinámica determina que el universo comenzó con un grado de orden aún mayor, esto es, una entropía todavía menor. Penrose y otros consideran misterioso que el universo haya sido creado bajo una condición de orden tan extremo -como sujeto a una escala real-, y piensan que cualquier teoría cosmológica exitosa debería en último término explicar este problema de la entropía. El modelo del big bang, en su forma actual, no lo hace; en realidad, no dice nada acerca de las condiciones iniciales del universo

Estructuras en gran escala y materia oscura

El supuesto básico de la homogeneidad que subyace al modelo del big bang es evidentemente falso para nuestro universo cercano. Este no presenta un fluido uniforme e indiferenciado que lo colme de modo regular. Por el contrario, es bastante desigual. La materia se aglomera en galaxias y las galaxias forman racimos de galaxias, y así sucesivamente. Los astrónomos denominaron "estructuras" a estas acumulaciones de galaxias. Existen muchísimas estructuras de muy diversos tamaños, y los astrónomos desean comprender la naturaleza de estas estructuras y cómo se formaron. Hasta que no se conozcan las respuestas, será muy difícil decidir si las inhomogeneidades que se han observado son simplemente detalles de un panorama estándar o, por el contrario, pistas que conducen a un cuadro radicalmente diferente.

Uno de los primeros científicos del siglo XX que sugirieron una distribución no uniforme de la masa en el universo fue C. V. L. Charlier, quien consideró la posibilidad de un cosmos jerárquico donde que la estructura y la densidad promedio cambian a medida que se pasa a escalas cada vez mayores. En 1933, Harlow Shapley, del Observatorio del Harvard College, manifestó que las irregularidades observadas en las posiciones de las galaxias eran demasiado pronunciadas como para constituir aglomeraciones accidentales en un fondo básicamente uniforme, y sugirió una cierta "tendencia evolutiva en el sistema metagaláctico". En 1938, Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, sugirió que las aglomeraciones de galaxias, de un tamaño aproximado de 10 mil millones de años luz, se consideraran las unidades básicas de materia del universo.

Roger Penrose nació en 1931 en Colchester, Inglaterra. Estudió en el University College de Londres y en Cambridge, y actualmente es profesor de matemáticas en la Universidad de Oxford. Entre sus contribuciones a la cosmología se cuentan el trabajo con Hawking sobre los teoremas de singularidad cosmológica y su planteamiento del problema de la entropía en cosmología. Penrose es una de las personas matemáticamente más refinadas que jamás hayan trabajado en relatividad general y cosmología, y es famoso por su descubrimiento de las baldosas Penrose, que son dos formas geométricas que pueden calzar entre sí una y otra vez hasta cubrir completamente un plano bidimensional, sin repetir ningún patrón.



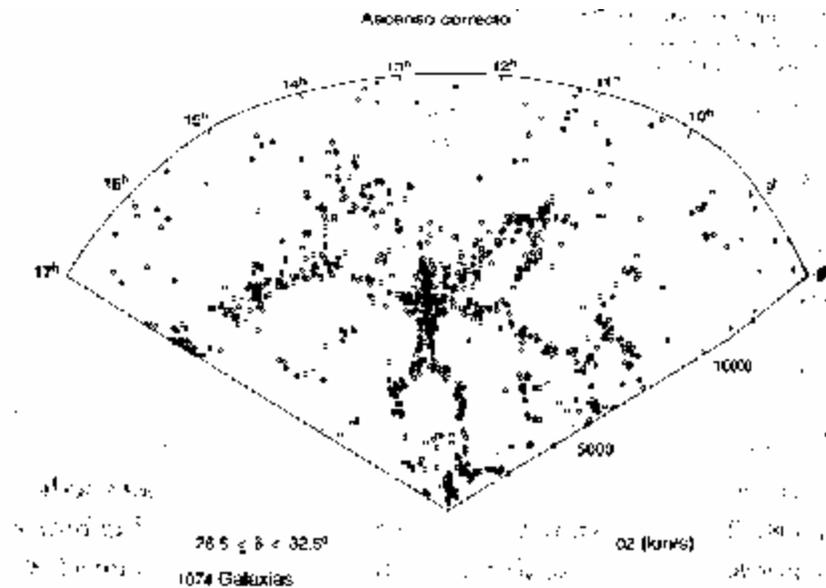
ROGER PENROSE

Gérard de Vaucouleurs nació en 1918 en París. Estudió en la Universidad de París y hoy es profesor de astronomía en la Universidad de Texas, en Austin. Sus contribuciones a la cosmología incluyen la identificación de la superaglomeración local, una compilación de catálogos de referencia de galaxias, la defensa de una distribución jerárquica de la materia cósmica, y nuevas medidas de la velocidad de expansión del universo. Adquirió fama por sus controvertidas posturas que al final resultaban ser verdaderas.

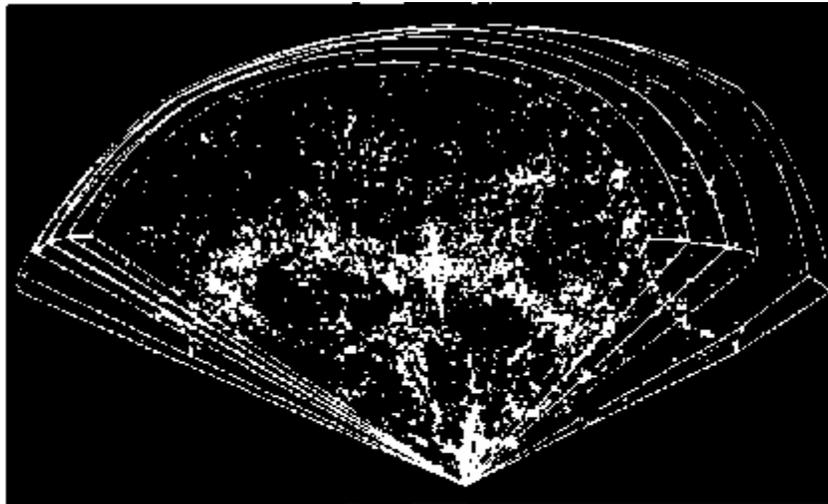


En 1953, Gérard de Vaucouleurs, quien entonces trabajaba en el Observatorio Nacional Australiano, descubrió que las galaxias que se encuentran a una distancia aproximada de 200 millones de años luz de la aglomeración de galaxias de Virgo -que incluye a la Vía Láctea- no eran mucho más que un disco gigante. A esta gran congregación de galaxias él lo llamó "superaglomerado de galaxias". Con este descubrimiento y su trabajo posterior, De Vaucouleurs desafió el supuesto de la homogeneidad del universo; de hecho, propuso un universo jerárquico, donde pequeñas estructuras forman parte de estructuras mayores, que a su vez forman parte de estructuras más grandes, y así indefinidamente. En este cuadro, no sólo el universo es inhomogéneo, sino que tampoco puede definirse una densidad promedio de la materia. Mientras mayor es el volumen que se considera para medir la densidad, menor resulta esta última. Si un modelo de este tipo fuese correcto, de las mediciones de nuestros alrededores sólo podríamos extraer escasas conclusiones acerca del comportamiento general del universo.¹

En estos últimos años se han encontrado nuevas evidencias de inhomogeneidades. En 1975, en el contexto del estudio de grandes aglomeraciones de galaxias, G. Chincarini y H. J. Rood descubrieron irregularidades en la distribución de la materia sobre distancias de aproximadamente 20 millones de años luz. En un simposio realizado por la Unión Astronómica Internacional en 1977, W. G. Tifft y S. A. Gregory -y, en forma independiente, los estonios M. Joveer y J. Einasto- informaron de sus observaciones de aglomeraciones y cadenas de galaxias, así como de "vacíos" sin ninguna galaxia, que se extendían sobre distancias de varios cientos de millones de años luz. En 1978, Gregory y L. A. Thompson hallaron pruebas de una gran aglomeración de galaxias, a la que llamaron la superconglomerado Coma, con un espacio relativamente vacío a su alrededor. En 1981, Robert Kirshner, August Oemler Jr., Paul Schechter y Stephen Shectman descubrieron un gigantesco vacío en el espacio en dirección a la constelación del Boyero, con un diámetro de aproximadamente 100 millones de años luz. Pareciera que pocas galaxias habitan este enorme espacio vacío. (Por comparación, en nuestro propio vecindario cósmico podemos encontrar una galaxia cada pocos millones de años luz.) Por la misma época, Gregory, Thompson y Tifft documentaron un gran número de galaxias aparentemente dispuestas en una larga cadena que se extendía unos 100 millones de años luz: la cadena de Perseo-Piscis, previamente identificada por Joveer y Einasto. En 1985, H. P. Haynes y R. Giovanelli, de la Universidad de Cornell, estudiaron e interpretaron esta cadena de galaxias con mayor detenimiento.



Una de las primeras perspectivas del desplazamiento al rojo, del Centro de Astrofísica conjunto de Harvard y el Instituto Smithsonian (1986), que muestra las posiciones de 1.074 galaxias en un sector del espacio. Cada círculo corresponde a una galaxia. Nuestra posición está en el vértice de la figura en forma de trozo de pastel. La dirección radial mide en forma directa la velocidad de alejamiento, que corresponde a la distancia radial en un universo homogéneo. La galaxia más lejana que aquí se incluye está a una distancia aproximada de 500 millones de años luz.



Una perspectiva más amplia del desplazamiento al rojo, del Centro de Astrofísica conjunto de Harvard y el Instituto Smithsonian (1989), catalogada por Margaret Geller y John Huchra, que muestra las posiciones de 3.962 galaxias en varios sectores adyacentes del espacio. La galaxia más lejana está a una distancia aproximada de 500 millones de años luz. A la aglomeración horizontal casi continua de galaxias que se extiende a través del diagrama se le ha denominado la "Gran Muralla", y constituye la mayor estructura coherente de galaxias observada hasta ahora.

En 1986, observaciones realizadas por Margaret Geller, John Huchra y Valerie de Lapparent, del Centro Astrofísico conjunto de Harvard y el Instituto Smithsonian, revelaron que en determinada región del espacio las galaxias parecían descansar sobre la superficie de estructuras en forma de burbuja de un tamaño aproximado de 100 millones de años luz, con vacíos al interior de las burbujas. Estas nuevas observaciones se contaron entre las primeras en registrar -en tres dimensiones- la localización una gran muestra relacionada de galaxias (1.100 galaxias en la investigación de 1986). Habiendo ampliado su estudio a varios miles de galaxias, en 1989 Geller y Huchra dieron a conocer pruebas de una "muralla" de galaxias de una longitud de por lo menos 500 millones de años luz.² Estos novedosos mapas tridimensionales de grandes modelos de galaxias, denominados perspectivas del desplazamiento al rojo, se han obtenido gracias a los adelantos tecnológicos que permiten calcular desplazamientos de galaxias mediante procedimientos rápidos y automatizados. Como ya dijimos, si se supone que el universo se está expandiendo de un modo relativamente homogéneo y uniforme, el desplazamiento al rojo de una galaxia se traduce en una distancia aproximada, lo que nos proporciona la evasiva tercera dimensión para la posición de una galaxia. En la próxima década, y utilizando telescopios diseñados específicamente para ello, los astrónomos esperan iniciar estudios del desplazamiento al rojo de un millón de galaxias.

Un trabajo muy reciente -fruto de la colaboración entre el Queen Mary y el Westfield College, las universidades de Durham y Oxford, todos de Inglaterra, y la Universidad de Toronto, Canadá; lo veremos más adelante- sugiere que las estructuras cósmicas halladas en unas cuantas regiones seleccionadas del espacio podrían ser típicas. También parece claro que en cada catastro de galaxias usualmente se encuentran estructuras de *algún tipo* a la mayor escala posible; es decir, un catastro que comprende una región de 100 millones de años luz por lo general encuentra alguna cadena o disco o *ausencia* de galaxias que en tamaño se extienden a unos 100 millones de años luz; el catastro de una región de 200 millones de años luz halla estructuras de 200 millones de años luz, y así sucesivamente. En este momento se están realizando perspectivas de galaxias que se extienden a mil millones de años luz. Queda por ver si estos estudios también mostrarán modelos y estructuras reconocibles en tan gigantescas regiones.

A algunos cosmólogos les preocupa que las inhomogeneidades observadas en regiones de varios cientos de millones de años luz pudieran extenderse en forma *indefinida* hasta dimensiones aún mayores, lo que amenazaría las bases del modelo del big bang, especialmente el supuesto de una homogeneidad en gran escala. Perspectivas recientes de desplazamiento al rojo -obra de T. J. Broadhurst y R. S. Ellis, de la Universidad de Durham; David C. Koo, del Observatorio Lick; Richard Kron, de la Universidad de Chicago, y Alex S. Szalay, de la Universidad Johns Hopkins y la Universidad Eotvos Lorand de Budapest- están desafiando esta consideración de una jerarquía de estructuras en todas las escalas. Estas perspectivas son básicamente unidimensionales; calculan los desplazamientos al rojo de galaxias sólo a lo largo de una línea centrífuga a través del espacio y determinan las posiciones de las galaxias a lo largo de dicha línea, como cuentas en un hilo. Para compensar su falta de amplitud, estas perspectivas en "haz" llegan a enormes profundidades, hasta varios miles de millones de años luz. Las perspectivas en haz sugieren una estructura cósmica extremadamente regular y organizada, de apariencia reticular, con galaxias agrupadas cada 400 millones de años luz. Aunque esta regularidad probablemente no sea general, según este cuadro el universo aparecería como homogéneo al hacer mediciones sobre regiones mucho más extensas que 400 millones de años luz. Urgen nuevos estudios, más amplios y más completos, que confirmen o rechacen estos importantes y misteriosos resultados.



Margaret Geller nació en 1947 en Ithaca, Nueva York. Estudió en la Universidad de California y en Princeton, y hoy enseña astronomía en Harvard y trabaja en el Observatorio Astrofísico del Instituto Smithsonian. Junto con John Huchra, ha dirigido los estudios de perspectivas de desplazamiento al rojo del Centro de Astrofísica, y ha encontrado evidencia de algunas galaxias que parecen situadas sobre la superficie de estructuras en forma de burbuja, de un diámetro aproximado de 100 millones de años luz. Atribuye su gran capacidad de visualizar planos tridimensionales a la preparación que recibió de su padre durante su infancia. Margaret Geller fue alumna de James Peebles.

Muchos científicos, encabezados por James Peebles de la Universidad de Princeton,³ se han convencido -gracias a mediciones de objetos que emiten ondas de radio muy débiles y a la emisión cósmica casi uniforme de rayos X- de que la materia del universo se torna uniforme al promediarla sobre varios miles de millones de años luz o más. Aquello podría corresponder a la distancia a la que ya no se logra distinguir cada grano de arena en la playa. La mayoría de los cosmólogos confía en que el universo debe ser homogéneo al observarlo en escalas de 10 mil millones de años luz, puesto que la radiación cósmica de fondo es uniforme y proviene de dichas distancias. Si, en el futuro, encontramos filamentos, burbujas y vacíos con proporciones de unos cuantos miles de millones de años luz -varias veces más grandes que los catalogados hasta hoy-, entonces se presentaría una contradicción directa con la uniformidad de la materia que la radiación cósmica de fondo implica. El modelo del big bang podría hacer crisis. En la actualidad, muchos cosmólogos piensan que las inhomogeneidades observadas en la distribución de las galaxias sin duda tienen implicaciones en la formación y aglomeración de galaxias, pero aún no entran en conflicto con el modelo del big bang y su correspondiente supuesto de homogeneidad a escalas muy grandes. En cualquier caso, hay que considerar las estructuras en gran escala.



John Huchra nació en 1948 en Jersey City, Nueva Jersey. Estudió en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y en el Instituto de Tecnología de California, y hoy es profesor de astronomía en Harvard; además, trabaja en el Observatorio Astrofísico del Instituto Smithsonian. Junto con Margaret Geller, Huchra ha dirigido los estudios de perspectivas de desplazamiento al rojo del Centro de Astrofísica, y ha encontrado pruebas de que algunas galaxias descansan sobre la superficie de estructuras en forma de burbuja, de un diámetro aproximado de 100 millones de años luz. Huchra es un observador activo y posee más experiencia práctica con los telescopios que cualquier otra persona de su edad en el mundo.



Sandra Faber nació en 1944 en Boston, Massachusetts. Estudió en el Swarthmore College y en la Universidad de Harvard, y hoy es profesora de astronomía en la Universidad de California en Santa Cruz. Ella descubrió un nuevo método para determinar las distancias a las galaxias, y fue uno de los "Siete Samuráis" que descubrieron el movimiento en gran escala de las galaxias hacia el Gran Atractor. Sandra Faber fue alumna de Vera Rubin.

En 1982, Faber descubrió que las galaxias se mueven hacia un punto en el cielo que se llama el Gran Atractor. Este punto está a unos 100 millones de años luz de la Tierra.

Vera Rubin nació en 1928 y se crió en el área de Washington D.C. Estudió en Vassar y en las universidades de Cornell y Georgetown, y hoy integra el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie Institution de Washington. Fue una de las primeras en informar acerca de los movimientos peculiares de las galaxias. Asimismo realizó uno de los primeros estudios observacionales que indicaban claramente la presencia de materia oscura. En 1965, se convirtió en la primera mujer a la que se le permitió realizar observaciones desde el Observatorio de Palomar.



En 1970, Rubin descubrió que las galaxias se mueven hacia un punto en el cielo que se llama el Gran Atractor. Este punto está a unos 100 millones de años luz de la Tierra.

Alan Dressler nació en 1948 en Cincinnati, Ohio. Estudió en la Universidad de California en Berkeley y en la de Santa Cruz, y hoy integra el equipo de los observatorios de Monte Wilson y Las Campanas, de la Carnegie Institution de Washington. Sus investigaciones incluyen trabajos sobre la formación y evolución de las galaxias, la estructura en gran escala del universo y los movimientos de las galaxias. Dressler es uno de los "Siete Samuráis".



En relación con las observaciones de la estructura cósmica encontramos la velocidad peculiar de las galaxias, esto es, velocidades que se desvían de la velocidad de alejamiento esperada en un universo en expansión uniforme e invariable. Como ya dijimos, cuando el material del universo es irregular, la velocidad centrífuga de una galaxia deja de ser estrictamente proporcional a su distancia. Los movimientos de las galaxias se ven alterados por la irregularidad de la gravedad que sienten. De este modo, las velocidades propias de las galaxias constituyen un signo indirecto de inhomogeneidades en la distribución de masa cósmica. Para medir la velocidad propia de una galaxia, un científico debe conocer su distancia y su desplazamiento al rojo. Este desplazamiento al rojo de la galaxia sólo informa de su velocidad total. Como vimos, para saber qué proporción de esta velocidad es "normal" y cuánta es "peculiar", debe conocerse la velocidad normal a esa distancia (es decir, la distancia multiplicada por la velocidad de expansión del universo: la constante de Hubble). Suponiendo que ya se conoce la constante de Hubble, ahora hay que saber la distancia a la galaxia. Las medidas de distancia son entonces fundamentales en todos los estudios de velocidades peculiares. No se puede suponer que la distancia es proporcional al desplazamiento al rojo, puesto que este supuesto es equivalente al de la homogeneidad, que es justamente lo que se está poniendo a prueba.

Ya en 1951 Vera Rubin, de la Carnegie Institution de Washington, fue la precursora de los estudios relacionados con las velocidades peculiares de las galaxias; a mediados de la década de 1970 los retomó junto a N. Thonnard, W. K. Ford Jr. y M. S. Roberts.⁴ En 1987, utilizando métodos perfeccionados para medir distancias cósmicas, los llamados "Siete Samurais" (David Burstein, de la Universidad del Estado de Arizona; Roger Davies, de los Observatorios Nacionales de Astronomía Óptica; Alan Dressler, de la Carnegie Institution de Washington; Sandra Faber, de la Universidad de California en Santa Cruz; Donald Lynden-Bell, de la Universidad de Cambridge; Robert J. Terlevich, del Observatorio Real de Greenwich, y Gary Wegner, del Dartmouth College)⁵ hallaron pruebas de que una gran aglomeración de galaxias, a una distancia aproximada de 200 millones de años luz de nosotros, se ha desviado considerablemente de sus movimientos, como si fuese atraída por alguna gran masa. La velocidad de este movimiento propio corresponde a cerca del 10% de la velocidad de expansión a esa distancia, y el gran cúmulo de masa que se considera responsable de la desviación ha sido denominado el Gran Atractor. Este, que es claramente una importante inhomogeneidad en la distribución de masa cósmica, parece ser una concentración de masa que se extiende sobre varios cientos de millones de años luz.

Los movimientos peculiares importantes, como los que descubrieron los "Siete Samurais", además de complicar una medición rigurosa de la velocidad general de expansión del universo, también podrían ser difíciles de comprender en sí mismos. Por otra parte, las velocidades peculiares proporcionan una herramienta única para cartografiar las inhomogeneidades de la masa en el universo. En 1989, Edmund Bertschinger, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Avishai Dekel, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, junto a sus colaboradores comenzaron a desarrollar un nuevo método teórico para deducir la distribución de la masa cósmica en una región del espacio, dadas las velocidades peculiares observadas de las galaxias en dicha región. El método Bertschinger-Dekel⁶ supone que la causa de estas velocidades observadas es la gravedad irregular de las inhomogeneidades de la masa. Sería muy interesante saber si la distribución de masa así deducida coincide con la masa que vemos en las mismas galaxias. Las inhomogeneidades observadas de la materia -racimos de galaxias, cadenas, murallas y vacíos-, más la gravedad, pueden explicar por lo menos algunas de las velocidades peculiares de las galaxias. Cualquier gran cúmulo de galaxias atraerá gravitacionalmente a otras galaxias a su alrededor, y los movimientos resultantes aparecerán como velocidades peculiares. La pregunta es si las inhomogeneidades observadas de la materia pueden explicar *del todo* las velocidades peculiares observadas. Si no es así, entonces deben existir algunas inhomogeneidades previas, no observadas,

como el Gran Atractor, o bien alguna forma de materia que es invisible, o quizás se trate de otras fuerzas que actúan junto a la gravedad. Cualquiera de estas posibilidades enviaría a los teóricos de regreso a la pizarra.

