Velocidades superlumínicas y causalidad

La teoría einsteiniana de la relatividad prohíbe que las partículas o las ondas se propaguen con velocidad superior a la de la luz en el vacío. La mecánica cuántica admite, en cambio, ese fenómeno

Rolf Tarrach

Uno de los corolarios más conocidos, y más importantes también, de las leyes del electromagnetismo, resumidas por James C. Maxwell en famosas ecuaciones, es la predicción de la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan con velocidad constante en el vacío. Esta velocidad, c, no depende ni de la intensidad, ni de la frecuencia de las ondas; tampoco, por consiguiente, de su longitud de onda, que es razón entre la velocidad y la frecuencia.

Resulta, además, que dicha velocidad constante en el vacío es igual a la de propagación de la luz. Ole Romer dio ya un valor de ésta en 1676. El astrónomo danés vio en el Observatorio Real de París que el tiempo transcurrido entre eclipses de las lunas de Júpiter por el planeta se acortaba conforme la Tierra se acercaba a Júpiter, intervalo que se alargaba a medida que ambos planetas se alejaban entre sí. Romer atribuyó ese fenómeno al tiempo que la luz necesitaba para recorrer la distancia entre Júpiter y la Tierra. De acuerdo con sus observaciones, concluyó, la luz se propagaba a una velocidad de 225.000 kilómetros por segundo.

ROLF TARRACH es catedrático de física teórica de la Universidad de Barcelona. Su campo de investigación es la teoría cuántica de campos y aspectos avanzados de la mecánica cuántica. En particular ha trabajado en diversos temas de electrodinámica cuántica, cromodinámica cuántica, trivialidad, grupo de renormalización, mecánica cuántica de alones y vacíos modificados. Ha publicado cerca de un centenar de artículos.

Todas las ondas electromagnéticas (las de radio, micrométricas, infrarojas, luz del espectro visible, ultravioleta A y B, rayos X blandos y duros, rayos gamma, etcétera) se propagan en el vacío con la misma velocidad: a 299.792.458 metros por segundo. Ese valor de c se estableció en 1983, año en que se decidió utilizar su carácter de constante universal para definir el metro a partir del segundo. Hasta entonces se venía definiendo el metro y el segundo con sus respectivos patrones, para medir luego c con ellos. De ese modo, una magnitud básica, la longitud, pasaba a ser magnitud derivada.

La consideración de constante universal le vino a la velocidad de la luz de la mano de la teoría de la relatividad especial de Albert Einstein. Enunciada ésta en 1905, no sólo postula la independencia de c respecto de la frecuencia de la onda electromagnética, sino también respecto del estado de movimiento del observador, siempre que éste sea inercial. (Llámase observador inercial aquel para el cual todas las fuerzas tienen una causa física independiente del mismo.) En virtud de dicha independencia, dos observadores inerciales, en movimiento de velocidad constante uno respecto del otro, siempre medirán la misma velocidad de propagación de la luz aunque, debido al efecto Doppler, percibieran la luz con color diferente. (La versión más familiar de ese efecto se produce en el sonido, que se eleva, aumenta la frecuencia, a medida que la fuente emisora se acerca a nosotros.)

En el ejemplo de los dos observadores inerciales deja de ser válida la ley clásica de adición de velocidades, que tan buen resultado nos da al caminar sobre la cinta transportadora del aeropuerto. Pero la relatividad especial nos dice más. Toda partícula dotada de masa se mueve con una velocidad que es siempre inferior a c; ahora bien, todo transporte de energía y toda transmisión de información utilizan como vehículo partículas materiales u ondas electromagnéticas; por tanto, concluye Einstein, ninguna velocidad asociada al transporte de energía o a la transmisión de información puede superar la velocidad de la luz en el vacío. La teoría general de la relatividad, creada por Einstein en 1915, refuerza y generaliza estos resultados.

En física, la noción de causalidad viene condicionada por la idea de velocidad máxima, insuperable, que caracteriza a la propagación de la luz en el vacío. Para entenderlo, imaginemos que en este instante preciso estallase el Sol, fenómeno que comportaría trágicas consecuencias en la Tierra. Desde aquí tardaríamos ocho minutos en percibir la explosión; o lo que es lo mismo: en ese intervalo de ocho minutos, la Tierra no se resentiría en absoluto de cualquier efecto derivado del estallido solar.

¿Qué ocurriría si hubiera velocidades de propagación superiores a la de la luz? Se producirían situaciones muy curiosas. La más espectacular es, sin duda, la posibilidad de violar la ley de la causalidad, dependiente como hemos visto de c. Estaríamos ante lo que coloquialmente se conoce como paradoja del abuelo. Si hubiesen causas (y por tanto efectos) que se propagasen a velocidad superior a c en ciertos sistemas de referencia, podrían aquéllas propagarse hacia atrás en el tiempo para ciertos observadores inerciales. Semejante situación permitiría que yo convenciese a mi abuelo, enviándole un mensaje que recibiría en su juventud, de las ventajas del celibato y, por tanto,

podría, con mis ideas, impedir que yo naciera. La paradoja es palmaria: impedir la existencia del nieto por el propio nieto.

Horizonte de partículas

Pese a las paradojas de ese tenor, la física reconoce la existencia de muchas velocidades que superan la de la luz. Acudamos a otro ejemplo. Nos lo proporciona nuestro universo y basta con percibirlo. El modelo estándar del universo, la teoría de la gran explosión ("big bang"), presenta tres predicciones coherentes con la observación astronómica y las mediciones astrofísicas: velocidad de expansión del universo, radiación de fondo y composición química del cosmos.

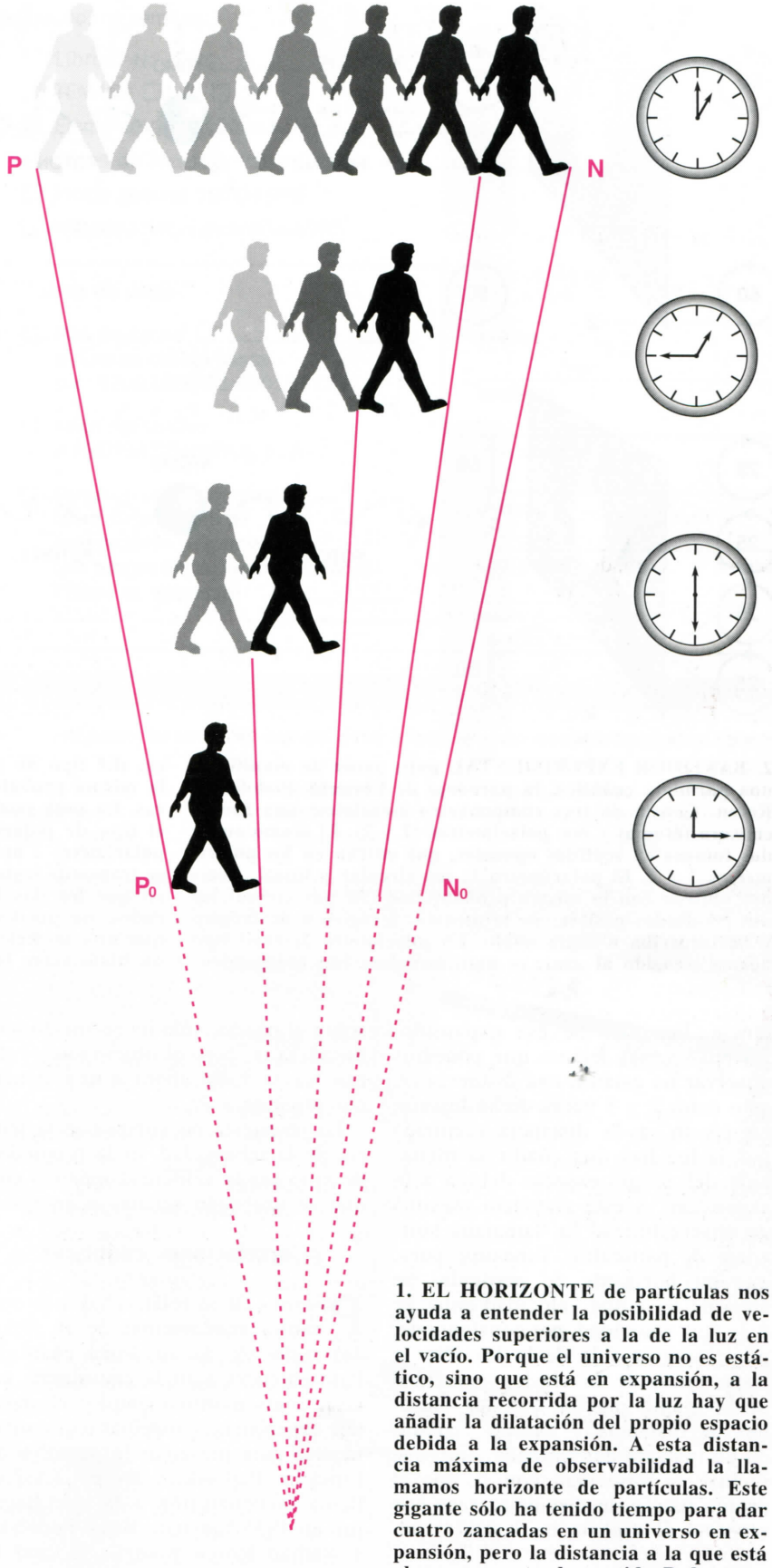
La velocidad de expansión del universo se mide por la constante de Hubble, así llamada en honor de Edwin Hubble. Para cualquier galaxia, dicha constante es su velocidad de alejamiento (o recesión) dividida por la distancia a que se encuentra de nosotros, cociente que se expresa en kilómetros por segundo y por megaparsec; vale (70 ± 30) km $\times$ s^{-1} por cada megaparsec de distancia. Un megaparsec (3×10^{22} m) es la unidad de distancia astronómica que equivale a un millón de parsecs, es decir, 3.262.000 años luz.

La segunda predicción es la radiación de fondo remanente del momento en que se formaron los átomos, lo que ocurrió cuando el universo tenía algunos centenares de miles de años de edad. Esta radiación, que desde entonces ha evolucionado sin apenas interactuar con la materia del universo, la ha medido con mucha precisión el satélite *COBE* y corresponde a una temperatura actual del universo de unos tres grados kelvin; exactamente, $(2{,}726 \pm 0{,}010)$ K.

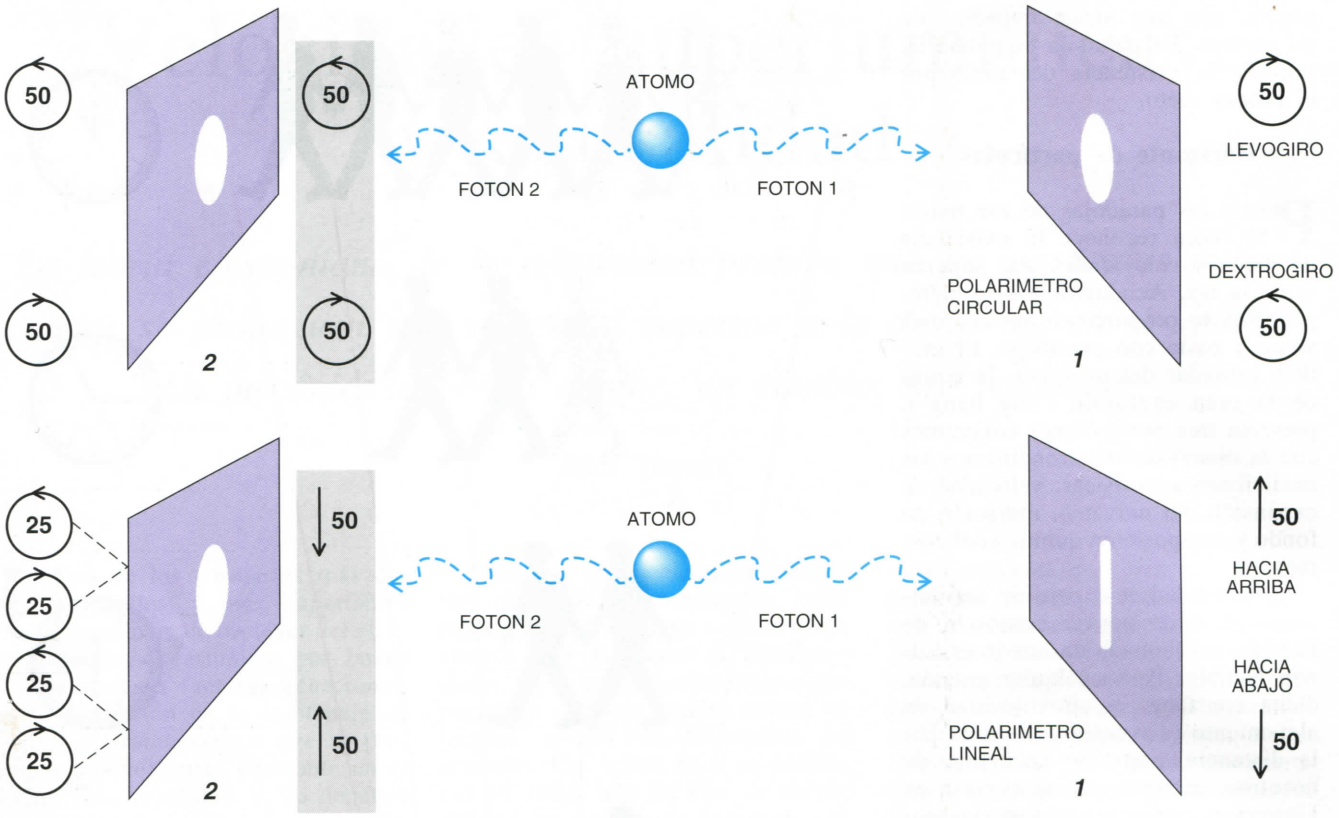
La tercera predicción se refiere a la composición química del universo tal como quedó fijada en la era de la nucleosíntesis, o de formación de los núcleos atómicos. El universo tenía entonces unos tres minutos de edad. Sobre tal composición podemos afirmar, *grosso modo*, que un 25 % de la masa actual del universo es de helio y un 75 % de hidrógeno.

Consideremos ahora los puntos más lejanos del universo que podamos, en principio, observar. Si el universo fuese estático, como se creía a principios de siglo, esta distancia máxima de observación sería simplemente ct, donde t representa la edad del universo; esa edad corresponde a la distancia que ha recorrido la luz emitida en los primeros instantes del universo.

Pero el universo no es estático, sino que se halla en expansión desde los primeros instantes de su exis-



1. EL HORIZONTE de partículas nos ayuda a entender la posibilidad de velocidades superiores a la de la luz en el vacío. Porque el universo no es estático, sino que está en expansión, a la distancia recorrida por la luz hay que añadir la dilatación del propio espacio debida a la expansión. A esta distancia máxima de observabilidad la llamamos horizonte de partículas. Este gigante sólo ha tenido tiempo para dar cuatro zancadas en un universo en expansión, pero la distancia a la que está ahora su punto de partida P de nosotros, que nos encontramos en N, es de siete zancadas. El punto P dista ahora de N un intervalo superior a la distancia recorrida por el gigante. P es nuestro horizonte de partículas.



2. BASTIDOR EXPERIMENTAL para poner de manifiesto una paradoja cuántica, la paradoja de Einstein, Podolski y Rosen. Consta de tres componentes esenciales: una fuente emisora (átomo) y dos polarímetros (1 y 2). El átomo emite dos fotones en sentidos opuestos, que entran en los polarímetros 1 y 2. El polarímetro 1, sea circular o lineal, siempre obtiene con la misma probabilidad (50 por ciento) los dos resultados posibles de la medida: levógiro o dextrógiro y hacia arriba o hacia abajo. El polarímetro 2, cuyo tipo hemos escogido al azar, es aquí circular; con independencia del tipo de polarímetro que sea el 1, siempre da con la misma probabilidad polarizaciones levógiras y dextrógiras. La zona sombreada contiene la información que refleja el tipo de polarímetro que se ha escogido en 1 y que el polarímetro 2 no es capaz de reconocer. La información no se transmite instantáneamente. La paradoja cuántica estriba en que los dos fotones, aunque estén espacialmente separados, no pueden describirse cada uno por su lado hasta que una medición realizada sobre uno de ellos no fuerce un hiato entre los dos.

tencia. Por mor de esa expansión, los puntos más lejanos que podemos observar no están a una distancia *ct*, sino entre 2 y 3 veces dicha lejanía; en efecto, a la distancia recorrida por la luz hay que añadir la dilatación del propio espacio debida a la expansión. A esta distancia máxima de observabilidad la llamamos horizonte de partículas. Tenemos, pues, que mi horizonte de partículas se aleja de mí a una velocidad entre *2c* y *3c*, una velocidad, por consiguiente, muy superior a la de la luz. No se trata, pues, de la clásica velocidad de un punto medida con los patrones de distancia y tiempo vigentes en un instante determinado, sino que incluye la velocidad con la que el propio patrón de distancia crece con respecto al vigente en instantes anteriores.

Ahora bien, ¿cómo podemos observar objetos que están a una distancia superior a *ct*? La respuesta es sencilla: la señal que observo, y que me proporciona toda la información sobre el objeto, sólo ha recorrido una distancia *ct*, pero el objeto emisor de esa luz se halla ahora a una distancia superior a *ct*.

La respuesta no contradice la teoría de la relatividad, ni la propiedad de *c* de ser la velocidad máxima con que se propagan señales o energía.

Correlaciones cuánticas

Pasemos de la relatividad a la otra teoría fundamental de la física del siglo XX, la mecánica cuántica. Para entender aquí la causalidad, recurriremos a otro ejemplo: el montaje experimental imaginario que suele idearse para presentar la paradoja de Einstein, Podolski y Rosen. (Así se llama la conclusión a la que llegaron en 1935 Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen y según la cual la mecánica cuántica es una teoría incompleta.)

El bastidor experimental imaginario constará de tres componentes esenciales: una fuente emisora y dos polarímetros, o aparatos medidores de la actividad óptica. Sea un átomo que emite dos fotones en sentidos opuestos; admitamos que, al medir las polarizaciones circulares de cada uno de ellos, siempre sean también opuestas. Cuando el fotón que llega al polarímetro 1 resulta, al medir, ser dextrógiro, el otro es levógiro, y viceversa; además, ambos resultados son equiprobables. La paradoja cuántica estriba en que los dos fotones, aunque estén espacialmente separados, no pueden describirse cada uno por su lado hasta que una medición realizada sobre uno de ellos no fuerce un hiato entre los dos.

La mecánica cuántica no permite siempre describir por separado los subsistemas de un sistema. Cuando la descripción ha de ser necesariamente global, sólo la medición realizada de un subsistema nos posibilita explicarlo separado del sistema. Por tanto, en cualquier instante considerado, podemos conocer la polarización del fotón que entra en el polaríme-

tro 2 al medir la polarización del fotón que entra en el polarímetro 1. Quiere ello decir que el fotón que entra en el polarímetro 2 tendrá una polarización circular bien definida al medir nosotros la polarización circular del fotón que entra en el polarímetro 1.

Las cosas no cambian si sustituimos polarizaciones circulares por lineales. Así, el fotón que entra en el polarímetro 2 mostrará ahora una polarización lineal bien definida al medir el observador la polarización lineal del fotón que entra en el polarímetro 1; ambas polarizaciones lineales serán, además, opuestas. Si el fotón del polarímetro 1 presenta polarización hacia arriba, el otro la presentará hacia abajo, y viceversa.

Habida cuenta de que un fotón no puede estar simultáneamente caracterizado por ambas polarizaciones, circular y lineal, la reflexión sobre lo anterior nos hace descubrir la paradoja escondida en el experimento imaginario: puesto que el fotón que entra en el polarímetro 2 unas veces tiene polarización circular y otras lineal cuando sólo se ha medido la polarización del otro fotón y los dos entran en los polarímetros en el mismo instante, no puede haber relación causal entre los resultados de las dos mediciones. ¿Cómo puede la polarización de un fotón, circular o lineal, quedar determinada instantáneamente por el tipo de polarímetro con el que efectuamos la medida sobre el otro fotón?

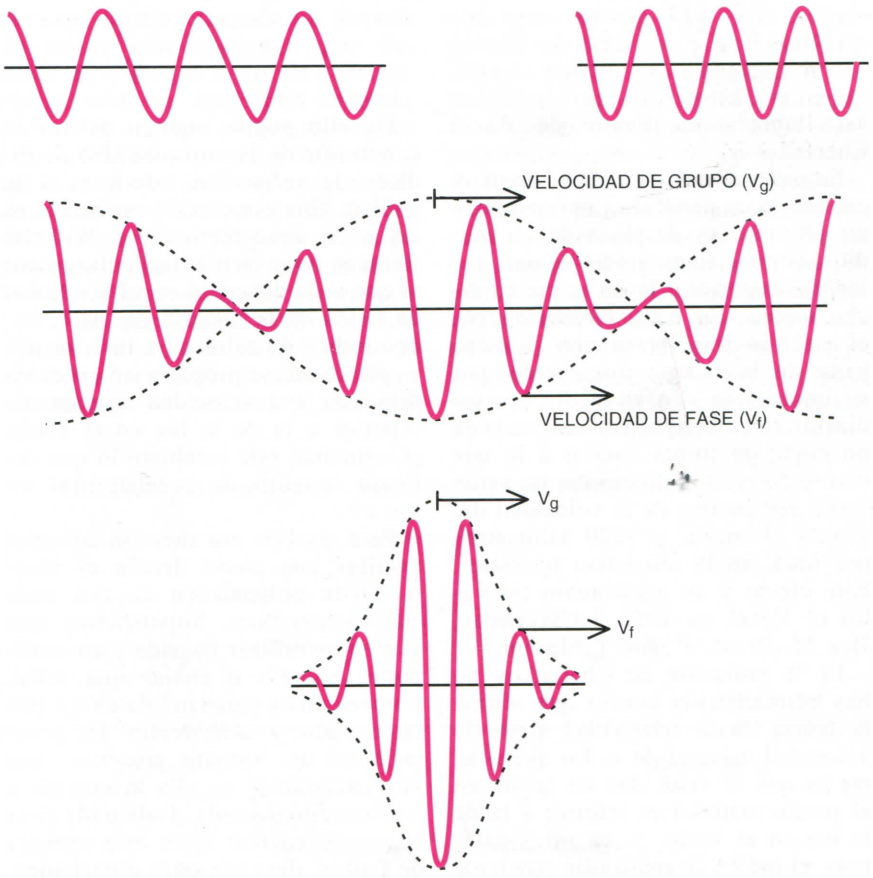
Para no desviarnos del tema, aceptemos que la paradoja no obliga a modificar la mecánica cuántica. Será preciso entonces cambiar nuestra forma común de entender la localidad y admitir la no separabilidad de las descripciones de uno y otro fotón. Pero se nos plantea un problema más espinoso, relativo a la información obtenida del sistema. ¿Permite transmitir instantáneamente información la determinación instantánea de la clase de polarización de un fotón por el tipo de polarímetro que utilizamos para medir la clase de polarización del otro?

Un símil, aunque algo forzado, nos allanará el terreno. Imaginemos un matrimonio formado por una astronauta que vive en una estación instalada en la Luna y un escritor que vive en la Tierra. La lejanía rompe el matrimonio. Llevado el pleito a los tribunales, el juez dicta sentencia en presencia del escritor. Si la sentencia resuelve que debe anularse el matrimonio, la astronauta es soltera desde ese mismo instante, aunque la notificación, enviada vía láser a la Luna, tarda algo más de un segundo en llegar. Lo mismo, si el juez dicta sentencia de divorcio; la astronauta está divorciada instantáneamente. El compromiso matrimonial puede, pues, dehacerse, por anulación o por divorcio, pero no por ambos simultáneamente. Se da una correlación instantánea entre los estados civiles de los dos ex cónyuges; no hay, sin embargo, señal física instantánea que notifique a la astronauta su soltería o su divorcio; vale decir, no hay una relación de causa a efecto de tipo físico. La velocidad de propagación de la correlación es infinita (instantánea), pero no se refiere a nada que transporte información o energía.

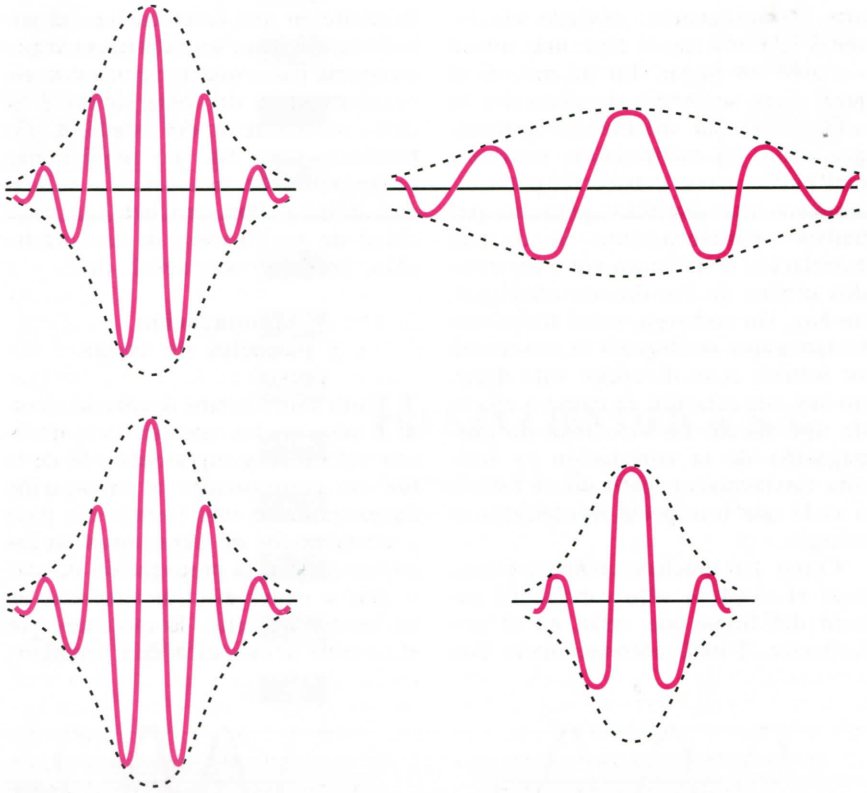
Como en muchas comparaciones, aquí el símil es sólo parcial. El estado del fotón que entra en el polarímetro 2 está correlacionado con la medición que se efectúa en el polarímetro 1, pero no está causado por un agente físico que transporte energía o información del polarímetro 1 al 2. La modificación del estado es instantánea, pero esto no implica una propagación de una señal a velocidad infinita. Por otro lado, la velocidad de verificación de la correlación, enviando una señal, es *c*.

Propagación y paquetes de ondas

Hasta ahora hemos analizado ejemplos en los que, si bien aparecen velocidades superiores a la de la luz, no corresponden a propagación de partículas o luz. Demos ese paso y ocupémonos de situaciones en las que se analice la propagación de partículas u ondas electromagnéticas en un medio material. Empecemos por el caso de la radiación de Cherenkov,



3. SUPERPOSICION DE DOS ONDAS MONOCROMATICAS de frecuencias diferentes para constituir una sola onda. La frecuencia de la onda de la derecha es mayor (*arriba*). La superposición produce una pulsación (*centro*). El máximo de la pulsación ocurre donde las dos ondas monocromáticas muestran, ambas, crestas o valles. Por tratarse de una interferencia constructiva, las amplitudes de las ondas originarias se suman. La velocidad de propagación de la onda resultante se llama velocidad de grupo (V_g, no sinusoidal); ésta se distingue de la correspondiente a los máximos o mínimos locales, que se desplazan con la velocidad de fase (V_f, sinusoidal). En la parte inferior se representa un paquete de ondas, que por ser de extensión finita contiene en principio todo el espectro de ondas monocromáticas, y las velocidades correspondientes.



4. DEFORMACION del paquete de ondas debida a la dispersión (*arriba*) y a la absorción (*abajo*). La dispersión se debe a que la velocidad de fase en un medio depende de la frecuencia; cada onda monocromática se propaga, pues, con velocidad distinta. La absorción de la onda por el medio va restándole intensidad conforme va propagándose, hasta que termina por desvanecerse. La dispersión y la absorción no son fenómenos independientes.

así llamada en honor de Pavel Cherenkov.

Se produce radiación de Cherenkov cuando una partícula, normalmente un electrón, se desplaza en un medio material transparente a una velocidad superior a la de la luz en dicho medio. En estas circunstancias, el electrón transforma una pequeña parte de la energía que pierde, por su interacción con el medio, en radiación electromagnética confinada en un cono, de forma similar a lo que ocurre con el sonido cuando un avión vuela por encima de la velocidad del sonido (1 mach, o 1229 kilómetros por hora, en la atmósfera terrestre). Este efecto y su explicación les valió el Nobel en 1958 a Cherenkov, Ilya M. Frank e Igor Y. Tamm.

En la radiación de Cherenkov no hay contradicción con lo que afirma la teoría de la relatividad sobre la velocidad máxima de c. Lo que ocurre es que la velocidad de la luz en el medio material es inferior a la de la luz en el vacío, o, en otras palabras, el índice de refracción (cociente entre la propagación en el vacío y la primera) es mayor que uno. Así, en el vidrio el índice de refracción va de 1,5 a 1,7 cuando la frecuencia de la luz crece desde el color rojo hasta el violeta. Hay, pues, un gran margen para velocidades superiores a la de la luz en el vidrio, pero inferiores a la de la luz en el vacío.

De ello podría alguien extraer la conclusión de la imposibilidad de índices de refracción inferiores a la unidad. Una conclusión errónea. Los rayos X, descubiertos por Wilhelm Röntgen hace cien años, hallazgo por el que se le concedió el primer Nobel de física de la historia en 1901, tienen índice de refracción inferior a 1 y, por tanto, se propagarían en el vidrio con una velocidad ligeramente superior a la de la luz en el vacío. ¿Contradice este resultado lo que defiende la teoría de la relatividad sobre c?

Para resolver esa cuestión debemos analizar con cierto detalle el fenómeno de propagación de una onda electromagnética. Supongamos que queremos utilizar la onda para transportar energía o enviar una señal. Empezaremos generándola en un instante dado y acabaremos de generarla en un instante posterior, una vez introducida en ella la energía o información deseada. Toda onda electromagnética real tiene este carácter de finitud. Pero una onda estrictamente monocromática (onda armónica), de una sola frecuencia, es necesariamente de extensión infinita, según sabemos por la ecuación diferencial que la describe.

Si superponemos dos ondas monocromáticas de frecuencias diferentes, obtenemos una sola onda, que continúa siendo de extensión infinita aunque ahora está modulada: se ha convertido en una pulsación. El máximo de la pulsación ocurre donde las dos ondas monocromáticas muestran, ambas, crestas o valles. La interferencia es entonces constructiva. El mínimo de la pulsación ocurre donde una onda monocromática tiene una cresta y la otra un valle: interfieren destructivamente. La velocidad de propagación de la onda resultante se llama velocidad de grupo (no sinusoidal); ésta se distingue de la correspondiente a los máximos o mínimos locales, que se desplazan con la velocidad de fase (sinusoidal).

Las ondas de extensión finita que percibimos son en realidad paquetes de ondas, esto es, la superposición de un número infinito de ondas monocromáticas. Por ejemplo, la luz que vemos azul no está formada por una sola frecuencia matemáticamente precisa, sino que constituye siempre un paquete continuo de ondas monocromáticas en el que dominan las frecuencias correspondientes al color azul.

En el vacío todas las ondas electromagnéticas monocromáticas se propagan con la misma velocidad; dicho de otro modo, la velocidad de fase de la onda no depende de la frecuencia. En razón de ello, la velocidad de grupo también coincide con esta velocidad constante, y de hecho cualquier punto de un paquete de ondas se desplaza con la misma velocidad, ya que no se deforma al propagarse. Esta constante es la velocidad de la luz en el vacío.