Además del nuevo trabajo teórico, también se hallan en curso nuevos estudios observacionales sobre las velocidades peculiares. Tal como las perspectivas de desplazamiento al rojo, estas nuevas investigaciones necesitan cubrir regiones más amplias del cielo y penetrar a mayor distancia. El objetivo para el futuro próximo es cartografiar las velocidades peculiares de unas 15 mil galaxias, hasta una distancia de cerca de 300 millones de años luz. Como ya dijimos, las mediciones independientes de distancias cósmicas son fundamentales para estos estudios, y para todos los estudios de estructuras en gran escala.

Jeremiah Ostriker nació en 1937 en la ciudad de Nueva York. Estudió en Harvard y en la Universidad de Chicago y hoy es profesor de Ciencia Astrofísica en Princeton. Las contribuciones de Ostriker a la cosmología incluyen la predicción de la existencia de materia oscura y la proposición de que enormes explosiones, y la posterior compresión de gas, podrían tener un papel en la formación de galaxias. Ostriker es ingenioso, rápido y capaz de saltar de una teoría a otra sin perderse.

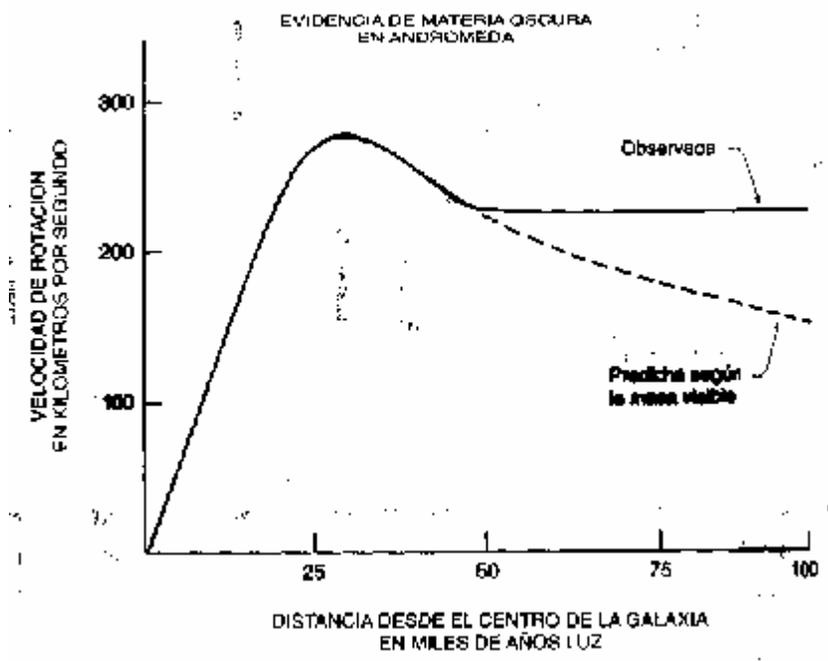


Existe un obstáculo para comprender la distribución de la masa en el universo y los movimientos de las galaxias: cerca del 90% de la masa detectada en el universo es invisible. No emite ninguna radiación -no hay luz óptica ni ondas de radio, tampoco radiación infrarroja ni ultravioleta ni rayos X-; es verdaderamente invisible. Esta materia detectada, pero oculta, se denomina materia oscura. Sabemos que existe, pues hemos detectado sus efectos gravitacionales sobre las estrellas y galaxias que observamos; sin embargo, no tenemos idea de qué es. El astrónomo suizo-norteamericano Fritz Zwicky descubrió el problema en 1933. Logró precisar la masa de una aglomeración de galaxias que orbitaban unas alrededor de otras calculando la cantidad de gravedad necesaria para mantener unido al grupo. La masa total que se deducía de este proceso era unas veinte veces mayor que la masa justificada por las estrellas visibles en el cúmulo.

El asombroso descubrimiento de Zwicky no se apreció durante muchos años. En 1973, Jeremiah Ostriker y James Peebles, de Princeton, llevaron a cabo algunos análisis teóricos en los que sugerían que la cantidad de materia visible en los discos de típicas galaxias en rotación no era suficiente para evitar que dichas galaxias se separasen o cambiasen drásticamente su forma. La observación de estas galaxias en silenciosa rotación sugirió, por lo tanto, que sus regiones externas contenían un halo de masa que no se ha visto y que es comparable con la masa visible del disco, lo que mantiene la forma de la galaxia gracias a su gravedad. Al año siguiente, Ostriker, Peebles y Amos Yahil recopilieron observaciones de masa deducida y masa visible de diversos sistemas astronómicos, desde galaxias individuales hasta grandes cúmulos de galaxias, y afirmaron que entre un 90 y un 95% de la masa del universo es invisible. J. Einasto, A. Kaasik y E. Saar llegaron en forma independiente a la misma conclusión. Cuatro años más tarde, Vera Rubin y sus colegas de la Carnegie Institution de Washington, y Albert Bosma, de la Universidad de Groningen, calcularon la masa de varias galaxias midiendo la velocidad a la que el gas órbita alrededor del centro de cada galaxia. Los investigadores descubrieron una evidencia directa y contundente de la existencia de por lo menos cinco veces más masa en las galaxias espirales que aquella que se explica por las estrellas visibles.⁷ Se ha

repetido mediciones similares para grupos de galaxias que orbitan una alrededor de la otra, y se ha encontrado diez veces más materia oscura que materia visible.

Es importante distinguir esta materia oscura, que no se ha visto pero se ha *detectado* gracias a estudios gravitacionales, de la masa que tampoco se ha visto pero que han planteado como *hipótesis* los científicos que piensan que ω es igual a 1. A esta última la llamaremos "masa faltante". Para resumir, digamos que la masa visible que emite luz proporciona una densidad de materia que sólo es suficiente para igualar ω a 0,01. Si incluimos la masa invisible pero detectada por sus efectos gravitacionales -la materia oscura-, se alcanza un ω de aproximadamente 0,1. Para que ω sea igual a 1 se requiere diez veces más masa, y ésta no sólo no se ha visto sino que no se ha detectado: la masa faltante. Sabemos que la materia oscura existe. De la existencia de la masa faltante no hay certeza alguna



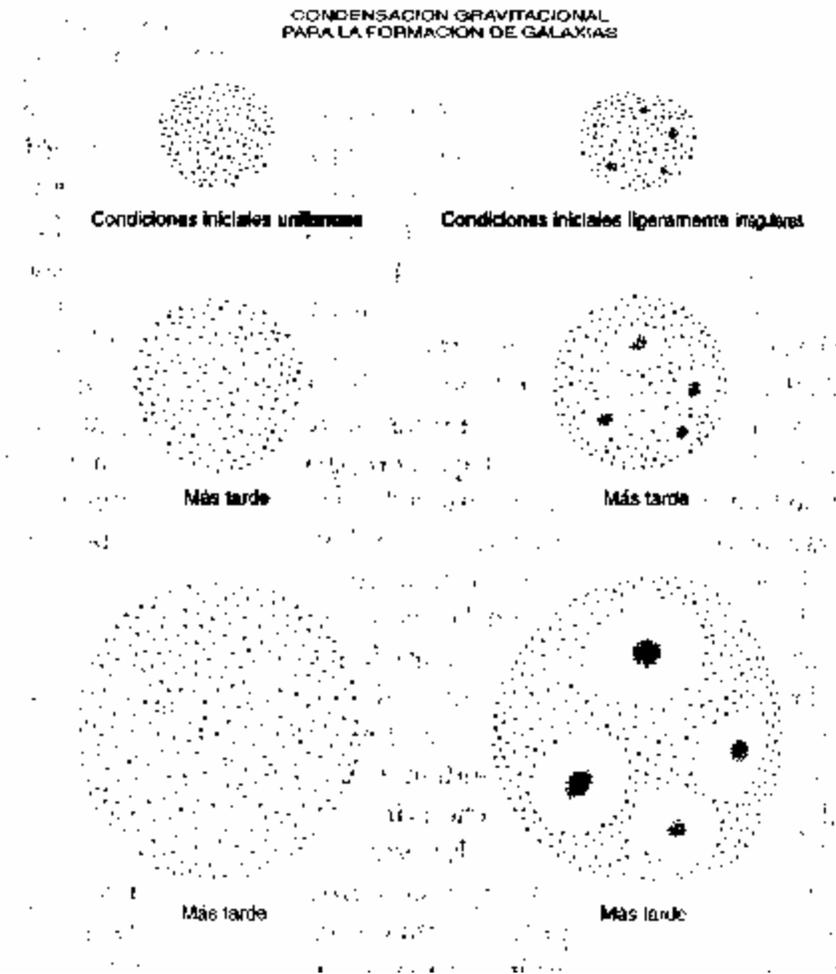
¿Cuál es la naturaleza de la materia oscura? ¿Consta de numerosos planetas, de estrellas colapsadas -los agujeros negros-, de partículas subatómicas que sólo interactúan con otra materia a través de la gravedad, o quizás de algún tipo nuevo y desconocido de partícula subatómica? La materia oscura, según lo que sea, podría modificar nuestras teorías sobre las partículas subatómicas o sobre la formación de galaxias; para comprender a cabalidad el cosmos resulta imprescindible identificarla. En estos últimos años, los astrónomos no dejan de inquietarse porque han comprendido que la materia luminosa que han observado y examinado durante siglos constituye un simple décimo de la totalidad.

El desconcierto no sólo se relaciona con la desconocida identidad de la materia oscura; tampoco se conocen su cantidad y su disposición en el espacio, lo que frustra cualquier intento por comprender por qué la masa luminosa está dispuesta del modo como lo está. Un cuidadoso ajuste de las velocidades peculiares de las galaxias con las inhomogeneidades *observadas* en la materia luminosa debería revelar la presencia de materia oscura, la que interviene en las velocidades peculiares a través de sus efectos gravitacionales. Los resultados preliminares de Bertschinger, Dekel, Faber y otros, quienes utilizaron los métodos ya mencionados, sugieren que la materia oscura podría estar distribuida de la misma forma que la materia visible. Mapas detallados de las posiciones y

los movimientos de las galaxias, sobre grandes escalas, permitirán confeccionar mejores mapas de la localización de la materia oscura.

Existen otras maneras de sondear la materia oscura. Una de las técnicas más recientes, y posiblemente muy importante, utiliza el fenómeno de la "lente gravitacional".⁸ Einstein, en su teoría de la gravedad, señaló que la luz debería verse afectada por la gravedad del mismo modo que la materia. Así, la luz de un objeto astronómico distante - como un cuasar- que viaje hacia la Tierra debería experimentar desviaciones debidas a cualquier tipo de masa que encuentre en su trayecto. Esta masa interpuesta puede actuar como una lente, distorsionando y dividiendo la imagen del cuasar. Aunque la masa interpuesta sea totalmente invisible, sus efectos gravitacionales no lo son. Por medio de un acucioso análisis de las distorsiones de las imágenes del cuasar, los astrónomos teóricos pueden restituir muchas de las propiedades de la lente gravitacional interpuesta, incluyendo su distribución en el espacio y su masa total. Las lentes gravitacionales se descubrieron el año 1979; desde entonces se ha encontrado cerca de una docena. Hace muy poco, Anthony Tyson, de AT&T Bell Laboratories, y sus colaboradores, utilizaron el fenómeno de las lentes gravitacionales para trazar la distribución de la materia oscura en cúmulos de galaxias. Métodos similares constituirán una poderosa herramienta en la próxima década.

La materia oscura podría ser algo mundano, como los grandes planetas, y habría que descartar esta posibilidad antes de analizar opciones más exóticas. Algunos astrónomos han propuesto que la materia oscura está compuesta de grandes planetas con masas de entre una milésima y una décima de la masa de nuestro Sol. La lenta contracción de estos objetos debería generar un calor suficiente para emitir una radiación infrarroja -la radiación con longitudes de onda mayores que las de la luz visible- de baja intensidad. Un telescopio infrarrojo altamente sensible podría detectar estos planetas masivos; su instalación es inminente.



Dejando de lado por un momento la incertidumbre de la materia oscura, se han propuesto diversas teorías para la formación de galaxias y su distribución en el espacio. Cualquiera de estas teorías debe especificar dos aspectos: las posiciones iniciales y los movimientos de cúmulos irregulares en la distribución de una masa cósmica que de otro modo sería uniforme, y las fuerzas que actúan posteriormente sobre estos cúmulos. Los científicos siempre han supuesto que es principalmente la fuerza de gravedad la que actúa sobre los cúmulos irregulares iniciales.

En 1902, el astrónomo británico James Jeans esbozó tempranamente un escenario, el modelo de la jerarquía gravitacional, para un universo estático; en 1933, Georges Lemaître lo modificó para un universo en expansión. Jeans y Lemaître suponían que primero la masa era casi uniforme, excepto en ciertos puntos en que se amontonaba muy levemente, como sucede con pequeñas ondas sobre la superficie de una laguna; no obstante, dejaron el origen de estas ondas para una teoría posterior. En un lugar donde la masa estuviese amontonada, habría una gravedad levemente mayor, con lo cual la masa cercana se juntaría aún más, atrayendo mayor cantidad de gas circundante. La gravedad aumentaría y el proceso seguiría su curso hasta la formación de una fuerte concentración de masa. Las ondas y cúmulos irregulares iniciales de pequeña magnitud producirían galaxias individuales, las más grandes producirían aglomeraciones y cúmulos de galaxias y así, con una jerarquía de estructuras. Las localizaciones y magnitudes de las ondas iniciales, junto con la acción posterior de la gravedad, explicarían entonces la situación de las galaxias en el espacio. En estos últimos años, comenzando con la obra de James

Peebles a mediados de la década de 1960, esta teoría se ha tornado cuantitativa, pero requiere de una especificación de los tamaños y las fuerzas de las ondas iniciales.⁹

Las investigaciones teóricas modernas sobre el modelo de jerarquía gravitacional han realizado simulaciones computacionales del desarrollo de cúmulos irregulares en un universo en expansión. En estas simulaciones denominadas simulaciones de cuerpo N, se dispone en posiciones iniciales 10 mil a 10 millones de puntos de masa, cada uno en representación de una galaxia o porción de una galaxia, se programa una velocidad centrífuga inicial correspondiente a la expansión del universo, y se les deja interactuar mediante su gravedad mutua. También puede agregarse materia oscura y materia faltante, conformando alguna fracción supuesta de la masa total y distribuida de alguna forma también supuesta. Las galaxias hipotéticas se desplazan por la pantalla del computador, gravitan una hacia la otra y forman aglomeraciones, cúmulos y vacíos. No hace mucho, R. Y. Gen y Jeremiah Ostriker, de Princeton, más sus colaboradores, añadieron los efectos de la presión del gas a estas simulaciones computacionales.¹⁰ Tales efectos -que surgen, en parte, de que las galaxias individuales no constituyen puntos de masa sino que tienen una extensión finita en el espacio- son relevantes sobre distancias de 100 millones de años luz, y menores.



Simulaciones computacionales de un cúmulo irregular de masa cósmica, realizadas por James M. Celso y Edmund Bertschinger, del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts). Los cálculos suponen el modelo de la materia oscura fría, que a su vez supone el valor de 1 para omega. La figura es una instantánea de un momento en que ha ocurrido una evolución y un agrupamiento importantes, y se piensa que corresponde a la época actual. Hay cerca de 17 millones de partículas, cada una con una masa galáctica aproximada de 0,001. Cada pequeño punto visible es una galaxia; cada mancha grande representa varios cientos de galaxias. La región aquí enmarcada cubre una distancia máxima de unos 150 millones de años luz. Los cálculos se realizaron en un supercomputador IBM 3090 en el Cornell National Supercomputer Facility.

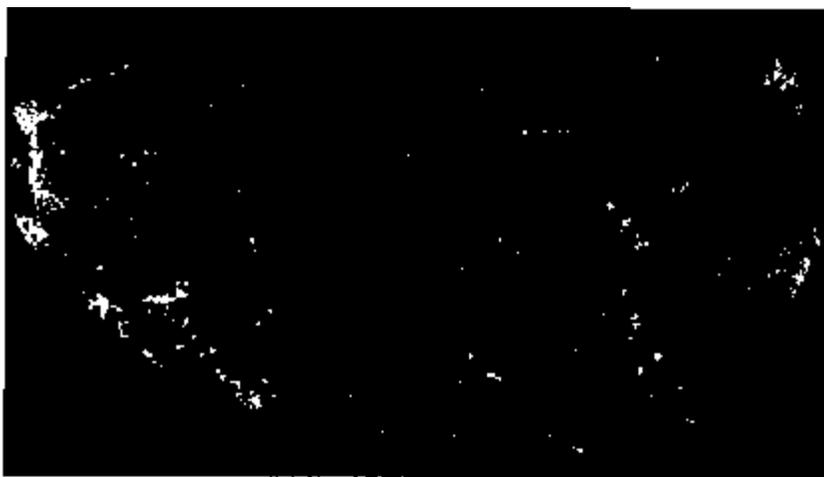
Joseph Silk, entonces en Harvard, estimó en 1967 que los cúmulos irregulares de materia inicialmente inferiores a unas mil veces la masa visible de una galaxia podrían no ser capaces de mantenerse unidas bajo los efectos de la radiación.¹¹ Este resultado se incorporó al modelo *panqueque*, desarrollado en Moscú a comienzos de la década de 1970 por Y. B. Zel'dovich, A. G. Doroshkevich y otros.¹² En este modelo, los primeros cúmulos irregulares de masa que comenzaban a formarse eran muy grandes y, por supuesto, había muchos. A medida que se enfriaban iban colapsando bajo su propio peso, y la desintegración tendía a ser más rápida en una dirección. El resultado sería un delgado *panqueque* de gas, que luego se dividiría en múltiples fragmentos, cada uno de los cuales constituiría una galaxia individual. En esta imagen, las galaxias tenderían a estar distribuidas en capas, siguiendo la forma de su nube de gas materna.

La proposición de la jerarquía gravitacional es un modelo de abajo hacia arriba para la formación de estructuras cósmicas, en que primero se forman pequeños cúmulos irregulares de materia que van creciendo cada vez más. En el modelo del *panqueque*, por el contrario, primero se forman grandes agregados de materia que luego se dividen en estructuras más pequeñas.

En todo caso, cualquier teoría convincente sobre la formación de estructuras debe explicar la distribución observada de las galaxias. En especial, los cosmólogos deben explicar por qué muchas galaxias están situadas en capas relativamente delgadas (aquí, "delgadas" significa que el ancho es muy inferior a la altura o la profundidad, a pesar de que ese ancho pueda ser de un millón de años luz). El modelo del big bang supone que la gravedad es la fuerza principal para determinar la evolución y la estructura del universo. Y la opinión convencional sostiene que la gravedad produce por sí misma rasgos que varían con fluidez en las localizaciones de las masas, con anchos, alturas y profundidades comparables para cualquier agrupamiento de galaxias. Según esta perspectiva, se necesitan otros fenómenos físicos o condiciones iniciales especiales para obtener características definidas en la distribución de la masa, como las cuerdas o las capas delgadas de galaxias.

Las simulaciones computacionales han puesto en tela de juicio la opinión convencional, puesto que demuestran que las características definidas pueden en efecto presentarse si las inhomogeneidades iniciales son suficientemente pronunciadas en fragmentos pequeños y distancias breves. Estos nuevos cálculos, efectuados por Changbom Park y Richard Gott en Princeton, Edmund Bertschinger y James Gelb en el MIT, y Jens Villumsen en la Universidad del Estado de Ohio, utilizan varios millones de puntos de masa en una versión del modelo de jerarquía gravitacional denominado "modelo de la materia oscura fría".¹³ (La mayor simulación realizada hasta ahora, obra de Gelb y Bertschinger, emplea 17 millones de partículas y fue realizada en un supercomputador IBM 3090.)

El modelo de la materia oscura fría ha sido durante la última década el principal candidato para explicar la formación de galaxias y otras estructuras de gran escala. Se basa en el modelo del universo inflacionario (lo veremos en el Capítulo 10), que exige que Ω sea igual a 1 y que especifica las inhomogeneidades iniciales en el universo recién creado. El nombre del modelo proviene del supuesto que las partículas de materia oscura -cualquiera sea su naturaleza- se desplazan lentamente, es decir están frías, y por ello son fácilmente desviadas por la gravedad. Muchos teóricos que trabajan en el problema de la estructura en gran escala del universo han adoptado el modelo de la materia oscura fría como punto de partida. Sin embargo, recientemente las observaciones han puesto en duda severa y quizás fatalmente este modelo. En 1990, S. J. Maddox, G. Efstathiou, W. Sutherland y J. Loveday, de la Universidad de Oxford, catalogaron la posición bidimensional (sin datos de profundidad ni desplazamiento al rojo) de 2,5 millones de galaxias en el cielo austral -el mayor catastro de galaxias jamás realizado-, y sostienen haber visto demasiados cúmulos irregulares de galaxias en gran escala como para ser explicados por el modelo de la materia oscura fría. En enero de 1991, un grupo de científicos del Queen Mary and Westfield College y las universidades de Durham, Oxford y Toronto analizaron la posición tridimensional de unas dos mil galaxias distribuidas en todo el firmamento. Este catastro galáctico, único en su género pues combina la información del desplazamiento al rojo con una amplísima cobertura del cielo, sugiere con gran fuerza la existencia de más aglomeraciones de galaxias en escalas que superan por 30 millones de años luz lo que puede explicar el modelo de la materia oscura fría. Estas nuevas observaciones de inhomogeneidades sustanciales en gran escala confirman el trabajo realizado en 1983 por Neta Bahcall, de Princeton, y Raymond Soneira, de los AT&T Bell Laboratories. Bahcall y Soneira descubrieron cúmulos de galaxias a escalas de varios cientos de millones de años luz, que muestran mayor acumulación que la que podría explicar el modelo de la materia oscura fría.¹⁴ El Gran Atractor, descubierto varios años más tarde, también comprende inhomogeneidades de masa en escalas para las que el modelo de la materia oscura fría ya no es válido. Considerando todas estas observaciones, la mayoría de los astrónomos piensa que este modelo está hoy en serias dificultades.



La distribución de dos millones de galaxias en un área que cubre el 10% del cielo en el hemisferio sur, catastro reciente realizado por Steve Maddox y sus colaboradores en la Universidad de Oxford. Las posiciones bidimensionales de las galaxias fueron registradas por una máquina automatizada de exploración controlada por computador (no se incluyen datos del desplazamiento al rojo ni tampoco las distancias). Cada punto blanco indica más de 20 galaxias; cada punto gris indica entre 1 y 19 galaxias. Los cuadrados negros son obra del procedimiento de registro; otras áreas negras son ausencias reales de galaxias. Los pequeños fragmentos brillantes son cúmulos de galaxias individuales. Las áreas luminosas más grandes y alargadas son superconglomerados y filamentos. El aspecto moteado del modelo general se debe a la aglomeración de galaxias en pequeña escala.

Como ya dijimos, algunos científicos consideran que las inhomogeneidades observadas, y en especial su forma, requieren de una explicación que comprenda otras fuerzas físicas además de la gravedad, o bien condiciones iniciales especiales. En 1981, por ejemplo, Jeremiah Ostriker, de Princeton, y Lennox Cowie, de la Universidad de Hawaii, propusieron que la presión de gas, generada por las explosiones de las estrellas, puede haber sido la fuerza principal en la formación y la aglomeración de galaxias. Mucho antes, los soviéticos Doroshkevich, Zel'dovich y Novikov habían propuesto una idea similar. Estas ondas de presión podrían desplazarse hacia afuera a partir de diversos centros de explosiones, expulsando todo el gas desde una cavidad esférica y depositándolo en el borde, donde podrían formarse entonces las galaxias. Pero, por lo visto, ni siquiera esta explicación no gravitacional de la distribución observada de las galaxias puede aclarar las inhomogeneidades en escalas de hasta 30 millones de años luz y mayores.

Finalmente, está la radiación cósmica de fondo. No importa que la materia del universo esté o no esparcida en forma uniforme se la considera en escalas de miles de millones de años luz; ciertamente es irregular y está estructurada en escalas más pequeñas. Si las estructuras observadas han crecido a partir de pequeños cúmulos irregulares en el pasado ya lejano, como lo exige tanto el modelo del panqueque como el modelo de jerarquía gravitacional, entonces aquellos cúmulos iniciales deben haber producido una cierta irregularidad en la radiación cósmica de fondo. De hecho, todas las teorías actuales acerca de la formación de estructuras cósmicas exigen dicha irregularidad.

No obstante, hasta el momento no se ha observado irregularidad alguna. A partir de las mediciones del satélite COBE y de otras mediciones nuevas efectuadas por varios grupos en Estados Unidos, los astrónomos han determinado que cualquier variación en la intensidad de la radiación cósmica de fondo debe ser menor de varias partes en 100 mil.¹⁵

Las antiguas teorías de la formación de las galaxias han quedado obsoletas. Afortunadamente para los teóricos, las nuevas teorías, que requieren de grandes cantidades de masa faltante, predicen una irregularidad notablemente inferior en la radiación cósmica de fondo. Estas teorías nuevas todavía resultan sustentables. En la próxima década, los detectores que en este momento se están desarrollando poseerán la sensibilidad necesaria para desafiarlas: variaciones de una parte de un millón. Si al aumentar estas sensibilidades no se encuentra ninguna irregularidad en la radiación cósmica de fondo, también estas nuevas teorías enfrentarán un grave problema. (Las observaciones más recientes revelan una cierta irregularidad en el nivel de una parte en 100 mil -todo un alivio para los teóricos-, pero aún no se han sometido a un análisis completo.) En estos últimos años, los astrónomos se han estado ocupando cada vez más de conciliar la uniformidad de la radiación cósmica de fondo con la acumulación de la materia circundante.

Actualmente, el campo más activo dentro de la investigación cosmológica es la estructura en gran escala del universo. Con todas las dificultades mencionadas, la mayoría de los cosmólogos considera que *ningún* modelo actual es satisfactorio. El mismo modelo del big bang podría correr peligro. Se comprueben o no que los modelos actuales son adecuados, por primera vez la teoría y la observación de estructuras en gran escala se han acercado lo suficiente como para confrontarse. Para la mayoría de la gente, el primer lugar de la lista de los problemas pendientes en cosmología lo ocupa la comprensión, tanto teórica como observacional, de la estructura en gran escala del universo.¹⁶

Admitidas las burbujas, las murallas y las cuerdas de galaxias, no debemos olvidar que el universo todavía es notablemente regular, comparado con lo que podría ser. La densidad de las galaxias y la velocidad de expansión del universo son más bien similares en toda dirección. Y la intensidad de la radiación cósmica de fondo que nos llega varía menos de una parte en diez mil a medida que nuestros radiotelescopios recorren la esfera celestial. Por supuesto que los cosmólogos deben explicar por qué las galaxias se acumulan como lo hacen, pero también deben explicar por qué el panorama global es tan uniforme.

Instrumentos y tecnología

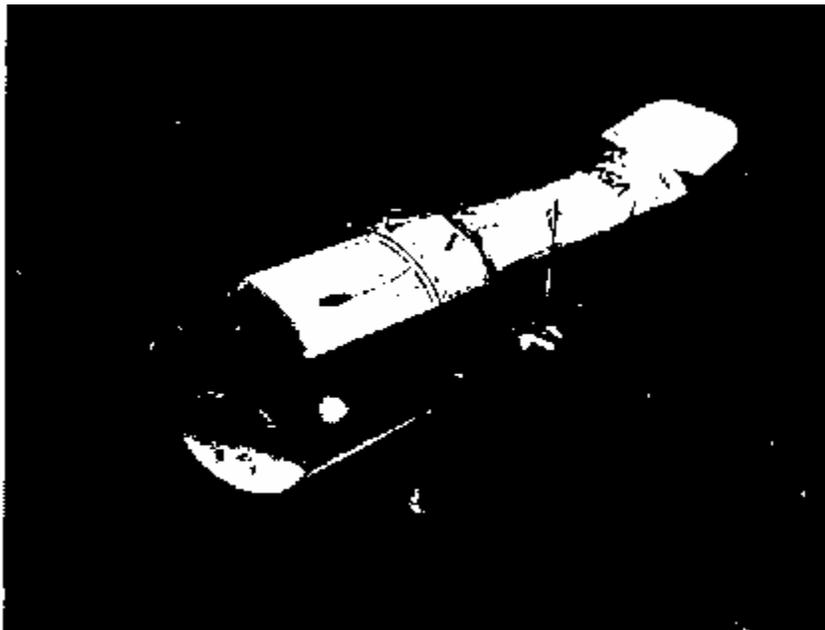
Casi no nos hemos referido a la importancia de los instrumentos y los aparatos en astronomía; sin embargo, la tecnología impulsó gran parte del notable progreso de la década de 1980 en cartografía de las localizaciones y los movimientos de galaxias. Nuevos computadores y equipos electrónicos de grabación y captación de luz permiten ahora grabar imágenes y colores de galaxias de forma más ágil, y digitalizarlos y procesarlos según procedimientos automatizados. En efecto, gran parte de los avances en todos los campos de la astronomía han contado con la inestimable ayuda de los instrumentos y la tecnología.

Para ilustrar la revolución tecnológica en astronomía, consideremos en primer lugar la astronomía óptica. La mayoría de los objetos astronómicos emite luz en diferentes longitudes de onda que son menores o mayores que las que el ojo humano puede detectar. La luz óptica es la luz que podemos ver.

Detectar una fuente de luz supone dos pasos fundamentales: captar la luz y registrarla. En nuestro propio ojo, la pupila capta la luz y la retina la registra. Los telescopios se inventaron para captar más luz que el ojo humano. Uno de los primeros grandes telescopios de Estados Unidos, el telescopio de cien pulgadas de Monte Wilson, California, se construyó alrededor de 1920 y en él trabajaron Edwin Hubble y otros. Las cien pulgadas se refieren al diámetro de su abertura. Con una pupila tan grande, un telescopio puede reunir muchísima más luz y, por lo tanto, observar objetos mucho más tenues que lo que el ojo humano es capaz de ver. Específicamente, al duplicar el diámetro de la abertura de un telescopio se cuadruplica la cantidad de luz que éste recibe, lo que le permite distinguir objetos cuatro veces más tenues. En Monte Palomar, California, se asienta un telescopio de doscientas pulgadas que por lo menos hasta 1991 fue el mayor telescopio de Estados Unidos. Su construcción se completó en 1949. Para comienzos de la década de 1990 los astrónomos tenían planificado poner a punto unos cuantos telescopios nuevos, con diámetros que oscilan entre trescientas y cuatrocientas pulgadas. El primero de estos nuevos y gigantescos telescopios, el Keck, de 396 pulgadas (diez metros), se asentará en Hawaii. Durante la primavera [boreal] de 1990, el telescopio espacial Hubble fue puesto en órbita alrededor de la Tierra, donde resulta inmune a los efectos distorsionadores y difusores de la atmósfera. Desafortunadamente, existe un defecto en los espejos de este telescopio; cuando se repare, el Hubble podrá captar detalles de un ángulo de apenas 0,00003 grado, equivalente al ancho de un centavo a una distancia de 40 kilómetros.



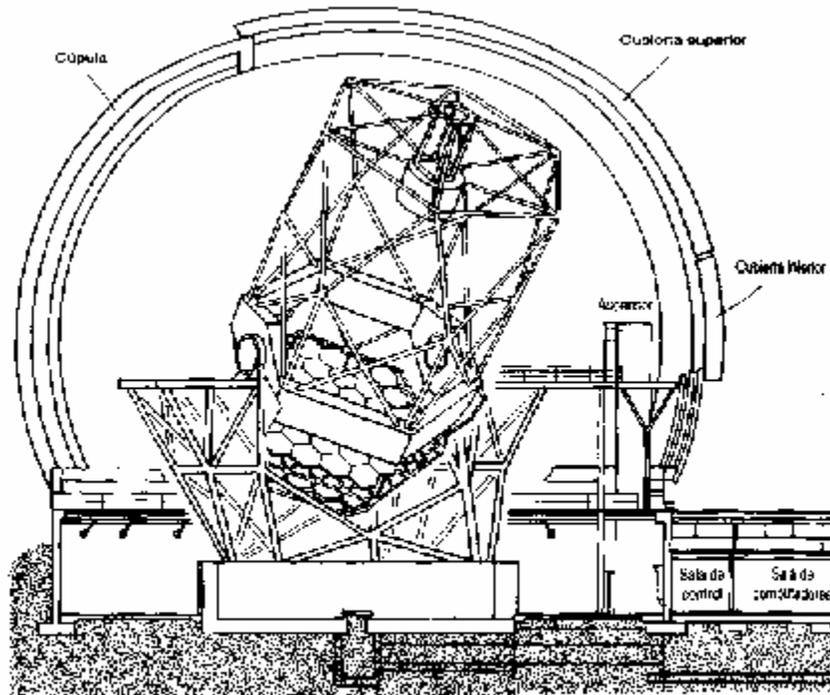
El telescopio Hale, de doscientas pulgadas, en Monte Palomar, iluminado por la Luna.



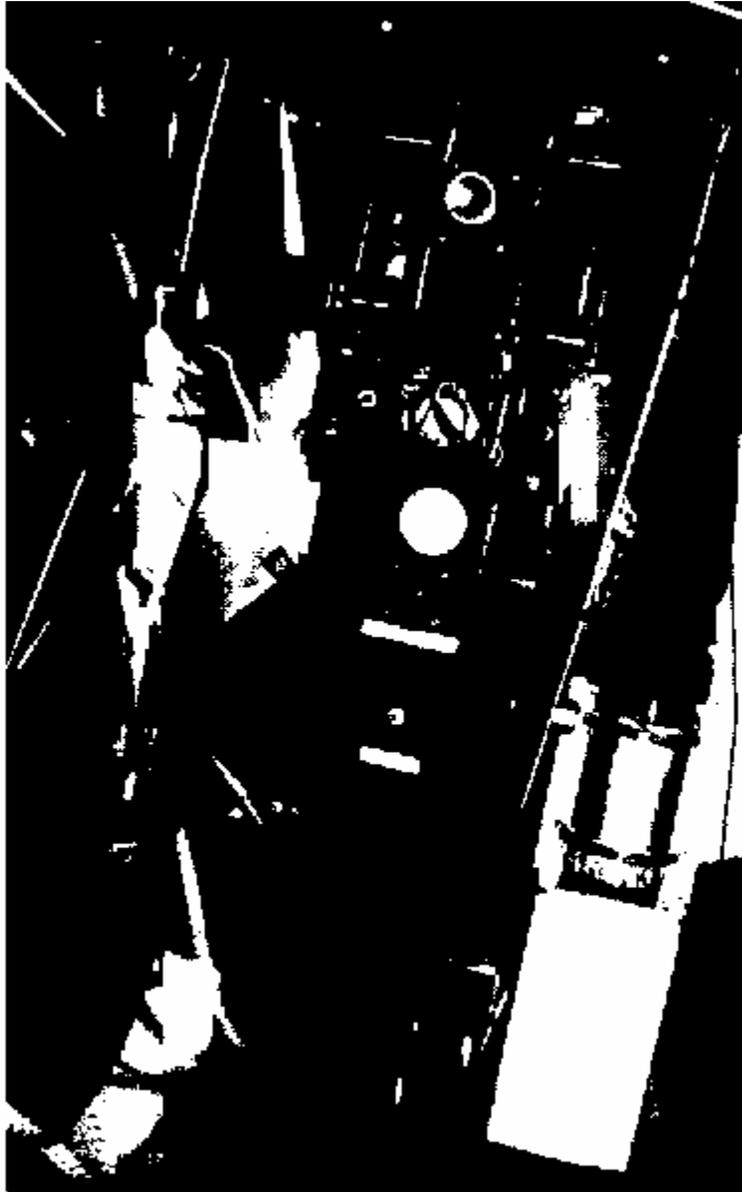
El telescopio espacial Hubble, lanzado en la primavera [boreal] de 1990

Hasta hace poco, la luz proveniente de los objetos astronómicos se registraba en una placa fotográfica situada en la parte posterior del telescopio. Pero los granos de una

emulsión fotográfica sólo responden a cerca de un 1% de la luz que nos llega. Para registrar la débil luminosidad de una galaxia distante se necesitaban largos tiempos de exposición, lo que hacía difícil la tarea de realizar grandes catastros de galaxias. A comienzos de la década de 1960, a los telescopios se les equipó con el primer dispositivo electrónico generador de imágenes, el tubo de imagen, que se sitúa sobre la placa fotográfica y amplía enormemente la luz que ingresa. La placa fotográfica continúa limitándose a registrar la luz, pero ésta entra en tales cantidades que el tiempo de exposición se reduce unas diez veces. El tubo de imagen fue el primer adelanto realmente grande en el campo de la tecnología.



Dibujo en perspectiva del telescopio Keck, de diez metros, situado en Mauna Kea, Hawaii.



La "máquina-z", un detector digital diseñado por Stephen Sheerman y utilizado para registrar los desplazamientos al rojo de galaxias mediante un proceso automatizado.

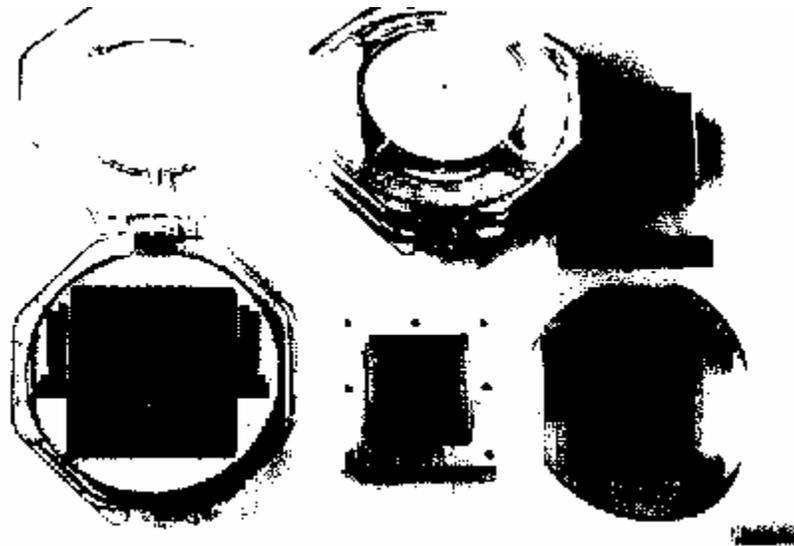
El siguiente avance tuvo lugar entre 1970 y 1972, cuando se reemplazó la placa fotográfica por un detector digital dirigido por un computador. Estos dispositivos fueron desarrollados en forma independiente por John B. Oke, del Instituto de Tecnología de California; Alexander Boksenberg, del Observatorio Real de Greenwich, y Joseph Wampler y Lloyd Robinson, del Observatorio Lick de la Universidad de California en Santa Cruz. Un detector digital traduce la luz a señales eléctricas, y no a granos oscurecidos sobre una placa fotográfica. Las señales eléctricas pueden digitalizarse y almacenarse en un computador, y estos datos almacenados permiten una fácil manipulación.

Por ejemplo, si se sabe que la imagen de una galaxia distante fue parcialmente oscurecida por la luz de una estrella situada delante, el computador puede eliminar electrónicamente la luz no deseada y reconstruir una imagen clara de aquella galaxia. Los detectores digitales nacieron, en parte, gracias a la revolución en la tecnología computacional que significó la aparición del microchip a fines de la década de 1960. En la

segunda mitad de la década de 1970, Stephen Shectman, de los observatorios de Monte Wilson y Las Campanas, diseñó un detector digital económico y simple, que fue reproducido en varios otros observatorios. Se le llama "máquina z" o shectógrafo, y se ha utilizado, por ejemplo, en el estudio de desplazamiento al rojo del Centro de Astrofísica.

Un dispositivo reciente de alta tecnología, que transformará la astronomía óptica, es el dispositivo de carga acoplada (CCD). El CCD es un detector digital tan eficaz y sensible que no requiere de ningún tubo de imagen. En efecto, los dispositivos de carga acoplada representan un mejoramiento adicional, de un factor de cinco o diez, sobre los tubos de imagen en el tiempo de exposición necesario. Los CCD reemplazan tanto a las antiguas placas fotográficas como al tubo de imagen; se descubrieron en 1969 en los Laboratorios Bell, y el trabajo conjunto de James Gunn, de Princeton, y James Westphal, del Instituto de Tecnología de California, permitió en gran parte introducirlos en la astronomía.

Otro dispositivo de alta tecnología es la fibra óptica, que se utilizó por primera vez en 1985. En ella, la luz del telescopio se canaliza en numerosas fibras de vidrio y cada una transporta la luz detectada desde un objeto individual, como una galaxia, y la conduce a un dispositivo aparte para someterla a análisis. De este modo se puede registrar en forma simultánea los colores y los desplazamientos al rojo de gran cantidad de galaxias. Cada fibra de vidrio es un tubo largo y delgado, cuyo diámetro mide aproximadamente una centésima de pulgada. Por lo general, un telescopio cuenta con unas cien fibras de vidrio, lo que le permite analizar al mismo tiempo unas cien galaxias diferentes.



Varios dispositivos de carga acoplada (CCD), que reemplazaron tanto a la placa fotográfica como al tubo de imagen.



James Gunn nació en 1938 en Livingstone, Texas. Estudió en la Universidad de Rice y en el Instituto de Tecnología de California; actualmente es profesor de astrofísica en Princeton. Al igual que Dicke, Gunn es excepcional como observador y también como teórico. Ha diseñado y fabricado dispositivos altamente sensibles para registrar la luz y, con otros, ha pronosticado una relación entre los tipos de partículas subatómicas posibles y la abundancia de helio cósmico.

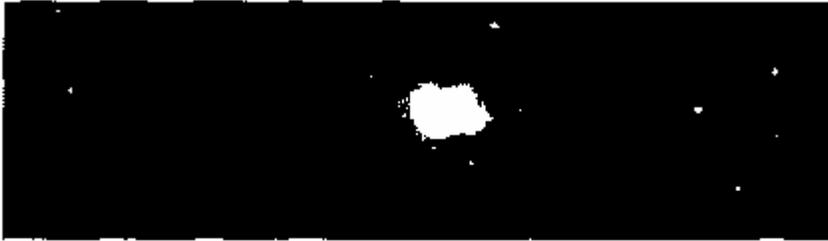
La última innovación electrónica, aún en desarrollo, es la "óptica adaptativa". Se trata de un mecanismo electrónico de retroalimentación, capaz de corregir los efectos distorsionadores de la atmósfera terrestre, y que por lo tanto permite la obtención de imágenes mucho más nítidas de objetos astronómicos. La atmósfera de la Tierra parece estar constantemente titilando -a causa de bolsones móviles de aire y cambios de temperatura- y este brillo tenue hace que los rayos de luz que atraviesan la atmósfera se inclinen en una dirección y luego en otra. En efecto, la atmósfera actúa como una lente que cambia muy rápidamente, distorsionando y desenfocando las imágenes. En la óptica adaptativa, unas almohadillas motorizadas situadas detrás del espejo secundario del telescopio readecuan constantemente la superficie del espejo para contrarrestar el efecto de desenfoco de la atmósfera. Un computador, que analiza la imagen de una "estrella guía" en el mismo campo visual al que esté apuntando el telescopio, transmite las instrucciones a las almohadillas. Si no existiera distorsión atmosférica, la imagen de una estrella debería verse como un solo punto de luz. Al analizar en cuánto la imagen real de la estrella guía se diferencia de un punto, el computador puede deducir la distorsión de la atmósfera e indicar a las almohadillas cuánto alterar el espejo para recuperar una imagen nítida de la estrella guía y de todos los objetos cercanos a ella. Las correcciones deben realizarse a gran velocidad, puesto que la atmósfera cambia rápidamente. En la práctica, el computador vuelve a analizar la imagen de la estrella guía y transmite nuevas instrucciones entre 0,01 y 0,1 segundo.