Medios absorbentes e inversión de población

Si dejamos el vacío y pasamos a un medio material (aire o agua, por ejemplo), aparecerán dos fenómenos nuevos: la dispersión y la absorción. La dispersión (fenómeno en que el índice de refracción disminuye con el crecimiento de la longitud de onda) se debe a que la velocidad de fase en un medio depende de la frecuencia; cada onda monocromática se propaga, pues, con ve-

locidad distinta. Si el medio es el agua, podemos comprobar nítidamente esa dispersión en el arco iris, cuando se produce separación de las componentes de distintos colores de la luz solar por las gotas de lluvia. Esta separación, o dispersión, provoca que el paquete de ondas se ensanche y deforme a lo largo de la propagación. La velocidad de grupo depende de cómo varía la velocidad de fase con la frecuencia y de las características del paquete, o sea, del peso que tiene cada frecuencia en el paquete. La absorción de la onda por el medio va restándole intensidad conforme va propagándose, hasta que termina por desvanecerse. La dispersión y la absorción no son fenómenos independientes.

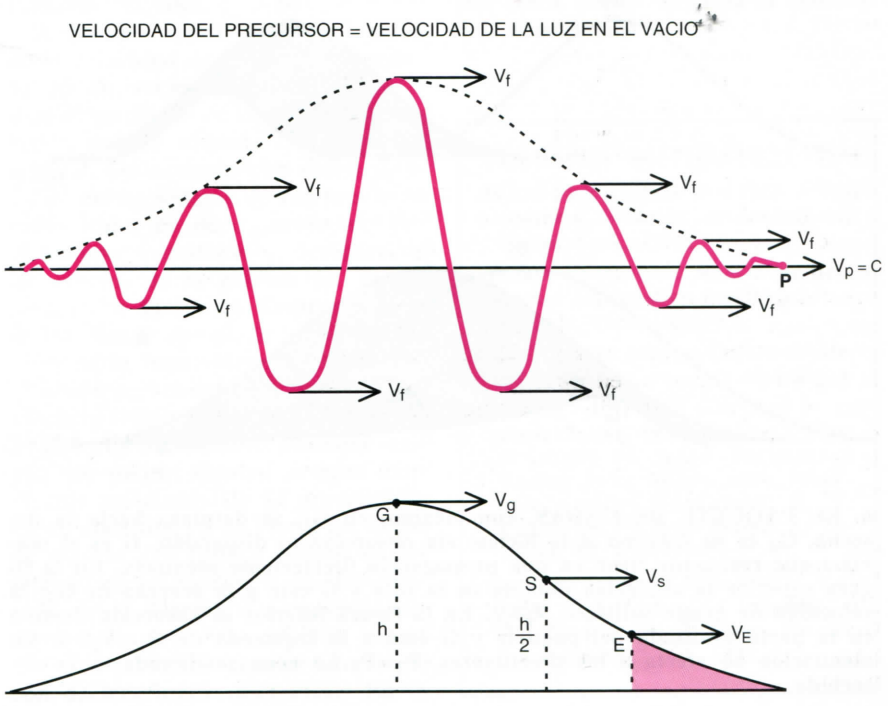
Para abordar la complejidad de la propagación de un paquete de ondas en un medio absorbente, Arnold Sommerfeld y Léon Brillouin introdujeron tres nuevas velocidades: la de transporte de energía, la de la señal o transporte de información y la de los precursores o del frente. La velocidad de transporte de energía corresponde a la que desarrolla un punto que tiene delante de él una fracción fija del paquete. La velocidad de la señal es la del punto que se encuentra a la mitad de la altura del máximo del paquete; por último, la velocidad de los precursores es la del frente más avanzado del paquete.

Cuando el medio es sólo ligeramente absorbente para las frecuencias dominantes del paquete, las velocidades de grupo, de transporte de energía y de la señal vienen a coincidir. Su valor es inferior a la velocidad de la luz en el vacío, con independencia de que la velocidad de fase correspondiente a las frecuencias dominantes sea mayor o menor que la de la luz en el vacío. La velocidad de propagación que se mide experimentalmente es esta velocidad común, la del grupo, energía o señal; dicha velocidad no contradice la teoría de la relatividad.

La velocidad de los precursores, que como acabamos de afirmar corresponde al frente más avanzado de la onda, lugar donde la amplitud se desvanece, escapa pues a toda posibilidad de medición; no hay aparato que pueda lograrlo con suficiente precisión. Esta velocidad es siempre la velocidad de la luz en el vacío: el frente del paquete viene dominado por las frecuencias más altas, para las que la velocidad de fase es c, ya que todo medio a altísimas frecuencias se hace transparente asemejándose al vacío.

En cualquier medio material, sin embargo, existen ciertas frecuencias, llamadas de resonancia, para las que la absorción es muy importante. (En la frecuencia de resonancia una determinada excitación sinusoidal produce la amplitud máxima de oscilación del medio.) Cuando un paquete de ondas está dominado por frecuencias cercanas a las de resonancia se habla de dispersión anómala. Así se la califica porque acontecen varios fenómenos curiosos: la velocidad de grupo se hace superior a la de la luz en el vacío (éste es el caso de los rayos X al propagarse por un vidrio) o incluso negativa, pero la de la señal y la de transporte de energía continúan siendo inferiores a c y positivas. Debido a la intensidad de la absorción es difícil efectuar medidas suficientemente precisas de la velocidad de propagación de la luz en estas circunstancias; ocurre un fenómeno similar cuando el paquete de ondas atraviesa una barrera por efecto túnel [*véase* "¿Más veloz que la luz?", por Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat y Aephraim M. Steinberg, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1993]. Efectivamente, las velocidades de propagación de los fotones medidas por Chiao y colaboradores, que son las de grupo, resultaron ser aproximadamente $(1{,}7 \pm 0{,}2)\ c$. A pesar de ello, la constancia de la velocidad de los precursores y el hecho de que las velocidades de propagación de la señal y de la energía sean menores que c garantizan que nada se propague acausalmente.

Conviene insistir en que la velocidad de propagación del fotón que se mide es superior a c. Para entender por qué ello no contradice la relatividad einsteiniana hay que recordar que la mecánica cuántica hace que las consecuencias de la relatividad sean mucho más sutiles que cuando se refieren a una partícula clásica, puntual. La dualidad onda-corpúsculo que caracteriza a la mecánica cuántica proporciona una descripción ondulatoria de la propagación de una partícula que viene representada por un paquete de ondas. Entonces, en un medio fuertemente absorbente, o en una barrera atravesada por la partícula por efecto túnel, se produce una remodelación del paquete por atenuación intensa de su cola, lo que conduce a adelantar su máximo respecto de la posición que tendría sin



5. PARA EXPLICAR la complejidad de la propagación de un paquete de ondas en un medio absorbente, Arnold Sommerfeld y Léon Brillouin introdujeron la velocidad de transporte de energía, la velocidad de la señal o transporte de información y la velocidad de los precursores o del frente. En la parte superior se representa la velocidad de fase y la velocidad del precursor, P, que siempre es igual a c. En la parte inferior se representa sobre la línea discontinua de la figura superior la velocidad de grupo, V_g, correspondiente al máximo, G; la velocidad de la señal, V_S, correspondiente al punto de media altura, S; y la velocidad de la energía, V_E, correspondiente al punto E que tiene a su derecha una fracción fija de la onda.

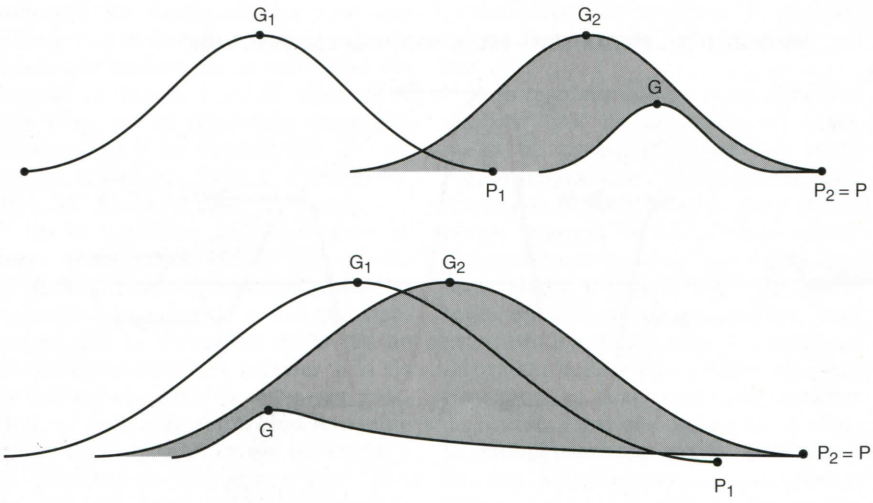
esta atenuación. Resulta así, finalmente, una velocidad de grupo superior a *c*. Lo sorprendente es que, pese a ello, la velocidad de grupo siga siendo la que representa la velocidad de propagación de la partícula.

Cabría preguntar si, al ser la velocidad del máximo del paquete superior a la de los precursores, no los adelantará en algún momento, con lo que se produciría un fenómeno imposible. No hay tal. La absorción de la onda, que ocurre muy rápidamente, no le deja suficiente tiempo al máximo del paquete para ganar esta carrera; cuando alcanza al precursor se desvanece.

El equipo de Chiao afirma haber ahora descubierto circunstancias que conducen a velocidades de transporte de energía y de la señal superiores a *c*, sin por ello poner en un brete la causalidad einsteiniana. Consideran, para su propósito, un medio transparente que no está en equilibrio termodinámico, sino que se caracteriza por presentar lo que se llama inversión de población. En un medio en equilibrio siempre hay menos moléculas en un estado excitado que en el estado fundamental; ahora bien, mediante técnicas introducidas para desarrollar el primer máser (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación), podemos mantener el medio en un estado metaestable, en el que haya más moléculas en el estado excitado que en el fundamental. Un medio que presenta esta inversión de la distribución normal de poblaciones energéticas permite también una remodelación del paquete de ondas que lo atraviesa, tal como ocurría con un medio fuertemente absorbente, aunque ahora por razones distintas: por la ganancia temporal y por la posibilidad de tomar prestada energía del medio, que refuerza la parte avanzada del paquete y que se devuelve al medio a costa de la parte posterior del paquete. Ello conduce a velocidades de grupo, energía y señal superiores a *c*. Una vez más, tampoco se viola la causalidad einsteiniana. Veamos por qué.

La metaestabilidad del medio es tal que, al llegar los precursores del paquete de ondas, decae del estado excitado al fundamental, liberando energía de excitación en la parte avanzada del paquete. El medio recupera luego la energía cedida al paquete de la cola del mismo, debilitando a esta región. El resultado final es un avance de todo el paquete, salvo de su punto más avanzado, y una deformación de aquél. El máximo del paquete (velocidad de grupo), el punto de media altura (velocidad de la señal) y el punto correspondiente a tener delante de él una fracción fija del paquete (velocidad de la energía) se hallan todos avanzados, y las tres velocidades superan de ese modo la velocidad de la luz en el vacío.

La verdad es que la energía no se ha propagado más rápidamente que *c*, pues ya estaba en el medio; tampoco la señal, dado que la información estaba contenida en los precursores, que continúan siendo la avanzadilla. Sin embargo, volvemos a enfrentarnos con la paradoja de que, transcurrido cierto tiempo, si todo continuase igual, el paquete debería adelantar a sus precursores. Dificultad que ahora no nos la resuelve la absorción, sino otro fenómeno: cuando el máximo del paquete se acerca a los precursores, el medio no dispone de suficiente tiempo entre la llegada de éstos y el grueso del paquete para reforzarlo en su parte avanzada, y todas las velocidades se reducen a valores no superiores a *c*. Por consiguiente, lo mismo que para el efecto túnel, se trata de un fenómeno transitorio.



6. EL PAQUETE DE ONDAS, con máximo en G_1, se desplaza hacia la derecha. G_2 es su máximo si lo hiciese sin absorción ni dispersión. G es el máximo que realmente tiene en una propagación fuertemente atenuada. En la figura superior la absorción domina en la cola y G está a la derecha de G_2: la velocidad de grupo satisface $V_g > c$. En la figura inferior la absorción domina en la parte avanzada del paquete y G está a la izquierda de G_1: $V_g < 0$. La atenuación no afecta a los precursores, $P_2 = P$. La zona sombreada es la absorbida.

Vacíos modificados

Hasta aquí hemos considerado la velocidad de propagación en el vacío o en medios materiales. Se sabe, desde hace algunos años, que velocidades de grupo superiores a *c* aparecen en medios más tenues. En particular, I. T. Drummond y S. I. Hathrell lo predijeron para un vacío alterado por la presencia de un campo gravitatorio, y K. Scharnhorst para un vacío de Casimir (así llamado en honor de H.B.G. Casimir) sólo alterado por la presencia, lejana, de materiales conductores de la electricidad. A diferencia de otras modificaciones del vacío, pensemos en las alteraciones del mismo en que se encuentra lleno de radiación electromagnética (vacío de nuestro universo, inundado de radiación de fondo) o lleno de campos electrostáticos o magnetostáticos, el vacío gravitatorio y el de Casimir presentan una característica sorprendente; a saber: poseen una densidad de energía inferior a la del vacío normal, es decir, la que no ha sufrido modificación alguna.

De esa propiedad se infiere que el vacío gravitatorio y el de Casimir corresponden a alteraciones que conllevan extraer energía del vacío. Para el vacío gravitatorio ello se debe al carácter atractivo de la gravitación, que hace que la energía potencial gravitatoria sea negativa. Para el vacío de Casimir la explicación es más compleja. Sabemos que, por el principio de incertidumbre de Heisenberg (en honor de Werner Heisenberg), no podemos conocer simultáneamente, en un nivel microscópico, la posición y el momento de una partícula con absoluta precisión; a la misma incertidumbre están sometidos la de-

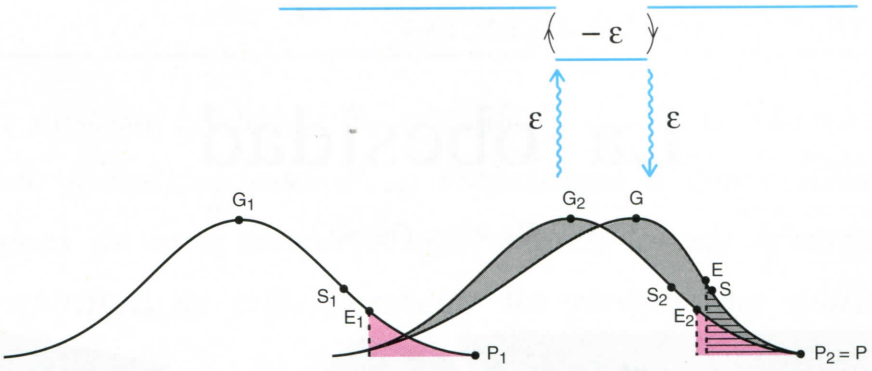
terminación de la energía y el tiempo. En razón del principio de incertidumbre no podemos aplicar el principio macroscópico de causalidad al nivel atómico. Pues bien, el principio de energía-tiempo de Heisenberg y la equivalencia energía-masa de Einstein dotan al vacío de una estructura cuántico-relativista que sólo la teoría cuántica de campos permite modelizar adecuadamente.

Para intervalos de tiempo extraordinariamente breves Heisenberg permite violaciones de la ley de conservación de la energía lo suficientemente importantes para que Einstein transforme esta energía sobrante en partículas, desde luego efímeras. Se llega así a una imagen del vacío en que se encuentra poblado por partículas, masivas o sin masa, como los fotones, pero virtuales, ya que desaparecen al mismo ritmo que aparecen, y que, sin alguna acción exterior, nunca pueden observarse como partículas reales.

Ocurre que en el vacío de Casimir no pueden existir ciertos fotones virtuales porque no son compatibles con las condiciones de contorno que deben satisfacer en la superficie de los conductores lejanos. Una consecuencia de este vacío, comprobada experimentalmente y que no deja de sorprender a muchos científicos, es que dos placas metálicas, planas, paralelas y neutras se atraen con una fuerza por unidad de superficie inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia entre las placas. Así pues, el vacío de Casimir corresponde también a una fuerza atractiva, o, lo que reviste mayor significación, a una energía potencial negativa.

Sabemos ahora que esta densidad de energía negativa del vacío gravitatorio y de Casimir dota, a la luz o fotones de baja energía que se propagan por tales vacíos, de una velocidad de grupo superior a la de la luz en el vacío normal. El fenómeno parece así ser similar al de la propagación de ondas electromagnéticas en medios con inversión de población, aunque la modificación de la velocidad es tan pequeña, que difícilmente podrá observarse en un futuro próximo.

Al igual que un medio con población invertida, el vacío gravitatorio y el de Casimir no están en equilibrio, ya que el carácter atractivo de las correspondientes fuerzas los torna inestables ante fluctuaciones; son, pues, metaestables. Basta observar nuestro universo para ver cómo, por suerte para nosotros, la materia se ha acumulado en forma de estrellas, galaxias y cúmulos buscando el equilibrio. Sólo desde una óptica de macroescala podemos hablar de una distribución uniforme de materia en el universo. La razón de tales agrupaciones se debe a que las distribuciones de masa uniformes no son estables bajo la acción de la atracción gravitatoria.



7. UN MEDIO CON INVERSION DE POBLACION refuerza la parte avanzada del paquete de ondas cediéndole una energía ε que luego recupera sustrayéndola de la cola del paquete. Como consecuencia de esta remodelación los puntos G, E y S que determinan las velocidades de grupo, energía y señal se adelantan con respecto a las posiciones que tendrían en ausencia del medio, G_2, E_2 y S_2, por lo que $V_G > c$, $V_E > c$ y $V_S > c$. Las zonas sombreadas representan las modificaciones de la onda debidas a la cesión temporal de la energía ε por parte del medio.

Si continuamos con la analogía basada en la inestabilidad, llegaremos a la conclusión según la cual las propagaciones de ondas a velocidad superior a la de la luz resultarían también de la deformación del paquete de ondas que toma prestada por un breve instante energía del vacío, que éste ofrece debido a su inestabilidad, reforzando su frente avanzado y debilitando su cola.

A primera vista, la modificación de la velocidad de la luz al propagarse en un vacío gravitatorio contradice el principio de equivalencia, sobre el que se sustenta la relatividad general. De acuerdo con dicho principio, en un sistema de referencia en caída libre, es decir, acelerado por el campo gravitatorio, desaparecen los efectos de la gravitación, la velocidad de la luz es siempre c y la teoría física apropiada para describirlo es la relatividad especial.

Acontece, sin embargo, que la equivalencia relativista es local. Además, en los objetos extensos, aunque caigan libremente, quedan siempre unos efectos residuales de la gravitación, bien conocidos en la Tierra en forma de mareas. (El flujo y reflujo de las mareas corresponden a la deformación de la Tierra: si el planeta cediera a la atracción del Sol, partes distintas del mismo caerían libremente con aceleraciones diferentes.) En la propagación de una partícula o fotón, al comportarse como una onda, abandona una descripción puntual y permite así efectos de marea de origen gravitatorio.

La aparición de velocidades de interés físico superiores a c es transitoria y siempre refleja una descripción no puntual de la partícula o del fotón. La mecánica cuántica, y en particular su descripción ondulatoria de las partículas y los fotones, ha transformado la frase "nada se propaga más rápidamente que la luz en el vacío" en un complejo y sorprendente conjunto de fenómenos que pueden resumirse en otra expresión no menos categórica: "la velocidad de los precursores siempre es c, y, por tanto, nunca se viola la causalidad einsteiniana".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WAVE PROPAGATION AND GROUP VELOCITY. L. Brillouin. Academic Press, Nueva York, 1960.

TEORÍA CUÁNTICA Y REALIDAD. Bernard d'Espagnat en *Investigación y Ciencia*, enero de 1980.

REALIDAD DEL MUNDO CUÁNTICO. Abner Shimony en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1988.

SUPERLUMINAL (BUT CAUSAL) PROPAGATION OF WAVE PACKETS IN TRANSPARENT MEDIA WITH INVERTED ATOMIC POPULATION. R. Y. Chiao, en *Physical Review A*, volumen 48, R34, 1993.

SPEED OF LIGHT IN NON-TRIVIAL VACUA. J. I. Latorre, P. Pascual y R. Tarrach, en *Nuclear Physics* volumen B437, 60, 1995.

El misterio de la constante cosmológica

De acuerdo con la teoría, la constante que mide la energía del vacío debería ser mucho mayor de lo que es. El conocimiento del motivo de esa discrepancia podría revolucionar los fundamentos de la física

Larry Abbot

¿Qué es lo que determina la estructura del espacio y el tiempo en el universo? De acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, las propiedades geométricas del espacio están relacionadas con la densidad de energía (y de momento) del universo. Por consiguiente, para comprender la estructura del espacio-tiempo debemos empezar por identificar fuentes de energía que se presuman importantes y ponderar luego su contribución a la densidad total de energía (y de momento). Las fuentes de energía obvias que acuden a nuestra mente son la materia y la radiación. Una fuente de energía bastante menos obvia que puede incidir de una forma decisiva en la estructura del universo es el espacio sin nada, esto es, el vacío.

La idea de que el vacío constituya una fuente de energía va, así parece, contra la intuición. Pero las teorías actuales de las partículas y de las fuerzas elementales no sólo permiten que el vacío adquiera una densidad de energía distinta de cero, sino que sugieren sólidamente que debe tener un valor alto. ¿Es tanta la densidad de energía del vacío como estas teorías parecen indicar?

La respuesta es decididamente negativa. La estructura geométrica del universo se muestra muy sensible al valor de la densidad de energía del vacío. Reviste tanta importancia este valor que se ha definido una constante proporcional a dicha densidad de energía del vacío. Se trata de la constante cosmológica. Si la densidad de energía del vacío o, equivalentemente, la constante cosmológica, adquiriese el alto valor que le atribuyen las teorías de las partículas elementales, el universo donde vivimos sería del todo distinto y tendría unas propiedades que nos parecerían a la vez extrañas y desconcertantes. ¿En qué yerran nuestras teorías? Todavía no lo sabemos. La verdad es que la comparación de nuestros conocimientos teóricos y experimentales acerca de la constante cosmológica nos conduce a uno de los misterios más enredados y frustrantes de la física de partículas y de la teoría de la relatividad de nuestros días.

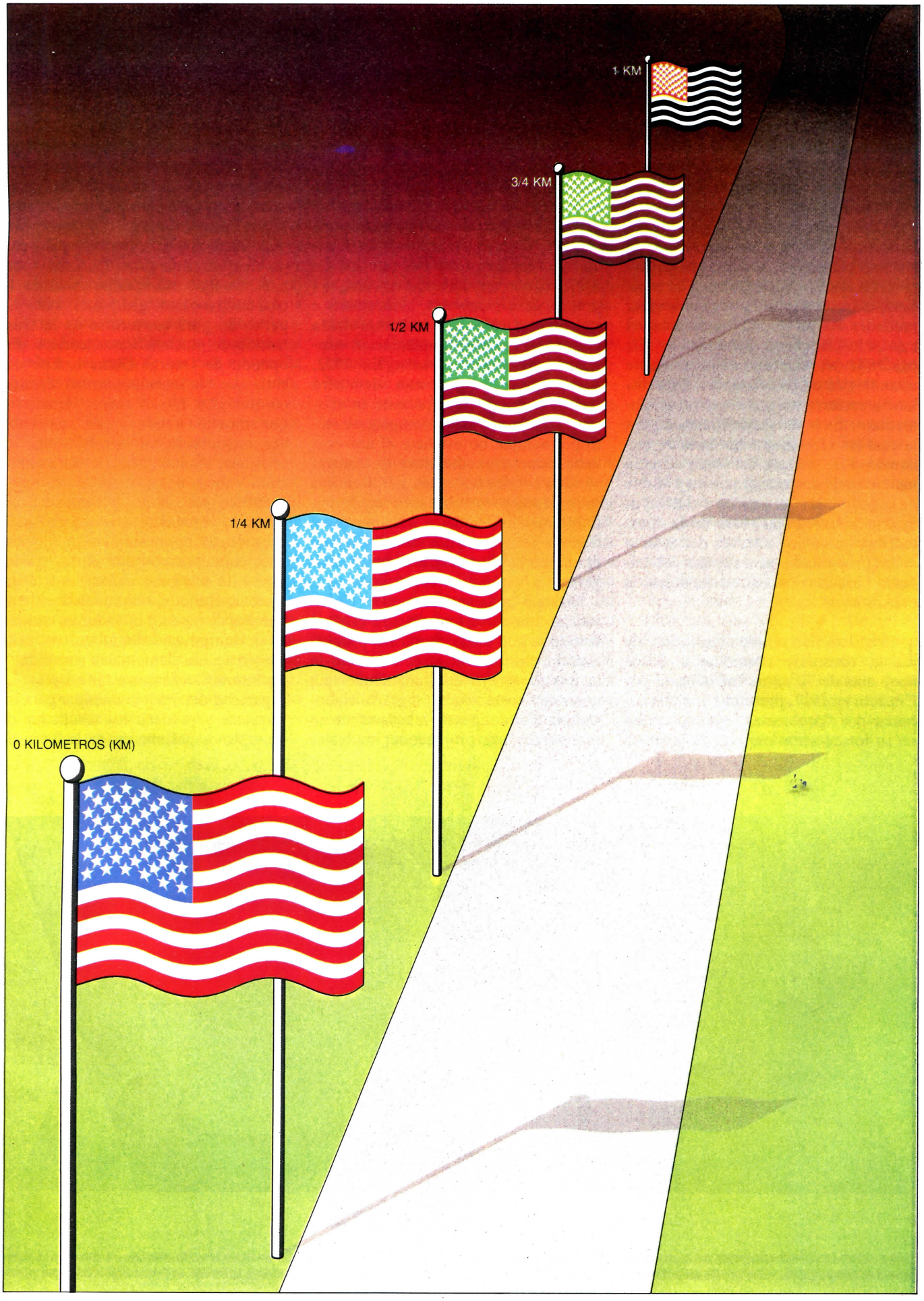
La mayoría de las personas no están acostumbradas a la idea de que el vacío pueda tener una densidad de energía no nula: ¿cómo es posible que una unidad de volumen de espacio vacío contenga energía? La respuesta se halla, en parte, en el hecho siguiente: de acuerdo con la mecánica cuántica, las magnitudes físicas tienden a fluctuar. Incluso en la aparente quietud del estado vacío, aparecen y desaparecen constantemente pares de partículas. Tales fluctuaciones contribuyen a la energía del vacío.

La noción de una energía del vacío resulta también poco familiar porque se trata de una energía que no puede detectarse mediante técnicas usuales. Generalmente, las energías se determinan midiendo el cambio en la energía de un sistema cuando éste se modifica, o bien midiendo la diferencia de energía que hay entre dos sistemas. Así, por ejemplo, podríamos medir la energía que se produce cuando dos compuestos químicos reaccionan. Debido a ello, la energía, tal como la definimos normalmente, es una magnitud relativa. La energía de cierto estado de un sistema tiene sólo un significado en relación con la de algún otro estado.

Por convenio, las energías se miden a menudo en relación con la del vacío. Cuando se definen de este modo, el vacío tiene automáticamente energía cero en relación consigo mismo. El método tradicional no puede dar resultado, si lo que pretendemos es averiguar la energía del vacío de una manera absoluta y significativa. Deberemos utilizar necesariamente una técnica distinta para determinar su valor.

El único camino para establecer una medida absoluta de la energía es hacer uso de la gravedad. En la teoría de la relatividad general, la energía constituye la fuente de los campos gravitatorios, del mismo modo que la carga eléctrica es la fuente de los campos eléctricos en la teoría de Maxwell sobre el electromagnetismo. Una densidad de energía de cualquier tipo, incluida la que se produce por fluctuaciones del vacío, genera un campo gravitatorio que se muestra, a su vez, en forma de un cambio de la geometría del espacio-tiempo. Así, por ejemplo, el campo gravitatorio de la Tierra está producido por su energía en reposo, que es igual a la masa de la Tierra multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz (según nos dice la famosa fórmula $E = mc^2$). El campo gravitatorio produce una pequeña distorsión en la geometría del espacio-tiempo cerca de la Tierra, lo que se traduce en la fuerza que nos atrae a todos hacia el suelo. En la teoría de la relatividad general, la densi-

1. UN UNIVERSO con una constante cosmológica elevada sería muy distinto del que observamos. El artista ha recreado la situación que se produciría si dicha constante adquiriese el valor que las estimaciones teóricas le asignan. La ilustración está basada en un valor positivo de la constante cifrado en 1/(1 kilómetro)^2. Para un valor así, la estructura del espacio se hallaría tan distorsionada que la radiación procedente de objetos distantes estaría notablemente corrida hacia el rojo, es decir, hacia longitudes de onda más largas. Cuanto más alejado del observador se encontrara un objeto, tanto mayor sería el corrimiento hacia el rojo. Un objeto espectralmente azul situado a un kilómetro de distancia lo veríamos rojo; los objetos situados a más de un kilómetro de distancia de nosotros mostraría tal corrimiento hacia el rojo que resultarían invisibles.


1 KM
3/4 KM
1/2 KM
1/4 KM
0 KILOMETROS (KM)

CONSTANTE COSMOLOGICA =
$= 8\pi G/c^4 \times$ DENSIDAD DE ENERGIA DEL VACIO

G simboliza aquí la constante gravitatoria de Newton; *c*, la velocidad de la luz. Definida así, las unidades de la constante cosmológica son de la forma 1 dividido por el cuadrado de la distancia.

dad de energía del vacío tiene un significado absoluto y puede determinarse midiendo el campo gravitatorio producido, no ya por la materia, sino por el propio vacío.

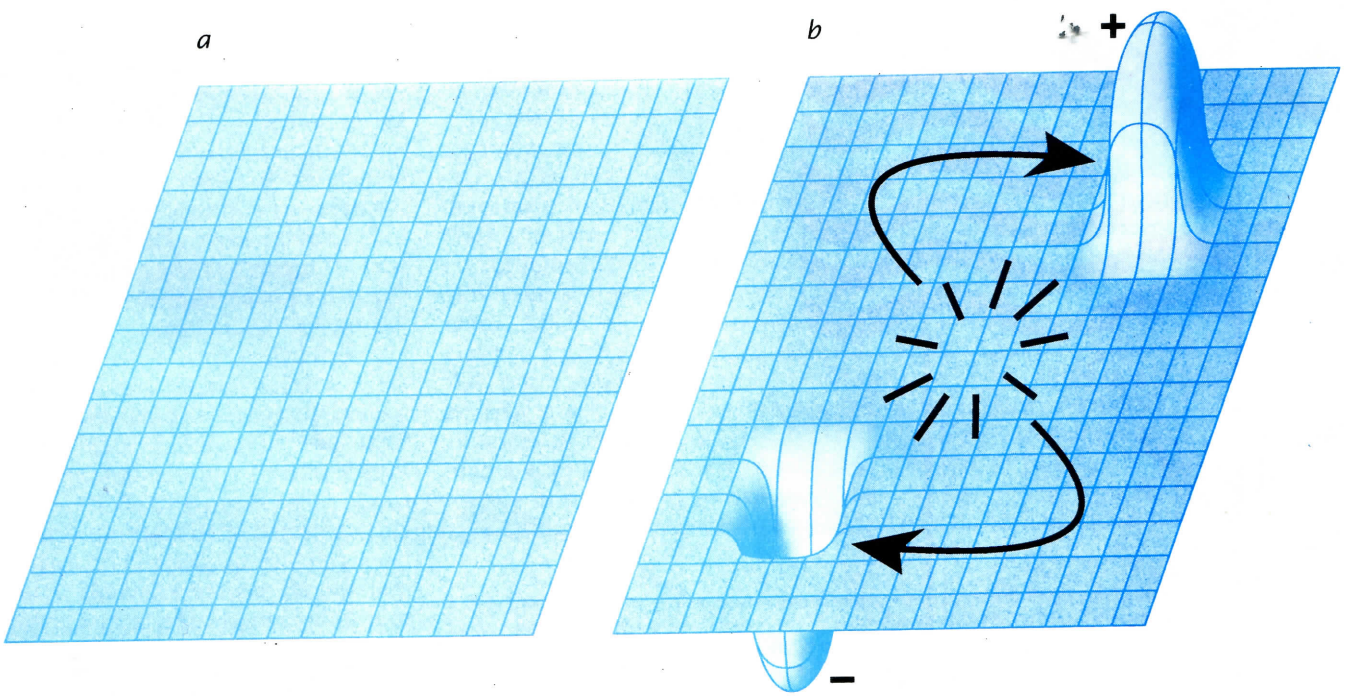
Establecer la densidad de energía del vacío es lo mismo que determinar la constante cosmológica: una es proporcional a la otra. Ahora bien, a la constante cosmológica se le pueden asignar unidades del inverso de la distancia al cuadrado. En otras palabras, la raíz cuadrada del recíproco de la constante cosmológica es una distancia. Esta distancia encierra un significado físico inmediato. Es la escala de longitud para la cual los efectos gravitatorios de una densidad de energía del vacío no nula incidirían de una manera obvia y visible en la geometría del espacio y el tiempo. Podríamos medir el valor de la constante cosmológica a través del estudio de las propiedades geométricas del universo a escalas de longitud del orden de esa distancia.