Una consecuencia importante de la incorporación de estos nuevos instrumentos de alta tecnología es que los vastos programas observacionales, que alguna vez requirieron de grandes telescopios, hoy pueden efectuarse con telescopios de tamaño moderado. Dada la gran demanda por los grandes telescopios, la posibilidad de realizar un proyecto de largo aliento en un telescopio más pequeño y asequible puede marcar la diferencia entre realizarlo o no.

Hasta aquí sólo hemos considerado instrumentos que registran la luz óptica, que es la única luz que los astrónomos pudieron detectar durante miles de años. Sin embargo, existen nuevos tipos de telescopios e instrumentos capaces de detectar radiación invisible al ojo humano. En efecto, la luz óptica es sólo una pequeña fracción del espectro electromagnético. La radiación infrarroja posee longitudes de onda más largas que la luz óptica, y las ondas de radio longitudes de onda más largas todavía. En el otro extremo del espectro, con longitudes de onda más cortas que la luz visible (óptica), están la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, en una serie de longitudes de onda cada vez más cortas. Aun cuando estas radiaciones tienen distinta denominación, todas constituyen una misma forma de energía y se diferencian sólo por sus longitudes de onda. En la región visible del espectro electromagnético, las distintas longitudes de onda corresponden a los colores. La luz azul posee la longitud de onda más corta de luz visible; la luz roja, la más larga.

En la década de 1930, la aparición de nuevos dispositivos de comunicación permitió la recepción de ondas de radio desde el espacio. Estas ondas fueron la primera forma de radiación invisible que los instrumentos humanos detectaron. Las antenas parabólicas de

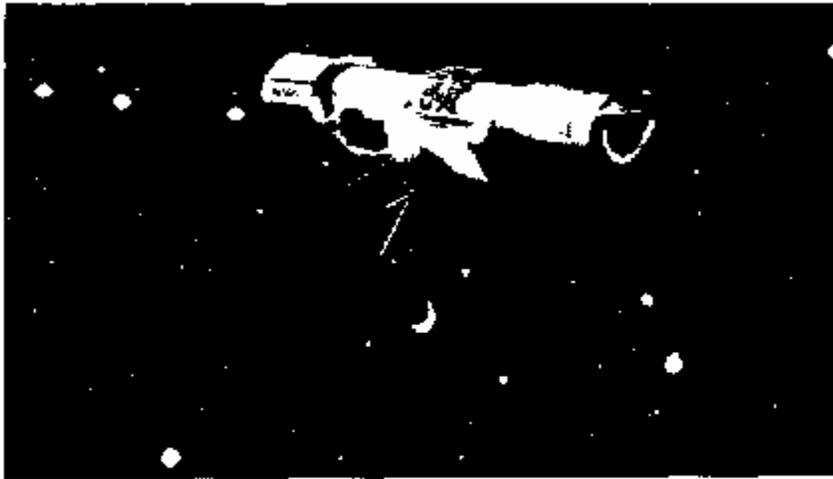
radio son muy comunes en la actualidad. El radiotelescopio más grande del mundo de una sola unidad está en el Observatorio de Arecibo, en Puerto Rico. Se trata de un gigantesco plato de 305 metros de diámetro, fabricado con paneles de aluminio perforados, que atrapa las ondas de radio que llegan a la Tierra. Desafortunadamente, las ondas de radio y la luz óptica constituyen las únicas radiaciones que atraviesan libremente la atmósfera terrestre, sin sufrir absorción alguna (también lo hacen algunas longitudes de onda de otras radiaciones). Para detectar otras formas de radiación electromagnética, los instrumentos deben situarse por sobre la atmósfera de la Tierra.



Fotografía infrarroja de la Vía Láctea, obtenida gracias al "experimento de fondo infrarrojo difuso" del satélite CORE. La Tierra se encuentra en el plano del disco y forma parte de él.

Desde la década de 1940, una serie de cohetes y satélites han registrado la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta y los rayos X del espacio. Estas radiaciones, todas invisibles para el ojo humano, han revelado características completamente nuevas de numerosos objetos astronómicos y han anunciado algunos objetos hasta entonces desconocidos. Además del problema logístico que supone traspasar la atmósfera, cada radiación requiere de un tipo diferente de instrumento para detectarla.

El Observatorio espacial Einstein de Rayos X, que orbitó alrededor de la Tierra desde 1978 hasta 1981, es un ejemplo de los nuevos instrumentos astronómicos situados en el espacio. Esta instalación disponía de espejos especialmente diseñados para enfocar los rayos X entrantes y formar imágenes de objetos astronómicos en "luz de rayos X". Para la última década del siglo se planifica un sucesor del Observatorio Einstein, la Instalación Avanzada de Astrofísica de Rayos X, o AXAF. Este satélite también sería capaz de enfocar rayos X, y tendría un poder de resolución angular diez veces mayor y una sensibilidad cien veces mayor que su predecesor. Otro instrumento reciente lanzado al espacio es el Satélite Astronómico Infrarrojo, puesto en órbita terrestre a mediados de la década de 1980. Diversos tipos de moléculas en el espacio revelan su identidad mediante su emisión infrarroja. Para la década de 1990, los astrónomos esperan lanzar un satélite infrarrojo más avanzado, la Instalación Telescópica Espacial Infrarroja (SIRTF), que tendrá una resolución angular diez veces superior y una sensibilidad de *varios miles a un millón de veces* mayor que la de su predecesor.



Dibujo de la Instalación Avanzada de Astrofísica de Rayos X (AXAF), en proyecto.



Dibujo de la Instalación Telescópica Espacial Infrarroja (SIRTF), en proyecto.

Los computadores miniaturizados situados a bordo de estos satélites orbitales controlan el programa de observaciones de los detectores, enfocándolos en distintas direcciones en diferentes momentos. Una vez que un telescopio orbital ha captado imágenes, los computadores y otros dispositivos de alta tecnología transmiten esas imágenes a la Tierra. Ya no se dejan caer carretes de película a la Tierra. Las imágenes y los datos captados por el telescopio se registran en forma de impulsos eléctricos, se digitalizan y, posteriormente, se les transmite por radio a la Tierra.

Condiciones iniciales y cosmología cuántica

Las condiciones iniciales juegan un papel singular en cosmología. En general, las condiciones iniciales y las leyes de la naturaleza constituyen las dos partes esenciales de cualquier cálculo físico. Las condiciones iniciales muestran la disposición de las fuerzas y las partículas al iniciarse un experimento. Las leyes indican lo que sucede. Por ejemplo, los movimientos de las bolas sobre una mesa de billar dependen tanto de las leyes de la mecánica como de sus posiciones y velocidades iniciales. Aun cuando estas condiciones iniciales deben especificarse al principio de un experimento, también pueden calcularse a partir de sucesos previos. En el caso de las bolas de billar, su disposición inicial es el resultado de una disposición previa, que en último término es el resultado de cómo el taco golpeó la primera bola. De este modo, las condiciones iniciales de un experimento son las condiciones finales de uno previo. Este concepto no sirve para las condiciones iniciales del universo. Por definición, nada existió antes del principio del universo, si es que el universo tuvo en realidad algún principio, de modo que sus condiciones iniciales deben aceptarse como un punto de partida -la disposición específica de las bolas dentro del triángulo antes del primer golpe- que es incalculable. Un punto de partida como este aflige a los físicos, que desean saber *por qué*

Stephen Hawking nació en 1942 en Oxford, Inglaterra. Estudió en Oxford y en Cambridge. Actualmente es profesor de matemáticas en Cambridge. Sus contribuciones a la cosmología incluyen el trabajo con Roger Penrose sobre los teoremas de la singularidad cosmológica, la exposición de la probabilidad del principio del universo según el big bang, y un trabajo más reciente que intenta concebir las condiciones iniciales del universo. Desde la década de 1960, Hawking sufre una enfermedad neuromuscular incurable y degenerativa.



Los problemas del horizonte y de la cosmología plana resultan especialmente apremiantes si consideramos las numerosas posibilidades de condiciones iniciales y procesos físicos con que el universo podría haber comenzado, de los cuales sólo una pequeña fracción habría generado un universo tan homogéneo y casi plano como el nuestro. Por supuesto que es posible postular que el universo comenzó con una densidad y una temperatura uniformes, y que existía un equilibrio casi perfecto entre la energía gravitacional y la energía cinética de expansión. La pregunta es si estas condiciones iniciales son plausibles. ¿Son probables o improbables? Tradicionalmente, los argumentos probabilísticos requieren que un experimento se realice en un gran número de sistemas idénticos, o bien que se repita muchas veces en un solo sistema. Por ejemplo, podemos hablar razonablemente de la probabilidad de que un auto pase frente a nuestro hogar un martes por la mañana entre las 8:00 a.m. y las 8:01 a.m. si durante miles de martes por la mañana nos hemos sentado a mirar por la ventana, y hemos llevado una estadística. Pero no contamos con mil universos.

¿Cómo podrían haberse determinado las condiciones iniciales del universo?
¿Apareció repentinamente el universo en $t = 0$? El modelo estándar del big bang, basado

en la teoría de la gravedad de Einstein, precisa que el estado del universo antes del estallido de la existencia fuera de una densidad infinita. Sin embargo, los científicos concuerdan en que este modelo no resulta completo a densidades de materia extremadamente altas. A diferencia de todas las otras teorías modernas en el campo de la física, la teoría de la gravedad de Einstein no incorpora las propiedades físicas de la mecánica cuántica. En la década de 1920, los físicos descubrieron que todos los fenómenos naturales tienen un comportamiento dual: a la vez similar a las partículas y similar a las ondas. En ciertos casos, un electrón actúa como una partícula, ocupando sólo una posición a la vez en el espacio, y en otras circunstancias actúa como una onda, ocupando varias posiciones al mismo tiempo. La teoría de este extraño comportamiento se denomina mecánica cuántica. La dualidad onda-partícula de la materia conduce a una incertidumbre intrínseca con respecto a la naturaleza, es decir, una incertidumbre que no surge de nuestra ignorancia o incapacidad de medir, sino que es una ignorancia absoluta. Tenemos que describir la naturaleza mediante probabilidades, no certezas.

Los físicos han intentado con denuedo elaborar una teoría completa de la gravedad que incluya la mecánica cuántica, hasta ahora en vano. Los cálculos de cualquier teoría propuesta de la "gravedad cuántica" arrojan números infinitos. Los físicos no están seguros si el problema es técnico o conceptual. No obstante, incluso prescindiendo de una teoría completa de gravedad cuántica, se puede deducir que los efectos de la mecánica cuántica, habrían sido cruciales durante los primeros 10^{-43} segundos del inicio del universo, cuando éste tenía una densidad de 10^{93} gramos por centímetro cúbico y mayor. (El plomo sólido tiene una densidad de aproximadamente diez gramos por centímetro cúbico.) Este período se denomina la era cuántica o era de Planck, y a su estudio se le llama cosmología cuántica. Como el universo en su totalidad habría estado sujeto a grandes incertidumbres y fluctuaciones durante la era cuántica, con la materia y la energía apareciendo y desapareciendo de un vacío en grandes cantidades, el concepto de un principio del universo podría no tener un significado bien definido. En todo caso, la densidad del universo durante este período es de tal magnitud que escapa a nuestra comprensión. Para propósitos prácticos, la era cuántica podría considerarse el estado inicial, o principio, del universo. En consecuencia, los procesos cuánticos ocurridos durante este período, cualquiera sea su naturaleza, determinaron las condiciones iniciales del universo.

Utilizando las ideas generales de la mecánica cuántica, pero sin disponer de una teoría detallada de la gravedad cuántica, Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, James Hartle, de la Universidad de California en Santa Bárbara, junto a otros especialistas, han intentado recientemente *calcular* las condiciones iniciales esperables de nuestro universo. Estos cálculos no implican en absoluto la observación del universo actual ni su análisis retrospectivo. Hawking y Hartle se proponen calcular cómo *debió crearse* el universo -de acuerdo con los conceptos generales de la teoría cuántica y la teoría de la relatividad- y luego seguir trabajando a partir de allí.¹ Los detalles de un cálculo de este tipo deben esperar que se formule una teoría de la gravedad cuántica; incluso entonces, puede que el cálculo resulte demasiado complicado para llevarlo a la práctica. No obstante, incluso si dicho cálculo pudiese realizarse de manera confiable, las condiciones iniciales quizá no deberían asumirse como un dato; estarían en la misma situación que las leyes de la naturaleza. En principio, todos los aspectos del universo podrían calcularse y explicarse.

Durante un tiempo, muchos científicos pensaron que la noción de un principio del universo de extremadamente alta densidad era un artilugio hipotético, fruto de las idealizaciones del modelo del big bang, como el postulado de la homogeneidad. No obstante, a mediados de la década de 1960, Roger Penrose y Stephen Hawking probaron matemáticamente que, incluso si el universo no es a fin de cuentas homogéneo su actual comportamiento expansivo, unido a la teoría de la relatividad general, implican que el universo debe haber tenido una formidable densidad en el pasado, retrocediendo en el tiempo por lo menos hasta la era de Planck, que es hasta donde se aplica la relatividad

general clásica.² Para comprender el estado inicial del universo, entonces, parece imprescindible abordar el tema de la cosmología cuántica.

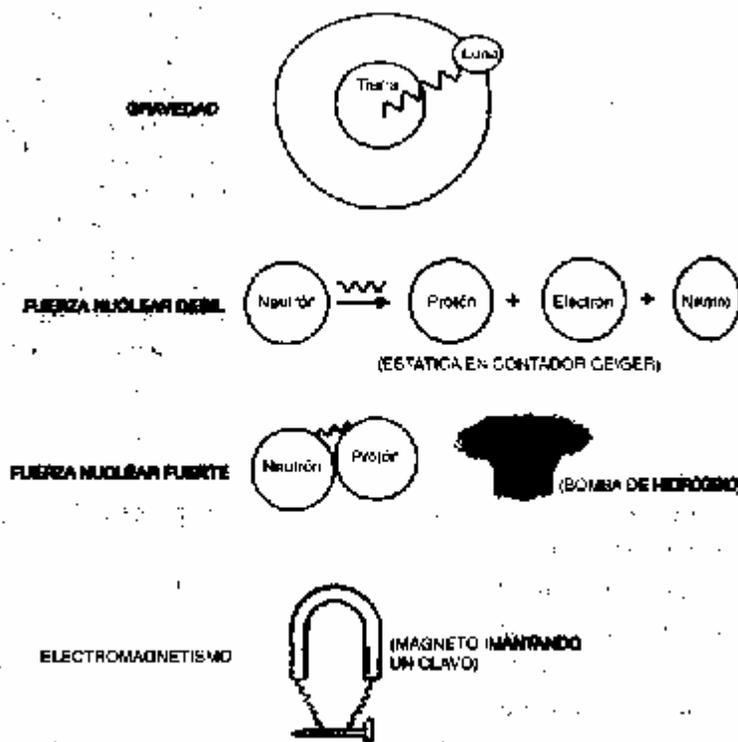
Algunos cosmólogos, en especial los teóricos, piensan que jamás lograremos entender por qué el universo es como es hasta que no comprendamos sus condiciones iniciales y dispongamos de una teoría confiable de la gravedad cuántica, lo cual podría estar a muchos años de nosotros

Física de partículas, la nueva cosmología y el modelo del universo inflacionario

En la década de 1970, la cosmología teórica experimentó un cambio importante. Un grupo de físicos expertos en la teoría de partículas subatómicas se unió a los astrónomos para trabajar en cosmología. Introdujeron una serie de ideas novedosas y un nuevo conjunto de herramientas intelectuales para investigar el por qué de las propiedades del universo, no sólo *cuáles* son esas propiedades.

En la "antigua cosmología", previa a la década de 1970, la mayoría de los cosmólogos se ocupaba de medir las distancias y los movimientos de las galaxias, su formación y composición, la velocidad de expansión del universo y la densidad promedio de la materia. En la "nueva cosmología", los científicos han comenzado seriamente a formular preguntas como: ¿por qué debería existir la materia?, ¿de dónde provino?, ¿por qué la energía gravitacional del universo es casi igual a su energía cinética de expansión (el problema de la cosmología plana)?, ¿por qué la radiación cósmica de fondo, que llega desde una distancia de miles de millones de años luz, tiene el mismo valor sin importar la dirección en que apunte el telescopio (el problema del horizonte)?, ¿por qué la proporción de fotones a bariones en el universo es de mil millones a uno, y no alguna cifra superior o inferior?, ¿por qué comenzó el universo en un grado tan alto de orden (el problema de la entropía)? Además del "qué" y "cómo", ahora se agregaba el "por qué". Unos cuantos científicos habían planteado algunas de estas preguntas tiempo atrás, pero por lo general se las descartó o abandonó, puesto que nadie propuso buenas respuestas. Muchos científicos consideraron que estas interrogantes sobrepasaban los límites de la ciencia. La física de partículas amplió la ciencia de la cosmología.

LAS CUATRO FUERZAS FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA



En la década de 1960 pudo oírse un preludio a esta colaboración futura entre la física de partículas y la cosmología. Se relacionaba con la cantidad de tipos diferentes de partículas elementales. Las teorías de las partículas y fuerzas elementales dependen absolutamente de cuántos tipos de partículas elementales existan, tal como la teoría del universo de Aristóteles dependía de sus cinco elementos: fuego, agua, aire, tierra y éter. Según cálculos teóricos realizados por primera vez en los años 60, la cantidad de helio producida en las reacciones nucleares del universo antiguo debió haber dependido de la cantidad de tipos de ciertas partículas subatómicas denominadas leptones. (El electrón, por ejemplo, es un tipo de leptón.) Mientras más tipos de partículas hayan existido, más helio debería haberse producido. Así, a partir de la abundancia comprobada de helio, que según los cálculos llega a un 25% de la materia, podemos determinar la cantidad de tipos de leptones.

En 1964, Hoyle y Talyer fueron los primeros en sugerir la relación esperada entre abundancia de helio y tipos de leptones; el año 1967 lo hizo en forma independiente Robert Wagoner, de la Universidad de Stanford. V. F. Shvartsman, de la Universidad del Estado de Moscú, realizó en 1969 el primer cálculo cuantitativo del efecto. En 1977, Gary Steigman, de la Fundación de Investigación Bartol; David Schramm, de la Universidad de Chicago, James Gunn, de la Universidad de Princeton, sin conocer dichos trabajos previos, redescubrieron el efecto y realizaron un cálculo más detallado.¹ Hoy se conocen tres tipos de leptones -electrones, muones y tauones, y sus antipartículas y neutrinos asociados-, pero ciertas teorías de física de partículas predicen que podrían existir muchos más. Los cálculos teóricos de Schramm y sus colaboradores indican que *sólo* podría existir un tipo más de leptón, para llegar a un máximo total de cuatro. De otro modo, la fracción de helio producida en el universo antiguo, como fuera calculado por la teoría del big bang, discreparía con la fracción observada. Con el fin de averiguar la cantidad de tipos de leptones existentes, en 1989 se llevó a cabo experimentos en el gigantesco Acelerador de Partículas (CERN) situado en Génova, y en el Acelerador Lineal de Stanford, en California (SLAC), los que indicaron que *no* existen nuevos tipos de leptones.² Los tres que se ha

observado hasta ahora son todo lo que hay. Esta confirmación de un resultado - pronosticado por la cosmología utilizando la tecnología de la física de partículas- ha complacido por igual a físicos y astrónomos.



Steven Weinberg nació en 1928 en la ciudad de Nueva York. Estudió en Cornell y en Princeton, y hoy es profesor de ciencias en la Universidad de Texas, en Austin. Weinberg fue uno de los primeros físicos que aplicaron a la cosmología las nuevas teorías de las partículas elementales. El y otros señalaron que los efectos de las grandes teorías unificadas, apreciados en el universo antiguo, podrían explicar la proporción de fotones a bariones. Su libro más popular, *Las primeras tres minutos*, introdujo a muchas personas y científicos en el tema de la cosmología. En 1979 obtuvo el Premio Nobel de Física por su trabajo teórico sobre la unificación de la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil.

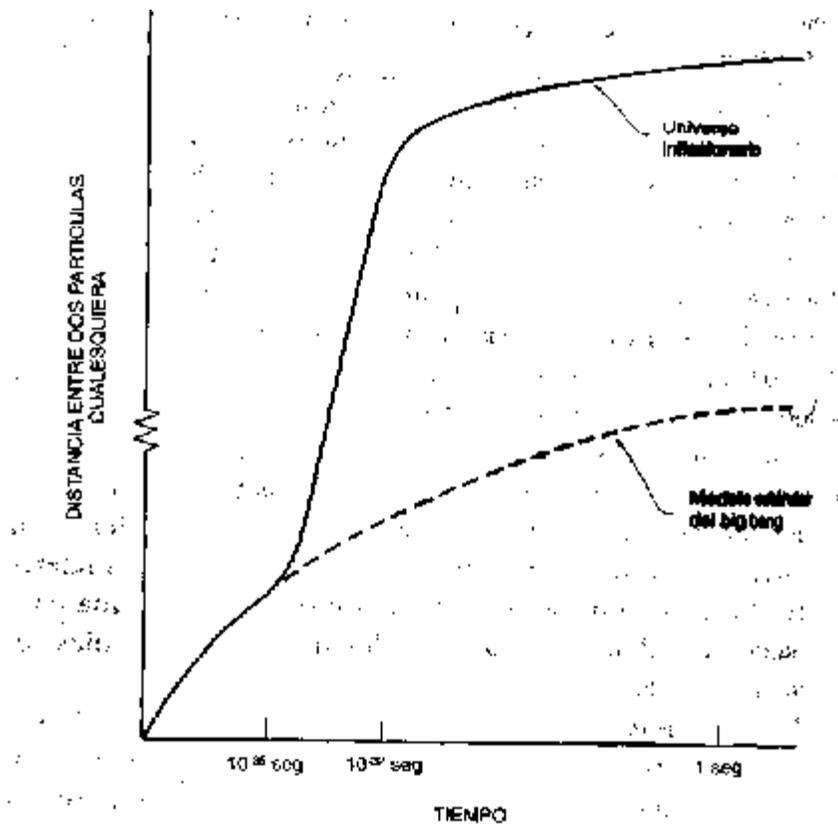
La mayoría de los físicos involucrados en los cálculos mencionados tenía una formación en astronomía y cosmología. En cambio, los físicos de partículas que comenzaron a aventurarse en cosmología a mediados de los 70 prácticamente carecían de cualquier conocimiento en este campo. Una de sus principales motivaciones era poner a prueba las nuevas grandes teorías unificadas de la física (GUT, *Grand Unified Theories*)³ Estas proponen que tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza son en realidad distintas versiones de una sola fuerza. (De un modo similar, la electricidad y el magnetismo no son realmente dos fuerzas separadas, ya que pueden generarse entre sí. Un magneto que se mueve dentro de una bobina de alambre produce corriente eléctrica, y la corriente eléctrica que fluye a través de un alambre produce un campo magnético que rodea al alambre.) Las tres fuerzas fundamentales combinadas en las grandes teorías unificadas son la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte -que mantiene unidas a las partículas subatómicas en el núcleo atómico- y la fuerza nuclear débil, responsable de ciertos tipos de radiactividad. La cuarta fuerza, la gravedad, no ha podido unificarse con éxito, debido a las dificultades de intentar combinarla con la mecánica cuántica.

Hace mucho tiempo que los físicos consideran una gran teoría unificada como su Santo Grial. Desde tiempos inmemoriales han buscado explicaciones minimalistas de la naturaleza. Las teorías con cuatro partículas básicas son mejor consideradas que las que contienen diez. Una sola fuerza que explique la caída de una manzana y la órbita lunar es mejor que dos. Aún no existen las suficientes pruebas experimentales de la veracidad de las grandes teorías unificadas. Una de las dificultades prácticas para ponerlas a prueba es que sus efectos alcanzan grados significativos sólo a temperaturas extremadamente altas, mucho mayores que las que se pueden crear en la Tierra o incluso en el centro de las estrellas. Estas temperaturas extremas pudieron alcanzarse sólo en un lugar, o más bien, sólo una vez: en el universo recién creado, cuando toda la materia tenía la forma de un gas de partículas subatómicas de una temperatura ultra alta. Por esta razón los físicos de partículas comenzaron a interesarse en la cosmología.

Las grandes teorías unificadas representan un intrépido salto hacia terreno desconocido. Las energías más altas conseguidas en los aceleradores de partículas terrestres corresponden a una temperatura de aproximadamente 10^{14} grados centígrados. Las grandes teorías unificadas se refieren a temperaturas de unos 10^{28} grados, o alrededor de cien billones de veces más altas. En otras palabras, la edad del universo era de unos 10^{-8} segundos cuando su materia estaba a una temperatura de 10^{14} grados. Cualquier otra extrapolación retrospectiva hacia el big bang, hacia temperaturas más altas, entra en el campo de la especulación. Y los cosmólogos se han visto obligados a

especular: muchas de las propiedades del universo pueden haberse determinado durante los primeros 10^{-8} segundos y aun antes.

Si las grandes teorías unificadas son correctas, entonces sus efectos más interesantes se habrían observado cuando el universo tenía aproximadamente 10^{-35} segundos. Ese es el momento en que la temperatura cósmica alcanzó los 10^{28} grados, y cuando las diversas fuerzas combinadas habrían comenzado a separarse. Una de las especulaciones más espectaculares de las GUT para esta época es la formación de líneas de energía extremadamente delgadas, denominadas cuerdas cósmicas. Según la teoría, una cuerda cósmica tiene un diámetro aproximado de 10^{-30} centímetros y la energía equivalente a 10^{26} toneladas de TNT por pulgada de su longitud. Si es que existen, las cuerdas cósmicas podrían haber sido la fuente de la formación y las aglomeraciones de galaxias, en virtud de su intensa concentración de energía y los efectos gravitacionales resultantes. Hoy, el universo podría estar habitado por cuerdas cósmicas de diversas longitudes, oscilando entre fracciones de pulgadas a miles de millones de años luz. Sin embargo, aún no se dispone de cálculos teóricos confiables de cuántas de estas cuerdas debieran existir, ni tampoco hay pruebas basadas en la observación de que realmente existan.⁴



La expansión del universo en el modelo estándar del big bang y en el modelo del universo inflacionario.

Alan Guth nació en 1947 en New Brunswick, Nueva Jersey. Estudió en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, donde hoy enseña física. Guth, un físico experimentado en partículas elementales, fue uno de los principales arquitectos del influyente modelo del universo inflacionario, una modificación del modelo del big bang.



En 1978 y 1979, diversos grupos de físicos de partículas, incluyendo Steven Weinberg, señalaron que los procesos resultantes de las grandes teorías unificadas, que habían actuado unos 10^{-35} segundos después del big bang (mucho después de la extremadamente incierta era cuántica de los primeros 10^{-43} segundos), podrían explicar la razón del valor asignado a la proporción entre fotones y bariones.⁵ Aun cuando estos cálculos eran bastante ambiguos, en parte porque no se sabía a ciencia cierta cuál de las grandes teorías unificadas podría ser la más correcta, el solo hecho de poder calcular una magnitud cosmológica que hasta entonces era un misterio conmocionó a los cosmólogos. Weinberg era un físico teórico muy respetado, que trabajaba en el campo de las partículas subatómicas; pronto recibiría el Premio Nobel por su trabajo en la física de partículas. Alentada por el ejemplo de Weinberg, una nueva generación de jóvenes físicos de partículas decidió trabajar en el campo de la cosmología.

Uno de estos jóvenes físicos inspirados por Weinberg fue Alan Guth. A fines de 1978, Guth se enteró del problema de la cosmología plana en una conferencia de Robert Dicke, en Cornell. Cerca de un año después, mientras trabajaba en su posdoctorado en el Acelerador Lineal de Stanford, Guth propuso una modificación del modelo del big bang que proporcionaba una explicación natural al problema del horizonte y al de la cosmología plana. Este nuevo modelo cosmológico -el modelo del universo inflacionario- ha provocado un cambio de gran envergadura en el pensamiento cosmológico. Algunos de los elementos que componen el modelo del universo inflacionario ya los habían discutido otros expertos (entre ellos, los belgas R. Brout, F. Englert y P. Spindel; Demóstenes Razanas, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA en Maryland; Martin Einhorn, de la Universidad de Michigan, y el japonés Katsuhiko Sato; y A. A. Starobinsky, del Instituto Landau de Moscú), pero la nítida exposición del modelo y de sus ventajas por parte de Guth tuvo el efecto de reactivar el tópico en la comunidad científica.⁶

Fundamentalmente, el modelo del universo inflacionario sostiene que, poco después del big bang, el universo recién creado experimentó una expansión breve y extremadamente rápida, después de la cual regresó a la velocidad de expansión más moderada del modelo estándar del big bang. En el momento en que el universo tenía apenas una pequeña fracción de segundo de edad (quizá 10^{-32}), este período de expansión rápida, o inflación, ya había terminado. Bajo ciertas condiciones, el comportamiento inflacionario del universo recién creado constituye una consecuencia natural de las grandes teorías unificadas. Estas teorías sostienen que, en el momento en que la fuerza unificada individual comenzó a actuar como varias fuerzas separadas, la energía y la masa del universo existían en un estado peculiar denominado falso vacío, el que se comporta como si tuviese gravedad negativa. La gravedad negativa repele, de modo que, en vez de retardar la velocidad de expansión, la aceleró. El período inflacionario habría finalizado cuando la energía y la masa del universo volvieron de ese estado peculiar al estado normal, con una gravedad de atracción.

La época de expansión rápida pudo haber ocupado un fragmento de espacio tan pequeño que ya estaba homogenizado, y rápidamente lo extendió a un tamaño más grande del que hoy tiene el universo observable en su totalidad. Se puede realizar cálculos

cuantitativos, pero resultan inciertos a causa de la ignorancia de los detalles de la gran teoría unificada subyacente, por lo tanto del momento exacto en que comenzó y finalizó la época inflacionaria. Con un fin ilustrativo, supondremos que dicha época se inició cuando el universo tenía 10^{-35} segundos de edad, y terminó a los 10^{-32} segundos de edad. En los comienzos de la época inflacionaria, la región de espacio más extensa que podría haberse homogenizado habría tenido el tamaño de unos 10^{-35} segundos-luz (cerca de 10^{-25} centímetros), mucho más pequeña que el núcleo de un átomo. Al finalizar la época inflacionaria, esta diminuta región homogenizada se habría extendido a unos casi 10^{400} años luz. Haciendo una comparación, al término del período inflacionario la región del espacio desde la que hoy detectamos radiación cósmica de fondo tenía un tamaño de sólo unos mil centímetros (10 m), igual a la dimensión que tenía todo el actual universo observable. La expansión inflacionaria habría homogenizado entonces el universo sobre una región extremadamente grande, mucho más extensa que cualquier región de la que tengamos conocimiento. El problema del horizonte está resuelto. Las regiones de espacio que al parecer jamás estuvieron suficientemente cerca como para intercambiar calor, según extrapolaciones en el pasado basadas en el modelo estándar del big bang, según el modelo del universo inflacionario en realidad estaban mucho más cerca.

Andrei Linde nació en 1948 en Moscú. Estudió en la Universidad del Estado de Moscú y en el Instituto de Física Lebedev, donde hoy es profesor de física. Junto con Guth, Linde fue uno de los creadores del modelo del universo inflacionario. Ha propuesto una nueva versión de este modelo, denominado de inflación caótica, en el que el universo genera nuevos universos en forma continua y aleatoria. Aunque su trabajo es muy matemático, Linde se describe a sí mismo como más intuitivo que técnico.

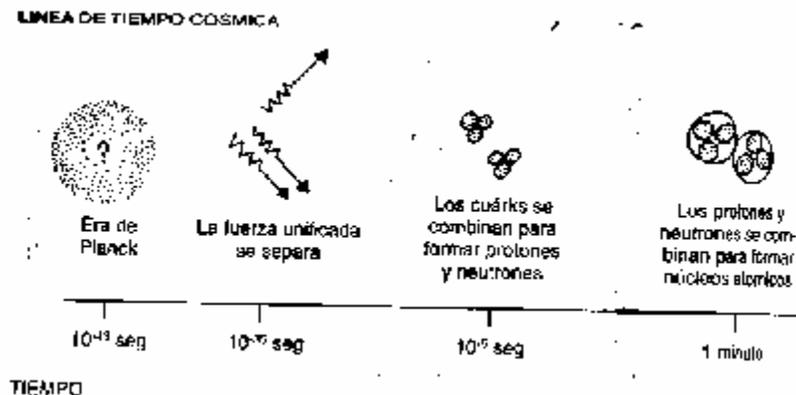


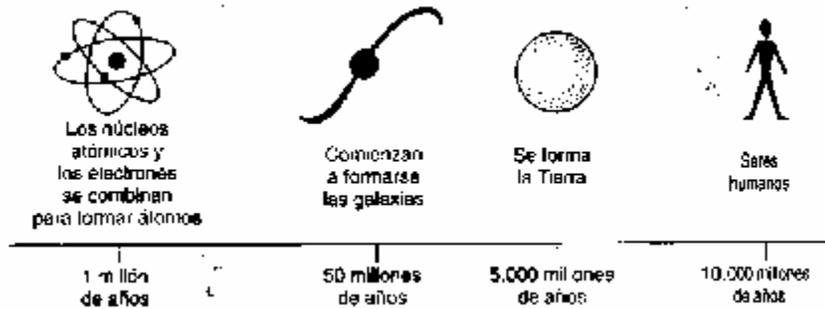
El modelo del universo inflacionario también resuelve el problema de la cosmología plana. Dejando de lado la curvatura inicial del universo -ya sea en la forma de un universo abierto o de uno cerrado-, cualquier fragmento observable del universo será casi plano una vez finalizado el período de expansión rápida, tal como una pequeñísima área de la superficie de una pelota de playa parecería casi plana después de haberla inflado hasta alcanzar un diámetro de un kilómetro. El modelo del universo inflacionario predice de manera tajante que actualmente el universo debería ser casi plano. De forma equivalente, la densidad promedio de la materia debería estar muy cerca de su valor crítico, mucho más cerca que el décimo del valor crítico que las observaciones actuales han calculado. Según este fundamento, la encargada de respaldar o liquidar el modelo es la evidencia observacional: si se descubre que la masa faltante existe, el modelo es válido; si se logra demostrar que la masa faltante no existe, el modelo no sirve.

El modelo del universo inflacionario explica algunos de los problemas pendientes de la cosmología sin recurrir al argumento de la explicación según las condiciones iniciales. De hecho, proporciona un mecanismo físico según el cual las condiciones iniciales del universo pueden haber sido *irrelevantes*: un concepto que complace y alivia a muchos físicos. Y, combinando la física subatómica y la física astronómica como lo hace, la teoría resulta elegante. Además, el modelo del universo inflacionario proporciona un nuevo panorama del cosmos. Puesto que el universo experimentó tan enorme extensión durante la época inflacionaria, puede ser muchísimo más grande de lo que pensamos. Por consiguiente, es probable que lo que vemos a través de nuestros mayores telescopios -la pequeña fracción de espacio que denominamos el universo observable- nos diga muy poco del universo como un todo. En este sentido, el modelo del universo inflacionario nos ha empequeñecido aún más.

Andrei Linde, del Instituto de Física Lebedev de Moscú, ha ido más allá en esta idea, hacia lo que él llama "modelos caóticos del universo inflacionario". La teoría de Linde es que, bajo ciertas condiciones, un universo henchido puede dividirse en distintas partes, absolutamente separadas unas de otras, en realidad universos diferentes. Cada uno de los nuevos fragmentos puede repetir el proceso de una manera aleatoria, de modo que cada universo genera muchos universos nuevos. Como en los mundos de Anaximandro, aparecerían y desaparecerían universos individuales, pero el conjunto de universos sería eterno. Algunos de los universos nuevos podrían tener propiedades muy distintas a las del nuestro: fuerzas disímiles, distintos tipos de partículas, hasta diferentes dimensionalidades de espacio. En un escenario como éste, nunca llegaríamos a conocer más que una ínfima fracción de las posibilidades y realidades de la naturaleza.

El modelo original del universo inflacionario, tal como fuera propuesto por Guth a comienzos de 1980, tuvo sus dificultades. En el modelo de Guth, las peculiares materia y energía con gravedad negativa no llenaban el universo en forma pareja, sino que se esparcían en ciertos puntos. Como resultado, algunas partes del universo se expandían rápidamente mientras otras lo hacían lentamente. Los fragmentos en expansión rápida se iban homogenizando cada vez más, pero el universo en general quedaría con una estructura llena de vacíos, algo que las observaciones contradicen. Esta dificultad se resolvió en 1982, cuando Paul Steinhardt y Andreas Albrecht en la Universidad de Pensilvania, más Andrei Linde en forma independiente, desarrollaron una nueva versión del modelo del universo inflacionario. En este modelo corregido, todas las partes del universo comenzaban a henchirse y dejaban de hacerlo al mismo tiempo. Así se obtenía una cierta homogeneidad. Desafortunadamente, también el nuevo modelo de universo inflacionario de Linde, Albrecht y Steinhardt presentaba problemas serios.⁷ Los cálculos teóricos sugieren que este modelo, aunque mucho más homogéneo que el modelo inflacionario original, predice inhomogeneidades en el universo temprano que son suficientemente grandes como para estropear la uniformidad observada de la radiación cósmica de fondo. Además, se requiere de un cierto tipo especial de gran teoría unificada para alcanzar una fase adecuada de expansión rápida.





Por otra parte, no existen pruebas directas basadas en la observación que confirmen el modelo del universo inflacionario. De hecho, una de las predicciones críticas del modelo resulta inconsistente con las observaciones actuales. Casi cualquier versión del modelo del universo inflacionario predice que el valor actual de omega, incluso diez mil millones de años después del big bang, debiera estar muy cerca de 1. No obstante, el valor calculado de omega se acerca en realidad a 0,1, aunque no se tiene certeza absoluta de ello. En otras palabras, hemos detectado cerca de un décimo de la masa cósmica que requiere el modelo del universo inflacionario. Por lo tanto, los científicos que, según bases teóricas, consideran que el modelo es correcto deben confiar en que una enorme cantidad de masa se esconde de nosotros, escapa a la detección, quizás en la forma de un oscuro gas de partículas tenue y uniforme que existiría entre las galaxias. Más aún, la masa faltante que exige el modelo del universo inflacionario no puede estar constituida de la materia ordinaria que compone los átomos. Para hacer coincidir la abundancia observada de helio con los cálculos teóricos de su producción en el universo temprano es necesario que el omega derivado de la materia ordinaria -por ejemplo, protones y neutrones- no sea mayor que 0,1. Por consiguiente, la masa faltante debe constar de ciertas especies exóticas de materia.

A pesar de todas estas dificultades, las características generales y los resultados del modelo del universo inflacionario son tan atractivos que la mayoría de los cosmólogos considera que la idea es correcta en alguna forma, aun cuando difiera en detalles y mecanismos de las proposiciones originales de Guth, Linde, Albrecht y Steinhardt. Con todo, el modelo inflacionario puede no ofrecer una buena solución al problema de la entropía planteado por Penrose. En consecuencia, algunos físicos piensan que una comprensión más fundamental del origen del universo reemplazará este modelo

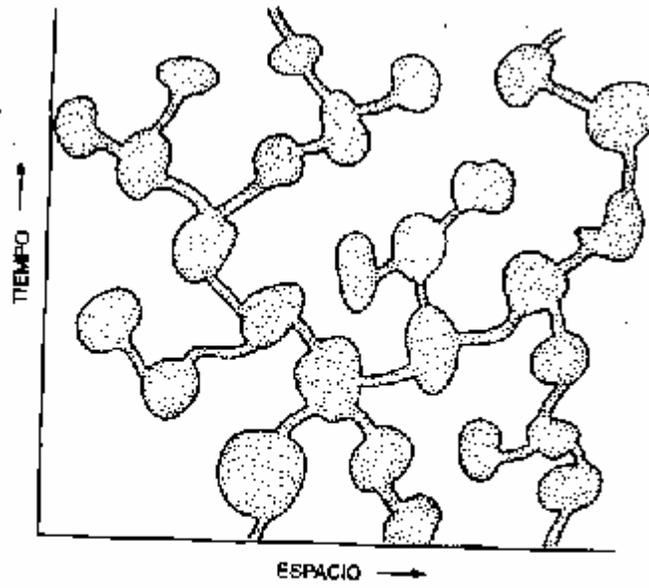


Ilustración del modelo caótico del universo inflacionario. Cada burbuja constituye esencialmente un universo separado que, con el tiempo, genera nuevos universos.

El principio antrópico

Durante las últimas dos décadas, un pequeño pero eminente grupo de físicos ha abordado el problema de las condiciones iniciales en cosmología en términos de las condiciones necesarias para crear la vida. Parece plausible que no cualquier condición física que pueda concebirse permita que se forme vida; por lo tanto, el hecho de nuestra existencia puede limitar las posibilidades que deben considerarse. Este concepto se denomina principio antrópico.

Existen dos formas de principio antrópico, la débil y la fuerte. La forma débil sostiene que la vida puede surgir y existir sólo durante una cierta época de nuestro universo. La forma fuerte establece que la vida podría surgir, en cualquier época, sólo en un tipo especial de universo. El principio antrópico débil se limita al universo en que vivimos; el fuerte se refiere de manera implícita a muchos universos posibles. Algunos cosmólogos no sólo han aceptado la validez del principio antrópico, sino que lo utilizan para explicar diversos aspectos del universo.

Con la publicación en 1961 de un breve artículo en la revista británica *Nature*, Robert Dicke fue el primero en adoptar argumentos antrópicos modernos en el campo de la física y la cosmología.¹ Para comprender su argumentación, debemos remontarnos a 1938, año en que Paul Dirac, físico ganador del Nobel, afirmó que una cierta combinación de constantes fundamentales de la naturaleza, multiplicada y dividida de una determinada forma, arrojaba como resultado justamente la edad actual del universo, cerca de 10 mil millones de años. (Las constantes fundamentales de la naturaleza son, por ejemplo, la velocidad de la luz -300.000 kilómetros por segundo- y la masa de un electrón, $9,108 \times 10^{-28}$ gramos; se supone que estos valores son los mismos en todo lugar y tiempo. En efecto, cada rayo de luz alguna vez cronometrado en el espacio vacío viaja a la misma velocidad; cada electrón que haya sido alguna vez pesado tiene la misma masa.) A Dirac, la coincidencia entre los dos tipos de números -uno, basado en cantidades microscópicas; el otro, en el universo como un todo- le parecía escasamente fruto de la casualidad, y sugirió la posible existencia de una ligazón entre las constantes fundamentales y la evolución del universo.² Pero, como la edad del universo evidentemente aumenta con el tiempo, también las constantes fundamentales de la naturaleza tendrían que ir cambiando para mantener la relación que Dirac proponía.