Los físicos han venido ocupándose de la constante cosmológica desde hace más de 70 años. Introducida por Einstein en 1917, pretendía con ella eliminar dos "problemas" que aparecían en su formulación original de la teoría de la relatividad general. Creyó, por una parte, que, sin una constante cosmológica, la teoría general no podía dar cuenta de un universo homogéneo e isótropo: aquel que se nos aparece del mismo modo desde cualquier posición. No deja de ser curioso que Einstein se ocupase ya de esa cuestión en 1917, cuando no había todavía ninguna prueba de un universo homogéneo e isótropo, extremo que se comprobaría más tarde. Pero la argumentación einsteniana resultó incorrecta. En 1922, Alexander A. Friedmann demostró que la teoría general permite la existencia de un universo homogéneo e isótropo, aunque no estático: el universo debe estar expandiéndose (o contrayéndose). Observaciones astronómicas subsiguientes corroboraron de forma fiable que los modelos basados en el trabajo de Friedmann describían con exactitud la macroestructura del universo.

Einstein hallaba otro motivo de insatisfacción en su formulación original debido a que dicha teoría no proporcionaba una explicación convincente de la inercia. Creyó que, añadiendo una constante cosmológica, lograría elaborar una teoría capaz de relacionar de un modo directo las propiedades inerciales de la materia con la distribución de energía y momento del universo, en línea con lo sugerido por el físico y filósofo austríaco Ernst Mach. Esta esperanza se desvaneció poco después de la publicación del trabajo de Einstein, a raíz de una explicación original del físico holandes Willem de Sitter, que descubrió el modelo de espacio-tiempo que más adelante examinaremos.

Después de un comienzo tan ignominioso no debe sorprendernos el enojo de Einstein en 1923: "fuera el término cosmológico", escribió, quizá con un deje de amargura. Pero, lo veremos, no fue tan sencillo eliminar la constante cosmológica; más aún, ha pervivido para convertirse en la frustración de muchos físicos teóricos. En opinión de George Gamow, Einstein creía que "la introducción del término cosmológico fue el mayor desacierto que cometió en toda su vida", pero una vez introducida ya por Einstein "la constante cosmológica... levanta su horrible cabeza una y otra vez".

Parece que hoy nos hallamos en una situación excelente para abordar la cuestión de la constante cosmológica, pues contamos con una de las teorías físicas de más éxito jamás construidas, a saber, el modelo estándar. Recibe el nombre de modelo estándar un conjunto de teorías que describen con éxito las partículas elementales conocidas y las interacciones entre las mismas. La capacidad del modelo estándar para interpretar y predecir los resultados de múltiples experimentos de la física de



2. FLUCTUACIONES CUANTICAS Y SU CONTRIBUCION al valor de la densidad de energía del vacío (*a*). De acuerdo con la mecánica cuántica, los valores de las magnitudes físicas tienden inevitablemente a fluctuar. A consecuencia de ello, en el vacío pueden aparecer, de forma espontánea, pares de las

partículas no tiene rival (al menos, hasta las energías más altas que resultan accesibles en los actuales aceleradores de partículas).

El modelo estándar es una teoría cuántica de campos. Significa ello que, para cada tipo de partícula fundamental de la naturaleza, existe el correspondiente campo en el modelo y se usa para describir las propiedades e interacciones de la partícula. En el modelo estándar hay, pues, un campo para el electrón, un campo para el fotón (el campo electromagnético) y un campo para cada partícula conocida.

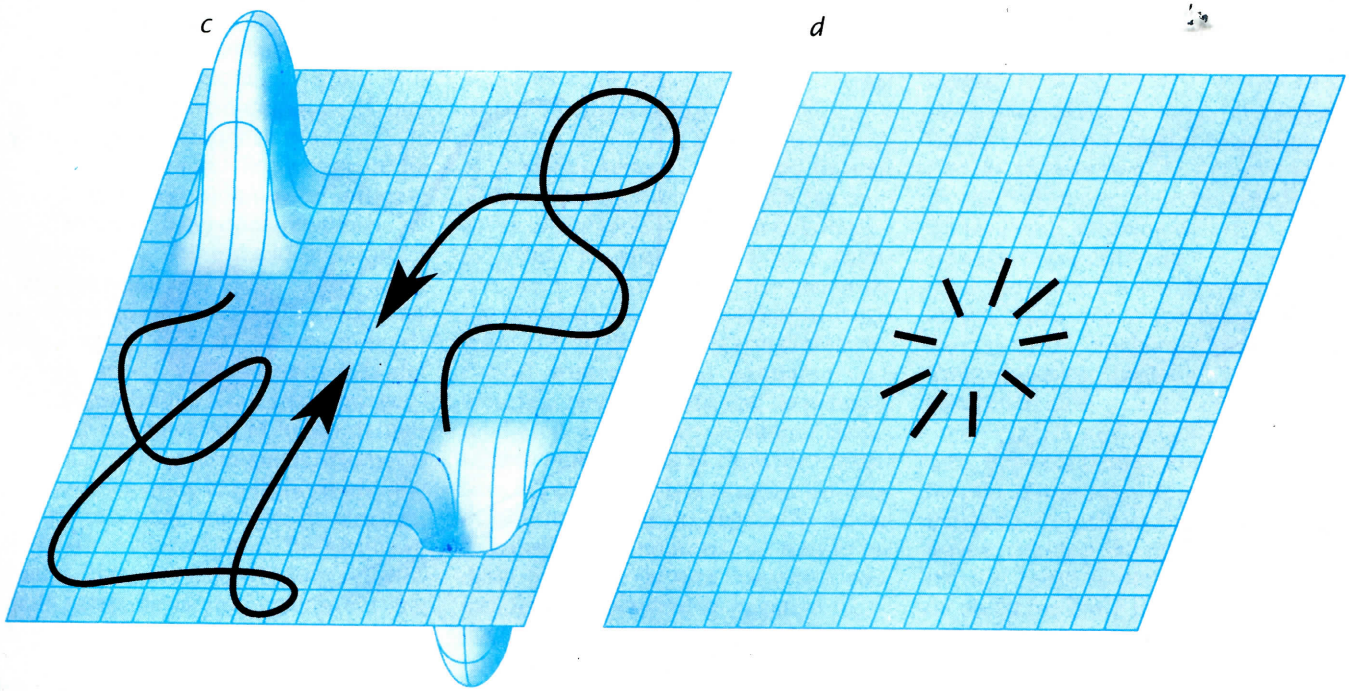
El modelo estándar depende de un número bastante grande de parámetros libres: números que deben determinarse mediante experimentos y sustentarse en la teoría antes de que ésta nos pueda proporcionar predicciones definidas. Entre los ejemplos de parámetros libres citemos los valores de las masas de las partículas y los números que caracterizan las intensidades de sus interacciones mutuas. Una vez establecidos estos números, podemos recurrir al modelo para predecir los resultados de nuevos experimentos, y éstos servirán, luego, para comprobar tales predicciones. La historia corrobora el éxito espectacular de estas comprobaciones.

Los parámetros libres del modelo estándar desempeñarán un papel fundamental en nuestro artículo. A pesar de los muchos éxitos del modelo estándar, su dependencia de un número tan alto de parámetros libres limita seriamente su poder predictivo. Así, por ejemplo, predice la existencia de una partícula adicional, el quark cima ("top"), pero es incapaz de proporcionarnos un valor para su masa, puesto que ésta es otro parámetro libre de la teoría. La física de partículas tiene ante sí el reto formidable de desarrollar una teoría más potente, basada en un número menor de parámetros libres, que incorpore todos los éxitos del modelo estándar. Una teoría, por consiguiente, capaz de determinar los valores de algunos parámetros que no pueden predecirse con el modelo estándar. En la búsqueda de la misma, los físicos investigan sin pausa ni tregua las relaciones entre los parámetros del modelo estándar que pudiesen revelar una estructura más profunda. Como veremos, la constante cosmológica nos proporciona una relación de ésas, aunque aquí nos encontraremos con la sorpresa de hallar más de lo que andábamos buscando.

Igual que en toda teoría cuántica de campos, el vacío se define en el modelo estándar como el estado de menor energía; expresado con mayor propiedad, constituye el estado de mínima densidad de energía. Ahora bien, esto no implica que la densidad de energía del vacío sea cero. La densidad de energía puede ser positiva, negativa o nula, de acuerdo con los valores de varios parámetros de la teoría. Con independencia del valor que tenga, son muchos y complejos los procesos que contribuyen al valor total de la densidad de energía del vacío.

La densidad de energía total del vacío es básicamente la suma de tres tipos de términos. En primer lugar está la constante cosmológica sin más: el valor que tendría dicha constante si no existiese ninguna de las partículas conocidas y si la única fuerza del universo fuese la gravedad. La constante cosmológica "sin más" es un parámetro libre que sólo puede determinarse experimentalmente a través de la medición del verdadero valor de la constante cosmológica.

El segundo tipo de contribución a la densidad total de energía del vacío surge, en parte, de las fluctuaciones cuánticas. Los campos del modelo estándar, como el campo del electrón, experimentan fluctuaciones incluso en el vacío. Tales fluctuaciones se manifiestan en forma de pares de partículas virtuales, que aparecen espontáneamente, interaccionan durante un breve instante y luego desaparecen. (Cada par de partículas virtuales consta de una partícula y de su correspondiente antipartícula: electrón y positrón, por ejemplo, que tienen masas idénticas y cargas eléctricas opuestas.) Aunque las partículas virtuales no pueden detectarse mediante una ojeada casual al espacio vacío, ejercen un influjo mensurable en física; contribuyen, en particular, a la densidad de energía del vacío. El papel de las fluctuaciones del vacío en el modelo estándar depende, a través de una vía muy complicada, de las masas y de las intensidades de interacción entre todas las partículas conocidas.



llamadas partículas virtuales (*b*), que interaccionan brevemente (*c*) para luego desaparecer (*d*). Dibujamos en estas dos páginas las fluctuaciones de una manera abstracta y simbólica. Cada par de partículas virtuales está formado por una partícula y su correspondiente antipartícula. (Dibujos de Joe Lertola.)

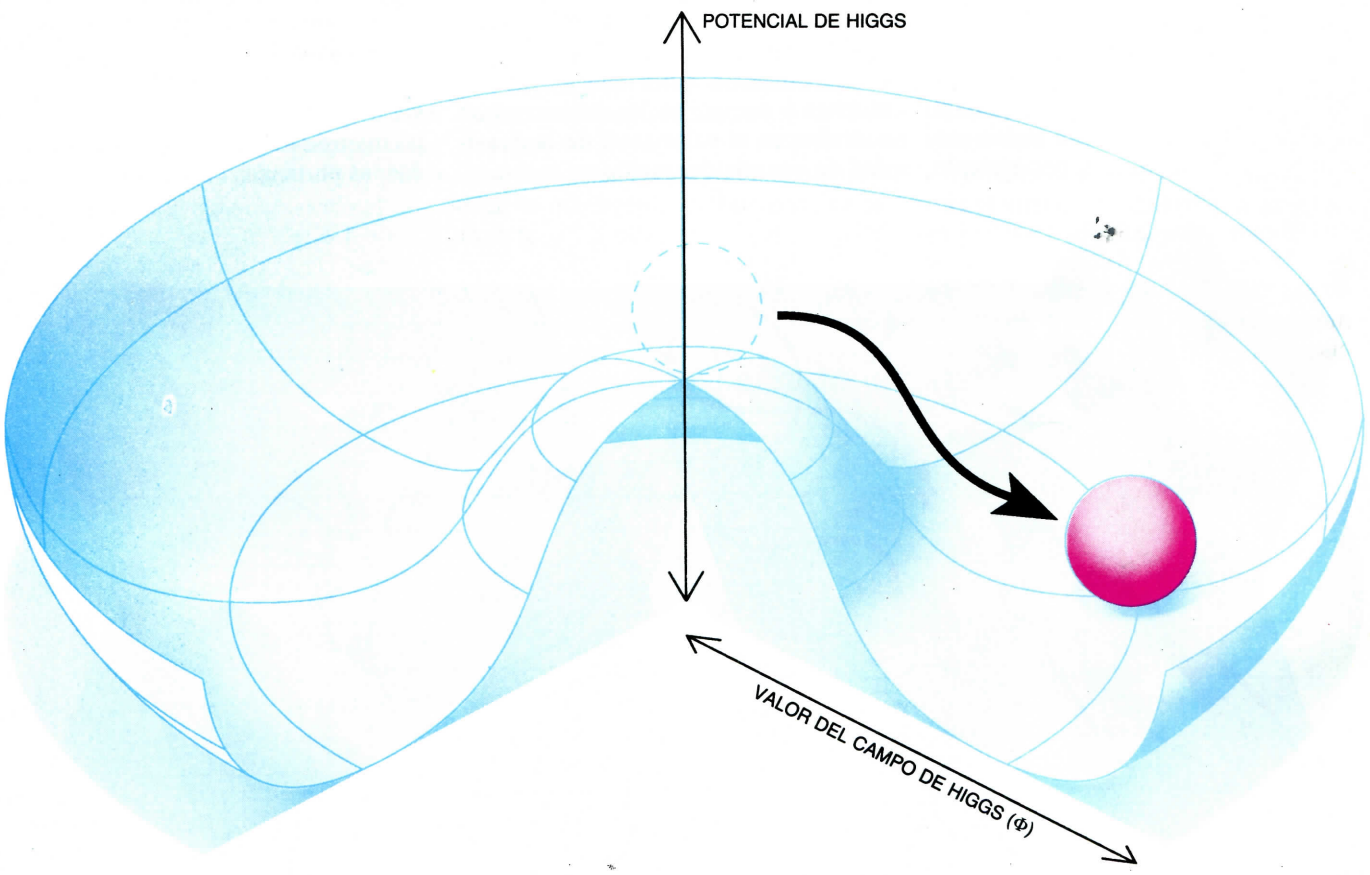
El segundo tipo depende también de un campo adicional, por lo menos; me refiero al campo de Higgs, que representa una partícula dotada de masa, el bosón de Higgs, todavía por detectar. El campo de Higgs debería ejercer un efecto drástico sobre la densidad de energía del estado vacío [véase "El bosón de Higgs", por Martinus J.G. Veltman, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987].

El último término a incluir es, a grandes rasgos, un factor de tamaño, que representa las aportaciones a la densidad de energía del vacío debidas a todo tipo de partículas e interacciones adicionales que podrían existir, aunque las ignoremos todavía. Ni que decir tiene que el valor de este término es desconocido.

La constante cosmológica se determina sumando los tres términos mencionados. Nuestra capacidad de predecir su valor siguiendo el modelo estándar se ve frustrada por la existencia de la constante cosmológica "sin más" —parámetro libre que sólo puede determinarse realizando la propia medición que estamos intentando predecir— y por la sensibilidad de la energía del vacío ante la física que todavía desconocemos. Pero no todo está perdido de antemano. Pese a que todos los términos que intervienen en el cálculo de la constante cosmológica dependen, a través de una vía compleja, de los parámetros del modelo estándar, los valores de muchos de estos términos pueden estimarse de modo bastante aproximado. Los constituyentes de protones y neutrones, los quarks "arriba" (up) y "abajo" (down), contribuyen, en una cuantía aproximada de 1/(1 kilómetro)^2, al valor de la constante cosmológica, mientras que el campo de Higgs contribuye en una cantidad aún mayor, aproximadamente igual a 1/(10 centímetros)^2.

Cada término que contribuye a la constante cosmológica depende de los parámetros del modelo estándar de una manera distinta e independiente. Si suponemos que los parámetros del modelo estándar son libres e independientes (hipótesis que estamos comprobando continuamente en nuestra búsqueda de una estructura más profunda), parece muy improbable que estos términos sin relación mutua conocida puedan cancelarse unos con otros. En consecuencia, cabe suponer que la constante cosmológica total será, al menos, de la magnitud de los distintos términos que podemos calcular. Ahora bien, esta suerte de razonamiento, demasiado general, no permite predecir si la constante cosmológica será positiva o negativa; aunque sí podemos estimar, desde un planteamiento prudente, que su magnitud será, por lo menos, de 1/(1 kilómetro)^2, y suponer que podría muy bien cifrarse en 1/(10 centímetros)^2, o incluso más. En otras palabras, esperamos que los efectos gravitatorios de una densidad de energía del vacío no nula se manifiesten en forma de distorsiones de la geometría del espacio-tiempo a distancias de un kilómetro o menos tal vez.

No se requiere ningún tipo de experimentación refinada para mostrar que el cálculo teórico precedente es completamente erróneo. Todos sabemos que la geometría euclídea ordinaria proporciona una descripción adecuada del espacio en distancias superiores al kilómetro. Al dar una vuelta alrededor de una manzana de casas, ninguno de nosotros ha observado jamás graves distorsiones de la estructura del espacio-tiempo de nuestro vecindario. Si la magnitud de la constante cosmo-



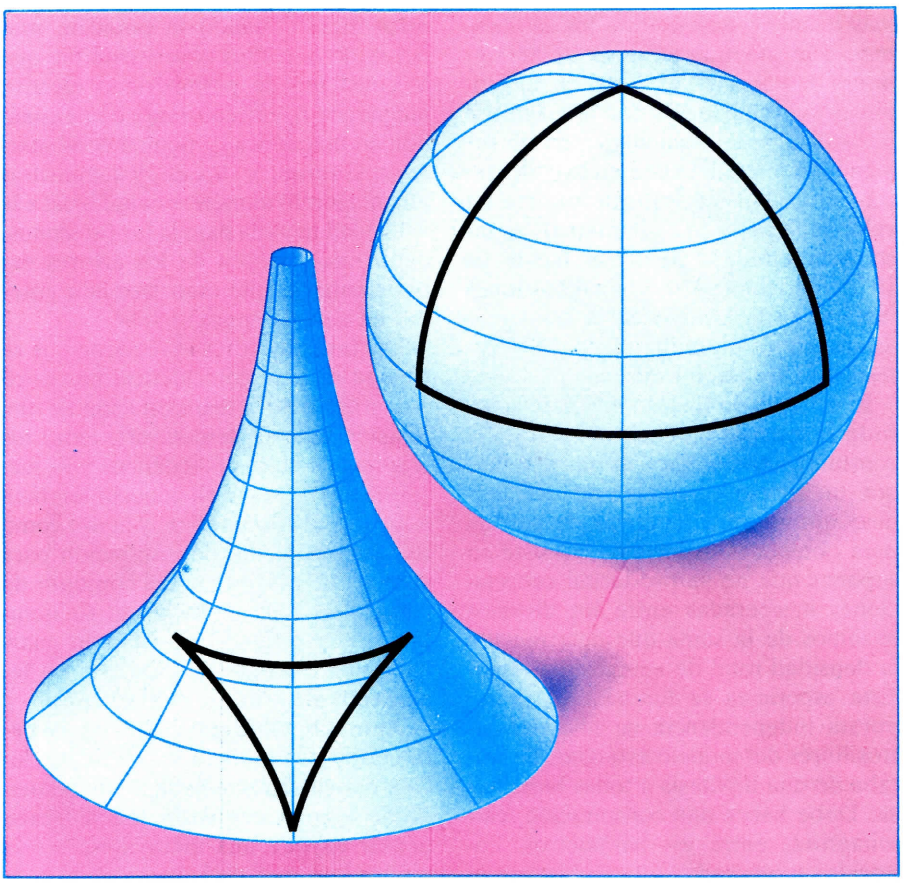
3. SI EXISTE, EL CAMPO DE HIGGS intervendrá de manera decisiva en la densidad de energía del vacío. Se supone que el campo de Higgs corresponde al bosón de Higgs, partícula que, a su vez, originaría las masas de las partículas. Se representa aquí el potencial de Higgs –la parte de la densidad de energía del vacío que depende del valor del campo de Higgs– en función del valor del campo, Φ. Aunque el potencial de Higgs es completamente simétrico con respecto al eje vertical, el vacío debe romper la simetría optando por cierta posición en el fondo de la depresión (*la bola*). Tal selección equivale a la rotura espontánea de simetría y desempeña un papel crucial en el modelo estándar, es decir, en la teoría unificada que describe las partículas elementales y sus interacciones fundamentales.

lógica fuese tan grande como se estima a partir del modelo estándar, la geometría euclídea ordinaria no sería válida en escalas de distancia de un kilómetro, o incluso inferiores. Si la constante cosmológica fuese negativa, con un valor de $1/(1\ \text{kilómetro})^2$, la suma de los ángulos de un triángulo de lados del orden de un kilómetro sería apreciablemente inferior a los 180 grados y el volumen de una esfera de un kilómetro de radio sería significativamente mayor que $4\pi/3$ kilómetros cúbicos.

Una constante cosmológica positiva del orden de $1/(1\ \text{kilómetro})^2$ tendría consecuencias más extrañas todavía. Si la constante cosmológica fuese tan grande, no seríamos capaces de percibir otros objetos que los que estuviesen sólo a unos pocos kilómetros de nosotros, debido a las tremendas distorsiones de la estructura del espacio-tiempo. Además, si nos alejásemos de nuestra casa algo más de unos pocos kilómetros, para ver algo del resto del mundo, la distorsión gravitatoria del espacio-tiempo sería tal que no nos permitiría nunca nuestro regreso a casa, por mucho que lo intentásemos.

¿Qué ocurriría si la constante cosmológica fuese distinta de cero, aunque suficientemente pequeña? En este caso, tendríamos que mirar a grandes distancias para apreciar sus efectos sobre la estructura del espacio-tiempo. Naturalmente, nos es imposible trazar triángulos del tamaño del universo y medir sus ángulos, pero sí podemos observar las posiciones y movimientos de galaxias muy lejanas. Mediante la anotación cuidadosa de la distribución y las velocidades de las galaxias lejanas, los astrónomos deducen la estructura geométrica del espacio-tiempo en el que ellos mismos existen y se mueven.

Desde hace ya mucho tiempo, se ha llegado a la conclusión de que la fuente dominante de distorsión gravitatoria de la geometría del espacio-tiempo del universo a grandes escalas parece ser la densidad de energía de la materia, y no la del vacío. Aunque ambas, la densidad de energía de la materia y la del vacío, condicionan la estructura geométrica del universo, lo hacen de manera diferente y distinguible. Numerosas observaciones han demostrado que las galaxias del universo se mueven, alejándose unas de otras, hecho que se cuenta entre los más relevantes dentro de la teoría de la gran explosión ("big bang") del universo y su expansión, teoría corrientemente aceptada en cosmología. La atracción gravitatoria ordinaria entre galaxias tiende a frenar esta expansión. A medida que las galaxias se alejan unas de otras, su atracción gravitatoria se va debilitando; de este modo, el ritmo al que la expansión se va frenando disminuye con el tiempo. Así, pues, el efecto de la materia ordinaria sobre la expansión del universo es el de decelerar dicha expansión a un ritmo cada vez menor.



4. DISTORSIONES DE LA GEOMETRIA producidas por una constante cosmológica no nula. Esas deformaciones pueden afectar al espacio y al tiempo. Se muestra aquí el efecto sobre la geometría espacial, suponiendo que las distorsiones sean independientes del tiempo. Una constante cosmológica negativa daría lugar a un espacio con curvatura constante negativa (*izquierda*); una constante positiva produciría una curvatura constante positiva (*derecha*). En un espacio con curvatura negativa, la suma de los ángulos de un triángulo sería menor que 180 grados; con una curvatura positiva, la suma sería mayor que 180 grados.

¿Cuáles serían los efectos de una constante cosmológica no nula sobre el ritmo de expansión del universo? Una constante cosmológica negativa tendería a frenar la expansión de las galaxias, a un ritmo siempre constante que no disminuiría con el tiempo. Por el contrario, una constante cosmológica positiva haría que las galaxias tendiesen a acelerar su mutuo alejamiento aumentando el ritmo de expansión del universo. Los estudios detallados de los ritmos de expansión de las galaxias lejanas no muestran ningún indicio en favor de una constante cosmológica, ni positivo ni negativo.

Un buen ejemplo de cómo los astrónomos miden la geometría del universo y buscan constantes cosmológicas no nulas lo encontramos en un trabajo reciente de Edwin D. Loh y Earl J. Spillar, de la Universidad de Princeton. En su observación contaron el número de galaxias situadas dentro de regiones de tamaño específico en diversos lugares del espacio. Si suponemos que, en promedio, el número de galaxias por unidad de volumen es el mismo en todas partes, al contar las galaxias que se hallan en cierta región estamos estimando el volumen de la misma. Midiendo volúmenes de regiones alejadas de nosotros, estamos determinando la relación entre distancia y volumen a escalas muy grandes y a tiempos muy remotos, dado que la luz de las galaxias lejanas tarda mucho tiempo en llegar hasta nosotros —miles de millones de años en el caso de esta observación.

A pesar de que las observaciones de este tipo contienen muchas y sutiles fuentes potenciales de error, los resultados difieren de un modo asombrosamente drástico de nuestra estimación teórica; hasta el punto de que errores de un factor dos e incluso diez resultan insignificantes. Todas las observaciones galácticas están de acuerdo en que no hay ninguna prueba de distorsiones del espacio-tiempo debidas a una constante cosmológica no nula; afirmación que es válida incluso para las distancias

más lejanas y accesibles a los astrónomos, que se cifran en unos 10.000 millones de años luz, es decir, en 10^{23} kilómetros. Implica ello que la magnitud de la constante cosmológica ha de ser menor que $1/(10^{23}\ \text{kilómetros})^2$. Nuestra estimación teórica, que sugiere un valor superior a $1/(1\ \text{kilómetro})^2$ es incorrecta en un asombroso factor de 10^{46}, como mínimo. Pocas estimaciones teóricas en la historia de la física realizadas sobre hipótesis razonables han resultado ser tan inexactas.

El estrepitoso fracaso que hemos sufrido al intentar predecir el valor de la constante cosmológica es mucho más que un simple contratiempo. Recuérdese que nuestra hipótesis de partida para obtener la estimación consiste en suponer que no se producían cancelaciones inesperadas entre los diversos términos de la suma que determinaba la densidad total de energía del vacío. Esta esperanza se fundaba en la supuesta independencia de los parámetros libres del modelo estándar. Se trataba de una hipótesis a todas luces falsa. Debe haber una conspiración, casi milagrosa, entre los parámetros, conocidos e ignorados, que gobiernan la física de partículas, de suerte que los términos que intervienen en la constante cosmológica se aniquilen entre sí y la suma total sea una cantidad 46 órdenes de magnitud menor que la de los distintos factores de la suma. En otras palabras, ese valor tan pequeño de la constante cosmológica nos está diciendo que existe una relación muy precisa y totalmente inesperada entre todos los parámetros del modelo estándar, la constante cosmológica "sin más" y la física aún desconocida.

Una relación entre los parámetros libres del modelo estándar es lo que estamos buscando en nuestro afán por descubrir teorías más profundas y predictivas. ¿Cómo aparece una relación tan compleja entre lo que en un principio creíamos parámetros libres, sin ligaduras de ningún tipo? ¿Qué significado encierra?

Para responder a estas preguntas convendrá traer a colación dos ejemplos extraídos de la historia de la física. A mediados del siglo XIX se había medido ya la velocidad de la luz y había teorías que describían los fenómenos eléctricos y magnéticos; sin embargo, no se había demostrado todavía que la propagación de la luz fuese un efecto electromagnético. Pero varios físicos se dieron cuenta de una curiosa relación entre la velocidad de la luz y dos parámetros que intervienen en las ecuaciones de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Usando la notación moderna, lo que ellos observaron fue que la constante de permisividad electromagnética ϵ_0 y la constante de permeabilidad magnética μ_0 podían combinarse en la forma $\sqrt{1/\mu_0\epsilon_0}$, y suministrar una magnitud numéricamente igual a la velocidad medida para la luz (al menos, dentro del margen de los errores experimentales, que eran bastante grandes en aquella época).

Los investigadores apreciaron que se trataba de una coincidencia numérica milagrosa o de la manifestación de una relación todavía desconocida entre los fenómenos electromagnéticos y la luz. James Clerk Maxwell conocía también esa curiosidad numérica, y la usó como fuente importante de inspiración para demostrar, por medio del conjunto de ecuaciones que ahora llevan su nombre, que la propagación de la luz guardaba una estrecha relación con los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Ante la notable relación entre los parámetros del modelo estándar, deducida del valor extremadamente pequeño de la constante cosmológica, ¿cabe pensar en que una maravillosa teoría unificadora nos está aguardando a la vuelta de la esquina? No nos precipitemos. Veamos otro ejemplo, sacado esta vez de la historia de la teoría electromagnética.

En cuanto Maxwell incorporó la propagación de la luz en la teoría electroagnética, comenzó a admitirse que las ondas luminosas viajaban a través de un medio que recibía el nombre de éter. Haciendo uso de un interferómetro, Albert A. Michelson y Edward W. Morley se aprestaron a medir la velocidad de la Tierra en su movimiento a través del éter. Encontraron que la velocidad relativa era cero: la velocidad de la Tierra y la velocidad del éter eran idénticas. Es ésta otra relación que involucraba lo que entonces se creía otro parámetro fundamental de la naturaleza: la velocidad del éter. Pero, ¿mostró este descubrimiento el camino hacia una teoría unificada que relacionase una propiedad fundamental del electromagnetismo con el movimiento de la Tierra?

Aunque se avanzó la idea de que el éter se desplazaba con la Tierra, el resultado nulo del experimento de Michelson-Morley se explica hoy apelando a la teoría especial de la relatividad de Einstein, la cual demostró que la concepción del éter que se utilizaba entonces era incoherente con las simetrías del espacio y del tiempo. Ninguna teoría que porporcionase una relación fundamental entre la velocidad del éter y algo tan peculiar como la velocidad de la Tierra ha persistido. No debe sorprendernos. La velocidad de la Tierra está afectada por muchos fenómenos —la forma y el tamaño de su órbita alrededor del Sol, la masa del Sol y el movimiento de éste en la galaxia, por ejemplo—, los cuales no parecen estar en absoluto relacionados con los fenómenos de la teoría del electromagnetismo. No se defiende ya ninguna relación fundamental entre la velocidad del éter y la velocidad de la Tierra, entre otras razones porque el propio éter, tal como lo imaginaban los teóricos del siglo XIX, ni siquiera existe.

En ambos ejemplos, una relación sorprendente entre distintos parámetros de la naturaleza trajo consigo descubrimientos nuevos, drásticos y revolucionarios. Hay razones sobradas para creer que la misteriosa relación escondida tras el valor, pequeñísimo, de la constante cosmológica indica que quedan todavía por llevar a cabo importantes descubrimientos. Los dos ejemplos que hemos considerado son muy diferentes. La primera relación, en la que intervienen dos parámetros provenientes del electromagnetismo y uno de la propagación de la luz, es lo que los físicos denominarían hoy una relación "natural", es decir, una relación que involucra un pequeño número de parámetros conocidos. La existencia de una relación natural puede indicar la existencia de una teoría unificadora y, lo que reviste interés, sugiere que tal teoría puede llegar a descubrirse.