Dicke explicó la coincidencia de Dirac de una manera totalmente diferente. Los físicos, argumentó, sólo pueden existir durante una estrecha ventana de tiempo en la evolución del universo. El carbono del cuerpo de los físicos requirió de una estrella para forjarlo, de modo que un universo habitado por físicos y otros seres vivientes debe ser suficientemente antiguo como para haber formado estrellas. Por otra parte, si el universo fuese demasiado antiguo las estrellas se habrían consumido y, por lo tanto, habrían eliminado la fuente principal de calor y luz que hace habitables los planetas que giran en su órbita. Yuxtaponiendo estos límites, resulta que los físicos sólo pueden existir durante una época en que la edad del universo sea aproximadamente el tiempo de vida de una estrella promedio. Dicke calculó esta cantidad en términos de principios básicos de física, y descubrió que era igual a la combinación de las constantes fundamentales de la naturaleza que Dirac había mencionado, lo que en números igualaba la cifra aproximada de 10 mil millones de años. Así pues, la igualdad en los dos números de Dirac no era una coincidencia, sino una necesidad para nuestra existencia. Dicke estableció que las

constantes eran efectivamente constantes, como se suponía. Muchísimo antes o muchísimo después de la época actual, la combinación de constantes fundamentales de Dirac no igualaría la edad del universo, pero los físicos no estarían allí para discutir la situación.

El argumento de Dicke ejemplifica el principio antrópico débil. Como una interesante nota a pie de página, Dirac publicó una breve respuesta al documento de Dicke, señalando que el análisis de este último le parecía acertado, pero que él mismo "prefería" su propio argumento, pues éste permitía la posibilidad de que los planetas "pudiesen existir en forma indefinida en el futuro y que la vida jamás tuviera que extinguirse". Dejando de lado la objeción de Dirac, la mayoría de los cosmólogos acepta el principio antrópico débil de Dicke. Su formulación y aplicación se refieren sólo a nuestro universo real.

En 1968, Brandon Carter, entonces en la Universidad de Cambridge, estableció el más polémico principio antrópico fuerte: los valores de muchas de las constantes fundamentales de la naturaleza deben permanecer dentro de un rango limitado con el fin de permitir que la vida surja, incluso durante la ventana de tiempo de Dicke. Por ejemplo, sostiene Carter, el surgimiento de la vida requiere de la formación de planetas, la que a su vez requiere de la existencia de estrellas de las que se puedan desprender fragmentos. Al analizar las condiciones necesarias para la formación de estas estrellas "convectivas", Carter halla que los valores de algunas de las constantes fundamentales están limitados a un cierto rango. Este rango, por supuesto, incluye los valores de nuestro universo. La suposición de que las galaxias, las estrellas y otras condiciones especiales son necesarias para la vida está implícita en este argumento y en todas las formulaciones del principio antrópico; sin embargo, como nuestra experiencia con la vida se limita a la biología terrestre, dicha suposición resulta muy difícil de comprobar.

En años recientes célebres cosmólogos han utilizado el principio antrópico fuerte para explicar ciertas propiedades del universo. Según esta línea de pensamiento, sólo un universo con las propiedades específicas del nuestro -incluyendo los valores de ciertas constantes fundamentales y condiciones iniciales- permitiría nuestra existencia. Por ejemplo, la proporción de masa del protón y el electrón, que en el laboratorio se calcula en 2.000, no podría ser de 2 ni de 2.000.000 en *nuestro* universo, ya que dichos valores producirían una física, una química y una biología incompatibles con la sustancia viviente. Los valores de 2 ó 2.000.000 podrían existir en otros universos, y serían perfectamente satisfactorios de cualquier modo, excepto en la capacidad de permitir nuestra existencia. De todos estos otros universos posibles, sólo una pequeña fracción poseería una proporción de masa protón-electrón adecuada para la vida. Otro ejemplo del principio antrópico fuerte lo proporcionan C. B. Collins y Hawking en 1973, quienes lo utilizaron para discutir el problema de la cosmología plana. Partiendo del supuesto de que las galaxias y las estrellas son necesarias para la vida, ambos plantearon que un universo que comience con demasiada energía gravitacional sufriría un colapso antes de haber podido formar estrellas, y un universo que comienza con muy poca energía jamás permitiría la condensación gravitacional de galaxias y estrellas. Por lo tanto, de muchos universos posibles, con valores iniciales de omega muy distintos, solamente podríamos haber existido en uno en el que el valor inicial de omega fuese casi igual a 1. Sólo algunos científicos aceptan esta solución antrópica al problema de la cosmología plana.³

Lo que sustenta el argumento del principio antrópico fuerte es la noción de que algunas propiedades de nuestro universo no son fundamentales, y por lo tanto no requieren de explicaciones fundamentales en términos de las leyes de la física; por el contrario, tales propiedades son simplemente resultado del azar. Los valores de nuestro universo en particular son lo que son porque cualquier cosa muy diferente nos excluiría, y nuestra existencia es un hecho. Otros valores son característicos de otros universos, en la mayoría de los cuales nosotros no podríamos existir. La lógica es similar a la que se

emplea para explicar por qué llueve los días en que el padre lleva a su hijo a la escuela en automóvil, y no los días en que el chico se va caminando.

Los científicos discuten entre sí acerca de la validez del principio antrópico como explicación de la naturaleza. Por una parte, el argumento tiene peso sólo si invocamos un gran número de universos posibles, con propiedades muy variables. De otro modo, volvemos a la explicación de por qué la naturaleza única es la que es. Pero, como ya dijimos, a algunos científicos les resulta incómodo postular universos diferentes. Habitamos un único universo, el nuestro, y los argumentos para explicarlo, puesto que deben salir de este universo, también pueden haberse salido del marco de la ciencia. Por otra parte, la mayoría de los científicos preferiría explicar la naturaleza en términos de leyes básicas que puedan derivar y comprobar, más que hacer conjeturas acerca de posibilidades que podrían ser correctas pero que jamás podrían comprobarse. En lugar de una explicación antrópica, muchos científicos preferirían una teoría fundamental que demostrara que, sin importar si la vida existe o no, la proporción de la masa del protón y el electrón *debe* ser 1.836 y no otra cifra, tal como la proporción entre la circunferencia de un círculo y su radio debe ser 3,1416 en la geometría euclidiana. Algunos científicos consideran que a los enigmas cósmicos se les proponen explicaciones antrópicas sólo cuando no se puede encontrar una mejor interpretación. Finalmente, hay quienes matizan el principio antrópico con sugerencias teleológicas y religiosas: si la vida es tan rara en todos estos universos posibles, ¿acaso nuestro universo en particular fue diseñado con algún propósito? Es evidente que este tipo de cuestionamiento no acepta la idea de que nuestro universo es simplemente un accidente.

Los argumentos antrópicos, al menos superficialmente, parece que involucran la vida de una forma primordial. Sin embargo, una pregunta relacionada con ellos la evade. ¿Podría existir un universo con muy distintas leyes físicas, con valores muy diferentes para la velocidad de la luz y la masa del electrón y el valor inicial de omega? ¿O es acaso nuestro universo el único posible, el único conjunto de leyes y parámetros intrínsecamente coherente? Para algunos físicos, la búsqueda de las leyes en nuestro único universo se ha convertido en una búsqueda de la respuesta a esta pregunta, mucho más amplia.

En casa

Es un día claro y frío de diciembre. Nevó durante toda la noche. Esta mañana, mi hija de diez años y yo nos levantamos temprano; estamos en su cuarto mirando la nieve por la ventana y conversando tranquilamente. Ella aún tiene puesto su pijama de franela; abraza a nuestro gato de angora y se inclina en el alféizar de la ventana. Yo sostengo una taza de café. "¿Crees que existan seres vivientes en otros planetas?", me pregunta. "Probablemente", respondo.

Del otro lado de la ventana el aire brilla gracias a dos luces: una viene del sol que está en lo alto, y la otra del sol aquí abajo, reflejado en la nieve. Mucho más arriba, el aire adquiere lentamente una tonalidad azul brillante, que se eleva cada vez más hasta donde alcanza la vista. Estamos en una competencia de quién ve más.

"El espacio es extraño", dice mi hija. "Es absolutamente imposible imaginar algo que continúa siempre. Y si no continúa siempre, ¿qué hay fuera de él?" Yo inclino la cabeza en señal de aprobación, y bajamos las escaleras en puntillas para tomar nuestro desayuno y prepararnos para el día que comienza.

Glosario

Abundancia: cantidades relativas de elementos químicos. Por ejemplo, el hidrógeno constituye cerca del 75% de la masa del universo, de modo que su "abundancia cósmica" es de un 75%.

Aglomeración: en cosmología, un grupo de galaxias más unidas de lo que se esperaría si las galaxias estuviesen esparcidas aleatoriamente en el espacio. Una aglomeración típica tiene un tamaño aproximado de 15 millones de años luz. También pueden agruparse para formar un "superconglomerado" de galaxias, cuyo tamaño suele ser de unos 150 millones de años luz.

Aglomeración Coma: la aglomeración masiva de galaxias más cercana a la nuestra, que se conoce como el grupo local. La aglomeración Coma, a una distancia aproximada de nosotros de 300 millones de años luz, contiene cerca de mil galaxias en una región de un diámetro cercano a los 10 millones de años luz. (Ver aglomeración; galaxia.)

Aglomeración globular: acumulación esférica de estrellas dentro de una galaxia, que giran en órbita entre sí debido a su gravedad mutua. Una aglomeración globular típica consta de cerca de un millón de estrellas; por lo tanto, las aglomeraciones globulares son mucho más pequeñas que las galaxias. En nuestra galaxia, la Vía Láctea, existen aproximadamente cien aglomeraciones globulares.

Aglomerarse: en cosmología, la tendencia observada de galaxias a arracimarse, a agruparse entre sí en vez de distribuirse de manera uniforme e independiente unas de otras. (Ver galaxia.)

Agujero negro: una masa tan enormemente compacta que ni siquiera la luz puede escapar a su intensa gravedad. Por esta razón parece negra desde el exterior. Si el Sol se comprimiese a una esfera de un diámetro aproximado de seis kilómetros, se convertiría en un agujero negro. Se piensa que algunas estrellas masivas colapsan bajo su propio peso después que se ha agotado su combustible nuclear, y entonces se transforman en agujeros negros.

Anisotropía: condición en que el universo aparece diferente en distintas direcciones.

Bariones: partículas subatómicas que interactúan mediante la fuerza nuclear fuerte. El protón y el neutrón son ejemplos de bariones. Hasta hace poco se pensaba que los bariones se conservaban, es decir, que el número neto de bariones antes y después de cualquier proceso físico no se alteraba. Las Grandes Teorías Unificadas de la física (GUT), propuestas por primera vez a mediados de la década de 1970, sugieren la posibilidad de que los bariones no se conserven.

Burbujas (en la distribución en gran escala de las galaxias): las estructuras formadas por la distribución observada de las galaxias en el espacio. Algunos catastros de galaxias cercanas muestran su ubicación sobre capas más bien esféricas -burbujas- de un diámetro aproximado de 100 millones de años luz (casi mil veces el diámetro de una sola galaxia). Existen muy pocas galaxias en el interior de una "burbuja".

Cadena de Perseo-Piscis: región del espacio que contiene una enorme agrupación de galaxias, un superconglomerado. Las galaxias de esta superaglomeración parecen estar distribuidas en una larga cadena.

Cálculo de orden de magnitud: cálculo aproximativo de la magnitud *de* algo, con una precisión que fluctúa en un rango entre diez veces demasiado grande y diez veces demasiado pequeño. Por ejemplo, teniendo en cuenta que la población de Estados Unidos alcanza los 250 millones de habitantes, cualquier cálculo estimativo de la población que se encuentre entre los 25 millones y los 2.500 millones sería un cálculo aceptable de orden de magnitud. Los astrónomos acostumbran trabajar con cálculos de orden de magnitud.

Campo cuántico: una distribución de energía que está constantemente creando y destruyendo partículas según las probabilidades de la mecánica cuántica, y transmitiendo las fuerzas de la naturaleza. (Ver teoría de campo; mecánica cuántica.)

Campo de velocidad: las velocidades de un grupo de objetos con distintas velocidades en diferentes posiciones del espacio.

CCD: sigla de Dispositivos de Carga Acoplada, dispositivos fotoeléctricos altamente sensibles capaces de registrar en forma electrónica la intensidad y el punto de llegada de pequeñas cantidades de luz. Los CCD se colocan en el extremo receptor de los telescopios, para "tomar fotografías" de objetos astronómicos muy desvanecidos; han llegado a reemplazar casi por completo las placas fotográficas.

Cefeida: un tipo de estrella de luminosidad oscilante; primero es opaca, luego brillante, luego se torna opaca de nuevo, cíclicamente. La duración del ciclo está estrechamente relacionada con la luminosidad de la estrella. De este modo, al medir el tiempo del ciclo de luz de una estrella cefeida se puede calcular su luminosidad intrínseca. Al comparar la luminosidad de una estrella con su brillantez *aparente*, por lo tanto, se obtiene la distancia de la estrella. Las cefeidas se cuentan entre los pocos objetos astronómicos cuyas distancias pueden determinarse con exactitud. (Ver luminosidad.)

Condiciones iniciales: ver condiciones límite.

Condiciones límite: las condiciones necesarias para determinar la evolución de un sistema físico, dadas las leyes de la naturaleza. Por ejemplo, la oscilación de un péndulo se determina tanto por las leyes de la mecánica y la gravedad como por la altura inicial desde la que se deja caer el péndulo. Esta última se denomina condición límite, o condición inicial.

Conjunto (de universos): grupo hipotético de muchos universos con diferentes propiedades. Algunos físicos intentan calcular cuán "probables" son las propiedades de nuestro universo imaginándolo como una muestra de un conjunto de universos.

Constante cosmológica: una contribución a la gravedad que resulta de la densidad de la masa efectiva, o densidad de la energía, en el vacío. Una constante cosmológica positiva actúa como si fuese gravedad negativa: en vez de provocar la atracción mutua de dos masas, las hace repelerse. El primer modelo cosmológico de Einstein incluía una constante cosmológica, que aparecía como un término adicional en las ecuaciones de la relatividad general. (Ver falso vacío; vacío.)

Constante de Hubble: velocidad de expansión del universo. Aunque se le llame "constante", en realidad cambia con el tiempo, puesto que la gravedad está disminuyendo la velocidad de expansión del universo. La constante de Hubble es igual a la velocidad de alejamiento de una galaxia distante, dividida por su distancia de nosotros. Si presumimos un universo homogéneo e isotrópico, la velocidad de alejamiento de una galaxia distante es proporcional a su distancia; así, la constante de Hubble, determinada por cualquier galaxia que se aleja, debería ser la misma para todas, estableciendo una velocidad universal de expansión del universo. Según los cálculos, el valor actual de la constante de Hubble es aproximadamente 1×10.000 millones de años, lo que significa que la distancia entre dos galaxias distantes cualquiera se duplicará en unos 10 mil millones de años a la velocidad actual de expansión. Los astrónomos miden la constante de Hubble en unidades de kilómetros por segundo por megaparsec. Por ejemplo, una constante de Hubble de cien kilómetros por segundo por megaparsec -la que los astrónomos simplemente llamarían

constante de Hubble de 100- corresponde a 1 por 10 mil millones de años. El símbolo para la constante de Hubble es H_0 . (Ver ley de Hubble.)

Constante de Planck: constante fundamental de la naturaleza que mide la magnitud de los efectos de la mecánica cuántica. La luz visible, por ejemplo, consta de partículas discretas de luz, o fotones, y cada una transporta una cantidad de energía igual a la constante de Planck multiplicada por la frecuencia de luz visible. (La energía de un fotón de luz visible es de aproximadamente 10^{-18} , o una milmillonésima de una milmillonésima, la energía de un centavo que cae al suelo desde la altura de la cintura.) Al combinar la constante de Planck con otras dos constantes fundamentales de la naturaleza -la constante gravitacional de Newton y la velocidad de la luz- se obtienen otras unidades de Planck que marcan densidades críticas y tiempos en que la mecánica cuántica y la gravedad eran extremadamente importantes. Por ejemplo, la densidad de Planck, o escala de Planck, es la densidad de materia sobre la cual la estructura, y quizás hasta el significado, del tiempo y del espacio se rompen debido a los efectos de la mecánica cuántica. Expresándolo en cifras, la densidad de Planck es de unos 10^{93} gramos por centímetro cúbico. El universo recién creado tuvo esta enorme densidad a la edad aproximada de 10^{-43} segundos, lo que se denomina la era de Planck, y cuando su temperatura alcanzaba los 10^{22} centígrados. A esta temperatura, la energía media por partícula era equivalente a la masa de Planck, unos 10^{-5} gramos. (Ver mecánica cuántica.)

Constante gravitacional: constante fundamental de la naturaleza que mide la energía de la fuerza gravitacional. También se le denomina constante gravitacional de Newton, y su símbolo es G .

Constantes fundamentales de la naturaleza: cantidades físicas, como la velocidad de la luz o la masa de un electrón, que son parte fundamental de las leyes de la física y que se considera son las mismas siempre y en cualquier lugar del universo. La mayoría de los físicos trabaja con las constantes fundamentales como si fueran propiedades dadas del universo.

Cosmología cuántica: subcampo de la cosmología que se relaciona con el universo durante sus primeros 10^{-43} segundos, cuando los efectos de la mecánica cuántica y la gravedad eran ambos extremadamente importantes. (Ver constante de Planck; mecánica cuántica.)

Cuark: una de las partículas fundamentales e indestructibles de la naturaleza, a partir de las cuales se forman muchas otras partículas subatómicas. El neutrón, por ejemplo, está compuesto por tres cuarks. Se han descubierto cinco tipos de cuarks, y se piensa que existe un sexto. Los cuarks interactúan principalmente a través de la fuerza nuclear fuerte y de la fuerza electromagnética.

Cuasares: objetos astronómicos extremadamente distantes y luminosos, mucho más pequeños que una galaxia y mucho más luminosos. Los cuasares pueden ser las regiones centrales de ciertas galaxias muy energéticas, en una primera etapa de su evolución. Se cree que la energía de un cuasar proviene de un agujero negro en su centro.

Curvatura: separación de la geometría del universo con respecto a la geometría euclidiana (plana). En términos cualitativos, la curvatura la indica el parámetro de curvatura, simbolizado por k . Los valores $k = 0, 1, -1$ se refieren a la geometría plana (no curva), la geometría cerrada y la geometría abierta, respectivamente. En una geometría plana, por ejemplo, la circunferencia de un círculo es igual a dos veces π multiplicado por su radio. En una geometría cerrada, la circunferencia es menor que dos veces π multiplicado por el radio; en una geometría abierta, es mayor. (Ver universo cerrado; universo plano; universo abierto.)

Densidad de masa crítica: el valor de la densidad promedio de masa cósmica sobre la cual el universo es cerrado. La densidad promedio de masa del universo se obtiene midiendo la masa en un volumen de espacio muy amplio, que incluya muchas galaxias, y dividiendo esa cifra por el tamaño del volumen. La velocidad actual de

expansión del universo es la que determina la densidad de masa crítica. Según cálculos de la velocidad actual de expansión del universo, la densidad actual de masa crítica corresponde a aproximadamente 10^{-29} gramos por centímetro cúbico. Basándonos en las mejores mediciones, la densidad promedio de masa de nuestro universo parece estar cerca de un décimo de la densidad de masa crítica. (Ver universo cerrado; omega; universo abierto.)

Desplazamiento al rojo: cambio de color hacia el extremo rojo del espectro, que ocurre cuando una fuente de luz (y color) se aleja del observador. La magnitud del desplazamiento al rojo está directamente relacionada con la magnitud de la velocidad de alejamiento; así, la medición del desplazamiento al rojo de un objeto mide su velocidad de alejamiento. En un universo en expansión, los colores de las galaxias se desplazan hacia el rojo, y en un universo que se expande en forma uniforme, el desplazamiento es directamente proporcional a la distancia de un objeto de la Tierra (a excepción de objetos extremadamente distantes). La medición del desplazamiento al rojo de un objeto astronómico proporciona la distancia al objeto.

Deuterio: un núcleo atómico que consta de un protón y un neutrón. Se piensa que el deuterio fue el primer núcleo compuesto formado en el universo recién creado.

Distribución estadística: rango de variación de una cierta cantidad en una población, que se obtiene tomando una muestra muy grande de la población. Por ejemplo, la distribución estadística de la altura de varones norteamericanos podría obtenerse tomando una muestra de diez mil individuos elegidos al azar y contabilizando el número de ellos dentro de cada rango de alturas. En cosmología, la distancia entre pares de galaxias, promediadas sobre un gran número de galaxias, constituiría una distribución estadística.

Ecuación de Friedmann: una ecuación para la evolución del universo. La ecuación de Friedmann puede derivarse de la teoría de gravedad de Einstein y del supuesto de que el universo es homogéneo (se ve igual en cada punto) e isotrópico (se ve igual en toda dirección). La solución de la ecuación de Friedmann explica, entre otras cosas, cómo la distancia entre las galaxias cambia con el tiempo. (Ver homogeneidad; isotropía.)

Ecuación de Schrödinger: ecuación fundamental en la mecánica cuántica para el desarrollo de la función de onda de un sistema. (Ver mecánica cuántica; función de onda.)

Ecuación diferencial: una ecuación que describe la evolución *de* un sistema en el tiempo, dadas las condiciones límite para dicho sistema. Casi todas las leyes de la física se expresan en las matemáticas de las ecuaciones diferenciales. (Ver condiciones límite.)

Ecuaciones de Einstein: las ecuaciones de la teoría de la gravedad de Einstein, denominada de la relatividad general. Las ecuaciones de Einstein especifican en forma cuantitativa la gravedad producida por la materia y la energía. Puesto que se piensa que la gravedad es la principal fuerza que actúa sobre distancias muy largas, las ecuaciones de Einstein se utilizan en las teorías cosmológicas modernas.

Electrón-voltio: unidad de energía o de masa. El electrón pesa cerca de 10^{-27} gramos, lo que equivale a unos 500 millones (5×10^8) de electrón-voltios de energía. El electrón-voltio es entonces, según los estándares corrientes, muy pequeño. La energía que se libera al dejar caer un centavo (tres gramos) al suelo es de unos 4×10^{17} electrón-voltios.

Entropía: medida cuantitativa del grado de desorden de un sistema físico. Los sistemas muy desordenados poseen una entropía alta; los sistemas sumamente ordenados tienen una entropía baja. Una de las leyes de la física, la segunda ley de la termodinámica, enuncia que la entropía de cualquier sistema físico aislado sólo puede aumentar con el tiempo.

Equilibrio térmico: la condición de un sistema en el que todas sus partes han intercambiado calor y han llegado a la misma temperatura. Un sistema aislado en equilibrio térmico no cambia con el tiempo. Este es también un estado de máximo desorden. (Ver radiación antirradiante; entropía.)

Era de Planck: ver constante de Planck.

Escala de distancia extragaláctica: la serie de distancias a objetos astronómicos fuera de nuestra galaxia. Es difícil obtener distancias a objetos más allá de los 10 millones de años luz con una precisión mayor del 25%.

Espectro: la cantidad de luz en cada rango de la longitud de onda, es decir, en cada rango de color. El término espectro también puede aplicarse de manera más general a la intensidad de algo en cada escala de longitud. Se dice que un objeto que emite radiación en un rango continuo de colores posee un espectro continuo; que un objeto que emite radiación sólo a ciertas longitudes de onda tiene líneas de emisión; y que un objeto que *absorbe* la radiación sólo a ciertas longitudes de onda posee líneas de absorción.

Espectrógrafo: instrumento que registra la cantidad de luz en cada rango de la longitud de onda, es decir, en cada rango de color. Por lo general, cada tipo de objeto astronómico, como una estrella o una galaxia, emite un espectro de luz característico. (Ver espectro.)

Espectroscopia: estudio de qué longitudes de onda de luz emitirá un objeto o sustancia bajo diversas condiciones.

Estrellas de la población I, II y III: las estrellas más jóvenes observadas se conocen como estrellas de la población I; las estrellas un poco más antiguas observadas se denominan población II; se postula que una generación aún más antigua de estrellas - población III- existió todavía antes. Las estrellas de la población II se formaron en su mayor parte a partir del hidrógeno y el helio. Las estrellas de la población I, como nuestro Sol, se formaron del hidrógeno, el helio y un vasto número de elementos más pesados (como el carbono y el oxígeno) que se piensa se crearon en el interior de estrellas más antiguas de las poblaciones II y III, y que posteriormente fueron arrojados al espacio.

Estructura en gran escala: la distribución de galaxias y otras formas de masa en escalas de grandes distancias, que cubren cientos de millones de años luz y más. Un universo perfectamente homogéneo e isotrópico no tendría una estructura en gran escala; un universo con todas las galaxias alineadas en fila india tendría una enorme estructura en gran escala.

Expansión exponencial: expansión extremadamente rápida. Por ejemplo, un globo que duplica su tamaño cada segundo -de modo que mide una pulgada después de un segundo, dos pulgadas a los dos segundos, cuatro pulgadas a los tres segundos y ocho pulgadas a los cuatro segundos- se está expandiendo en forma exponencial. En cambio, un globo cuyo radio es de una pulgada después de un segundo, dos pulgadas a los dos segundos, tres pulgadas a los tres segundos y cuatro pulgadas a los cuatro segundos, se está expandiendo en forma lineal con el tiempo, no exponencial. Según el modelo del universo inflacionario, el universo antiguo atravesó un breve período de expansión exponencial, durante el cual su tamaño aumentó en forma considerable.

Factor de escala: una medida de distancia en cosmología. La distancia entre dos galaxias cualesquiera, por ejemplo, es proporcional al factor de escala, que siempre está aumentando en un universo en expansión. Si el factor de escala duplica su tamaño, entonces la distancia entre dos galaxias cualesquiera también se duplica.

Falso vacío: una región en el espacio que parece estar vacía, pero que en realidad contiene energía almacenada. Al liberar esta energía almacenada, se dice que el falso vacío se desintegra. (Ver vacío.)

Física de partículas: la rama de la física que intenta comprender las partículas fundamentales y las fuerzas de la naturaleza.

Fluctuaciones: desviación de condiciones uniformes. Por ejemplo, una masa de gas que se agrupa a una densidad mayor que el gas circundante se calificaría como una fluctuación. A la cantidad de agrupamientos para cada escala de masa se le denomina espectro de fluctuación. La mayoría de los cosmólogos intenta explicar las estructuras observadas en el universo (como los grupos de galaxias), según la condensación gravitacional y el crecimiento de pequeñas fluctuaciones de masa en el pasado.

Fluctuaciones cuánticas: variaciones continuas en las propiedades de un sistema físico, producidas por el carácter probabilista de la naturaleza supuesto por la mecánica cuántica. Por ejemplo, el número de fotones en una caja con paredes perfectamente reflectantes varía constantemente debido a las fluctuaciones cuánticas. Estas fluctuaciones pueden hacer que las partículas aparezcan y desaparezcan. Algunas teorías sostienen que el universo completo fue creado a partir de la nada, en una fluctuación cuántica.

Fluctuaciones en la densidad: inhomogeneidades aleatorias en una distribución de materia que de otro modo sería uniforme.

Formación explosiva de galaxias: una teoría de la formación galáctica en la que la explosión de una gran cantidad de estrellas crea una gigantesca onda de choque que se desplaza hacia afuera y comprime el gas circundante. Las galaxias se forman en las regiones donde existe un gas de alta densidad.

Fotón: la partícula subatómica que transmite la fuerza electromagnética. La luz consta de una corriente de fotones.

Fuerza de gravedad: la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza; la fuerza gravitacional entre dos masas cualesquiera es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Las otras tres fuerzas fundamentales son la fuerza electromagnética y dos tipos de fuerza nuclear. (Ver fuerza electromagnética; fuerza nuclear.)

Fuerza electromagnética: una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. La electricidad y el magnetismo surgen de la fuerza electromagnética. Las otras tres fuerzas fundamentales son la fuerza de gravedad, la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte. (Ver fuerza gravitacional; fuerza nuclear.)

Fuerzas nucleares: existen dos tipos, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. Ambas, más la fuerza de gravedad y la electromagnética, constituyen las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. La fuerza nuclear fuerte, que es la más poderosa de todas, es la que mantiene unidos protones y neutrones en el núcleo atómico. La fuerza nuclear débil es responsable de ciertos tipos de radiactividad; por ejemplo, la desintegración de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino.

Función de onda: la descripción matemática de un sistema físico de acuerdo a las leyes de la mecánica cuántica. La función de onda indica los estados posibles de un sistema físico, y cuál es la probabilidad de estar en un estado particular en un momento dado.

Galaxia: conjunto aislado de estrellas y gas, que se mantienen unidas por su gravedad mutua. Una galaxia típica posee cerca de 100 mil millones de estrellas, tiene una masa total cercana a un billón de veces la masa del Sol, su diámetro mide aproximadamente 100 mil años luz, y está separada de la galaxia más cercana por una distancia de unas cien veces su propio diámetro, o bien 10 millones de años luz. De este modo, las galaxias constituyen islas de estrellas en el espacio. Nuestra galaxia se llama la Vía Láctea. Las galaxias se presentan esencialmente en dos formas: como discos aplanados con una protuberancia en el centro (galaxias espirales) y como manchas amorfas semiesféricas (galaxias elípticas). Si se encuentran galaxias agrupadas unas

cerca de otras, se dice que se hallan en grupos o cúmulos. Los cúmulos que comprenden un número especialmente grande de galaxias se denominan cúmulos ricos. Las galaxias que no se hallan en dichos grupos, sino que parecen más bien estar esparcidas de manera uniforme y aleatoria por el espacio, se denominan galaxias de campo. Algunas galaxias se caracterizan por el tipo dominante de radiación que emiten. Por ejemplo, las galaxias de radio son emisoras inusualmente poderosas de ondas de radio.

Geometría euclidiana: la geometría desarrollada por el matemático griego Euclides cerca del 300 a. C. La geometría euclidiana, al igual que todas las geometrías, deduce ciertos resultados a partir de una serie de presunciones iniciales. Uno de los supuestos críticos de la geometría euclidiana es que, dados una línea recta cualquiera y un punto no ubicado en dicha línea, se puede trazar exactamente una línea, paralela a la primera línea, hasta ese punto. Uno de los resultados de la geometría euclidiana es que los ángulos interiores de cualquier triángulo suman 180 grados. La geometría euclidiana es la que se enseña en la secundaria.

Geometría no euclidiana: la geometría que no sigue los postulados y resultados de la geometría de Euclides. Por ejemplo, en una geometría no euclidiana la suma de los ángulos interiores de un triángulo no es 180 grados. Según la teoría de la relatividad general de Einstein, la gravedad distorsiona el espacio en una geometría no euclidiana.

Geometría riemanniana: una vasta clase de geometrías no euclidianas. Las matemáticas de la relatividad general utilizan la geometría riemanniana. (Ver relatividad general.)

Gran Atractor: una gran masa hipotética, a unos 100 millones de años luz de la Tierra, que parece estar afectando los movimientos de muchas galaxias cercanas en virtud de su gravedad.

Grandes Teorías Unificadas (GUT): las teorías en la física que intentan explicar las fuerzas de la naturaleza como manifestaciones de una sola fuerza fundamental.

Gravedad cuántica: una teoría de la gravedad que incluiría adecuadamente la mecánica cuántica. Hasta la fecha no existe una teoría completa e internamente coherente de gravedad cuántica, aun cuando se han descubierto exitosas teorías cuánticas para todas las fuerzas de la naturaleza a excepción de la gravedad. (Ver mecánica cuántica.)

Hidrodinámica: el estudio de cómo fluyen los gases y los fluidos bajo fuerzas aplicadas.

Hipótesis de números grandes de Dirac: la edad actual del universo, dividida por el tiempo que tarda la luz en atravesar el radio de un protón, es una cifra cercana a 10^{40} , casi igual a la proporción de las energías de la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional. Dirac consideró que era muy poco probable que la igualdad aproximada de estos dos números grandes fuese accidental, y dedujo que algún proceso físico debía estar funcionando para mantenerla. Como la primera cifra (la edad del universo) evidentemente cambia con el tiempo, Dirac propuso que también las "constantes fundamentales de la naturaleza" incluidas en la segunda cifra debían cambiar con el tiempo, para mantener la igualdad.

Homogeneidad: en cosmología, la propiedad de que un volumen grande del universo se ve igual que cualquier otro. La mayoría de los modelos cosmológicos la suponen.

Horizonte: la distancia máxima que un observador puede ver. En cosmología, el horizonte es igual a la distancia que la luz ha recorrido desde el principio del universo. Los objetos que están más allá de nuestro horizonte son invisibles a nuestros ojos, porque no ha transcurrido el tiempo suficiente para que la luz llegue desde ese punto hasta aquí.

Inflación antigua: el modelo original (1981) del universo inflacionario. (Ver modelo del universo inflacionario; inflación nueva.)

Inflación caótica: una variación del modelo del universo inflacionario, en la que las fluctuaciones cuánticas aleatorias están continuamente formando nuevos universos. (Ver modelo del universo inflacionario; inflación nueva; inflación antigua; fluctuaciones cuánticas; mecánica cuántica.)

Inflación nueva: modificación del modelo original del universo inflacionario, realizada en 1982. Aunque el modelo original solucionó unos cuantos problemas cosmológicos, llevaba a la conclusión de que el universo era muy inhomogéneo durante la época inflacionaria y contenía burbujas de espacio vacío rodeadas por un medio lleno de energía. En la inflación nueva también se mantiene que el universo experimentó una breve época de expansión extremadamente rápida, pero no aparecen estas burbujas. (Ver modelo del universo inflacionario.)

Interacciones débiles: las interacciones entre ciertas partículas causadas por la fuerza nuclear débil. (Ver fuerza nuclear.)

Interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica: interpretación de la mecánica cuántica que sostiene que un sistema físico existe en uno y sólo uno de sus estados posibles después de realizar una medición. Antes de la medición, el sistema no posee existencia física y sólo puede describirse en términos de la probabilidad de cada posible resultado de una medición. (Ver interpretación de múltiples mundos de la mecánica cuántica.)

Interpretación de múltiples mundos (Everett-Wheeler) de la mecánica cuántica: la tesis que sostiene que un sistema físico existe en forma simultánea en todos sus posibles estados, antes y después de haberse sometido a mediciones (comparar con la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica). En la interpretación de múltiples mundos, cada una de estas existencias simultáneas forma parte de un universo separado. Cada vez que medimos un sistema físico y descubrimos que está en un estado particular de todos los posibles, nuestro universo se bifurca hacia uno de los universos donde el sistema esté en ese estado particular en ese preciso momento. No obstante, el sistema continúa existiendo en sus otros posibles estados, en universos paralelos. (Ver interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica; mecánica cuántica.)

Isotropía: en cosmología, la propiedad del universo de aparecer igual en todas direcciones. La uniformidad de la radiación del ruido de fondo cósmico, que proviene de todas las direcciones del espacio, sugiere que, visto en gran escala, el universo es isotrópico con respecto a nuestra posición. Si suponemos que nuestra posición no es única, podemos concluir que el universo parece isotrópico con respecto a todos los puntos. Este último resultado requiere que el universo sea homogéneo. (Ver radiación del ruido de fondo cósmico; homogeneidad.)

Kiloparsec: medida de distancia igual a 1.000 parsecs, o cerca de 3.000 años luz.

Leptones: partículas fundamentales de la naturaleza que pueden interactuar a través de todas las fuerzas fundamentales a excepción de la fuerza nuclear fuerte. El electrón es un ejemplo de un leptón.

Ley de Hubble: la ley que dice que la velocidad de alejamiento es proporcional a la distancia en un universo homogéneo e isotrópico. Se dice que las galaxias que se alejan de nosotros a una velocidad que justamente corresponde a esta ley están siguiendo el flujo de Hubble. Como el universo real no es precisamente homogéneo -presenta irregularidades producidas por la aglomeración de galaxias y los huecos de espacio vacío-, los movimientos de las galaxias reales experimentan una cierta desviación del flujo de Hubble.

Longitud de escala: una medida del tamaño de un sistema físico o región del espacio.

Luminosidad: la energía por segundo emitida por un objeto astronómico, similar al vataje de una bombilla o ampolleta.

Masa de Planck: ver constante de Planck.

Masa faltante: masa cósmica hipotética que algunos científicos citan como necesaria para que el universo tenga la densidad crítica de materia, con un equilibrio exacto entre energía gravitacional y energía cinética de expansión, que da un resultado de $\omega = 1$. Se le llama masa faltante porque representa unas diez veces la cantidad de masa que en realidad se ha detectado mediante cualquier método, incluyendo los estudios de efectos gravitacionales. (Ver universo cerrado; densidad de masa crítica; materia oscura.)

Materia oscura: la materia del universo que detectamos por sus influencias gravitacionales, pero que no podemos ver. La materia oscura con una menor velocidad aleatoria y que se concentra fácilmente por la gravedad se denomina materia oscura fría. La materia oscura caliente posee una mayor velocidad aleatoria y, por lo tanto, es capaz de resistir las irregularidades gravitacionales. Los modelos recientes que explican el diseño observado de la aglomeración galáctica pueden, en parte, caracterizarse por si invocan la

materia oscura fría o la materia oscura caliente. En todo caso, como no sabemos lo que es la materia oscura, no disponemos de evidencia directa de si es fría o caliente.

Materia oscura fría: ver materia oscura.

Mecánica cuántica: la teoría que explica el comportamiento dual de la materia, similar a las partículas y similar a las ondas, y el carácter probabilista de la naturaleza. Según la mecánica cuántica, es imposible disponer de información completa y precisa acerca del estado de un sistema físico, tal como no puede localizarse una onda en un solo punto en el espacio, puesto que se extiende a muchos puntos. Esta incertidumbre constituye un aspecto intrínseco del sistema o partícula, no un reflejo de nuestra incapacidad para medir con exactitud. Por consiguiente, los sistemas físicos deben describirse en términos de probabilidades. Por ejemplo, en un amplio conjunto de átomos de uranio, es posible predecir en forma exacta *qué fracción* de estos átomos se desintegrará en forma radiactiva durante los siguientes sesenta minutos, pero es imposible predecir *cuáles* de ellos lo harán. Otro ejemplo: no se puede localizar a un electrón con una velocidad bien conocida en una pequeña región del espacio, pues aquél se comporta como si ocupase muchos lugares diferentes al mismo tiempo. Se podría ver la existencia de cualquier sistema físico -por ejemplo, un átomo- como la combinación de todos sus estados posibles, cada uno de los cuales posee una cierta probabilidad. La teoría cuántica ha logrado explicar en forma extremadamente satisfactoria el comportamiento de la naturaleza en el nivel subatómico, aun cuando muchos de sus resultados atentan contra nuestra intuición basada en el sentido común. (Ver interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica; interpretación de múltiples mundos de la mecánica cuántica; principio de la incertidumbre; función de onda.)

Megaparsec: medida de distancia igual a un millón de parsecs, o bien tres millones de años luz.

Metales: en astronomía, todos los elementos más pesados que el hidrógeno y el helio, que son los dos más livianos.

Métrica de Robertson-Walker: descripción matemática de las propiedades geométricas de un universo homogéneo e isotrópico. Todas las cosmologías de Friedmann utilizan la métrica de Robertson-Walker. (Ver modelos de Friedmann; homogeneidad; isotropía.)

Minuto de arco: unidad de ángulo igual a 1/60 de grado.

Modelo de aglomeración jerárquica: modelo de aglomeración galáctica en el que aparecen distintos patrones a distintas escalas de distancia, indefinidamente a escalas

cada vez mayores, y donde la densidad "promedio" de materia depende del tamaño del volumen sobre el que se realiza el promedio.

En un modelo homogéneo la densidad promedio es independiente de dicho tamaño. (Ver modelo *pancake*.)

Modelo de De Sitter: una solución específica a las ecuaciones cosmológicas de Einstein, descubierta por Wilhelm de Sitter en 1917, en la cual el espacio se expande a una velocidad exponencial, rápida. Esta solución es muy distinta a las soluciones propuestas por Friedmann y por Lemaître, en las cuales el universo se expande a una velocidad mucho más lenta (una velocidad a la que la distancia entre dos puntos cualesquiera aumenta como algo entre la raíz cuadrada del tiempo y linealmente con el tiempo). Las soluciones tipo de Friedmann y Lemaître se incorporaron al modelo estándar del big bang. Modificaciones recientes de este modelo -como el modelo del universo inflacionario- proponen que en sus comienzos el universo atravesó un período de desarrollo exponencial, llamado fase de De Sitter.

Modelo de Weinberg-Salam: teoría física desarrollada por Steven Weinberg, Abdus Salam y Sheldon Glashow, que unifica dos fuerzas fundamentales de la naturaleza, la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil. Es la misma que la teoría electrodébil.

Modelo de la materia oscura fría: un importante modelo teórico para explicar la aglomeración de galaxias y otras grandes distribuciones de masa cósmica. Se basa en el modelo del universo inflacionario, supone que el universo es plano y presume que la "masa faltante" se compone de partículas de movimiento lento que se aglomeran fácilmente. (Ver modelo del universo inflacionario; masa faltante.)

Modelo del big bang: un modelo de la evolución del cosmos que sugiere que el universo se creó hace diez mil millones de años, en un estado de densidad y temperatura extremadamente altas. Según este modelo, el universo se ha estado expandiendo, tornándose menos denso y enfriándose desde su inicio. La observación ha comprobado que todas las galaxias distantes se están alejando de nuestra propia galaxia, como lo pronosticó el modelo del big bang. (Ver universo cerrado; modelos de Friedmann; universo abierto.)

Modelo del estado continuo: un modelo del universo en el que éste no cambia con el tiempo. A fines de la década de 1940 se propuso un modelo moderno del estado continuo. El modelo del big bang no es un modelo de estado continuo.

Modelo del universo inflacionario: una reciente modificación del modelo estándar del big bang, en la que el universo recién creado atraviesa un breve período de expansión extremadamente rápida (exponencial), después del cual vuelve a la velocidad de expansión más pausada del modelo estándar. El período de expansión rápida comenzó y terminó cuando la edad del universo era aún mucho menor que un segundo, pero proporciona una explicación física a los problemas del horizonte y de la cosmología plana.

Asimismo, el modelo del universo inflacionario sugiere que el universo es muchísimo más grande que la fracción que nosotros podemos ver. (Ver expansión exponencial.)

Modelo del universo oscilante: un universo que se expande y se contrae sucesivamente, atravesando diversos ciclos.

Modelo mixmaster: modelo cosmológico no friedmanniano que comienza con un universo altamente anisotrópico y muestra cómo las anisotropías se reducen con el tiempo. (Ver modelos de Friedmann.)