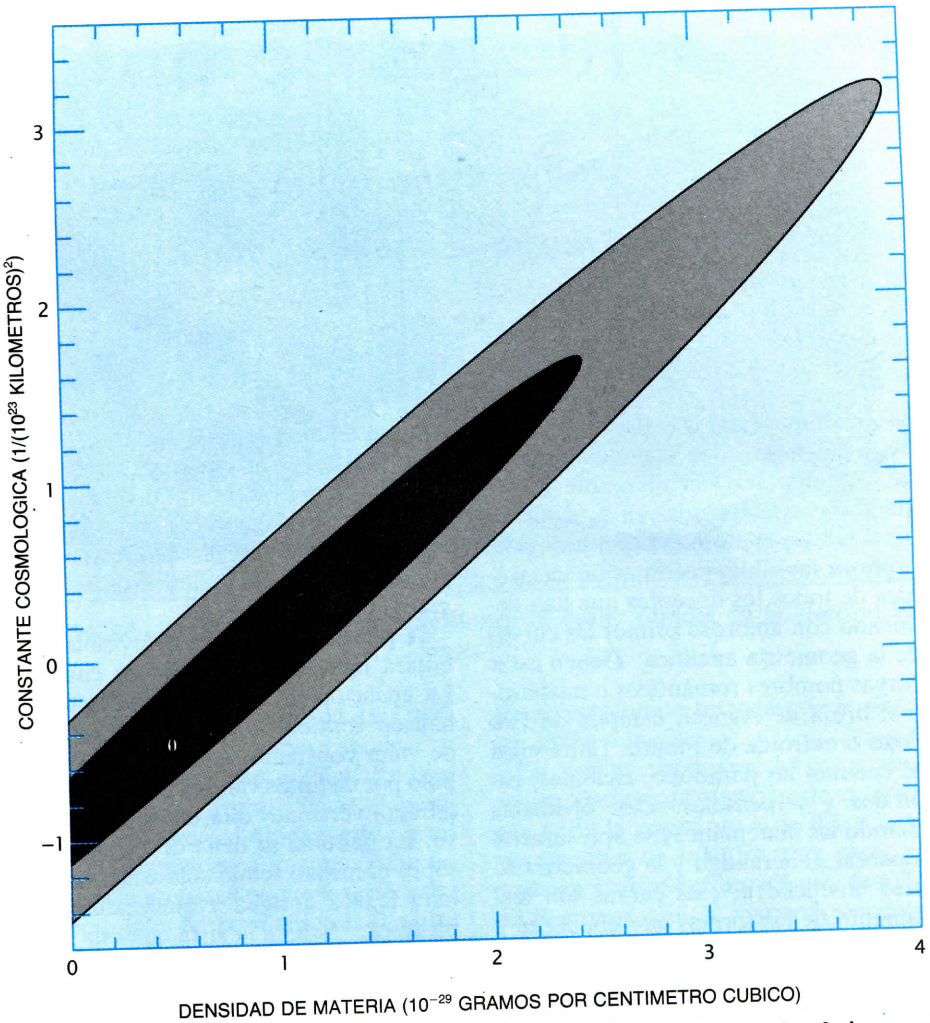
El segundo ejemplo, en el que la velocidad del éter se relacionó con la velocidad de la Tierra, es lo que hoy llamaríamos una relación "no natural", es decir, una relación que involucra muchos parámetros, desconocidos algunos de ellos, si no imposibles de conocer. Parece improbable, por ejemplo, que podamos averiguar jamás, y comprender, los numerosísimos factores que determinan el valor de la velocidad de la Tierra en relación a las galaxias lejanas. Cualquier teoría unificada que pretenda dar cuenta de una relación no natural tendría que explicar simultáneamente los valores de muchos parámetros, conocidos o ignorados. Parece muy poco probable que una teoría de este tipo pueda hallarse nunca, aun cuando existiera en realidad.

Nuestro ejemplo indica que una relación no natural sugiere la existencia de una profunda falta de comprensión de la esencia de lo que se está midiendo y relacionando, y no precisamente la existencia de una teoría unificadora subyacente. En consecuencia, una re-

lación no natural puede señalar el advenimiento de una revolución en nuestro marco teórico más drástica que la que señalaría una relación natural.

Si dejamos de lado la posibilidad de que ese mínimo valor de la constante cosmológica sea accidental, debemos aceptar que posee profundas implicaciones en física. Sin embargo, antes de embarcarnos en la construcción de nuevos modelos unificados, conviene abordar el hecho de que la relación implicada por la anulación de la constante cosmológica sea no natural. Las cancelaciones milagrosas requeridas para producir una constante cosmológica aceptablemente pequeña dependen de todos los parámetros relevantes de la física de partículas, conocidos o desconocidos. Para predecir un valor cero (o pequeño) de la constante cosmológica, toda teoría unificada habría de empezar por dar cuenta, uno por uno, de todos los parámetros que afectan a la física de partículas. Una tarea nada despreciable. Y lo que es aún peor, para obtener una constante cosmológica lo suficientemente pequeña, son necesarias cancelaciones de finísima precisión (de una parte en 10^{46} o más); la teoría debería predecir los parámetros con una exactitud extraordinaria antes de lograr una mejora, siquiera mínima, en la situación que concierne a la constante cosmológica. La construcción de tal teoría, aun cuando existiera (lo que no está claro), constituye una labor de titanes, por no decir imposible.

Se han propuesto algunas teorías para resolver este problema; por ejemplo, las del tipo de las de la "corriente de éter". Pero la mayoría de los esfuerzos empeñados en la constante cosmológica se centran, hoy, en descubrir el error subyacente, la pieza que falta en el modelo estándar o el sesgo equivocado en la concepción del vacío, elemento que, una vez acotado, desharía el problema o lo convertiría, al menos, en otro de tipo natural. Mientras el problema de la constante cosmológica siga siendo no natural, la única esperanza de solución reside en idear una teoría que lo contenga todo, capaz de dar cuenta de todos los parámetros de la física de partículas con una exactitud casi perfecta. Si podemos cambiar la relación requerida para producir una densidad de energía del vacío aceptablemente pequeña, convirtiéndola en otra natural, entonces, aunque no hayamos podido todavía determinar su valor, habremos reducido el problema de la constante cosmológica a otro problema más manejable, que sólo comprometerá un número razonable de parámetros conocidos, para los cuales bastará una predicción con un grado de exactitud moderado. De momento son pobres los resultados conseguidos en el empeño. A pesar de una gran inversión en trabajo y creación teórica, seguimos sin saber por qué la constante cosmológica es tan pequeña.



5. SE HA INVESTIGADO LA CONSTANTE COSMOLOGICA contando el número de galaxias que se hallan en diversas regiones del universo y determinando, a partir de ello, la geometría de esas regiones. Las representaciones gráficas de los resultados permiten ciertos valores de la constante cosmológica en función de la densidad de materia del universo. (El área en negro corresponde a valores permitidos con un nivel de confianza del 67 por ciento; el área en gris es la región de nivel de confianza del 95 por ciento.) Las unidades son aproximadas, si bien la gráfica muestra que el valor de la constante cosmológica ha de ser menor que $1/(10^{23}$ kilómetros$)^2$, unos 46 órdenes de magnitud por debajo del valor predicho en el marco del modelo estándar. La gráfica está tomada de un análisis de Edwin D. Loh, basado en un trabajo con Earl J. Spillar.

Pese a las palabras de Aristóteles, la naturaleza no "aborrece el vacío", aunque tal vez sí deseche un vacío que no lo sea. Mediante la introducción del éter en los primeros días de la teoría electromagnética, Maxwell y otros físicos llenaron ese vacío con un fluido hipotético que tenía complejas propiedades. Michelson y Morley demostraron que esta visión del vacío repugnaba a la realidad experimental y Einstein corroboró que iba también contra las simetrías del universo.

Las teorías cuánticas de campos llenan, asimismo, el "vacío" esta vez con fluctuaciones cuánticas y con campos, no con éter. Estas formas modernas de llenarlo se muestran coherentes con la teoría de la relatividad especial, pero causan problemas cuando se contemplan bajo la perspectiva de la teoría de la relatividad general. El misterio de la constante cosmológica nos está diciendo, quizá, que estamos pagando de nuevo el precio de traficar demasiado con el vacío. El modelo estándar, poseedor de un gran número de campos cuánticos fluctuantes, entre ellos el campo de Higgs, es fuente importante de polución del vacío. No cabe ninguna duda de que la teoría resultante será una estructura bella y de gran éxito, pero basada a lo mejor en una concepción defectuosa del vacío o del espacio-tiempo. Ante nosotros tenemos el reto de reparar estos cimientos agrietados sin destruir el majestuoso edificio que hemos construido sobre ellos.

Velocidad de expansión y tamaño del universo

La edad, evolución y destino del universo dependen de la rapidez con que éste se expanda. Gracias a las nuevas técnicas para medir el tamaño del universo, se ha afinado más en el cálculo de la velocidad de expansión

Wendy L. Freedman

Todas las galaxias, incluida nuestra Vía Láctea, se alejan unas de otras en virtud de la gran explosión inicial ("big bang"), violento nacimiento del universo. A lo largo del siglo XX se ha descubierto dicha expansión, se ha detectado la radiación de fondo en microondas procedente de la explosión original, se ha inferido la fuente de los elementos químicos del universo y se ha representado la macroestructura y el movimiento de las galaxias. No obstante esos y otros muchos avances, quedan sin resolver cuestiones elementales: ¿cuánto tiempo ha transcurrido desde el inicio de tan colosal expansión? ¿Continuará el universo en expansión indefinida o la gravedad le obligará a invertir esa dirección para colapsar sobre sí mismo?

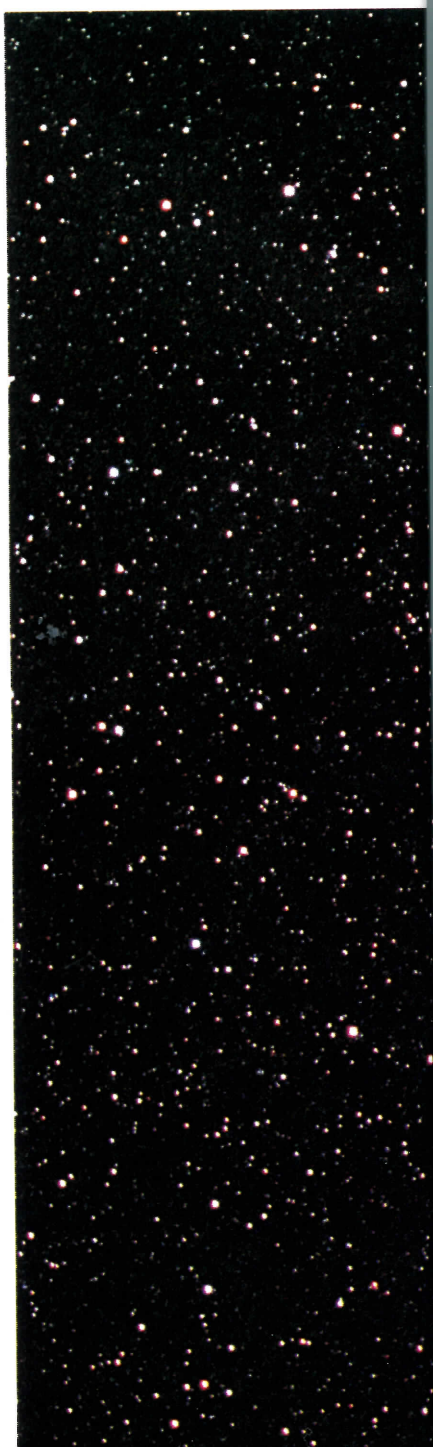
Durante decenios, los cosmólogos se han esforzado por responder a estas preguntas midiendo la escala de tamaños y la velocidad de expansión del universo; tarea para la que se precisa establecer primero cuál es la velocidad a que se mueven las galaxias y a qué distancia se encuentran. Disponemos de técnicas fiables para calcular la velocidad de las galaxias; no así para estimar su lejanía. A lo largo de los últimos diez años, varios grupos de astrónomos han elaborado, de forma independiente, métodos mejores para medir tales distancias, lo que ha comportado una estimación enteramente nueva de la velocidad de expansión.

Pruebas de origen dispar sugieren una velocidad de expansión rápida, señal de un universo joven, de unos diez mil millones de años de edad; y apuntalan también la imagen de una expansión indefinida. Mas, por muchas razones, mis colegas y yo no consideramos definitiva esta conclusión, y defendemos la bondad de nuestras propias técnicas.

Es esencial una medición precisa de la velocidad de expansión, no sólo para determinar la edad del universo y su destino, sino también para acotar las teorías cosmológicas y los modelos de formación de galaxias. Importa, además, para estimar magnitudes fundamentales; entre otras, la cantidad de materia no luminosa en las galaxias y el tamaño de los cúmulos galácticos. Y, dado que se requieren medidas exactas de la distancia para calcular la luminosidad, la masa y el tamaño de los cuerpos celestes, vemos que el problema de la escala de distancias cosmológicas, o la determinación de la velocidad de expansión, afecta, en mayor o menor medida, a la astronomía extragaláctica entera.

Las mediciones de la velocidad de expansión del universo se iniciaron

WENDY L. FREEDMAN se halla adscrita al Observatorio Carnegie de Pasadena, desde 1987. Nació en Toronto, en cuya universidad se doctoró en astronomía y astrofísica, hace nueve años. Dentro del programa del telescopio Hubble, trabaja en "la escala de distancias extragalácticas".



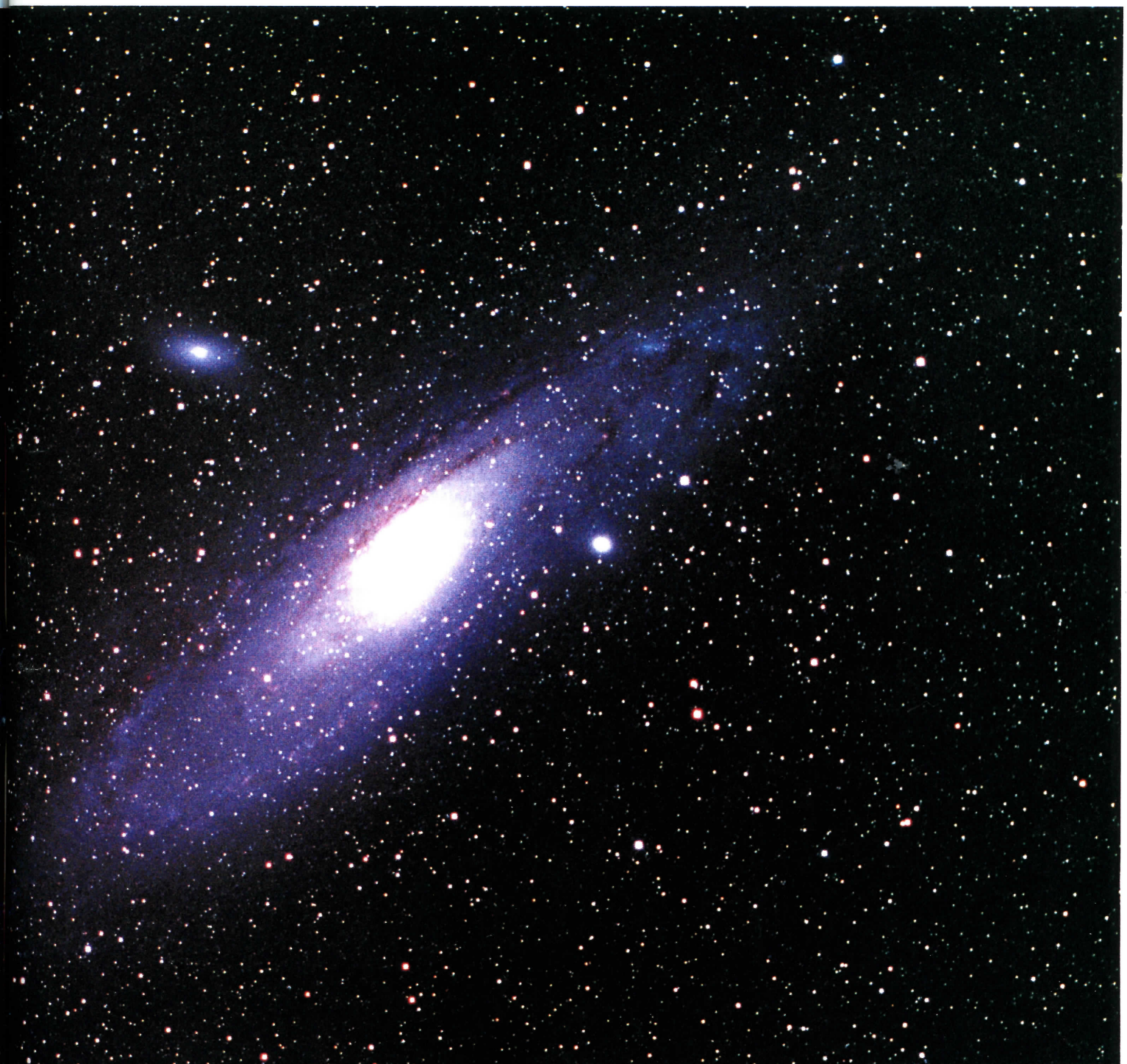
1. LA GALAXIA ANDROMEDA ilustra claramente la dificultad de calcular la velocidad de expansión del universo. Andrómeda dista 2,5 millones de años luz de la Tierra, pero aún experimenta la atracción de nuestra propia galaxia. En consecuencia, su movimiento relativo refleja muy poco la expansión del universo. Observando galaxias remotas es posible detectar la expansión, mas no se conoce su velocidad precisa por ser difícil medir la lejanía de las galaxias distantes.

hace unos sesenta años. En 1929, Edwin P. Hubble, de la Institución Carnegie, descubrió que casi todas las galaxias se alejaban de la Tierra a velocidades enormes. Advirtió también un fenómeno notable: la velocidad de recesión era proporcional a la distancia de la galaxia. Sus observaciones constituyeron la primera prueba de que el universo entero se hallaba en expansión.

Hubble determinó la velocidad de expansión, cantidad que luego se llamaría constante de Hubble: la velocidad de recesión de la galaxia dividida por su distancia. Sin mayor precisión suele cifrarse dicha constante en 100 kilómetros por segundo y por megaparsec. (Llámase megaparsec la distancia que la luz recorre en 3,26 millones de años.) Acorde con ello, una galaxia situada a 50 megaparsec se aleja a unos 5000 kilómetros por segundo, y otra que diste 500 megaparsec se moverá a la increíble velocidad de 180 millones de kilómetros por hora.

Sesenta años llevan los astrónomos debatiendo en torno al valor correcto de la velocidad de expansión. Hubble obtuvo la cantidad de 500 kilómetros por segundo y por megaparsec (km/s/Mpc). A la muerte de éste en 1953, su discípulo Allan R. Sandage, también de Carnegie, continuó el programa cartográfico de expansión del universo. Conforme se fueron realizando observaciones más precisas y extensas, se fue revisando a la baja el valor original de Hubble, hasta dejarlo acotado en el intervalo de 50 a 100 km/s/Mpc, lo que implica un universo mucho mayor que lo sugerido por las primeras mediciones.

En los últimos veinte años, la cuantía estimada de la constante de Hubble se ha asentado en ese mismo intervalo, cayendo preferentemente hacia sus extremos. A modo de muestra, Sandage y Gustav A. Tammann, de la Universidad de Basilea, defendieron un valor de 50 km/s/Mpc, mientras que Gérard de Vaucouleurs, de la Universidad de Texas, sostenía un valor de



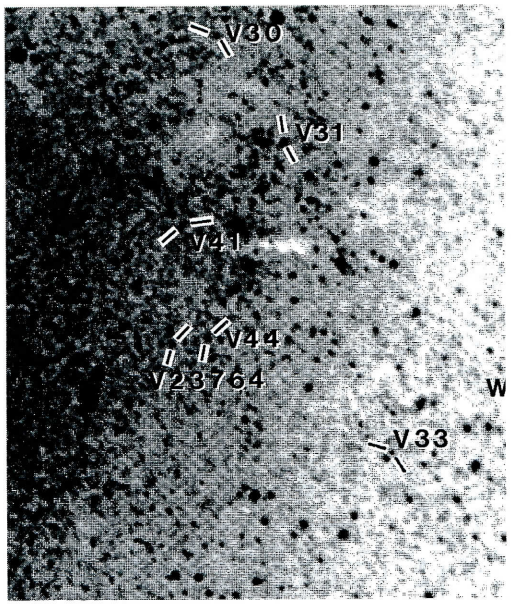
Luminosidad variable de las Cefeidas

Una Cefeida variable es una estrella bastante joven, cuya masa multiplica varias veces la solar y cuya luminosidad cambia de manera periódica: brilla y después se atenúa con más lentitud. Su pulsación se debe a que la fuerza de la gravedad que actúa en la atmósfera de la estrella no está del todo compensada por la presión de los gases calientes que salen del interior de la misma.

Este desequilibrio viene provocado por los cambios que experimenta su atmósfera, uno de cuyos componentes principales es helio simplemente ionizado (átomos de helio que han perdido un solo electrón). A medida que la radiación emerge de una Cefeida, el helio simplemente ionizado de la atmósfera absorbe y dispersa tal radiación, y puede convertirse en helio doblemente ionizado (perdiendo un segundo electrón el átomo). En consecuencia, la atmósfera se hace más opaca, y la radiación escapará difícilmente de la atmósfera. La presión generada por la interacción entre radiación y materia empuja hacia fuera la atmósfera de la estrella, con lo que la Cefeida crecerá en tamaño y luminosidad.

Al expandirse, la atmósfera también se enfría. A temperaturas menores, el helio regresa al estado de simplemente ionizado. La radiación puede entonces atravesar la atmósfera con mayor libertad, relajándose la presión sobre la misma. Finalmente, la atmósfera se colapsa de nuevo y torna a su tamaño inicial, con lo que la Cefeida recupera su brillo original. Después, se repite el ciclo.

El comportamiento de las Cefeidas se predice con gran precisión en los modelos teóricos de la evolución del interior de las estrellas, así como en las simulaciones del flujo de la radiación. Los astrónomos confían en las Cefeidas como indicadores de distancia por comprender bien la física que subyace en estas estrellas jóvenes y haberlas observado con gran detalle.



2. DIVERSAS CEFEIDAS VARIABLES aparecen en la galaxia M33, miembro de nuestro propio Grupo Local. Cada Cefeida viene señalada por un número y la letra V. Los puntos oscuros representan estrellas; las manchas blancas irregulares son regiones llenas de polvo.

100 km/s/Mpc. La controversia creó una situación insatisfactoria en la que cada uno ha podido optar por cualquier valor dentro de ese rango.

En principio, la determinación de la constante de Hubble es sencilla, ya que sólo requiere medir la distancia y la velocidad. La segunda de estas mediciones no presenta problemas, mas no así la primera. A fin de obtener la velocidad, los astrónomos dispersan la luz que procede de una galaxia y registran su espectro, el cual se compone de rayas espectrales discretas. Estas líneas, que aparecen a longitudes de onda características, se deben a la emisión o absorción de determinados elementos del gas y las estrellas que forman la galaxia. Cuando la galaxia se aleja de la Tierra, las posiciones de las líneas espectrales se han trasladado a longitudes de onda mayores en una cuantía proporcional a la velocidad, en un efecto de corrimiento hacia el rojo.

Por el contrario, a la hora de determinar la distancia a una galaxia, los astrónomos pueden elegir uno de entre múltiples métodos complejos, cada uno con sus ventajas, pero sin que ninguno pueda considerarse perfecto.

Podemos medir con precisión la distancia a que se encuentran las galaxias cercanas tomando por punto de referencia una Cefeida variable, estrella cuyo brillo varía a lo largo del tiempo de un modo periódico e inconfundible. En efecto, mientras transcurre la primera parte del ciclo, la luminosidad de una Cefeida se intensifica rápidamente, para decrecer lentamente durante el resto del ciclo. Por término medio, las Cefeidas variables brillan 10.000 veces más que el Sol.

Merece la pena destacar la posibilidad de calcular la distancia a una Cefeida a partir de su período (duración de su ciclo) y de su brillo aparente medio (luminosidad percibida desde la Tierra). En 1908, Henrietta S. Leavitt, del Observatorio de Harvard, descubrió que el período de una Cefeida guardaba una estrecha correlación con su brillo: cuanto más largo era el período, más lucía la estrella. Esta relación se apoya en el hecho de que el brillo de la Cefeida es proporcional a su área superficial. Las Cefeidas grandes y brillantes pulsan con un período largo, lo mismo que las campanas grandes resuenan a una frecuencia baja (período largo).

Anotando la variación de la luminosidad en función del tiempo, de una Cefeida, se infiere su período y su luminosidad aparente media, para así calcular su luminosidad absoluta (es decir, el brillo aparente que tendría la estrella si estuviera a una distancia normalizada de 10 parsec). Se sabe, además, que la luminosidad aparente decrece a medida que aumenta la distancia. Todo lo cual nos faculta para estimar la distancia a una Cefeida a partir de la relación entre el brillo absoluto y el brillo aparente.

Hay muchas razones para considerar las Cefeidas valiosos indicadores de la distancia; en particular, gracias a su comportamiento cíclico y su alta luminosidad no resulta difícil localizarlas y someterlas a medida.

En los años veinte, Hubble se apoyó en las Cefeidas variables para establecer la existencia de galaxias allende la Vía Láctea. Al estudiar fotografías de la nebulosa de Andrómeda, llamada también M31, identificó unas débiles imágenes en forma de estrella cuyo brillo variaba ligeramente con el tiempo; demostró que su comportamiento coincidía con el de las Cefeidas variables cercanas. Midiendo el brillo aparente y los períodos de las Cefeidas de la M31, dedujo que esta nebulosa distaba del Sol no pocos cientos de miles de

años luz, que la situaba fuera de la Vía Láctea. De los años treinta a los sesenta, Hubble, Sandage y otros trabajaron afanosamente por descubrir Cefeidas en galaxias cercanas. Lograron medir la lejanía de una docena de galaxias. Con ello la deducción de la constante de Hubble pudo afirmarse sobre bases más sólidas.

El método de las Cefeidas halla uno de sus principales contratiempos en el polvo interestelar, capaz de amortiguar la luminosidad aparente; las partículas absorben, dispersan y enrojecen la luz de todos los tipos de estrellas. Los efectos del polvo se dejan sentir más en la luz azul y ultravioleta. De ahí que sea necesario observar las Cefeidas a longitudes de onda del infrarrojo, donde los efectos son menos apreciables, o a muchas y distintas longitudes de onda del visible, para así ponderar los efectos y aplicar las correcciones pertinentes.

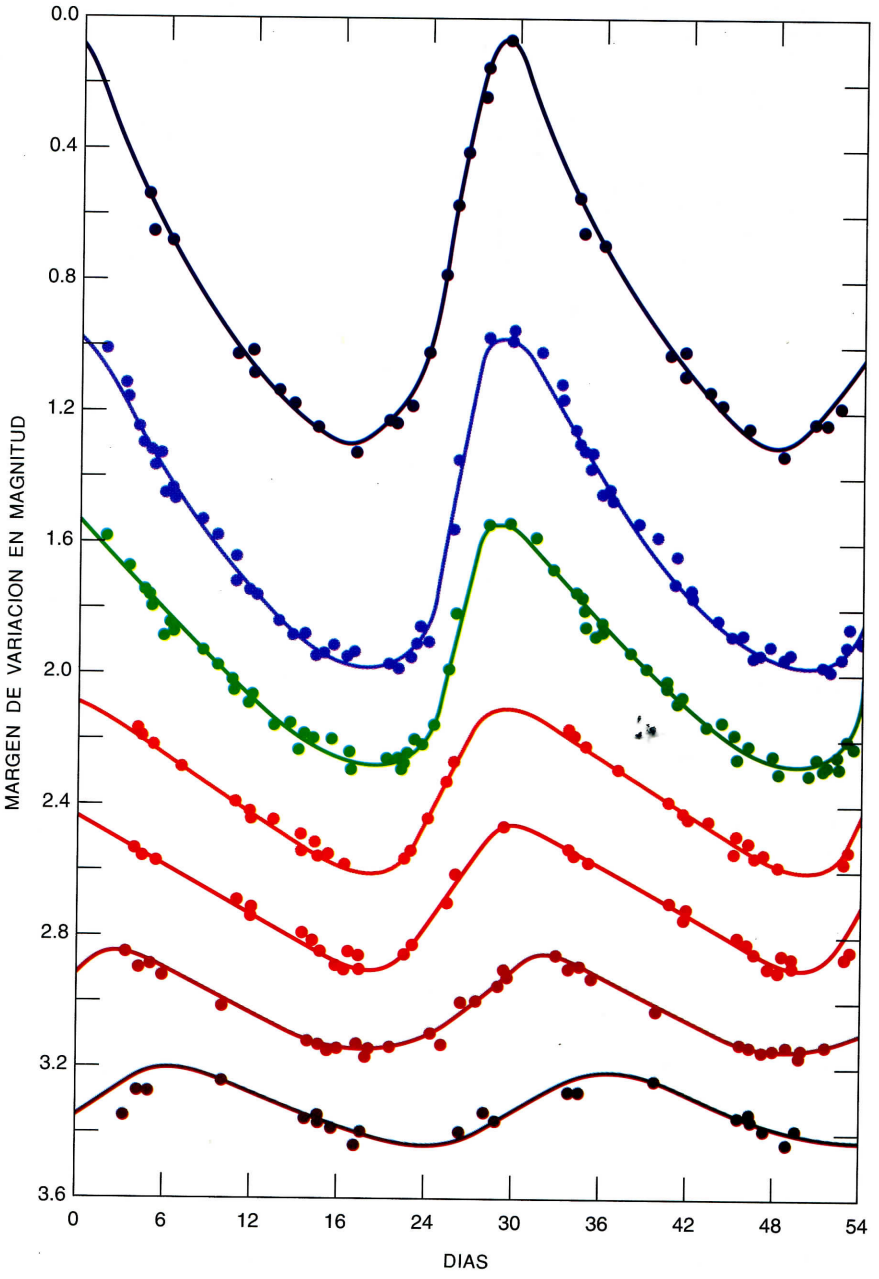
En virtud de lo anterior, para determinar la lejanía de las Cefeidas, se necesitan telescopios y detectores dotados de extrema sensibilidad a la luz en toda una gama de longitudes de onda. Hubble, Sandage y sus contemporáneos utilizaron placas fotográficas que respondían a la luz verde y azul y cuyo rendimiento no llegaba al 0,1 %. Hoy se emplean dispositivos de acoplamiento de carga (DAC), construidos con finas obleas de silicio. Estos dispositivos pueden detectar luz de longitudes de onda entre el azul y el rojo, con rendimiento superior al 50 por ciento. Cuando un fotón incide sobre un DAC libera un electrón del silicio, lo que crea una señal detectable.

Los DAC multiplican el rendimiento observacional que se obtenía con las placas fotográficas. Además, registran el brillo de una fuente luminosa con mucha mayor precisión que los materiales fotográficos. Se han convertido, pues, en detectores ideales para estudiar las Cefeidas y compensar los efectos de los granos de polvo.

Con mi colaborador y marido Barry F. Madore, del Instituto de Tecnología de California, he vuelto a medir cuidadosamente, durante los últimos diez años, las distancias a las galaxias más próximas. Nos hemos servido de los DAC y los grandes telescopios reflectantes de Mauna Kea (Hawai), Las Campanas (Chile) y Monte Palomar (California), entre otros; podemos afirmar que hemos determinado las distancias a las galaxias próximas con una precisión muy superior a la conseguida por cuantos nos precedieron.

Por desgracia, para obtener la constante de Hubble no podemos emplear la misma técnica que para medir las distancias a las galaxias con Cefeidas. Poseen estas estrellas brillo suficiente para vérselas en galaxias inmediatas, pero no en las distantes. Ahora bien, aun cuando las galaxias cercanas también participan en la expansión del universo, las interacciones por gravitación entre galaxias contiguas pueden provocar que algunas se muevan mucho más deprisa o más despacio que el resto del universo. Para calcular, pues, la constante de Hubble resulta forzoso determinar la lejanía a que se hallan galaxias remotas, tarea nada fácil.