Modelo *pancake*: modelo de formación de galaxias en que las primeras estructuras que se condensaron, diferenciándose del fondo uniforme de gas primordial, tenían un tamaño muy grande. Posteriormente, estas grandes masas colapsaron y se transformaron en delgadas capas (*pancakes*), dividiéndose en diversos fragmentos más

pequeños (las galaxias). Una teoría contrapuesta, en ocasiones denominada modelo de aglomeración jerárquica, propone que las primeras estructuras que se formaron eran del tamaño de las galaxias y, a medida que éstas se aglomeraban entre sí por la gravedad, se formaron estructuras cada vez mayores. (Ver modelo de aglomeración jerárquica.)

Modelos de Friedmann: una clase general de modelos cosmológicos que suponen que el universo es homogéneo e isotrópico en grandes escalas y que permiten la evolución del universo con el tiempo. La mayoría de los cálculos en el modelo estándar del big bang suponen una cosmología de Friedmann. (Ver ecuación de Friedmann; homogeneidad; isotropía.)

Movimientos en gran escala: voluminosos movimientos de galaxias distantes que se desvían del flujo de Hubble. (Ver ley de Hubble.)

Neutrino: partícula subatómica que no posee carga eléctrica, casi no tiene masa e interactúa con otras partículas sólo a través de la fuerza nuclear débil y la fuerza gravitacional. (Ver fuerzas nucleares.)

Neutrón: un tipo de partícula subatómica que, junto con el protón, forma el núcleo atómico. El neutrón no posee carga eléctrica y está compuesto por tres cuarks. (Ver protón; cuark.)

Nucleón: un protón o neutrón. (Ver neutrón; protón.)

Nucleosíntesis: la producción de núcleos pesados a partir de la fusión de núcleos livianos. Según la teoría del big bang, el universo recién creado solamente contenía hidrógeno, el más liviano de todos los núcleos atómicos, puesto que cualquier núcleo más pesado se habría desintegrado en el intenso calor. Todo el resto de los elementos tendría que haberse formado más tarde, en procesos de nucleosíntesis. Se piensa que la mayor parte del helio, el segundo elemento más liviano después del hidrógeno, se formó cuando el universo tenía unos cuantos minutos, y que la mayor parte de los otros elementos se creó mucho después, en reacciones nucleares en los centros de las estrellas.

Omega: la proporción de la densidad promedio de la masa del universo a la densidad de masa crítica (la densidad de masa requerida para detener la expansión centrifuga del universo). En un universo abierto, omega siempre es inferior a 1; en un universo cerrado, siempre es mayor que 1; en un universo plano, siempre es exactamente igual a 1. A menos que omega sea exactamente igual a 1, cambia con el tiempo, disminuyendo sin cesar en un universo abierto o aumentando ininterrumpidamente en un universo cerrado. Según mediciones, omega tiene un valor cercano a 0,1; sin embargo, estas mediciones son difíciles e inciertas. (Ver universo cerrado; densidad de masa crítica; universo plano; universo abierto.)

Parámetro de densidad: otro nombre para omega. (Ver omega.)

Parámetro de desaceleración: parámetro que mide la tasa de disminución de la expansión del universo. La gravedad provoca esta disminución. El parámetro de desaceleración es igual a omega (otro parámetro cosmológico) cuando el universo está dominado por la radiación, aproximadamente los primeros 100 mil años luego del big bang, y a $1/2$ omega cuando el universo está dominado por la materia. Como el parámetro de desaceleración es equivalente a omega (suponiendo una constante cosmológica de cero, como a menudo se hace), determina el destino final y la geometría espacial del universo. El símbolo para el parámetro de desaceleración suele ser q_0 . (Ver omega.)

Estudios del desplazamiento al rojo: la tabulación metódica de los desplazamientos hacia el rojo de un gran número de galaxias en una región específica del firmamento. Los desplazamientos al rojo miden directamente la velocidad de alejamiento de las galaxias. Si se adopta la ley de Hubble, estas velocidades pueden traducirse a distancias. Bajo este supuesto, una perspectiva del desplazamiento al rojo entrega la

tercera dimensión, la profundidad, para las galaxias en un catastro. Las otras dos dimensiones para cada galaxia las entregan sus posiciones percibidas en el firmamento. El desplazamiento al rojo de una galaxia se obtiene midiendo su espectro de luz; de este modo es posible ver cuál es el grado de desplazamiento de sus colores. (Ver espectro.)

Principio antrópico: la forma débil del principio sostiene que la vida puede existir solamente durante un breve período de la historia de nuestro universo. La forma fuerte del principio antrópico establece que, de todos los valores posibles para las constantes fundamentales de la naturaleza y las condiciones iniciales del universo, sólo una pequeña fracción de ellos permitiría la formación de vida, en cualquier época. (Ver condiciones límite; constantes fundamentales de la naturaleza.)

Principio cosmológico: el que sostiene que el universo es homogéneo e isotrópico en gran escala, es decir, que parece igual en todas partes y, desde cualquier punto específico, se ve igual en todas las direcciones.

Principio de equivalencia: la afirmación de que una fuerza gravitacional es absolutamente equivalente en todos sus efectos físicos a una aceleración general en la dirección contraria. Por ejemplo, una persona dentro de un ascensor en el espacio con una aceleración ascendente de treinta y dos pies por segundo sentiría que el suelo ejerce una presión ascendente sobre sus pies exactamente de la misma forma que si el ascensor estuviese detenido sobre la Tierra, donde la gravedad ejerce una presión descendente con una aceleración de treinta y dos pies por segundo. El "principio de equivalencia débil" sostiene que todos los objetos, independientemente de su masa o composición, caen con la misma aceleración en presencia de gravedad. El experimento de Eötvös, y otros posteriores y perfeccionados, demuestran el principio de equivalencia débil.

Principio de incertidumbre: también llamado principio de incertidumbre de Heisenberg, es un resultado fundamental de la mecánica cuántica que sostiene que la posición y velocidad de una partícula no pueden conocerse simultáneamente con una certeza absoluta. Si se tiene gran certeza de una de ellas, la otra se torna muy incierta. El producto de la incertidumbre en la posición y en el impulso (masa multiplicada por velocidad) es igual a una constante, la constante de Planck. Como para predecir la posición futura de una partícula es necesario conocer tanto la posición inicial como la velocidad inicial, el principio de incertidumbre impide predecir de manera precisa el futuro desde el pasado, aun cuando se conozcan los valores de todas las leyes de la física. (Ver constante de Planck; mecánica cuántica.)

Principio de Mach: la hipótesis de que la inercia de los cuerpos, es decir, su resistencia a la aceleración provocada por fuerzas aplicadas, no está determinada por ninguna propiedad absoluta del espacio, sino por los efectos de la materia distante en el universo. De modo equivalente, el principio de Mach propone que la distinción entre marcos de referencia acelerados y no acelerados sea determinada por los efectos de la materia distante.

Problema de la cosmología plana: el enigma de por qué el universo está hoy tan cerca del límite entre abierto y cerrado, es decir, por qué es casi plano. De manera similar, ¿por qué debe la densidad de masa promedio estar hoy tan cerca de la densidad de masa crítica, pero no ser exactamente igual a ella? Si Ω comienza siendo superior a 1, debiera aumentar cada vez más con el tiempo; si comienza siendo inferior a 1, debiera reducirse cada vez más. Para que Ω esté cerca del 0,1 hoy, unos 10 mil millones de años después del big bang, debió haber estado extremadamente cerca de 1 cuando el universo tenía un segundo. Algunos consideran que este equilibrio exquisito es muy poco probable según el modelo estándar del big bang, por lo que los desconcierta el que el universo "actual sea casi plano. (Ver universo cerrado; densidad de masa crítica; universo plano; Ω ; universo abierto.)

Problema del horizonte: el enigma planteado por la observación de que regiones del universo muy distantes entre sí comparten las mismas propiedades físicas, como la

temperatura, aun cuando estas regiones estaban demasiado alejadas cuando emitieron su radiación como para haber intercambiado calor y haberse homogeneizado en el tiempo que ha pasado desde el principio del universo. Específicamente, detectamos la misma intensidad de ondas de radio cósmicas (radiación del ruido de fondo cósmico) desde todas las direcciones del espacio, lo que sugiere que las regiones que emitieron dicha radiación tenían la misma temperatura en el momento de la emisión. Sin embargo, en ese momento, cuando el universo tenía unos 300 mil años, aquellas regiones estaban separadas por aproximadamente 50 millones de años luz, lo que sobrepasa con mucho la distancia que la luz o el calor podrían haber recorrido desde el big bang. (Ver horizonte.)

Proporción de fotones a bariones: la proporción del número de fotones al número de bariones en cualquier gran volumen típico de espacio. (Ver bariones; fotón.)

Proporción de masa a luz (M/L): la relación de la masa total de un sistema físico a la cantidad de radiación producida por ese sistema. La masa que no produce radiación de ningún tipo a menudo puede detectarse por medio de sus efectos gravitacionales. Los sistemas con una gran cantidad de esta materia oscura tendrían una alta proporción de masa a luz.

Proporción de materia a antimateria: la relación de la masa en partículas a la masa en antipartículas. Para cada tipo de partícula existe una antipartícula. El positrón, por ejemplo, es la antipartícula del electrón y es idéntico a él, excepto por su carga eléctrica, que es la opuesta. Las abundancias de partículas y antipartículas no deben ser necesariamente equivalentes. Pareciera que nuestro universo se constituye casi totalmente de partículas, y no de antipartículas, aunque no existe una diferencia fundamental entre los dos tipos de materia.

Proporción de partícula a antipartícula: lo mismo que proporción de materia a antimateria.

Proposición "sin bordes": una condición inicial (o condición límite) para el universo propuesta por Stephen Hawking y James Hartle. Estos reformularon las matemáticas de la relatividad general reemplazando el tiempo por una coordenada semejante al espacio, con lo que el universo aparece como si tuviese cuatro dimensiones de espacio en lugar de tres dimensiones de espacio y una de tiempo. (En una formulación de este tipo, el "tiempo" pierde su significado usual.) Hawking y Hartle sugieren que la geometría de esta representación del universo debería ser análoga a la geometría de la superficie de una esfera, es decir, una forma sin bordes. Al traducirla al tiempo y el espacio ordinarios, esta condición límite sugerida toma la forma de una condición inicial específica para el universo. La proposición sin bordes se formula mediante un cálculo de la mecánica cuántica del comportamiento del universo primitivo, aunque dichos cálculos están incompletos por la carencia de una teoría intrínsecamente coherente de gravedad cuántica.

Protón: un tipo de partícula subatómica que, junto con el neutrón, constituye el núcleo atómico. El protón posee una carga eléctrica positiva y está compuesto por tres cuárks. (Ver neutrón; cuárk.)

q_0 : parámetro de desaceleración. (Ver parámetro de desaceleración.)

Radiación antirradiante: un tipo único de radiación cuyo espectro y otras propiedades se caracterizan en su totalidad en términos de una sola cantidad, la temperatura. La radiación antirradiante se produce después de que un grupo de partículas y fotones llega a un estado de equilibrio térmico entre sí, en el cual cada reacción entre las partículas se compensa por la reacción contraria, de modo que el sistema como un todo ya no sigue cambiando. En esta situación, todas las partes del sistema, incluyendo la radiación, han llegado a la misma temperatura. La radiación antirradiante se produciría, por ejemplo, dentro de un horno que se mantuviera a temperatura constante y cuya

puerta permaneciera cerrada durante largo tiempo. (Ver fotón; espectro; equilibrio térmico.)

Radiación cósmica de fondo: a menudo denominada simplemente radiación de fondo, o radiación cósmica de microondas, es un penetrante baño de ondas de radio que provienen de todas las direcciones del espacio. Según la teoría del big bang, esta radiación se produjo por las colisiones de las partículas cuando el universo era mucho más joven y caliente, y llenó el espacio de manera uniforme. Las colisiones entre la radiación y la materia cesaron cuando el universo tenía una edad aproximada de 300 mil años; desde entonces, la radiación cósmica de fondo se ha estado dispersando libremente por el espacio. Hoy tiene la forma de ondas de radio.

Radio o límite de Schwarzschild: la "superficie" de un agujero negro, dentro de la cual la fuerza de gravedad es tan fuerte que la luz no logra escapar. El radio de Schwarzschild es proporcional a la masa del agujero negro, y mediría unos tres kilómetros para un agujero negro con una masa similar a la de nuestro sol. Karl Schwarzschild "descubrió teóricamente" los agujeros negros, en 1917. (Ver agujero negro.)

Relación de Faber-Jackson: correlación observada en forma empírica entre las velocidades de estrellas en el centro de una galaxia y la luminosidad de la galaxia: a mayores las velocidades aleatorias, más luminosa será la galaxia. Debido a que las velocidades de las estrellas pueden medirse directamente por medio del efecto Doppler en sus colores, la relación Faber-Jackson permite calcular la luminosidad de una galaxia. Al compararla con la brillantez observada, podemos deducir la distancia que existe hasta esa galaxia.

Relación de Tully-Fisher: una relación observada entre la luminosidad de una galaxia espiral y la velocidad de rotación de sus estrellas. Las galaxias más luminosas poseen estrellas que se desplazan más rápidamente. (Ver galaxia.)

Relatividad: la teoría de cómo el movimiento y la gravedad afectan las propiedades del tiempo y el espacio. La teoría especial de la relatividad establece, entre otras cosas, la naturaleza no absoluta del tiempo. El tiempo que transcurre entre dos sucesos no será el mismo para dos observadores o relojes en movimiento relativo entre sí. La teoría general de la relatividad describe cómo la gravedad afecta la geometría del espacio y la velocidad a la que transcurre el tiempo. (Ver relatividad general; relatividad especial.)

Relatividad especial: teoría del tiempo y el espacio de Einstein. Formulada en 1905, muestra cómo difieren las mediciones de longitud y tiempo para los observadores en movimiento relativo.

Relatividad general: La teoría de la gravedad de Einstein, formulada en 1915. La teoría de la relatividad general prescribe la gravedad producida por cualquier disposición de materia y energía.

Segunda ley de la termodinámica: una ley física formulada en el siglo XIX, que sostiene que cualquier sistema aislado se torna más desordenado con el tiempo. (Ver entropía.)

Segundo de arco: unidad de ángulo en astronomía. Un segundo de arco es $1/3600$ de grado.

Simulaciones: en la ciencia, los modelos del comportamiento de sistemas físicos realizados computacionalmente. (Ver simulaciones de cuerpo N.)

Simulaciones de cuerpo N: simulaciones computacionales del comportamiento de un gran número de cuerpos bajo sus interacciones mutuas. En las simulaciones cosmológicas de cuerpo N, por lo general los cuerpos son galaxias y las interacciones son gravitacionales. El computador simula cómo un grupo de galaxias debiera comportarse bajo su atracción gravitacional mutua. La ley de gravedad y las posiciones y velocidades

iniciales de las galaxias hipotéticas y otras masas se ingresan al computador, el que posteriormente calcula la evolución del sistema.

Singularidad: un lugar ubicado en el espacio o en el tiempo, donde cierta magnitud, como la densidad, se torna infinita. Las leyes de la física no pueden describir cantidades infinitas y, de hecho, los físicos piensan que las cifras infinitas no existen en la naturaleza. Por lo tanto, todas las singularidades, como la de Schwarzschild, probablemente son artefactos creados por teorías inadecuadas y no propiedades verdaderas de la naturaleza. Según la teoría de la relatividad general de Einstein, el universo comenzó en una singularidad de densidad infinita, el big bang. Hoy, los físicos piensan que una modificación aún no descubierta de la relatividad general, que incorpore la mecánica cuántica, demostrará que el universo no comenzó como una singularidad. (Ver singularidad de Schwarzschild.)

Singularidad de Schwarzschild: el centro de un agujero negro. De acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, toda la masa de un agujero negro se concentra en un punto en su centro, la "singularidad". Hoy, los físicos creen que los efectos de la mecánica cuántica, no incluidos en la teoría, harían que la masa se esparciese sobre una región pequeñísima pero no igual a cero, evitando con ello una densidad de materia infinita y eliminando la singularidad.

Superconglomerado: un conjunto de aglomeraciones galácticas que se extiende a unos 100 millones de años luz.

Teorema (o método) virial: en la física gravitacional, una relación cuantitativa entre la cantidad de energía gravitacional y la cantidad de energía cinética de un sistema físico aislado en equilibrio. Así, para un sistema de estas características, se debe medir directamente sólo uno de los dos tipos de energía; el otro se puede deducir mediante el teorema virial. El universo como un todo no está en un estado de equilibrio, por lo que no es necesario que su energía gravitacional y su energía cinética de expansión obedezcan al teorema virial.

Teoremas de singularidad: en astronomía y cosmología, pruebas matemáticas que muestran las condiciones bajo las cuales una masa colapsará gravitacionalmente para formar una singularidad. Los teoremas de singularidad de la cosmología, probados en la década de 1960, indican que el comportamiento actual del universo, junto con las leyes de relatividad general pero sin las correcciones de la mecánica cuántica, requiere que en algún tiempo definido en el pasado el universo estuvo comprimido en un estado de tamaño cero y densidad infinita, llamado singularidad. Las leyes de la física no sirven frente a una singularidad y no pueden utilizarse para predecir nada antes o durante la singularidad. (Ver singularidad.)

Teoría de campo: teoría donde las fuerzas entre dos partículas se comunican a través de un "campo" de energía, el que llena el espacio entre dos partículas. En una teoría de campo, cualquier partícula -por ejemplo, un electrón- está rodeada por un campo. Este campo crea y destruye continuamente partículas intermediarias, que transmiten la fuerza de un electrón a otras partículas. De hecho, se considera que las partículas en sí son concentraciones de energía en el campo.

Teoría Einstein -De Sitter: una solución particular a las ecuaciones cosmológicas de Einstein en la que el universo es plano. (Ver universo plano.)

Teoría electrodébil: la teoría que unifica la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil en una sola fuerza. Fue desarrollada en la década de 1960 por Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam, y se ha visto confirmada posteriormente en el laboratorio.

Termodinámica: el estudio de cómo los cuerpos cambian a medida que emplean fuerzas e intercambian calor con otros cuerpos.

Tiempo de Hubble: recíproco a la constante de Hubble. El tiempo (o época) de Hubble proporciona un cálculo para la edad del universo. Para obtener un valor preciso para la edad del universo también hay que conocer ω , ya que la velocidad de expansión ha cambiado con el tiempo. (Ver parámetro de desaceleración; constante de Hubble; ω .)

Tubos de imagen: dispositivos electrónicos que amplifican la luz que reciben, al tiempo que preservan su dirección.

Unidad luminosa estándar: en astronomía, cualquier clase de objetos con la misma luminosidad, o con alguna propiedad que permita una determinación confiable de las luminosidades. (Ver cefeida; luminosidad.)

Universo abierto: un universo cuyo destino es expandirse siempre. En un universo abierto, la energía cinética de expansión siempre es mayor que la energía gravitacional, y el valor de ω siempre es inferior a 1. Los universos abiertos tienen la geometría de una superficie curva infinita con el mismo grado de curvatura en cada punto. (Ver universo cerrado; ω .)

Universo cerrado: universo finito. Los universos cerrados se expanden por un tiempo finito, alcanzan un tamaño máximo y después colapsan. En los universos cerrados domina la fuerza centrípeta de gravedad, la que finalmente invierte la propagación centrífuga de la materia; es decir, la energía gravitacional domina la energía cinética de expansión. El valor de ω es mayor a 1 para un universo cerrado. Si un universo comienza cerrado, permanece cerrado; si comienza abierto, sigue abierto; si comienza siendo plano, mantendrá asimismo su condición. En el modelo del big bang, el que el universo sea cerrado, abierto o plano lo determinan las condiciones iniciales, tal como el destino de un cohete lanzado desde la Tierra está determinado por su velocidad ascendente inicial, relativa a la fuerza de la energía gravitacional de la Tierra. Si la velocidad inicial de expansión del universo fue inferior a un valor crítico, determinado por la densidad de masa, el universo se expandirá sólo durante un cierto tiempo y luego colapsará, como lo haría un cohete lanzado con una velocidad inferior al valor crítico dependiente de la fuerza de la gravedad de nuestro planeta, que alcanzaría una altura máxima y luego caería a la Tierra. Así se comporta un universo cerrado. Si la velocidad inicial de expansión del universo fue mayor que el valor crítico, el universo es abierto y no cesará de expandirse. Si la velocidad inicial de expansión fue exactamente igual al valor crítico, entonces el universo es plano, y continuará expandiéndose siempre, aunque con una velocidad de expansión que se aproxima al cero. (Ver universo plano; ω ; universo abierto.)

Universo plano: un universo que está en el límite entre un universo abierto y uno cerrado. En un universo plano, la densidad de masa promedio tiene siempre justamente el valor crítico necesario para mantener la energía gravitacional igual a la energía de expansión. En consecuencia, el valor de ω es 1 para ese universo. Los universos planos tienen un tamaño infinito y la geometría de una superficie plana infinita, es decir, la geometría euclidiana. (Ver universo cerrado; densidad de masa crítica; geometría de Euclides; ω ; universo abierto.)

Universos en reproducción: el proceso, en algunos modelos de universo inflacionario, mediante el cual el universo está constantemente produciendo nuevos universos, separados causalmente unos de otros y también del universo madre. (Ver inflación caótica.)

Vacío: un estado de energía mínima. Debido al principio de incertidumbre, incluso el espacio vacío posee un contenido mínimo de energía.

Vacíos: grandes regiones de espacio sin galaxias.

Velocidad peculiar: la velocidad de una galaxia que se desvía de la velocidad esperada suponiendo una expansión uniforme del universo. (Ver ley de Hubble.)