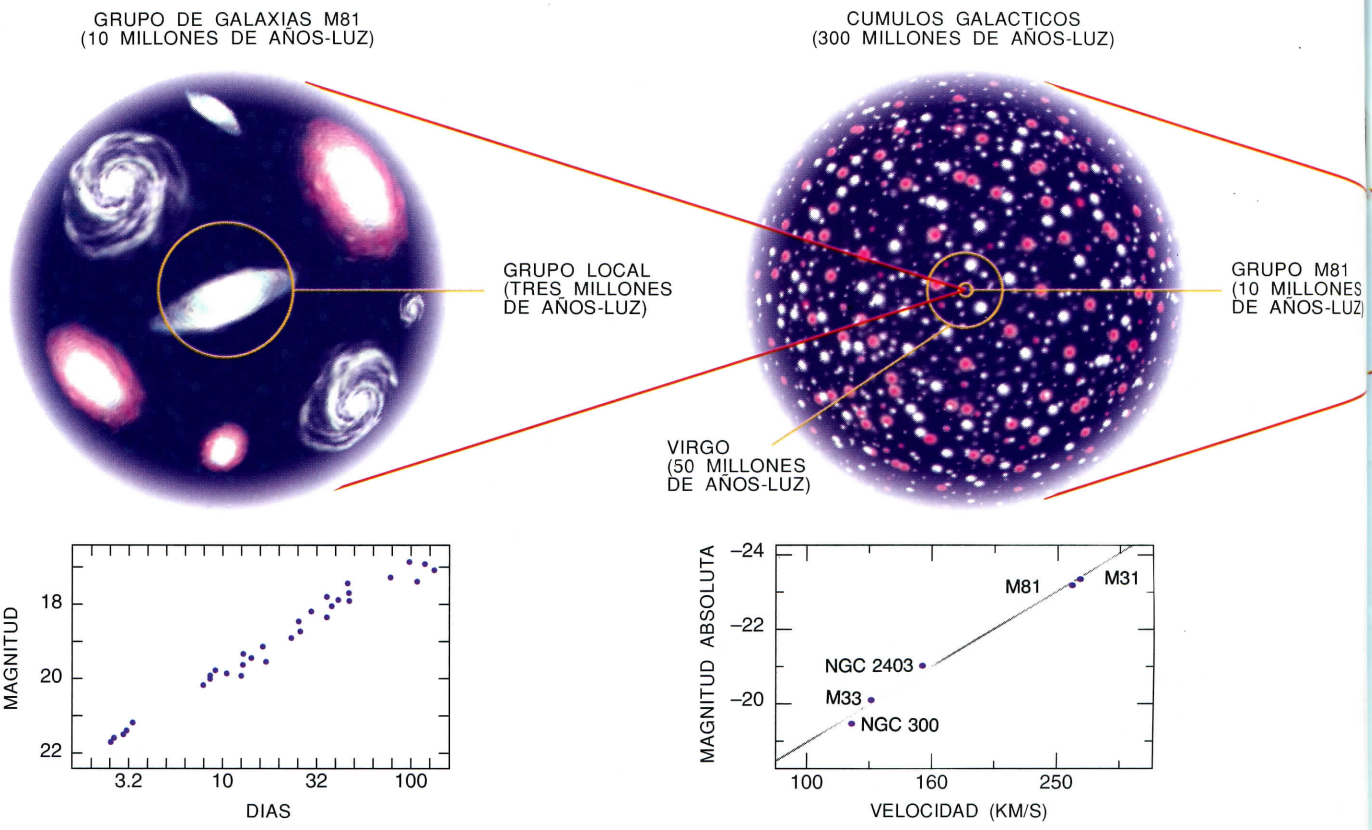
Pero no hasta el extremo de que no se hayan desarrollado métodos para calcular las distancias a dichas galaxias remotas. Muchas de estas técnicas necesitan calibrarse mediante la escala de distancias de las Cefeidas. Consideradas por ello indicadores secundarios de la distancia, las técnicas en cuestión se basan



3. LA MAGNITUD DE UNA CEFEIDA varía cíclicamente en un período de días. Cada línea en color corresponde a observaciones a distintas longitudes de onda de radiación (del ultravioleta al infrarrojo cercano). La amplitud de la variación luminosa es máxima hacia las longitudes de onda azul y ultravioleta. Las Cefeidas se descubren mejor con detectores sensibles a la luz azul.

¿A qué distancia se hallan las galaxias?

Para medir la lejanía de una galaxia podemos valernos de varias técnicas, si bien la precisión de las medidas decrece al aumentar la distancia de la galaxia. Observando las Cefeidas variables con telescopios terrestres, se han determinado con precisión las distancias de galaxias lejanas, como el grupo M81, a unos 10 millones de años luz. Con la misma técnica y el *Telescopio Espacial Hubble* tal vez podrá medirse la distancia al cúmulo de Virgo, a unos 50 millones de años luz. Midiendo el brillo de una galaxia y su velocidad de rotación, determinamos la distancia de galaxias alejadas 300 millones de años luz. Otra técnica prometedora se basa en el brillo aparente máximo de ciertas



4. PERIODO de una Cefeida: tiempo que tarda la estrella en completar un ciclo de variación de brillo. Guarda relación con su magnitud o luminosidad. Las mediciones se tomaron a longitudes de onda del infrarrojo en Cefeidas de la Gran Nube de Magallanes.

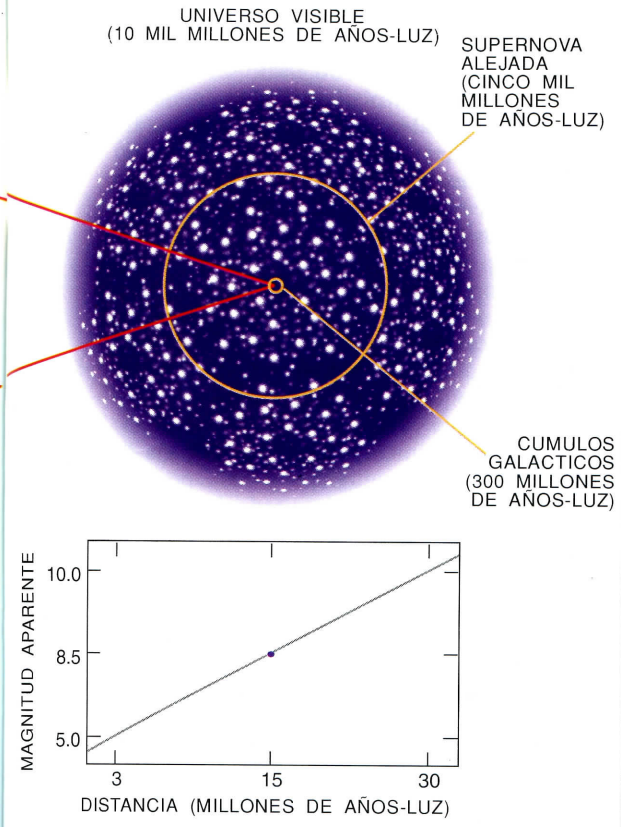
5. VELOCIDAD de giro de una galaxia. Depende de su magnitud a través de la relación de Tully-Fisher, extremadamente exacta, que permite obtener distancias relativas con precisión. Para determinar las distancias de las Cefeidas de estas galaxias se utilizaron detectores DAC.

en las propiedades de ciertos tipos de objetos brillantes del interior de las galaxias, o bien en las propias características de las galaxias. Mas no existe acuerdo entre los expertos a la hora de escoger indicadores secundarios fiables, concediendo que alguno lo sea. Discrepan, además, en cuanto al modo en que deben aplicarse los métodos y en la necesidad consiguiente de ajustar los resultados para compensar diversos efectos que pudieran distorsionarlos. Las discrepancias en la elección de los métodos secundarios están en la raíz de casi todo el debate actual acerca de la constante de Hubble.

Entre las técnicas de medición prometedoras destaca la que se funda en una correlación entre el brillo de la galaxia y su velocidad de rotación. Las galaxias de alta luminosidad suelen poseer una masa mayor que las de baja luminosidad; por tanto, las brillantes giran más lentamente que las galaxias de luz tenue. Aunque se conocía tal correlación, no se empleó de forma generalizada para medir las distancias hasta 1977. Lo hicieron R. Brent Tully, de la Universidad de Hawai, y J. Richard Fisher, del Observatorio Nacional de Radioastronomía.

La relación de Tully-Fisher da la máxima precisión en medidas de distancia, cuando se observa el brillo de una galaxia a longitudes de onda del infrarrojo. Para ello hay dos razones. La primera, que las estrellas de luminosidad predominante de las galaxias emiten la mayor parte de su radiación en longitudes de onda del infrarrojo cercano; la segunda, que, conforme la radiación infrarroja atraviesa el espacio, se dispersa menos cuanto mayor es la longitud de onda. Hace algo más de diez años, la relación de Tully-Fisher para longitudes de onda del infrarrojo fue ya utilizada por Marc Aaronson, de la Universidad de Arizona, Jeremy R. Mould, del Caltech, John P. Huchra, de la Universidad de Harvard, y Gregory D. Bothun, de la Universidad de Oregón. Desde entonces, varios grupos independientes han corroborado abundantemente el método de Tully-Fisher, y, lo que encierra mayor interés, han demos-

estrellas en explosión, las supernovas de tipo Ia. En principio, tales explosiones podrían llegar a detectarse a una distancia aproximada de la mitad del universo visible. La técnica de las supernovas es mucho menos precisa que el método de las Cefeidas (*gráfico inferior*).



6. EL BRILLO ABSOLUTO MAXIMO de una supernova del tipo Ia es constante, según la teoría; su brillo aparente guarda, pues, relación con su distancia a la Tierra. Pero sólo ha podido hacerse una medición para calibrar esta escala de distancias.

trado que la relación no parece depender del entorno: se mantiene la misma en las zonas densas de cúmulos muy poblados, en las regiones más externas de tales cúmulos y en galaxias más o menos solitarias.

Por estas y otras razones, se acepta —aunque hay voces discrepantes— que la relación de Tully-Fisher constituye uno de los indicadores de distancia secundarios más precisos existentes. Se emplea para estimar distancias de hasta 300 millones de años luz. Otra ventaja del método es que para su calibración puede recurrirse a la técnica de las Cefeidas. Como desventaja, cabe señalar el desconocimiento de los astrónomos con respecto al hilván teórico de esa relación de Tully-Fisher.

Se han desarrollado otras dos técnicas de medición de distancias. Una, la ideada por George Jacoby y su grupo del Observatorio Nacional de Astronomía Optica, apela a las nebulosas planetarias. Se forman éstas cuando las estrellas de masa comparable a la del Sol se aproximan al final de su ciclo vital; su luminosidad, según observaron, no excede de un límite superior bien definido. Para calcular la distancia a una galaxia, midieron la luminosidad aparente de las nebulosas planetarias más brillantes de aquella galaxia. En la calibración del nuevo método utilizaron galaxias cuyas distancias se conocían en referencia a las Cefeidas. Las medidas de lejanía que así obtuvieron concordaban muy bien con las conseguidas con el método de Tully-Fisher, en los casos en que se disponía de ambos datos.

El segundo método, desarrollado por el equipo de John L. Tonry, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, se basa en el aspecto granuloso de las galaxias cercanas; la superficie de las remotas, por contra, presenta un brillo distribuido de manera más uniforme. Ese fenómeno obedece a que la granularidad decrece con la distancia, al ser cada vez más difícil la labor de resolver las estrellas individuales. Por consiguiente, la lejanía de una galaxia puede inferirse a partir del grado de fluctuación del brillo aparente a través de su superficie. Tras determinar distancias galácticas mediante esta técnica del brillo superficial, Tonry comparó los resultados con los obtenidos por los métodos de las nebulosas planetarias y de Tully-Fisher. Comprobó que había un acuerdo excelente. Teniendo en cuenta la inseguridad que siempre ha afectado a las mediciones de distancias extragalácticas, los hallazgos de Tonry resultan muy sugestivos; el inconveniente es que disponemos sólo de un corto número de Cefeidas calibradoras para ambos métodos.

Otro indicador de distancias que encierra grandes posibilidades estriba en las supernovas de tipo Ia. (Las supernovas son explosiones catastróficas que señalan la muerte de ciertas clases de estrellas.) Se producen supernovas del tipo Ia en sistemas de estrellas dobles en los que una de las estrellas es una enana blanca, objeto muy denso. La explosión se produce cuando se transfiere, a la enana blanca, masa de la estrella acompañante. Puesto que entonces se libera una ingente cantidad de radiación, deberíamos poder observar supernovas que distaran tal vez hasta cinco mil millones de años luz, es decir, la mitad del radio del universo visible.

Las supernovas del tipo Ia constituyen buenos indicadores de distancia, ya que en su momento de máximo brillo producen todas la misma cantidad de luz aproximadamente. Partiendo de esa información, nos es dado inferir la distancia a que se encuentran.

Pero las supernovas son sucesos raros, lo que dificulta su descubrimiento y, sobre todo, su calibración. Por culpa de esa misma escasez, es muy pequeña la posibilidad de que aparezca una supernova del tipo Ia en una galaxia suficientemente cercana para que en ella midamos también las Cefeidas. La verdad es que hubo que esperar al último par de años para que el grupo de Sandage realizara la primera medición directa de la distancia a una galaxia de la cual se sabe que ha albergado una supernova Ia. Para lograrlo, observaron Cefeidas valiéndose del *Telescopio Espacial Hubble*. Aunque su trabajo signifique un avance importante, no basta un resultado aislado para calibrar con precisión la escala de distancias de supernovas.

Merecen mencionarse otros dos métodos de determinación de la constante de Hubble, independientes de la escala de distancias de las Cefeidas y útiles para medir distancias en las inmensas escalas cosmológicas. Además, las aplicaciones provisionales de uno y otro abogan por un menor valor de la constante de Hubble.

El primero de estos métodos alternativos se basa en el efecto de las lentes gravitatorias: la luz proveniente de una fuente lejana puede desviarse al pasar cerca de una galaxia en su camino hacia la Tierra. En los alrededores de la galaxia, la luz sigue diversas trayectorias, unas más largas que otras, llegando por consiguiente a la Tierra en instantes distintos. Si la luminosidad de la fuente varía de manera característica, la señal correspondiente se advertirá pri-

7. HENRIETTA S. LEAVITT, del observatorio de Harvard, encontró en 1908 una correlación entre el período de una Cefeida variable y su brillo absoluto. Esta correlación permite a los astrónomos medir las distancias a las galaxias más cercanas.

mero en la luz que llega por el trayecto más corto y se observará de nuevo, algo después, en la luz que ha seguido el trayecto más largo. El tiempo transcurrido entre los instantes de llegada denuncia la diferencia en longitud entre las dos trayectorias luminosas. A partir de ahí, aplicando un modelo teórico de la distribución de masa de la galaxia, podemos calcular un valor de la constante de Hubble.

El segundo método saca partido del efecto Sunyaev-Zel'dovich (SZ). Cuando los fotones procedentes del fondo cósmico de microondas atraviesan cúmulos galácticos aumentan su energía al chocar con electrones del plasma caliente (rayos X) que se encuentra en los cúmulos; de la colisión resulta una merma del fondo de microondas hacia la posición del cúmulo. Sabremos la lejanía del cúmulo por comparación entre las distribuciones de microondas y de rayos X. Para determinar esa distancia, sin embargo, debe también conocerse la densidad media de los electrones, su distribución y su temperatura, y se ha de disponer de una medida exacta de la disminución de la temperatura del fondo de microondas. Calculada así la distancia del cúmulo, y medida su velocidad de recesión, podrá obtenerse la constante de Hubble.

El método SZ y la técnica de las lentes gravitatorias merecen un voto de confianza, aunque no se han sometido todavía a contrastación rigurosa. Si queremos saber la imprecisión que les rodea, tendremos que descubrir más objetos dotados de las propiedades mencionadas.

Prosigue el debate en torno al método óptimo de determinación de la lejanía de las galaxias remotas, lo que significa que se esgrimen opiniones contrapuestas acerca de cuál sea la mejor estimación actual de la constante de Hubble. Sandage y sus colaboradores han dado un valor provisional de 45 km/s/Mpc, fiados en el método de las supernovas del tipo Ia. El método SZ y la técnica de las lentes gravitatorias apoyan también un valor bajo de dicha constante.

Mi equipo ha obtenido una estimación mejor. Básase en el empleo de mediciones recientes de Cefeidas para calibrar, una a una, la relación de Tully-Fisher en el infrarrojo; fúndase también en la técnica de las nebulosas planetarias y en el método de fluctuación superficial del brillo. Estas tres técnicas independientes dan resultados en excelente acuerdo: un valor de la constante de Hubble elevado, alrededor de 80 km/s/Mpc.

Nuestras mediciones y las de nuestros colegas inciden en muchos aspectos relativos a la edad, la evolución y el destino del universo. Un valor bajo de la constante de Hubble implica un universo viejo, mientras que un valor elevado sugiere una mayor "juventud". En particular, una constante de Hubble de 100 km/s/Mpc indica que la edad del universo está comprendida entre 7000 y 10.000 millones de años (según la cantidad de materia que exista y de la correspondiente desaceleración que ésta provoque). Un valor de 50 km/s/Mpc sugiere, sin embargo, una edad comprendida entre 15.000 y 20.000 millones de años.

¿Y qué suerte correrá el universo? Siendo baja la densidad media de materia en el cosmos, según las actuales estimaciones obtenidas por observación, el modelo estándar vigente predice que la expansión del universo proseguirá sin fin. Pero la teoría afirma también que la masa que encierra no se limita a la materia luminosa. (De hecho, la búsqueda de esta materia "oscura" se ha convertido en campo de intensa investigación.) Para responder sin ambigüedad a la pregunta sobre el destino final, los cosmólogos no sólo deben conocer la constante de Hubble y la densidad de materia media del universo, sino también disponer de una medida independiente de su edad. Estas tres magnitudes son necesarias para determinar de un modo unívoco la geometría y la evolución del universo.

Una constante de Hubble con un valor alto tendría profundas implicaciones en nuestra forma de entender la evolución de las galaxias y del universo. Si le asignamos un valor de 80 km/s/Mpc, resulta que la edad del universo estaría entre los 8000 y los 12.000 millones de años (dejando un margen de incertidumbre en el valor de la densidad media del universo), valores todos ellos inferiores a los que la teoría deduce para la edad de los cúmulos globulares. Se cree que esos viejos sistemas de estrellas se contarían entre los primeros objetos que se formaron en nuestra galaxia; su edad se cifra entre 13.000 y 17.000 millones de años. Obviamente, esta edad no puede ser mayor que la del propio universo.

Suele aducirse la edad estimada de los cúmulos globulares para preferir, a priori, un valor reducido de la constante de Hubble y, por tanto, una edad mayor para el universo. Algunos objetan, sin embargo, la posibilidad de que los modelos teóricos de cúmulos globulares, de los que tales estimaciones dependen, no estén bien asentados y partan de hipótesis inexactas. Se recuerda, por ejemplo, que los modelos se apoyan en el conocimiento de las proporciones exactas de ciertos elementos presentes en los cúmulos globulares, en concreto, el oxígeno y el hierro. Además, la precisión de la edad requiere una medición cabal de las luminosidades de las estrellas de tales cúmulos globulares, lo que, a su vez, exige valorar con exactitud la lejanía de los mismos. Considerando que puede haber errores tanto en las mediciones de la constante de Hubble como en los modelos y las distancias de los cúmulos globulares, no es fácil ponderar la gravedad de la discrepancia de edad manifiesta entre el universo y estos sistemas estelares.

Un valor elevado de la constante de Hubble plantea otro problema delicado: no encajaría en las teorías estándar sobre la formación de las galaxias y su distribución por el espacio. Especulan éstas, por ejemplo, sobre cuánto tiempo se necesita para desarrollar la macroacumulación observada en la distribución de las galaxias. Ante una constante de Hubble alta —y, por ende, un universo joven— los modelos se sienten inca-

paces de reproducir la distribución real de las galaxias.

La controversia sobre el valor de la constante de Hubble puede llegar a zanjarse con los datos que aporte el *Telescopio Espacial Hubble*, dotado de capacidad para resolver estrellas individuales a diez veces la distancia que puede alcanzarse desde el suelo. Proporciona, pues, la oportunidad de descubrir Cefeidas en un volumen de espacio mil veces mayor que el que rutinariamente exploran los telescopios instalados en tierra.

Prioridad del *Hubble* es descubrir Cefeidas en galaxias remotas, en el cúmulo de Virgo (a 50 millones de años luz), por ejemplo. Las Cefeidas servirían para determinar las distancias de tales galaxias, calibrando por tanto diversos indicadores de distancia secundarios. Tales observaciones mejorarían muchísimo las mediciones de la constante de Hubble.

Se nos concedió, a mi grupo y a otros, un tiempo de observación en el *Hubble* suficiente para localizar nuevas Cefeidas en galaxias más lejanas. Comenzamos nuestro rastreo, en 1991, por una galaxia cercana, la M81; identificamos más de 20 nuevas Cefeidas, obteniendo un conjunto espectacular de curvas de luz. Por desgracia, el telescopio no ha funcionado como se esperaba debido a la aberración esférica de su espejo primario, y ha tenido que retrasarse la mayor parte del programa hasta que la óptica se haya corregido, lo que por el momento está previsto para diciembre de 1993.

Contamos con razones poderosas para esperar que, a lo largo de los próximos diez años, se resuelva la controversia sobre la edad del universo y podamos trazar el curso de su evolución. De todas formas, la historia de la ciencia nos avisa que quedarán todavía muchos retos pendientes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

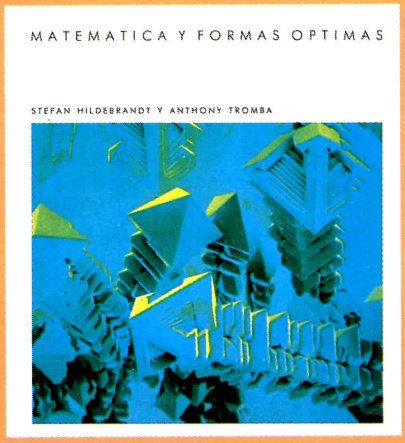
MAN DISCOVERS THE GALAXIES. R. Berendzen, R. Hart y D. Seeley. Science History Publications, 1976.

THE COSMOLOGICAL DISTANCE LADDER: DISTANCE AND TIME IN THE UNIVERSE. Michael Rowan-Robinson. W. H. Freedman and Company, 1985.

THE CEPHEID DISTANCE SCALE. Barry F. Madore y Wendy L. Freedman en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 103, n.º 667, páginas 933-957; septiembre de 1991.

LONELY HEARTS OF THE COSMOS: THE SCIENTIFIC QUEST FOR THE SECRET OF THE UNIVERSE. Dennis Overbye. Harper-Collins Publishers, 1991.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN



MATEMATICA Y FORMAS OPTIMAS

Stefan Hildebrandt y Anthony Tromba

Un volumen de 22 × 23,5 cm y 206 páginas, profusamente ilustrado en negro y en color

Mediante una combinación de atractivas fotografías y un texto fascinante, Stefan Hildebrant y Anthony Tromba nos proporcionan una sazonada explicación sobre la simetría y la regularidad de las formas y modelos de la naturaleza. Aunque por lo general resultan fáciles de observar, dichas formas y modelos no se prestan a una explicación inmediata. ¿Existen leyes universales que nos permitan comprenderlas? ¿Por qué son esféricos y no cuadrados o piramidales los cuerpos celestes? La naturaleza no aborrece las nítidas estructuras poliédricas: las encontramos, por ejemplo, en las formaciones de cristales. ¿Se rigen estas estructuras puntiagudas por el mismo principio que da cuenta de la forma de una burbuja de jabón, redonda y simétrica?

Este libro examina los esfuerzos de científicos y matemáticos, a lo largo de la historia, para hallar respuesta a tales cuestiones. Se ocupa del desarrollo del cálculo variacional, rama de las matemáticas que estudia los modelos que maximicen o minimicen una magnitud particular. ¿Es el iglú la forma óptima de alojamiento que minimice las pérdidas de calor hacia el exterior? ¿Utilizan las abejas la mínima cantidad posible de cera en la construcción de sus celdas hexagonales? Más aún, ¿existe un principio subyacente que describa la infinita variedad de formas de nuestro mundo?

Probablemente no haya una respuesta definitiva a estas preguntas. A pesar de ello, los científicos persisten en la exploración de la idea según la cual la naturaleza viene gobernada por el principio de la economía de medios: la naturaleza actúa de la manera más sencilla y eficaz.

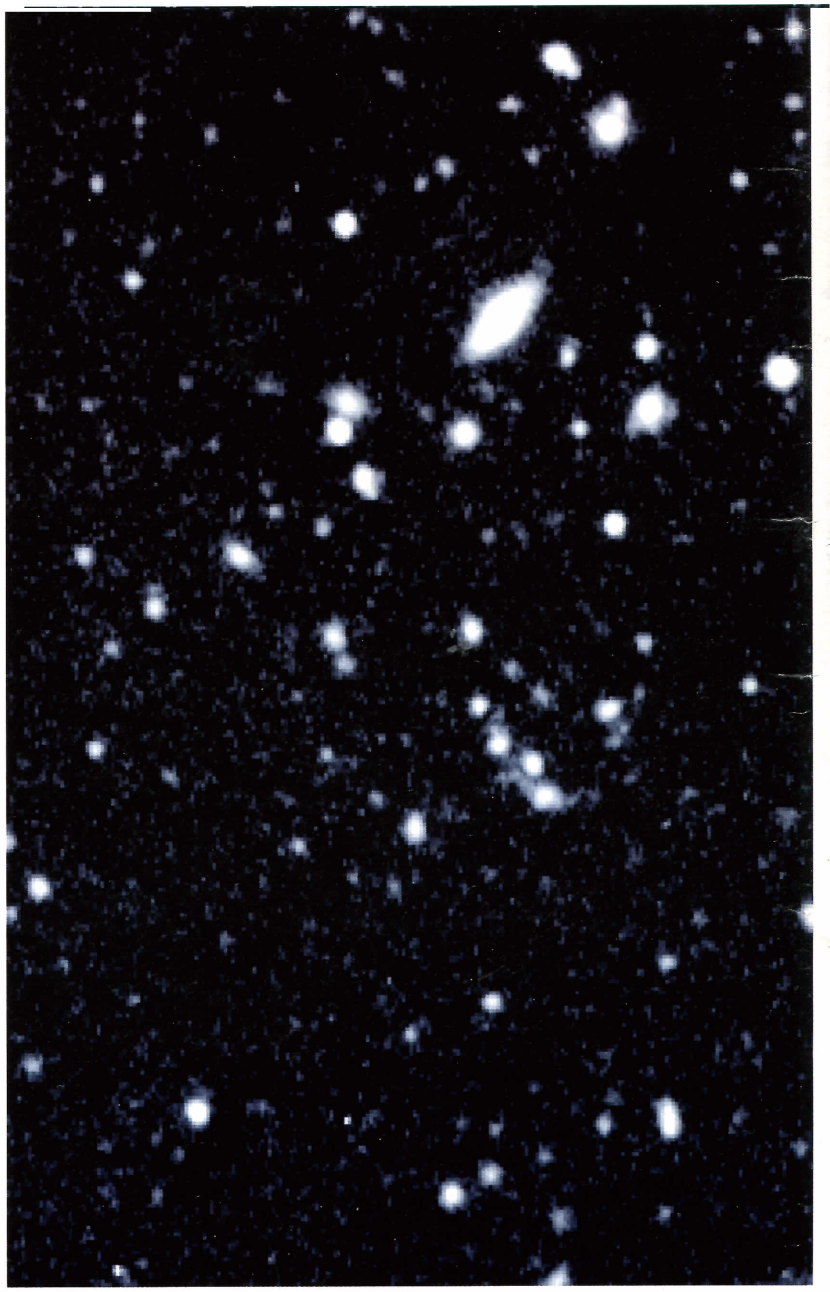
Stefan Hildebrandt, profesor de matemáticas en la Universidad de Bonn, ha enseñado en distintos centros superiores de los Estados Unidos y Europa. Goza de una vasta reputación por sus trabajos sobre cálculo variacional y superficies mínimas. Anthony Tromba es profesor de matemáticas en la Universidad de California en Santa Cruz y en el Instituto Max Plant en Bonn. Merecen especial atención sus trabajos sobre superficies mínimas y análisis funcional no lineal.

Prensa Científica

Exploración del espacio-tiempo

Las explosiones de estrellas observadas a inmensas distancias muestran que la expansión cósmica podría estar acelerándose, lo que nos lleva a pensar en la intervención de una nueva forma de energía, exótica

Craig J. Hogan, Robert P. Kirshner y Nicholas B. Suntzeff



Hace mucho tiempo (unos 5000 millones de años), en una galaxia muy lejana (a unos 2000 megaparsecs) explotó una estrella y su destello brilló más que miles de millones de soles juntos. Su luz se propagó por el espacio, apagándose y aumentando en longitud de onda a través de un cosmos en expansión, antes de que una brizna de ella llegara a la Tierra. En un intervalo de 10 minutos de cierta noche oscura de 1997, unos centenares de fotones de la supernova, no más, aterrizaron en el espejo de un telescopio de Chile. En el observatorio, un ordenador creó una imagen digital donde se evidenciaba el puntito luminoso. Pese a su apariencia irrelevante, aquella débil mota fue para nosotros una ráfaga de luz, un faro que alumbraba nuestra exploración del espacio y el tiempo.

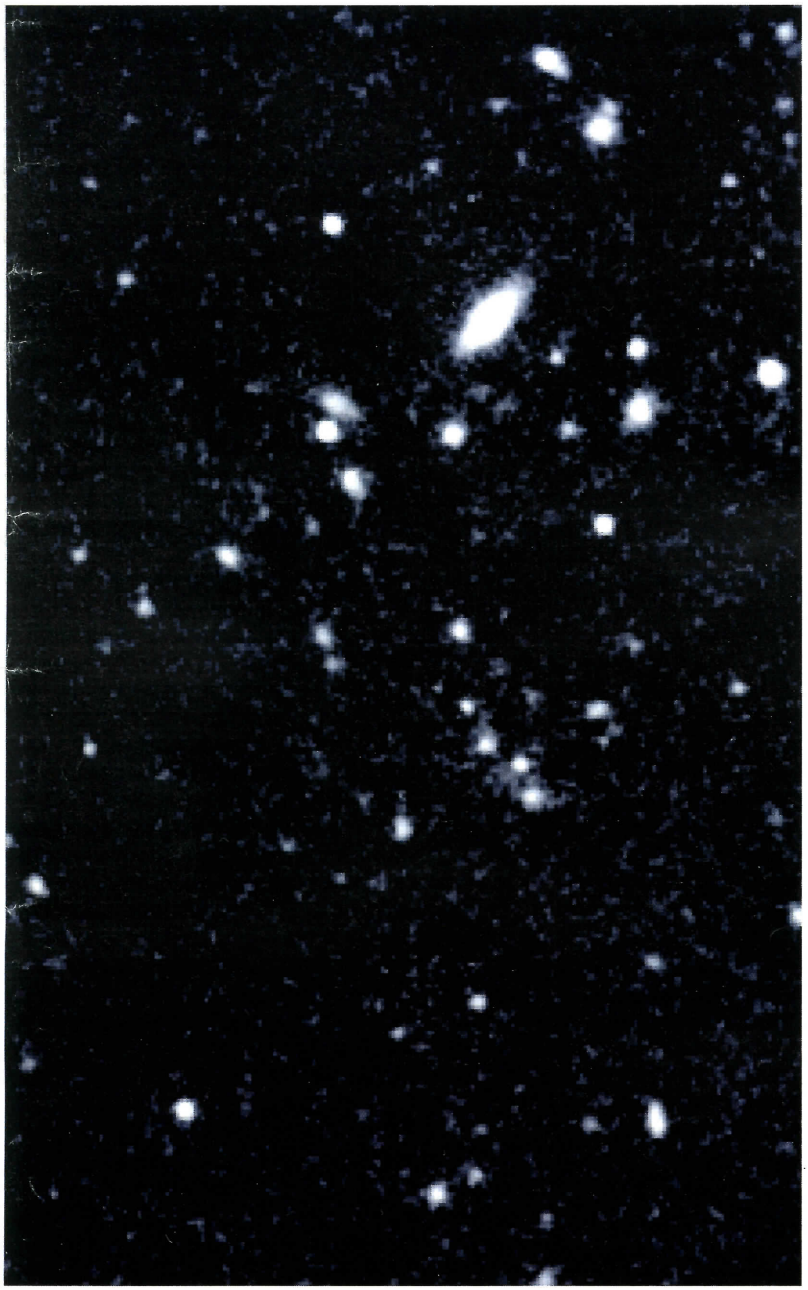
En colaboración con otros compañeros repartidos por diversos países, hemos seguido la llegada de la luz emitida desde docenas de supernovas. Tales observaciones nos han facultado para cartografiar la forma del universo y establecer un esbozo cronológico de su expansión. La conclusión a la que nosotros y otro equipo de astrónomos hemos arribado pone en tela de juicio postulados aceptados desde hace decenios. Según parece, el universo es mayor y está más vacío de lo esperado. Además, su expansión no remite, como muchos cosmólogos habían pronosticado, sino que se acelera.

Curvas estelares

A lo largo de buena parte del siglo se ha mantenido vivo el interés en torno al curso de la expansión cósmica. Por un doble motivo: da cuenta de la geometría del universo y refleja la naturaleza de sus constituyentes, es decir, de la materia, la luz y, posiblemente, otras formas de energía más sutiles. La teoría de la relatividad general de Albert Einstein aúna estas propiedades fundamentales del universo y describe la manera en que condicionan el movimiento de la materia y la propagación de la luz; merced a ello, puede predecir determinados fenómenos que los astrónomos someten a medición.

mediante supernovas

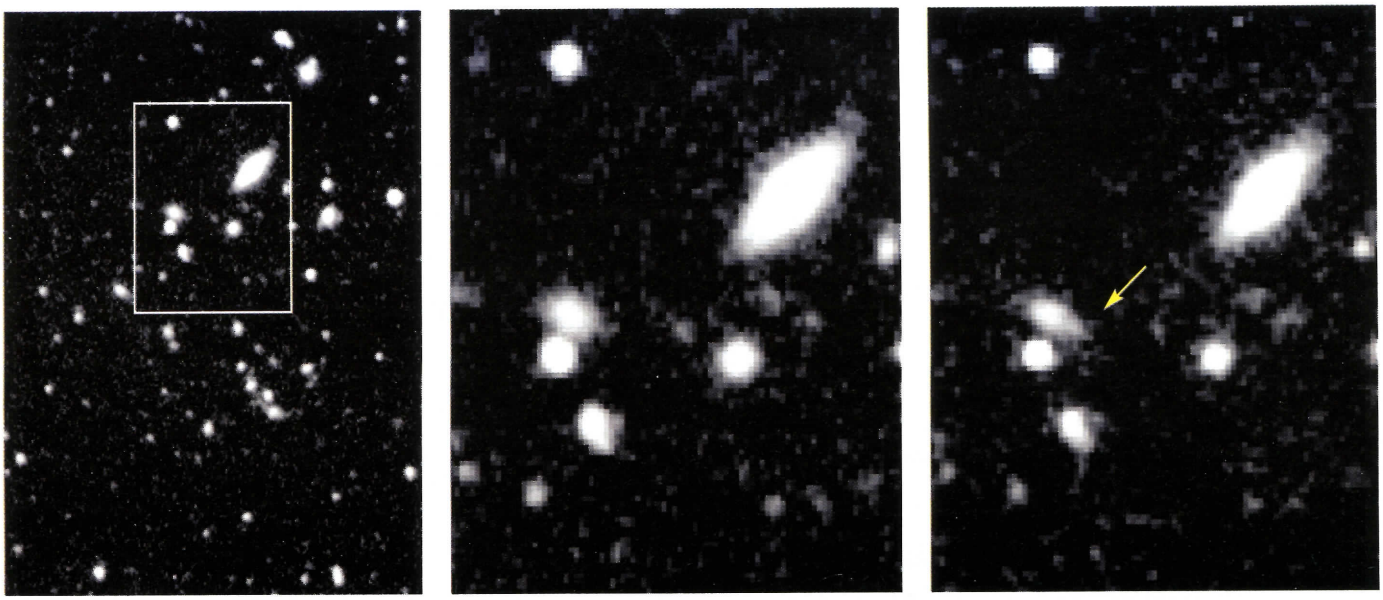
Antes de que Einstein publicara su teoría en 1916 y de las primeras observaciones de la expansión cósmica, acontecidas durante la década siguiente, se creía que el universo mantenía inalterado su tamaño. El propio Einstein desconfió de sus ecuaciones cuando advirtió que implicaban un universo dinámico. La situación cambió, sin dejar lugar a la duda, con las nuevas mediciones de los movimientos de las galaxias realizadas por Edwin P. Hubble y otros: las galaxias lejanas y débiles se alejaban de la Tierra más deprisa que las galaxias cercanas y brillantes, tal como predecía la relatividad general para un universo que se expande y distancia, por ende, unas galaxias de otras. Los astrónomos en cuestión midieron la velocidad de alejamiento de las galaxias a través del corrimiento de líneas espectrales visibles hacia longitudes de onda mayores (el corrimiento al rojo). Aunque suele asociársele con el efecto Doppler —fenómeno responsable del cambio de tono del silbato de un tren que pasa o de una bocina de coche—, el corrimiento al rojo cosmológico debe entenderse, con mayor rigor, como el resultado de la expansión del universo; ésta alarga la longitud de onda de la luz que viaja entre las galaxias. Las emisiones procedentes de objetos remotos, al haber viajado durante más tiempo, experimentan un corrimiento al rojo mayor que la radiación de fuentes próximas.



El estado de la técnica en tiempos de Hubble limitó la comprobación de la expansión cósmica a galaxias que estaban bastante cerca. En el intervalo temporal que invirtió la luz en llegar a la Tierra desde esas galaxias próximas, el universo sólo se había expandido una pequeña fracción de su tamaño global. Con estos cambios modestos, el corrimiento al rojo es directamente proporcional a la distancia; el cociente fijo de los dos se llama constante de Hubble y describe el ritmo actual de expansión cósmica. Desde hace años, los astrónomos esperaban comprobar que las galaxias más alejadas se apartan de esta relación simple entre corrimiento al rojo y distancia, ya sea porque el ritmo de expansión ha cambiado a lo largo del tiempo o porque el espacio que media esté curvado. Medir ese efecto constituye, pues, un objetivo crucial para los cosmólogos; es un reto difícil que exige medios para acotar las inmensas distancias a que se encuentran las galaxias.

Hubble y otros calcularon las distancias a diversas galaxias partiendo del supuesto de que todas ellas tenían el mismo brillo intrínseco. De acuerdo con su razonamiento, las que lucían mucho se hallaban cerca y, lejos, las de brillo pálido. Pero ese planteamiento resulta válido sólo a grandes rasgos, pues las galaxias difieren en sus propiedades. Y falla por completo cuando hablamos de fuentes lejanas cuya luz tarda muchí-

1. ¿DONDE ESTA LA SUPERNOVA? Este par de imágenes, realizadas con el Telescopio Blanco de cuatro metros de diámetro del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, aportaron la primera prueba de una supernova. En la imagen de la derecha, obtenida tres semanas más tarde que la imagen de la izquierda, la supernova altera sutilmente la apariencia de una de las galaxias, aunque se percibe. ¿Puede el lector encontrarla? Algunas discrepancias se deben a las condiciones atmosféricas cambiantes. Solución: en la figura siguiente.



2. UNA SUPERNOVA REMOTA, con un corrimiento al rojo de $z = 0{,}66$, aparece junto a la flecha. La explosión de esta estrella afecta sólo a algunos elementos de la imagen obtenida después del suceso.

simo en alcanzar la Tierra y nos muestra el estado de esas galaxias distantes hace miles de millones de años (de jóvenes); el brillo intrínseco de esas galaxias remotas pudo haber diferido notablemente del que emiten galaxias más viejas que observamos en nuestra vecindad. Es difícil desentrañar de los efectos de la expansión tales cambios evolutivos. Por eso, los astrónomos han venido buscando otras "candelas estándar" cuyo brillo intrínseco sea mejor conocido.

Para verse hoy lo que lució hace miles de millones de años luz, los faros emisores deben ser muy potentes. Al comienzo de los setenta, algunos se fijaron en los cuásares, fuentes portadoras de inmensa energía (probablemente alimentadas por agujeros negros que atrapan a las estrellas y gas de su alrededor). Pero los cuásares estudiados divergían unos de otros incluso más que las galaxias; resultaron, pues, de escasa utilidad.

Pero otros pensaron en las supernovas. Esas estrellas que explotan podían, quizá, servir de candelas estándar para la exploración cosmológica. Se trataba de un camino controvertido, pues las supernovas manifestaban también una amplia variación en sus propiedades. Sin embargo, la investigación realizada, a lo largo de los últimos diez años, por nuestro equipo ha permitido determinar, con exquisita precisión, el brillo intrínseco de las supernovas de tipo Ia.

Muerte estelar

¿En qué consiste una supernova de tipo Ia? A grandes trazos, es el estallido final producido cuando una estrella que ha muerto se transforma en una bomba termonuclear natural. Pese a la espectacularidad de la transformación postrera, el comienzo de la vida del progenitor es el de una estrella ordinaria, una bola estable de gas cuyas capas externas se mantienen por el calor de las incesantes reacciones nucleares que se desarrollan en su interior y convierten hidrógeno en helio, carbono, oxígeno, neón y otros elementos. Cuando una estrella muere, las cenizas nucleares se mezclan en ascuas incandescentes, comprimidas por la gravedad hasta alcanzar el tamaño de la Tierra y la densidad de un millón de veces la típica de la materia ordinaria.

Esas estrellas enanas blancas, en su mayoría, se enfrían y apagan, extinguiéndose. Ahora bien, si ocurre que se halla en órbita cerca de otra estrella, puede succionar materia de su compañera y adquirir una densidad creciente, hasta que prende una ignición termonuclear descontrolada. El cataclismo nuclear destroza por entero la estrella enana, lanzando material a unos 10.000 kilómetros por segundo. Y el brillo de esta bola de fuego en expansión tarda unas tres semanas en alcanzar su máximo, para declinar en meses.

Aunque varían ligeramente en el brillo, estas supernovas siguen un patrón, en el que las explosiones mayores y más brillantes duran más que las débiles. Por tanto, si investigamos su duración, podremos corregir las diferencias y deducir su brillo intrínseco con una precisión de hasta el 12 %. En el curso de los últimos diez años, el estudio de supernovas de tipo Ia con los detectores modernos ha convertido a tales destellos de luz en las candelas estándar mejor conocidas de los astrónomos.

La frecuencia con que una luz de ésas aparece en una galaxia típica se cifra en torno a una vez cada 300 años. En la Vía Láctea son sucesos poco habituales. Si escudriñamos algunos miles de galaxias descubriremos, casi cada mes, una supernova de tipo Ia. Hay tantas galaxias en el universo que, cada pocos segundos, estallan en el firmamento supernovas cuyo brillo nos las hace accesibles al estudio. Sólo queda descubrirlas e investigarlas. A esa tarea se ha aplicado nuestro grupo, "High-Z Team" (donde Z designa el símbolo de corrimiento al rojo); el equipo se organizó en 1995 bajo la dirección de Brian P. Schmidt, de los observatorios de Mount Stromlo y Siding Spring en Australia. Compite en este campo el grupo formado en torno al programa Supernova, "Supernova Cosmology Project", que empezó en 1988 y está liderado por Saul Perlmutter, del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley (véase *Supernovas y expansión acelerada del universo*, de Pilar Ruiz Lapuente, Alex G. Kim y Nicholas Walton en este mismo número).

Cada equipo desarrolla su propio programa. Ambos, sin embargo, sacan partido de un mismo avance fundamental, el despliegue de grandes detectores electrónicos de luz en telescopios gigantes. Esta combinación produce imágenes digitales de objetos débiles sobre una superficie considerable de cielo. Los dos grupos han compartido, por dar un ejemplo de los nuevos medios técnicos, la Cámara de Gran Rendimiento, desarrollada por Gary M. Bernstein y J. Anthony Tyson. Cuando esta cámara se coloca en el foco del Telescopio Blanco, de cuatro metros, del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, con una sola exposición se cubre casi tanta extensión como la luna llena y obtiene una imagen de unas 5000 galaxias en 10 minutos.

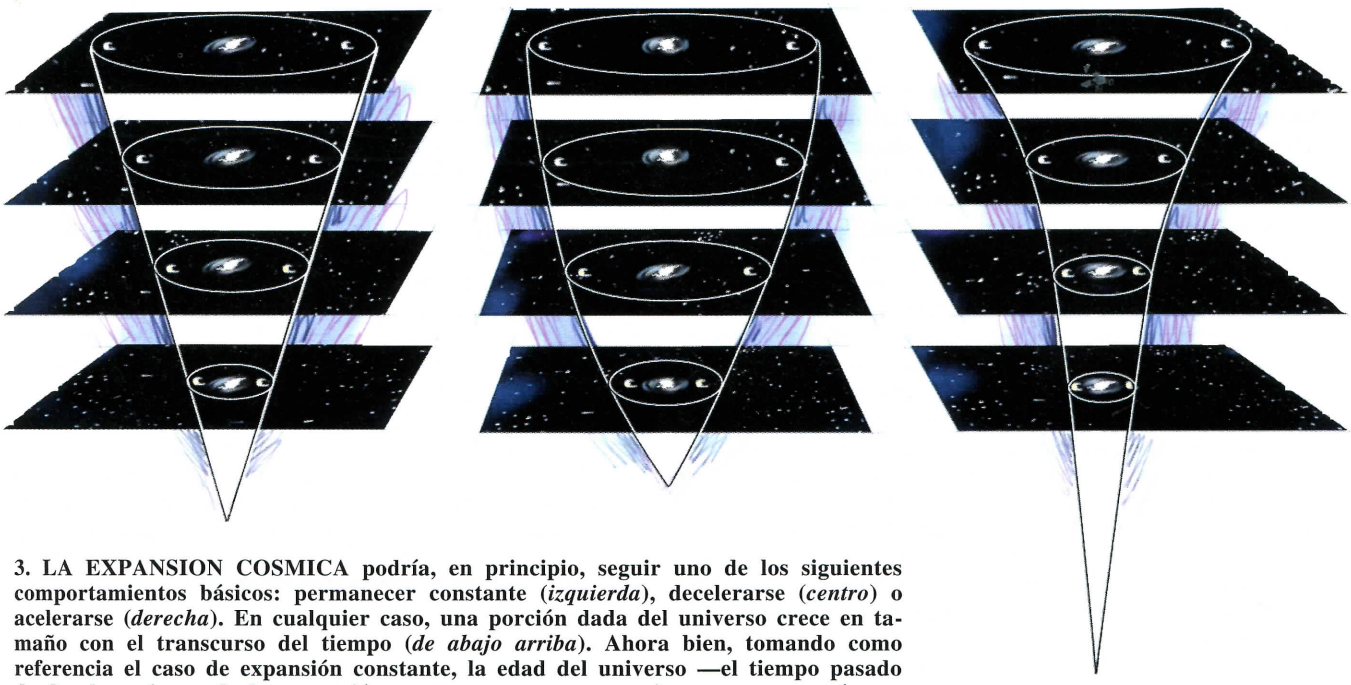
Para encontrar supernovas distantes, no hay más que tomar imágenes de la misma fracción del firmamento con unas pocas semanas de diferencia y buscar, en los cambios operados, explosiones de estrellas. Los detectores digitales cuentan el número de fotones en cada elemento de imagen de forma precisa. Por tanto, a nosotros sólo nos queda sustraer la primera imagen de la segunda y comprobar las diferencias significativas entre las dos. Puesto que se examinan miles de galaxias en cada par de imágenes, podemos estar seguros de que la búsqueda entre numerosas parejas de imágenes terminará por hallar muchas supernovas, siempre que el tiempo de observación acompañe. Para nuestra fortuna, la situación del observatorio, al pie de los Andes en la cordillera sur del desierto chileno de Atacama (uno de los lugares más secos del mundo), asegura cielos despejados. Con la esperanza de cosechar resultados, preparamos con antelación el tiempo de observación que debía desarrollarse en una batería de telescopios dispersos por todo el mundo, para que así las mediciones de seguimiento se acometieran antes de que se apagaran las supernovas.

La búsqueda de estrellas que explotan en los cielos desata un terremoto de actividad frenética. Los astrónomos han de tomar y comparar cientos de imágenes digitales a un ritmo vertiginoso. En todas las estancias de Cerro Tololo hay ordenadores que ejecutan la orden impuesta de alinear imágenes, corregir diferencias en transparencia atmosférica y tamaño de la imagen y sustraer los dos registros. En condiciones de normalidad, la mayoría de las galaxias desaparecen, dejando sólo un "ruido" en la diferencia entre dos imágenes. Las señales mayores denuncian un objeto nuevo o cambiante que puede ser una estrella variable, cuásares, asteroides y, en contados casos, supernovas.

Nuestros programas informáticos registran la posición de los nuevos objetos y se aprestan a identificar supernovas. Pero los tests automatizados son imperfectos. Hemos de escrutar las imágenes de forma visual para determinar si una supuesta supernova lo es en verdad. Puesto que de nuestros descubrimientos se ha de realizar un seguimiento inmediato en otros telescopios, se pasa al análisis sin perder tiempo.

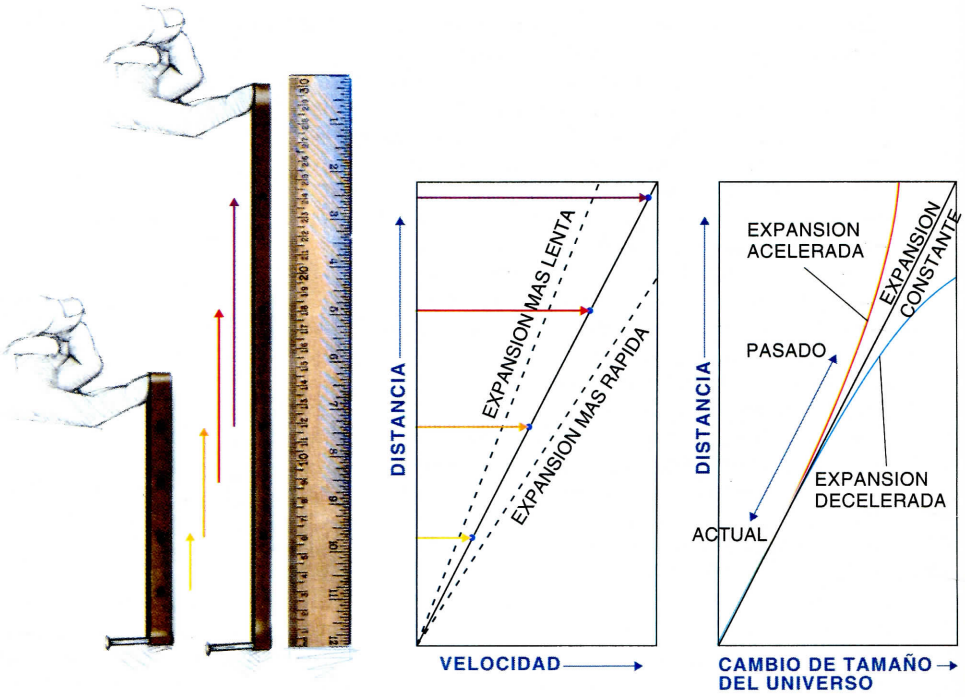
A continuación, nos centramos en los mejores candidatos de supernova. Los observamos con los mayores instrumentos ópticos del mundo, los telescopios Keck recién construidos en Hawai. Tales observaciones habrán de resolver si los objetos descubiertos son o no supernovas de tipo Ia, calibrar con exactitud su brillo intrínseco y determinar su corrimiento al rojo.

CRAIG J. HOGAN, ROBERT P. KIRSHNER y NICHOLAS B. SUNTZEFF comparten un interés por las grandes explosiones. Hogan, doctor por la Universidad de Cambridge, dirige el departamento de astronomía de la de Washington. Kirshner se doctoró en el Instituto de Tecnología de California, estudiando una supernova de tipo Ia observada en 1972 (la más brillante desde 1937). Codirige el Centro Smithsoniano de Astrofísica en Harvard. Suntzeff, formado en la Universidad de California en Santa Cruz, trabaja en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo.



3. LA EXPANSION COSMICA podría, en principio, seguir uno de los siguientes comportamientos básicos: permanecer constante (*izquierda*), decelerarse (*centro*) o acelerarse (*derecha*). En cualquier caso, una porción dada del universo crece en tamaño con el transcurso del tiempo (*de abajo arriba*). Ahora bien, tomando como referencia el caso de expansión constante, la edad del universo —el tiempo pasado desde el comienzo de la expansión— es mayor para un universo que se está acelerando y menor para un universo que se frena.

4. EL EXPERIMENTO de la cinta elástica muestra la relación lineal entre velocidad de recesión y lejanía. Se ofrecen dos instantes de la cinta estirada hacia arriba a cierto ritmo. La velocidad de los puntos marcados en la goma está dada por la longitud de las flechas de colores. El punto más cercano al origen es el que menos se mueve durante el intervalo entre los dos instantes; por tanto, su velocidad es la menor (*flecha amarilla*). El punto más alejado es el que más se mueve; por tanto, su velocidad es la más alta (*flecha violeta*). La pendiente de la línea resultante es el ritmo de expansión (*gráfico de la izquierda*). Si el ritmo cambia con el tiempo, la pendiente lo hará también (*gráfico de la derecha*). Los tiempos iniciales aparecen hacia arriba a la derecha, porque la luz de los objetos alejados tarda más tiempo en alcanzar la Tierra, el origen del dibujo. Si el ritmo era más lento en el pasado —señal de que la expansión se acelera— la línea se curvará hacia arriba (*línea roja*). Si el ritmo era más rápido —en un universo que decelera su expansión— la línea continuará curvándose hacia abajo (*línea azul*).



En el lado oscuro

Mientras tanto, otros componentes del grupo, que trabajan con telescopios de Australia, Chile y los EE.UU., siguen la evolución de las supernovas para determinar el momento en que alcanzan el máximo de brillo y su lento desvanecimiento. Dura meses la campaña de observación de una supernova. A menudo, el análisis final tiene que esperar un año o más, intervalo en que ha desaparecido la luz de la estrella que ha estallado y podemos obtener una buena imagen de su galaxia huésped. Nos sirve esta vista final para sustraer, de las imágenes de la supernova, el brillo constante de la galaxia. Las mejores mediciones que hemos logrado proceden del *Telescopio Espacial Hubble*, capacitado para registrar detalles sutilísimos que nos permiten separar la estrella que ha explotado de su galaxia huésped.

Los dos equipos han estudiado ya ejemplos de supernova en alto corrimiento al rojo, que estallaron hace entre 4000 y 7000 millones de años. Tenía entonces el universo entre la mitad y dos tercios de su edad actual. En el curso de tales estudios, uno y otro grupo recibieron una misma sorpresa, mayúscula: las supernovas son más débiles de lo esperado. La discrepancia entre lo esperado y lo observado es leve; en promedio, las supernovas remotas aparecen un 25 por ciento más débiles de lo esperado. Ahora bien, basta esa cifra para cuestionar las teorías cosmológicas más arraigadas.

Antes de extraer ninguna conclusión radical, los astrónomos de ambos equipos han buscado explicaciones más llanas que justificaran la relativa debilidad de las supernovas remotas. Se apela a la oscuridad provocada por el polvo cósmico, que apantallaría parte de la luz. Pero nosotros descartamos esa posibilidad por la sencilla razón de que los granos de polvo filtrarían la luz azul más que la roja, haciendo parecer a las supernovas más rojas de lo que en realidad son (de la misma forma que el polvo atmosférico colorea el sol poniente). No observamos ninguna alteración de ese tipo. Y, a menos que mostrara una dispersión regular por todo el espacio, el polvo cósmico tendería a introducir una gran variación en las mediciones, cosa que tampoco vemos.

Se pretende justificar también tal palidez recurriendo al fenómeno de lente gravitatoria. Así se llama la desviación de los rayos de luz al atravesar en su camino las regiones externas de galaxias. El fenómeno de la lente gravitatoria acarrea un aumento ocasional del brillo de fuentes remotas; en la mayoría de los casos, sin embargo, provoca una disminución del brillo. De ese modo podría contribuir a la debilidad de las supernovas distantes. Sin embargo, de los cálculos realizados se desprende que este efecto sólo adquiere significación cuando se trata de fuentes situadas todavía más lejos que las supernovas estudiadas. Podemos, pues, descartar esa explicación.

¿No sería, pensamos, por último, que las supernovas remotas difirieran de las cercanas, quizá porque se formaron de estrellas más jóvenes que albergaban menos elementos pesados que las típicas de galaxias más viejas? No descartamos esta posibilidad, aunque en nuestro análisis procuramos ya tomar en consideración esas diferencias. Estos estudios dan buenos resultados cuando se aplican a galaxias cercanas, cuya edad y morfología varía bastante de una a otra, así como los tipos de supernova observados en ellas.

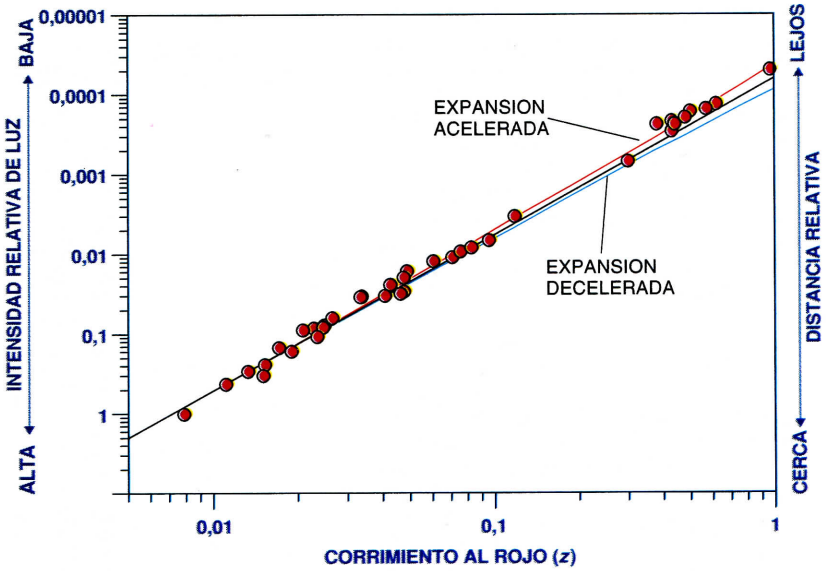
Puesto que ninguno de estos efectos triviales explica las observaciones, nos inclinamos, con otros muchos, a pensar que la debilidad de brillo de las supernovas remotas se debe a la estructura del cosmos. Podrían hallarse involucradas dos propiedades del espacio y del tiempo.

En primer lugar, el espacio puede tener una curvatura negativa. Para entender semejante deformación del espacio, sirvámonos de una analogía bidimensional. Los seres que viven en un mundo plano y de dos dimen-

siones (como los personajes de la novela de Edwin A. Abbott *Planilandia*) podrían averiguar que un círculo de radio r tiene una circunferencia de exactamente $2\pi r$. Pero si su mundo estuviera ligeramente curvado en forma de silla de montar, tendría una curvatura levemente negativa (*véase* "Inflación en un universo de baja densidad", por Martin A. Bucher y David N. Spergel, *en este mismo número*). Los residentes bidimensionales del país curvado en silla de montar podrían permanecer ignorando esa curvatura hasta que midieran un círculo grande de radio dado y descubrieran que su circunferencia era mayor que $2\pi r$.

La mayoría de los cosmólogos han dado por supuesto, apoyados en razones teóricas, que nuestro espacio tridimensional, igual que *Planilandia*, no está curvado. Pero si poseyera curvatura negativa, la enorme esfera de radiación arrojada por una supernova muy antigua tendría un extensión mayor que la que dispondría en un espacio geométricamente plano, determinando que la fuente apareciera extrañamente debilitada.

Una segunda explicación de la inesperada debilidad de las supernovas remotas lo atribuye a que éstas se hallarían más alejadas que lo que sus corrimientos al rojo sugieren. Con otras palabras, las supernovas situadas a estas enormes distancias mostrarían menos corrimiento al rojo que lo que cabría atribuirles. Para justificar ese menor corrimiento hacia el rojo, los cosmólogos postulan que la expansión del universo procedió con mayor lentitud en el pasado que lo que se supone, con un consiguiente menor desplegamiento global del universo y de la luz que viaja en su seno.



5. LAS OBSERVACIONES DE SUPERNOVA realizadas por el equipo en el que participan los autores (*puntos rojos*) se desvían ligera, aunque significativamente, del comportamiento esperado: una deceleración bastante rápida (*línea azul*) que ocurriría si el universo fuera "plano" y sin constante cosmológica. Pero las observaciones indican que el universo tiene sólo el 20% de la materia necesaria para hacerlo plano, porque se está decelerando con mayor lentitud que lo predicho (*línea negra*). Las mediciones sugieren que la expansión se está acelerando, debido posiblemente a una constante cosmológica no nula (*línea roja*).

La fuerza

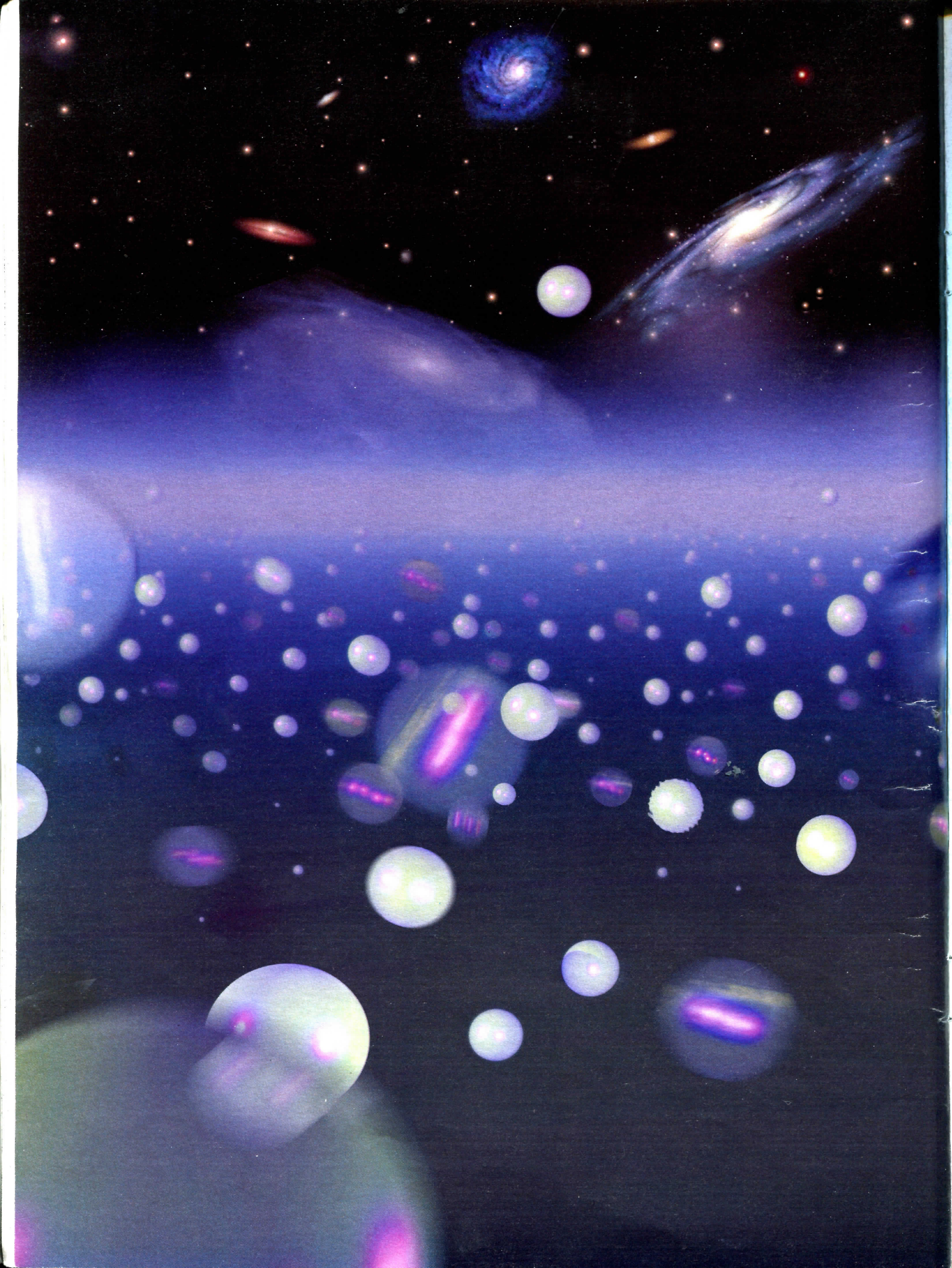
¿Qué significa que la expansión cósmica se frene menos deprisa de lo que se venía pensando? Si el universo consta de materia normal, la gravedad ha de frenar sin cesar la expansión. Un frenado escaso, según sugieren las mediciones de las supernovas, nos indica lisa y llanamente que la densidad global de materia distribuida en el universo es baja.

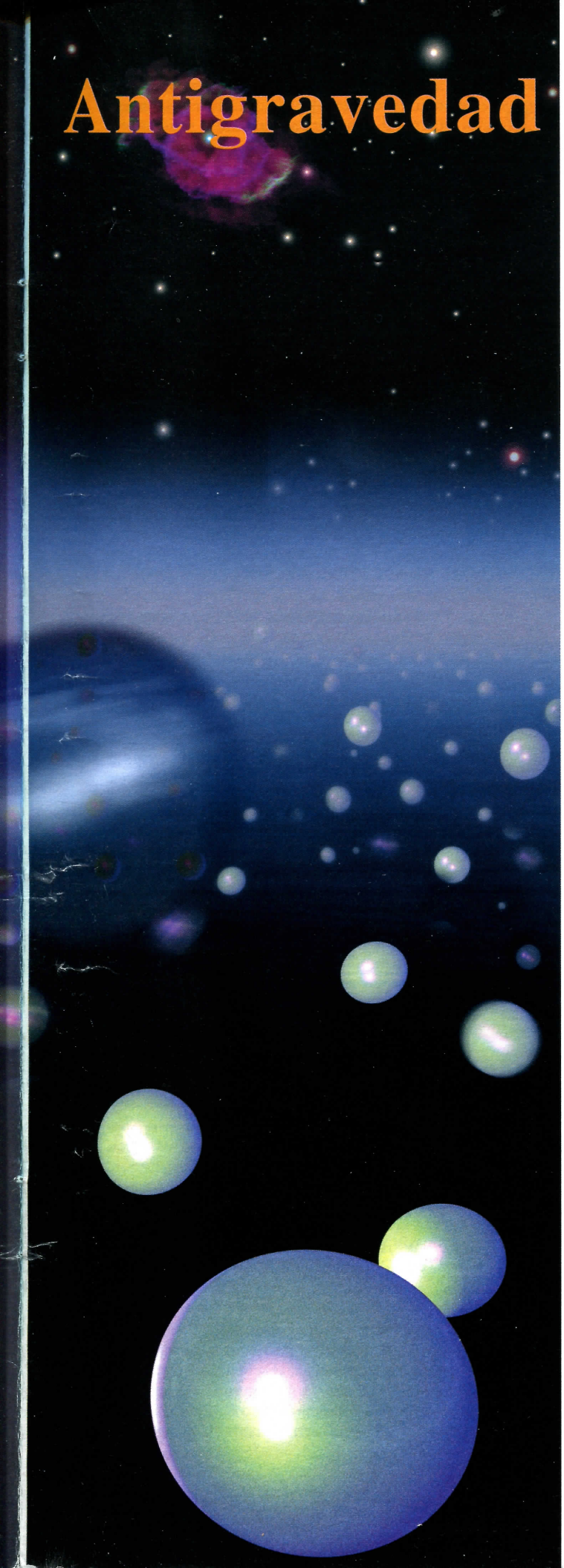
Por muchos supuestos teóricos que socave tal conclusión, no está ayuna de pruebas. En este contexto, algunos astrónomos afirman que ciertas estrellas parecen más viejas que la edad aceptada del universo, obvia contradicción. Pero si el cosmos se expandía antaño con mayor parsimonia, según nos revelan ahora las supernovas, la edad del universo debe revisarse al alza, con lo cual resolveríamos el problema. Los nuevos resultados se hallan también en sintonía con la investigación reciente de la cuantía total de materia alojada en el universo, a través del estudio de los cúmulos galácticos.

¿Qué aclara la nueva determinación de la densidad de materia del universo a propósito de la curvatura del mismo? De acuerdo con los principios de la relatividad general, la curvatura del universo y su deceleración están vinculadas. Parafraseando a John A. Wheeler, la materia le indica al espacio-tiempo cómo curvarse y éste le dice a aquélla cómo moverse. Una baja densidad de materia implica una curvatura negativa y poco frenado. Si el universo está prácticamente vacío, estos dos efectos de atenuación se hallarán cerca de su máximo teórico.

Entendido eso, se explica mejor nuestra sorpresa. Las supernovas que vemos son más débiles que lo predicho incluso para un universo casi vacío (que adquiere máxima curvatura negativa). Tomadas por el valor que indican, nuestras observaciones demandan que la expansión se esté acelerando con el tiempo. Ahora bien, un universo compuesto de manera exclusiva por materia ordinaria no puede crecer así, porque no dejaría de ejercerse la fuerza de atracción gravitatoria. Sin embargo, de acuerdo con la teoría de Einstein, la expansión puede acelerarse si una forma exótica de energía llena el espacio. Esta extraña "energía de vacío" queda incorporada en las ecuaciones de Einstein dentro de la constante cosmológica. A diferencia de las formas comunes de masa y energía, la energía de vacío añade una fuerza repulsiva y puede expandir el universo a velocidades crecientes. Una vez admitimos esta extraordinaria posibilidad, nuestras observaciones encajan perfectamente, incluso suponiendo la geometría plana preferida por los teóricos.

Las pruebas de la presencia de una forma extraña de energía, que ejerce una fuerza gravitatoria repulsiva, constituyen el resultado más desconcertante de cuantos cabía esperar. Y lo es en tal grado, que lo tomamos con reservada cautela. Para disipar dudas contamos con los avances técnicos, tales como los nuevos detectores infrarrojos y el *Telescopio Espacial de Nueva Generación*, que pronto nos permitirán examinar nuestras conclusiones con mayor precisión y fiabilidad. Estos maravillosos instrumentos nos habrán de facilitar la percepción de faros más débiles, que emitieron su destello hace mucho más tiempo en galaxias remotísimas.





Antigravedad cosmológica

La constante cosmológica, una peculiar forma de energía inherente al espacio mismo, se ha convertido en una de las dos explicaciones plausibles de la expansión acelerada

Lawrence M. Krauss

Decía en 1946 George Orwell, novelista y crítico social, que "para ver lo que se tiene ante las narices hay que luchar sin parar". Estas palabras vienen muy a cuento para describir la cosmología moderna. El universo nos rodea —somos parte de él— y, sin embargo, a veces hay que mirar lo que pasa lejos para conocer los procesos que rigen nuestra vida. Y aunque creemos que los principios que gobiernan la naturaleza son simples, el desentrañarlos ya es harina de otro costal. El firmamento da pistas sutiles. El dicho de Orwell es doblemente cierto para los cosmólogos que han de interpretar las recientes observaciones de estrellas que estallaron a cientos de millones de años de luz de distancia. En contra de lo esperado, la expansión del universo, en vez de frenar su velocidad, la acelera.

Se sabe desde 1929, por lo menos, que el universo visible se expande. Ese año Edwin P. Hubble mostró que las galaxias lejanas se van separando como si el cosmos entero estuviese hinchándose. Semejante alejamiento actúa contra el efecto opuesto ejercido por la gravedad conjunta de cúmulos galácticos y de todos los planetas, estrellas, gases y polvo que contienen. Hasta la minúscula atracción gravitatoria de un clip retarda un poco la expansión cósmica. Hace diez años la concordancia de la teoría con la observación daba a entender que había suficientes clips, suficiente materia en el universo para detener casi —pero sólo casi— la expansión. Por decirlo en la forma geométrica que Einstein promovió, parecía que el universo era "plano".

1. EL LLAMADO ESPACIO VACIO está repleto de partículas elementales que surgen y desaparecen muy deprisa. No podemos detectarlas directamente. Su presencia obedece a un principio básico de la combinación de la mecánica cuántica con la relatividad especial: nada es exacto, ni siquiera la nada misma. La energía conjunta de estas partículas "virtuales", como otras formas de energía, podría ejercer una fuerza gravitatoria, de atracción o repulsión en razón de principios físicos mal conocidos por ahora. A escala macroscópica esa energía podría actuar como la constante cosmológica propuesta por Albert Einstein.

Tipos de materia

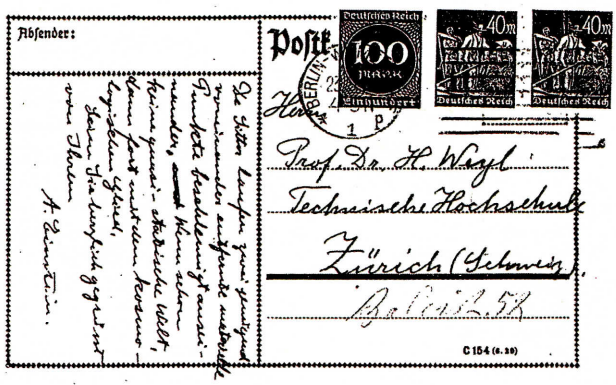
Tipos de materia	Composición probable	Indicio principal	Contribución aproximada a Ω
Materia visible	Materia ordinaria (compuesta sobre todo de protones y neutrones) que forma las estrellas, el polvo y el gas	Las observaciones telescópicas	0,01
Materia oscura bariónica	Materia ordinaria demasiado oscura para dejarse ver, quizás enanas marrones o negras (objetos compactos de gran masa del halo, los MACHO)	Los cálculos de la nucleosíntesis en la gran explosión (big bang) y la abundancia del deuterio observada	0,05
Materia oscura no bariónica	Partículas exóticas como los "axiones", los neutrinos con masa o las partículas de gran masa que interactúan débilmente (los WIMP)	La gravedad de la masa visible no basta para explicar las velocidades orbitales de las estrellas dentro de las galaxias y de las galaxias en los cúmulos	0,3
"Materia oscura" cosmológica	La constante cosmológica (la energía del espacio vacío)	El fondo de microondas da a entender que el cosmos es plano, pero no hay suficiente materia bariónica o no bariónica para que lo sea	0,6

2. EN EL UNIVERSO SE ALBERGAN miles y miles de millones de galaxias, cada una de las cuales contiene un número no menos abrumador de estrellas. Y, sin embargo, parece que en su mayor parte es "materia oscura". La constante cosmológica, si se confirma su existencia, actuaría a escala cósmica como una forma aún más exótica de materia oscura. La magnitud omega, Ω, es el cociente de la densidad de materia o energía y de la densidad necesaria para que el universo sea plano.

La del universo plano es una geometría intermedia entre otras dos posibles, la "abierta" y la "cerrada". En un cosmos donde la materia batalla con el impulso expansivo de la gran explosión ("big bang"), la geometría abierta es la victoria de la expansión: ésta proseguiría sin límite temporal. En el universo cerrado, ganaría la gravedad; el mundo acabaría por desplomarse sobre sí mismo de nuevo y terminaría en un ardiente gran implosión ("big crunch"). Los órdenes de cosas abierto, cerrado y plano vienen a ser como lanzar un cohete más deprisa, más despacio o exactamente a la velocidad de escape de la Tierra, la necesaria para superar la atracción gravitatoria del planeta.

Al decir de uno de los postulados clave de la teoría inflacionaria, vivimos en un universo plano, donde existe un perfecto equilibrio de fuerzas. Esa misma teoría, para resolver varias paradojas de la formulación corriente de la gran explosión, dicta que muy al principio del universo hubo un período de expansión rápida. Aunque el contenido visible del cosmos no basta para pensar en un universo plano, la dinámica celeste indica que hay mucha más materia que la percibida. La mayor parte de la encerrada en las galaxias y agrupaciones de galaxias tiene que ser invisible para los telescopios. Hace más de diez años denominé "quintaesencia" a esa materia a la que llaman oscura; tomé la palabra de Aristóteles, que así aludía al éter, elemento invisible que bañaba el espacio [*véase* "Materia oscura en el universo", de Lawrence M. Krauss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1987].

Pero ahora contamos con un mazo de pruebas que van más allá. Ni siquiera la materia ocultada basta para producir un universo plano. Quizás el mundo no sea plano, sino abierto, en cuyo caso habrá que modificar, o desechar, la teoría inflacionaria. O tal vez sí lo sea, en cuyo caso no tendrá sus constituyentes principales en la materia visible, la oscura o la radiación, sino en una forma aún más etérea de energía que poblaría el espacio vacío.



3. ESTA CARTA DE EINSTEIN al matemático Hermann Weyl reconoce que un universo de tamaño inmutable podría ser propenso a la expansión o la contracción: "En el universo de De Sitter dos puntos de fluido inestables distintos se separan aceleradamente. Si el mundo no es cuasiestático, ¡fuera el término cosmológico!"

La idea de esa forma de energía tiene una historia larga y agitada. Empieza cuando Einstein completó su teoría general de la relatividad, más de diez años antes de que Hubble enseñase convincentemente que el universo se expande. La relatividad entrelazaba espacio, tiempo y materia. Prometía así lo que hasta entonces había sido imposible: el conocimiento científico no sólo de la dinámica de los objetos del universo, sino también de la dinámica del mismo cosmos. Sólo había un problema. Al contrario que las demás fuerzas fundamentales a las que se halla sujeta la materia, la gravedad es siempre atractiva: sólo tira de, nunca empuja. La inexorable atracción gravitatoria de la materia podría hacer que el universo acabase por desplomarse. Ante semejante conclusión, Einstein, que imaginaba un universo estático y estable, añadió un término a sus ecuaciones, un "término cosmológico", que lo estabilizaba con una nueva fuerza de largo alcance en el espacio. Si su valor era positivo, sería una fuerza repulsiva, una especie de antigravedad que impediría que el universo se derrumbase bajo su propio peso.

Pero, ay, Einstein abandonaría cinco años después este apaño, del que dijo que había sido su "mayor pifia". La estabilidad que ofrecía el término era ilusoria, y aun contaba más en su contra el respaldo observacional creciente a la tesis de la expansión. En 1923 Einstein le escribía a Hermann Weyl que "si el mundo no es cuasiestático, ¡fuera el término cosmológico!". Como el éter antes, parecía que el término acabaría en la papelera.

LAWRENCE M. KRAUSS, catedrático de la Universidad Case Western Reserve, trabaja en la zona donde convergen física y astronomía. Estudia la naturaleza de estrellas, agujeros negros, lentes gravitatorias y universo primitivo.

En la teoría general de la relatividad la fuente de las fuerzas gravitatorias (atractivas o repulsivas) es la energía. La materia no es más que una forma de energía. Pero el término cosmológico es distinto. La energía asociada a él no depende de la posición o del tiempo; de ahí que se lo llame "constante cosmológica". La fuerza que causa actuaría aun cuando no hubiese materia ni radiación. Su fuente, pues, sería una curiosa forma de energía que residiera en el espacio vacío. La constante cosmológica, como el éter, le daba al vacío una especie de aura casi metafísica. Al prescindir de ella la naturaleza volvía a ser razonable.

¿O no? En los años treinta la constante cosmológica dio unas primeras señales de vida en un contexto diferente: el intento de combinar las leyes de la mecánica cuántica con la teoría especial de la relatividad. Paul A. M. Dirac y, luego, Richard Feynman, Julian S. Schwinger y Shinichiro Tomonaga mostraron que el espacio vacío era más complicado de lo supuesto. Resultaba que las partículas elementales podían brotar espontáneamente de la nada y desaparecer de nuevo, siempre y cuando fuese en un tiempo cuya brevedad impidiera la medición. Estas partículas virtuales, así se las conoce, producen efectos mensurables; alteran los niveles de energía de los átomos y crean fuerzas entre las placas metálicas neutras. La teoría de las partículas virtuales concuerda con las observaciones hasta el noveno decimal. Guste o no, el espacio vacío no está, después de todo, vacío.

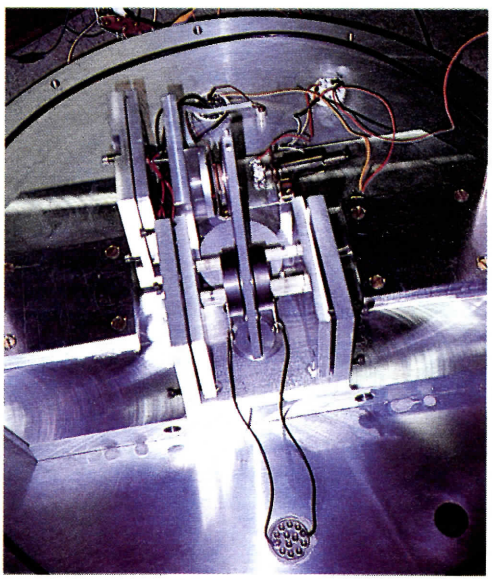
Si las partículas virtuales pueden cambiar las propiedades de los átomos, ¿podrían también afectar a la expansión del universo? Yakov B. Zeldovich mostró en 1967 que la energía de las partículas virtuales actuaría como la energía asociada a la constante cosmológica. Pero había un serio problema. La teoría cuántica predice todo un espectro de partículas virtuales, que abarcaría todas las longitudes de onda posibles. Al sumar todas las contribuciones sale una energía total infinita. Incluso cuando los teóricos ignoran los efectos cuánticos menores que cierta longitud de onda —más allá de la cual se supone que unos fenómenos gravitatorios cuánticos mal conocidos cambian las cosas—, la energía que le calculan al vacío es unos 120 órdenes de magnitud mayor que la contenida en toda la materia del universo.

¿Qué consecuencias tendría una constante cosmológica tan inflada? Aprovechando la cita de Orwell, es fácil poner un límite observacional a su valor. Mire los dedos de su mano. Si la constante alcanzase el valor que le asigna la teoría cuántica, el espacio entre los ojos y la mano se expandiría tan deprisa que la luz de ésta nunca llegaría a aquéllos. Para ver lo que se tuviese ante la cara habría que luchar sin parar (por así decirlo), pero nunca valdría para nada. El mero hecho de que veamos algo quiere decir que la energía del espacio vacío no puede ser grande. Y que podamos ver, no ya dónde terminan los brazos, sino hasta los remotos confines del universo, impone un límite aún más estricto a la constante cosmológica: ha de ser casi 120 órdenes de magnitud menor que el cálculo mencionado antes. Esta discrepancia entre la teoría y la observación es el problema cuantitativo más desconcertante de la física actual.

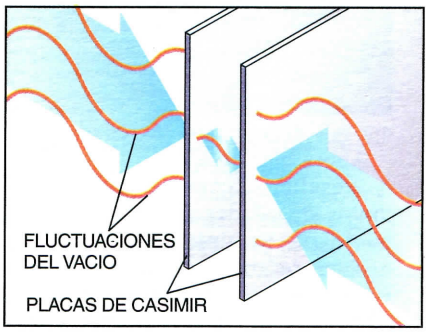
La respuesta más a mano es que habría alguna ley física no descubierta que anularía la constante cosmológica. Mas por mucho que plazca a los teóricos que la constante desaparezca, ciertas observaciones astronómicas —de la edad del universo, de la densidad de la materia en su seno y de la naturaleza de las estructuras cósmicas— abogan por lo contrario.

Entre las cuestiones persistentes de la cosmología se incluye la edad del universo. Midiendo la velocidad de las galaxias, podemos calcular cuánto han tardado en ocupar su posición presente, suponiendo que todas partieron del mismo punto. En una primera aproximación podemos prescindir de la deceleración causada por la gravedad: el universo se expande a velocidad constante y el intervalo de tiempo transcurrido es el cociente entre la distancia intergaláctica y la velocidad de separación medida, es decir, la inversa de la constante de Hubble. Cuanto mayor sea ésta, más rápida será la expansión y más joven el universo.

La primera evaluación que Hubble hizo de la constante que lleva su nombre fue de casi 500 kilómetros por segundo por megaparsec; con ello indicaba que dos galaxias separadas por una distancia de un megaparsec (unos tres millones de años luz) se separarían, en promedio, a 500 kilómetros por segundo. Dado este valor, el cosmos tendría unos 2000 millones de años, en penosa contradicción



4. DEMOSTRACION experimental del efecto Casimir, medio para corroborar la teoría de que el espacio está lleno de efímeras "partículas virtuales". El efecto genera unas fuerzas entre los objetos metálicos, de atracción entre placas metálicas paralelas (*arriba*), por ejemplo. Hablando sin mucho rigor, el hueco finito entre las placas impide que se materialicen partículas virtuales con una longitud de onda mayor que una determinada. Por tanto, hay más partículas fuera de las placas que entre ellas, desequilibrio que las empuja entre sí y acerca (*derecha*). El efecto Casimir depende de la morfología de las placas, gracias a lo cual es posible diferenciarlo de las demás fuerzas de la naturaleza.



con la edad comprobada de la Tierra, cifrada en unos 4000 millones de años.

Pero si se toma en consideración la atracción gravitatoria de la materia, el análisis predice que los objetos se movieron más deprisa al principio y, por tanto, que tardaron menos en llegar a su posición actual que si la velocidad hubiera sido constante. Esta precisión reduce la edad calculada en un tercio, con lo que la discrepancia resulta desastrosamente peor.

A lo largo de los últimos setenta años se ha determinado mejor la velocidad de la expansión del universo, aunque persistiera la tensión entre la edad que se le calcula y la de algunos de sus objetos. Pero desde hace un tiempo han empezado a converger las diversas mediciones de la constante de Hubble gracias al lanzamiento del *Telescopio Espacial Hubble* y al desarrollo de nuevas técnicas de observación. Wendy L. Freedman, de los Observatorios Carnegie, y sus colaboradores le conceden un valor de 73 kilómetros por segundo por megaparsec (con un intervalo más probable, dependiendo del error experimental, de 65 a 81). Estos resultados ponen el límite superior de la edad de un universo plano en unos 10.000 millones de años.

¿Es suficiente esa edad? Depende de la que tengan los cuerpos más antiguos que daten los astrónomos. Las estrellas más viejas de nuestra galaxia se refugian en los cúmulos globulares, ubicados algunos de éstos en los aledaños de la Vía Láctea, razón por la cual se sospecha que nacieron antes que el resto de la Vía Láctea. Las evaluaciones de su edad, basadas en el cálculo del ritmo con que las estrellas queman su combustible nuclear, oscilan entre los 15.000 y los 20.000 millones de años. Serían, pues, más viejas que el universo.

Para resolver si el conflicto de las edades debíase a fallos de la teoría cosmológica o a los modelos estelares, mis colaboradores Brian C. Chaboyer, Pierre Demarque y Peter J. Kernan y yo reevaluamos en 1995 las edades de los cúmulos globulares. Simulamos los ciclos de vida de tres millones de estrellas cuyas propiedades cubrían las aporías existentes. Comparamos luego nuestras estrellas modelo con las de los cúmulos globulares. Las más viejas, concluimos, tendrían no más de 12,5 millones de años. Pero esa cifra seguía sin concordar con la edad de un universo plano dominado por la materia.

Hasta que, hace dos años, el satélite *Hiparcos*, lanzado por la Agencia Espacial Europea para determinar la ubicación de más de 100.000 estrellas cercanas, revisó las distancias a que se encontraban e, indirectamente, las distancias de los cúmulos globulares. Los nuevos valores alteraron las estimaciones admitidas de su brillo. Nos forzaron a rehacer nuestro análisis, porque el brillo determina la velocidad a la que las estrellas consumen el combustible y, por tanto, su esperanza de vida. Parece ahora que los cúmulos globulares podrían tener, en el límite de los márgenes de error, sólo 10.000 millones de años, lo que ya encaja con las edades cosmológicas.

Ahora bien, esa concordancia marginal no deja de resultar incómoda. Exige que ambos conjuntos de edades estimadas se hallen cerca del borde de los intervalos admisibles. Lo único que puede abandonarse es la suposición de que vivimos en un universo plano dominado por la materia. Una densidad menor de materia, que correspondería a un universo abierto con una deceleración menor, aliviaría un tanto la tensión. Aun así, la única forma de elevar la edad por encima de los 12.500 millones de años sería aceptar que el universo no está dominado por materia, sino por una constante cosmológica. La fuerza repulsiva resultante haría que la expansión de Hubble se acelerara con el tiempo. Las galaxias habrían estado distanciándose antaño menos céleres que hoy y habrían tardado más en ocupar su situación actual, por lo que el universo sería más viejo.

Los cálculos que se manejan sobre la edad del universo son sólo indicativos. Otros pilares de la cosmología observacional se han visto sacudidos también. Al escrutar zonas cada vez mayores del universo ha mejorado la capacidad de tomar nota de su contenido. Contamos con datos convincentes de que la cuantía total de materia que encierra el universo no basta para hacerlo plano.

En ese censo cósmico se calcula primero la síntesis de elementos en la gran explosión originaria. Los elementos ligeros del universo —hidrógeno, helio y sus isótopos menos abundantes, como el deuterio— se crearon en los primeros tiempos del universo en unas cantidades relativas que dependieron del número de protones y neutrones disponibles, los constituyentes de la materia normal. Comparando, pues, la concentración relativa de los distintos isótopos se infiere la cantidad total de materia ordinaria que se produjo en la gran explosión. (Ni que decir tiene que pudo haber habido otra materia cuya composición no fuera de protones y neutrones.)

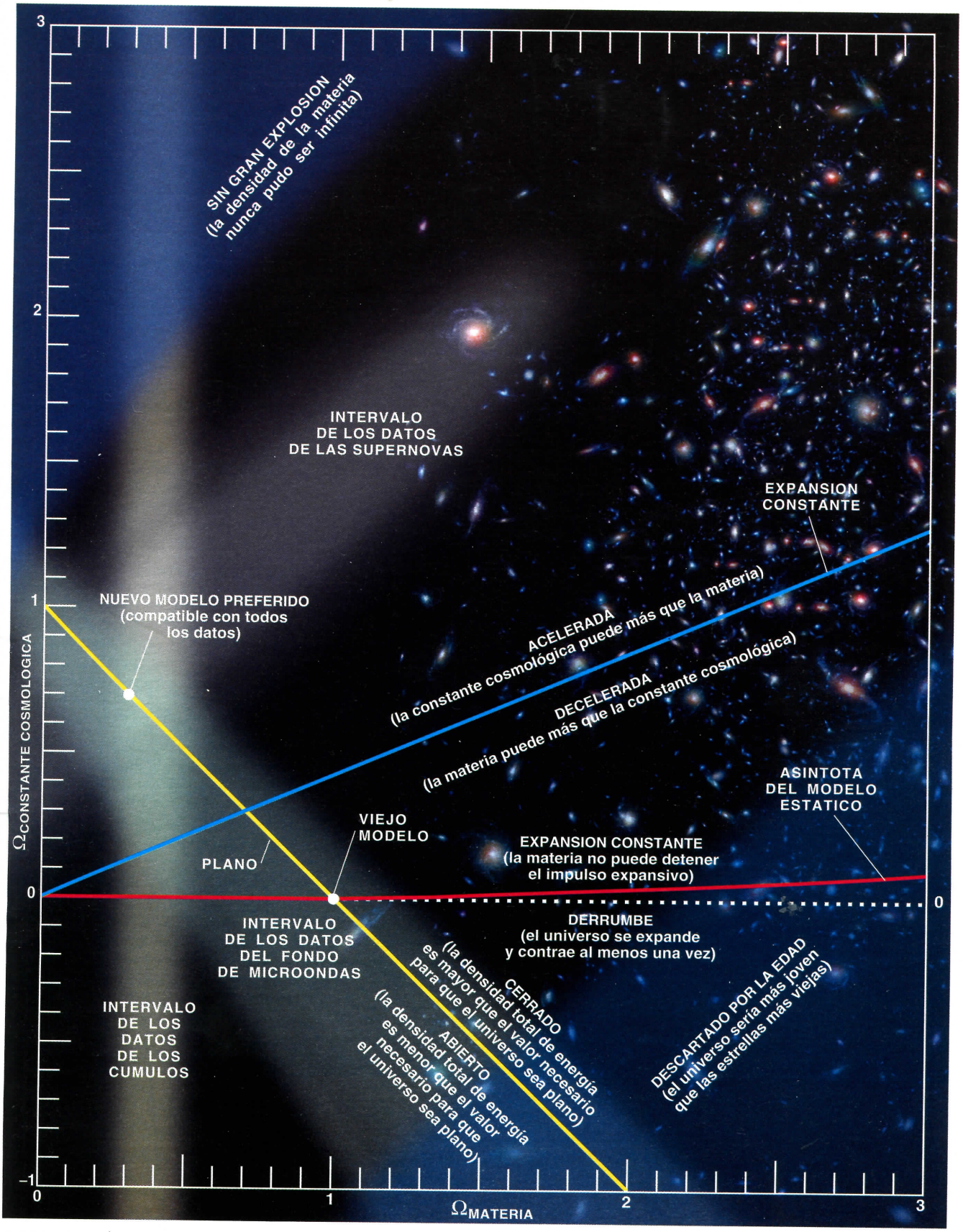
Las observaciones pertinentes dieron un paso de gigante en 1996. El grupo dirigido por David R. Tytler y Scott Burles midieron la abundancia primordial del deuterio observando la absorción de la luz de los cuásares por las nubes de hidrógeno intergalácticas. Al tratarse de nubes que nunca alojaron estrellas, su deuterio debía proceder sólo de la gran explosión. De los descubrimientos de Tytler y Burles se desprende que la densidad media de la materia ordinaria está entre el 4 y el 7 % de la necesaria para que el universo sea plano.

Se ha sondeado también la densidad de materia a través del estudio de las principales macroestructuras mantenidas por gravedad, los cúmulos galácticos. Estas agrupaciones de cientos de galaxias abarcan casi toda la materia visible. La mayor parte de su contenido luminoso es un gas intergaláctico caliente que emite rayos X. Su temperatura, inferida del espectro de éstos, depende de la masa total del cúmulo: cuanto mayor sea, mayores son la gravedad y la presión que hace que el

Sumario de los valores inferidos de la densidad cósmica de materia

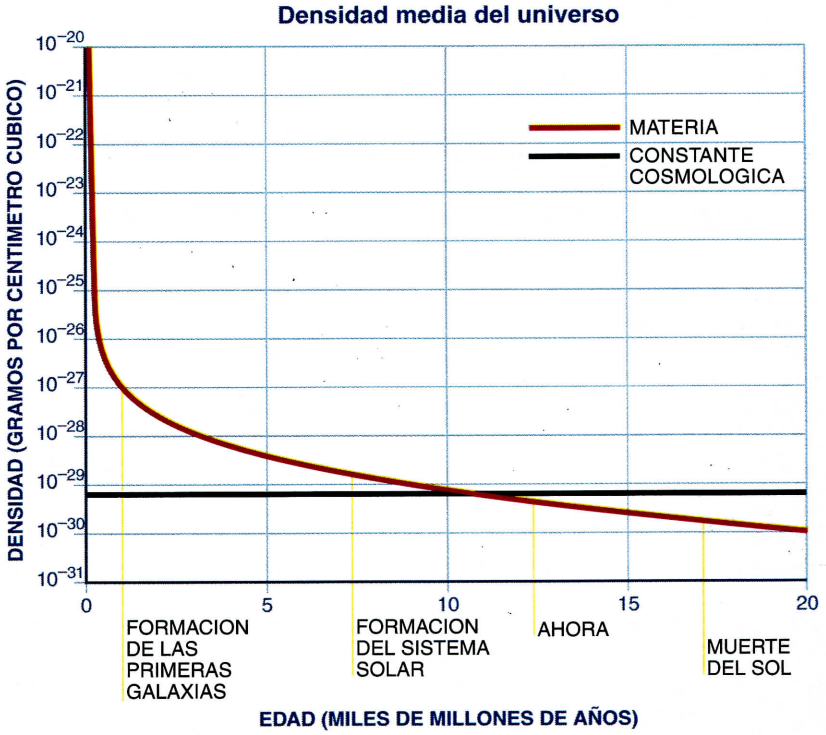
Observación	$\Omega_{materia}$
Edad del universo	<1
Densidad de protones y neutrones	0,3–0,6
Cúmulos de galaxias	0,3–0,5
Evolución galáctica	0,3–0,5
Radiación del fondo de microondas cósmico	≲1
Supernova de tipo Ia	0,2–0,5

5. LAS MEDICIONES de la contribución a Ω de la materia concuerdan más o menos. Aunque cada una de estas mediciones tiene sus escépticos, la mayoría de los astrónomos acepta ahora que la materia sola no puede hacer que Ω sea igual a 1. Pero es posible que otras formas de energía, como la constante cosmológica, aporten lo que falta.



6. ESTE MAPA DE LOS MODELOS muestra cómo depende la evolución del universo de dos magnitudes cosmológicas claves: la densidad media de materia (*eje horizontal*) y la densidad de energía en la constante cosmológica (*eje vertical*). Sus valores, dados aquí en unidades cosmológicas estándar, tienen tres efectos distintos. Primero, su suma (que representa el contenido energético cósmico total) determina la geometría del espacio-tiempo (*línea amarilla*). Segundo, su diferencia (que representa las intensidades relativas de la expansión y de la gravedad) determina el cambio de velocidad de la expansión con el tiempo (*línea azul*). Estos dos efectos han sido sondeados por observaciones recientes (*regiones sombreadas*). El tercer factor, un equilibrio de las dos densidades, determina el destino del universo (*línea roja*). Los tres efectos tienen muchas permutaciones, al contrario de lo que sucede si la constante cosmológica es cero.

7. LA COINCIDENCIA COSMICA es uno de los muchos misterios que rodean a la constante cosmológica. La densidad media de la materia ordinaria disminuye con la expansión del cosmos (*en rojo*). La densidad equivalente representada por la constante cosmológica es fija (*en negro*). ¿Por qué, pues, las dos tienen hoy casi el mismo valor pese a tales comportamientos antagónicos? Esta concordancia, o es puro azar, una precondición de la existencia humana (lo que remite al principio antrópico débil), o una indicación de que actúa un mecanismo cuya naturaleza no se vislumbra hoy por hoy.



El destino del universo

La constante cosmológica cambia la idea más común y sencilla acerca del futuro del universo. La cosmología ha venido prediciendo dos resultados posibles que dependían de la geometría del universo o, equivalentemente, de la densidad media de materia. Si la densidad de un universo lleno de materia sobrepasa cierto nivel crítico, es "cerrado", en cuyo caso acabará por dejar de expandirse, empezará a contraerse y al final desaparecerá en un ardiente apocalipsis. Si es menor que ese valor crítico, será "abierto" y se expandirá eternamente. Un universo "plano", en el que la densidad es igual al valor crítico, se expandirá también para siempre, pero más despacio.

Ahora bien, estos órdenes de cosas parten de que la constante cosmológica sea nula. Si no lo es, puede que sea ella y no la materia la que controle el destino final del universo. La razón estriba en la constante, que, por definición, representa una densidad fija de energía en el espacio. La materia no puede competir: al doblarse el radio su densidad se divide por ocho. En un universo en expansión la densidad de energía asociada a la constante cosmológica lleva las de ganar. Si la constante es positiva, generará en el espacio una fuerza repulsiva de largo alcance y el universo seguirá expandiéndose, aunque la densidad total de la energía en la materia y el espacio supere el valor crítico. (Quedan descartados los valores negativos grandes de la constante porque la resultante fuerza atractiva ya habría puesto fin al universo.)

Esta nueva predicción de la expansión eterna ni siquiera presupone que la constante lo sea en realidad, como reclama la relatividad general. Si la densidad de energía del espacio vacío varía con el tiempo, el destino del universo dependerá de cómo lo haga. Y podría haber un precedente para esos cambios: la expansión inflacionaria del universo primordial. Quizás el universo esté ahora entrando en una nueva era de inflación, que acabaría por llegar a un final. —*L. M. K.*

gas se aguante contra ella, y esto conduce a una temperatura más alta. El equipo de Simon D. White, tras recoger información acerca de varios cúmulos, llegó a la conclusión según la cual la materia luminosa abarcaba entre el 10 y el 20 % de su masa total. De estos resultados, cuando se los combina con las mediciones del deuterio, se desprende que la densidad total de materia incluida en cúmulos —contando protones, neutrones y partículas más exóticas, como ciertas candidatas a materia oscura— no pasa, como mucho, del 60 % de la requerida para que el universo sea plano.

Un tercer conjunto de observaciones, que también tiene que ver con la distribución de la materia a las mayores escalas, respalda la tesis de un universo con masa insuficiente para ser plano. Ningún otro campo de la cosmología ha avanzado tanto en los últimos veinte años como el del conocimiento sobre el origen y la naturaleza de las estructuras cósmicas. Se da por sentado desde hace mucho que las galaxias se agregaron a partir de ligeras concentraciones de materia en el universo primitivo, pero nadie sabía el agente de tales ondulaciones. El desarrollo de la teoría inflacionaria en los años ochenta aportó el primer mecanismo verosímil: el reforzamiento de las fluctuaciones cuánticas hasta que adquirieron un tamaño macroscópico.

Las simulaciones numéricas del crecimiento de las estructuras tras la inflación nos han mostrado que, si la materia oscura, en vez de protones y neutrones, consta de otro tipo de partículas (las llamadas WIMP), entonces ciertas perturbaciones sutiles de la radiación de fondo

de microondas pudieron crecer hasta convertirse en las estructuras que vemos ahora. Además, las concentraciones de materia deberían seguir evolucionando y creando cúmulos de galaxias si hay una densidad global de materia muy alta. El crecimiento parsimonioso del número de cúmulos ricos a lo largo de la historia reciente del universo da a entender que la densidad de materia no llega al 50 por ciento de la necesaria para defender un universo plano.

Este rosario de pruebas de la insuficiencia de materia para pensar en un universo plano vence la arraigada resistencia contra esta posibilidad. Así las cosas, caben dos interpretaciones. Estamos ante un universo abierto, la primera; la segunda, estamos ante un universo plano gracias a alguna forma adicional de energía que no está asociada a la materia ordinaria.

Para optar por una u otra opción se ha pugnado por medir el fondo de microondas con una gran resolución. Las investigaciones provisionales respaldan en estos momentos un universo plano. Mientras, los investigadores que estudian las supernovas remotas han proporcionado la primera prueba directa, aunque aproximada, de la aceleración de la expansión del universo, un signo que apunta a una constante cosmológica con el mismo valor que se desprende de los demás datos.

Las observaciones del fondo de microondas y las de las supernovas iluminan dos aspectos diferentes de la cosmología. El fondo de microondas revela la geometría del universo, que es sensible a la densidad total de energía, sea cual sea su forma, mientras que las supernovas sondean directamente la velocidad de expansión, que depende de la diferencia entre la densidad de materia (que frena la expansión) y la constante cosmológica (que puede acelerarla).

La combinación de todos estos resultados nos da a entender que la constante aporta del 40 al 70 por ciento de la energía necesaria para que el universo sea plano. Los teóricos están ya dándole vueltas a algo que hace 20 años habría sido impensable: una constante cosmológica mayor que cero, pero mucho menor que la predicha por la actual teoría cuántica. Un prodigio de sintonía fina ha de eliminar las energías de las partículas virtuales hasta el lugar decimal 123, pero dejando intacto el 124, una precisión no vista en ninguna otra parte de la naturaleza.

Steven Weinberg y sus colaboradores se ha adentrado en una línea que bascula sobre el último recurso de cosmólogos, el principio antrópico. Si el universo observado es uno entre una infinitud de universos sin vinculación mutua —cada uno de los cuales podría tener constantes de la naturaleza ligeramente distintas, según han venido a postular recientes encarnaciones de la teoría inflacionaria combinada con ideas emergentes de gravedad cuántica—, entonces los físicos pueden confiar en calcular la magnitud de la constante cosmológica inquiriendo en qué universos podría darse vida inteligente. Weinberg y otros han llegado a un resultado que es coherente con la cuantía aparente de la constante cosmológica hoy.

Pero la mayoría de los teóricos no están por esa labor. En su opinión, no hay razón por la que la constante deba tomar un valor determinado; lo toma, simplemente. Aunque este argumento pudiera ser cierto, no se han agotado otras posibilidades, que podrían restringir el valor de la constante mediante una teoría fundamental y no por un accidente histórico.

En otra línea de investigación milita la tradición iniciada por Dirac. Argumentaba éste que se ha medido un número grande del universo, su edad (o, equivalentemente, su tamaño). Si ciertas magnitudes físicas cambiasen con el tiempo hoy podrían ser o muy grandes o muy pequeñas. La constante cosmológica podría ser uno de esos casos. Podría, en efecto, no ser constante. Al fin y al cabo, si la constante cosmológica es fija y no vale cero, es que estamos viviendo en el primer y único momento de la historia cósmica en el que la densidad de materia, que disminuye con la expansión del universo, es equiparable a la energía almacenada en el espacio vacío. ¿Por qué esa coincidencia? Ciertos grupos, en cambio, han imaginado que alguna forma de energía cósmica imita una constante cosmológica, aunque varía con el tiempo.

Se adentraron por esa senda P. James Peebles y Bharat V. Ratra, hace diez años. Movidos por los nuevos hallazgos sobre las supernovas, otros grupos la han resucitado. Algunos se han inspirado en los conceptos de la teoría de cuerdas. Robert Caldwell y Paul J. Steinhardt han vuelto a proponer la denominación "quintaesencia" para nombrar esa energía variable. Da una idea del revuelo teórico de hoy el que la materia oscura que en un principio fue llamada así parezca ahora casi corriente y moliente en comparación. Por mucho que me guste el nombre, ninguna de las ideas concebidas para esa quintaesencia parece convincente. Todas son *ad hoc*. El problema de la constante cosmológica sigue retándonos.

¿Cómo sabrán los cosmólogos que se han reconciliado con este universo que tanta perplejidad teórica causa? Nuevas mediciones del fondo de microondas, el análisis continuo de las supernovas remotas y la medición de las lentes gravitatorias creadas por los cuásares lejanos deberían permitir que se precisase el valor de la constante cosmológica en unos años. Una cosa ya es segura. La cosmología vigente en los años ochenta, según la cual el universo era plano y estaba dominado por materia, ha muerto. El universo o es abierto o está lleno de una energía de origen desconocido. Aunque creo que las observaciones apuntan en favor del segundo estado de cosas, ambos impondrían una visión de la física radicalmente nueva.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DREAMS OF A FINAL THEORY. Steven Weinberg, Pantheon Books, 1992.

PRINCIPLES OF PHYSICAL COSMOLOGY. P. James E. Peebles. Princeton University Press, 1993.

BEFORE THE BEGINNING: OUR UNIVERSE AND OTHERS. Martin Rees. Addison-Wesley, 1997.

THE AGE OF GLOBULAR CLUSTERS IN LIGHT OF HIPPARCOS: RESOLVING THE AGE PROBLEM? Brian Chaboyer, Pierre Demarque, Peter J. Kernan y Lawrence M. Krauss en *Astrophysical Journal*, vol. 494, n.º 1, págs. 96-110, 10 de febrero de 1998. Preprint disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9706128, de la World Wide Web.

THE END OF THE AGE PROBLEM, AND THE CASE FOR A COSMOLOGICAL CONSTANT REVISITED. Lawrence M. Krauss en *Astrophysical Journal*, vol. 501, n.º 2, págs. 461-466, 10 de julio. Preprint disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9706227, de la World Wide Web.

LIVING WITH LAMBDA. J. D. Cohn. Preprint disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9807128, de la World Wide Web.

Supernovas y expansión acelerada del universo

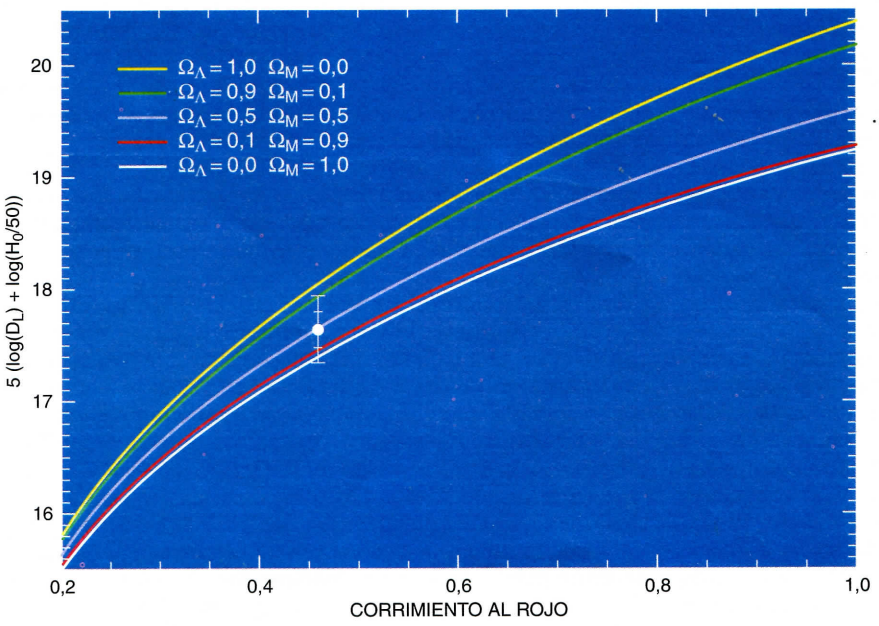
La exploración del espacio-tiempo por medio de supernovas, además de revelar que el cosmos acelera su expansión, puede arrojar luz sobre la naturaleza del universo y sus constituyentes

Pilar Ruiz-Lapuente, Alex G. Kim y Nicholas Walton

La comunidad científica asistió el año pasado a un doble descubrimiento que entrañaba un cambio radical en la comprensión del cosmos. Por un lado, la aceleración de la velocidad de expansión del universo y, por otro, la necesidad de que una forma exótica de energía sea responsable de dicha aceleración. La energía en cuestión constituiría una parte substancial del contenido del cosmos y contrarrestaría la fuerza ejercida por la atracción gravitatoria en su globalidad.

Dos fueron los equipos de astrofísicos implicados en el nuevo marco. Uno y otro aplicaron los mismos métodos, por lo que no sorprendió que sus conclusiones coincidieran. Cada grupo, sin embargo, trabajó por su cuenta. Sobre la labor realizada por el proyecto Alta-Z ("High-Z Team") se han extendido en el artículo precedente Robert Kirshner y Nicholas Suntzeff, miembros del mismo. Nosotros formamos parte del Proyecto Supernovas y Cosmología ("Supernova Cosmology Project"), en el que intervienen otros astrofísicos de institutos y universidades americanas, europeas y australianas. Desarrollamos parte de la labor en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma.

El método idóneo para explorar la evolución dinámica del cosmos en el transcurso del tiempo consiste en desentrañar su cambio de tamaño desde la gran explosión inicial ("big bang"), hace miles de millones de años, hasta



1. LA OBSERVACION de supernovas a distintos *z* permite discernir entre los diferentes tipos de universo. En el eje de las abscisas tenemos el corrimiento al rojo de la supernova y en el eje de las ordenadas el brillo aparente. En la teoría de la relatividad general, la curvatura del universo depende —lo mismo que la evolución del factor de escala— del contenido de masa-energía del universo. La curvatura, que influye en el brillo, varía en razón del contenido. Puede ser positiva, negativa o nula. La curvatura negativa del universo actúa como una lupa divergente, que rebaja el brillo de un objeto situado a gran distancia de nosotros. La curvatura positiva, por contra, actúa a modo de lente convergente, que refuerza el brillo del objeto lejano. Si juntamos muchas mediciones de brillo y corrimiento al rojo de un objeto uniforme obtenemos una idea de cuál es el contenido de masa-energía del universo, es decir, la densidad de materia expresada en el valor Ω_M y cuál es el valor de la densidad de energía de vacío Ω_Λ.

hoy. Para sondear esa evolución de la talla del universo nos servimos de la luz generada en explosiones de supernovas. Al ir recreando la expansión del cosmos a través de la luz de supernovas remotísimas nos hemos encontrado con que se está acelerando el ritmo. En el curso de esa misma investigación aparece el inventario de las formas de materia y energía que llenan el cosmos. Entre éstas debe existir una forma exótica de energía que empuja al universo a acelerar su expansión.

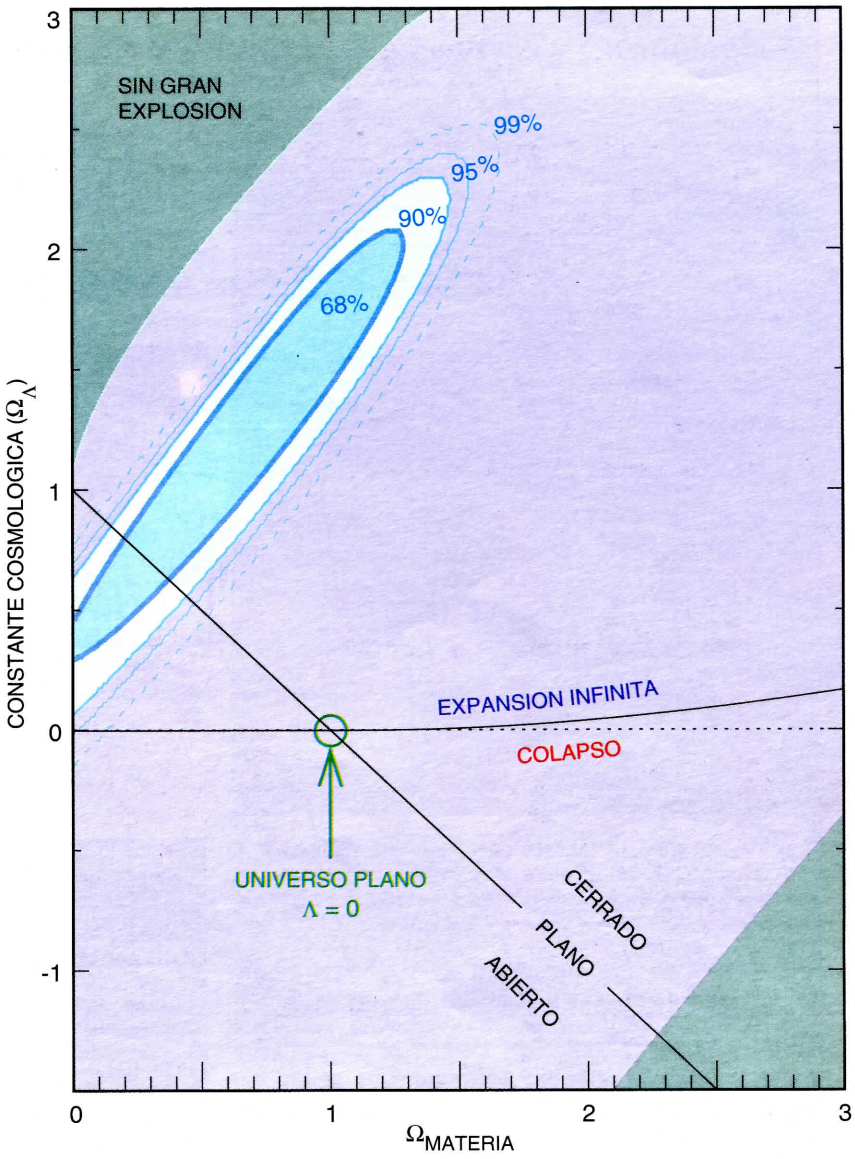
Al rojo

En su viaje por un universo en expansión, la luz se propaga con una longitud de onda cada vez más larga, se enrojece. A ese fenómeno se le conoce por "corrimiento hacia el rojo cosmológico" y se simboliza con la letra *z*. Cuando un telescopio recibe luz procedente de una supernova, se recoge una radiación que lleva viajando miles de millones de años, lo que significa que se ha trasladado a longitudes de onda cada vez mayores. Podemos medir el corrimiento hacia el rojo de nuestra supernova a partir de la luz analizada y descompuesta en sus colores, o sea, desde su espectro de luz.

El corrimiento hacia el rojo adquiere pleno sentido en la cosmología de Einstein. En el marco de la teoría general de la relatividad, el corrimiento constituye una medida del factor de escala —o tamaño— del universo en el momento en que se emitió la luz frente al alcanzado en el momento actual. Cuanto mayor es el corrimiento al rojo, más ha cambiado el factor de escala desde el momento de la emisión de la luz y más tiempo ha transcurrido.

De la luz procedente de las supernovas lejanas no sólo nos interesa el corrimiento hacia el rojo. Nos importa y mucho, el brillo aparente. Este flujo viene condicionado por la expansión cósmica. Además de depender del cuadrado de la distancia a la que se encuentra la supernova, el brillo aparente viene afectado por el factor de corrimiento al rojo cosmológico y la dilatación del tiempo en un universo en expansión.

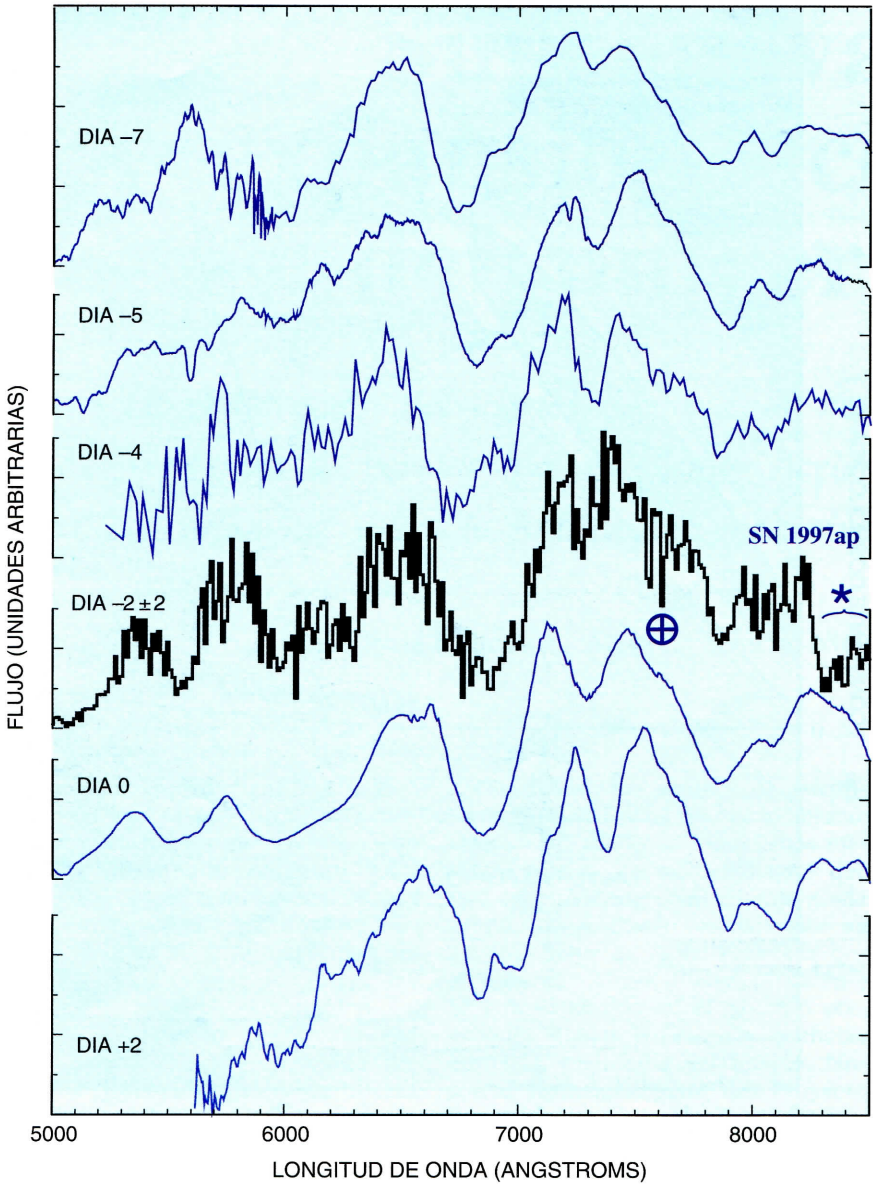
El inverso de la longitud de onda, o frecuencia con que llega la radiación al telescopio, nos da una idea de la energía. La potencia de un pulso de luz emitido en cierto intervalo de tiempo y cierta banda de frecuencia a miles de millones de años luz es más elevada que la potencia de ese pulso en el momento de su recepción en la Tierra. Ello se debe a que la energía recibida ha decrecido, porque la longitud de onda se ha estirado y, en consecuencia, ha disminuido su frecuencia. A su vez, el intervalo de tiempo entre dos pulsos de emisión se ha alargado en su viaje por un universo en expansión. Por eso, cuando medimos, en un intervalo de tiempo fijo, la energía recibida en una banda de frecuencias fija, nos encontramos con que esta cantidad (la potencia recibida) ha decrecido tanto más cuanto mayor ha sido el corrimiento al rojo.



2. RESULTADOS DEL PROYECTO SUPERNOVAS Y COSMOLOGIA para el valor de Ω_M y de la contribución de la constante cosmológica Ω_Λ. De los datos se infiere que la densidad de materia del universo está por debajo del valor crítico para "cerrarlo" y que la constante cosmológica tiene un valor no nulo mayor que cero.

Si dibujamos, siguiendo a Edwin Hubble y Allan G. Sandage, un diagrama donde aparezcan el corrimiento hacia el rojo de un objeto de luminosidad intrínseca conocida y su brillo aparente, observaremos una relación entre el cambio de factor de escala del universo y la distancia. Podemos poner muchos valores en el diagrama, para conocer de qué modo ha cambiado el factor de escala del universo con el tiempo. Ello nos indica el tipo de universo en el que estamos.

La idea de recurrir a las supernovas es bastante reciente; se tomó tras años de estudio por teóricos y espe-



3. ESPECTRO DE RADIACION de una supernova termonuclear descubierta a unos 7000 millones de años-luz comparada con una muestra más cercana a tan sólo decenas de millones de años-luz. Estos objetos estelares tienen las mismas características de luminosidad en el universo joven, de hace miles de millones de años, que en el universo actual.

cialistas observacionales. Buscábase, en efecto, un objeto cuyas propiedades de luminosidad fueran universales —independientes del tiempo y de la región del espacio donde se producen—, homogéneas —con poca dispersión en su brillo intrínseco o con propiedades de brillo intrínseco que obedezcan a una ley o relación bien conocida— y observables hasta muy altos corrimientos al rojo.

Las explosiones termonucleares de enanas blancas, conocidas como supernovas de tipo Ia o supernovas termonucleares, resultaron ser las que mejor se adecuaban a los propósitos de la investigación. Así, en lo concerniente a la homogeneidad espaciotemporal hemos demostrado que las propiedades de brillo de este objeto se definen con una precisión del 10 %, independientemente del entorno.

Aunque no todas las supernovas termonucleares son iguales, pues unas brillan más que otras, todas siguen un mismo patrón en su luminosidad. La correlación funciona de forma tan precisa que, conociendo la anchura de la curva de luz de la supernova, sabemos su luminosidad intrínseca. Tenemos una especie de gigantescas bombillas en las que con sólo leer la etiqueta conocemos los watts de potencia que vamos a tener.

Expansión acelerada

El contenido de materia y energía es el responsable del cambio en la velocidad de expansión del universo. En relatividad einsteiniana, materia y energía influyen en la dinámica del espacio-tiempo en un plano de igualdad.

El primer intento de medir el valor actual de la velocidad de expansión del universo lo realizó Hubble. En su honor se denominó parámetro de Hubble la velocidad con que se expande el universo. Su valor actual se conoce por constante de Hubble (H_0). Un segundo factor pone de manifiesto el cambio de ritmo de la velocidad de expansión en virtud del contenido de masa-energía del cosmos. Nos referimos al parámetro de deceleración, cuyo valor actual se representa por q_0. El parámetro q_0 es positivo si el universo se decelera y negativo, si se acelera. La dinámica de la aceleración o desaceleración es, en última instancia, función de la densidad total del universo y del comportamiento dinámico de ese contenido, de si contribuirá a la expansión o la frenará.

Esto último viene dado por la relación entre presión (p) y densidad (ρ) de cada componente de materia-energía del cosmos, lo que se conoce como ecuación de estado de cada componente. Si el universo está dominado por una componente en forma de materia o energía de presión negativa hasta el punto de que q_0 adquiera valores negativos, la expansión se acelera. En general, las formas conocidas de materia y energía tienen presión positiva y frenan la expansión.

Si la densidad de materia del cosmos es muy grande, el frenado terminará por invertir el ritmo de expansión y cambiarla de signo; el universo retrocedería en sus dimensiones hasta desplomarse en un colapso final. Esto ocurre cuando Ω_0, parámetro de densidad del universo, es mayor que 1, y no domina la componente de presión negativa.

Para entender el papel de los componentes que contribuyen a frenar o acelerar el cosmos, fijémonos en una forma común de energía, la luz o radiación electromagnética. Si tenemos un volumen lleno de radiación, ésta ejerce una presión positiva sobre las paredes que delimitan el volumen. La presión aumenta con la densidad de radiación, en una proporción de $p = {}^1/_3\rho$. El índice que caracteriza esta forma de energía ($w = {}^1/_3$) es positivo.

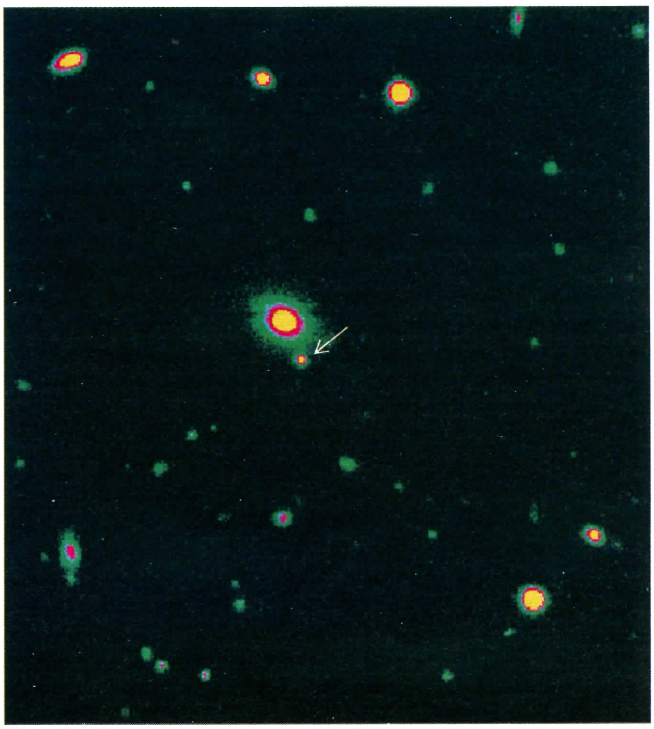
El Roque de los Muchachos y el Proyecto Supernovas y Cosmología

Dentro del Proyecto Supernovas y Cosmología corresponde al Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, acometer programas de descubrimiento y obtención de curvas de luz y espectros de supernovas que distan de nosotros miles de millones de años luz. Sus datos se combinan con los de otros observatorios agregados al proyecto. Sus resultados deben compararse y completarse con las mediciones y análisis efectuados desde el Observatorio Europeo del Hemisferio Sur en Chile, el Kitt Peak de Arizona, el Keck de Hawai y el Telescopio Espacial Hubble.

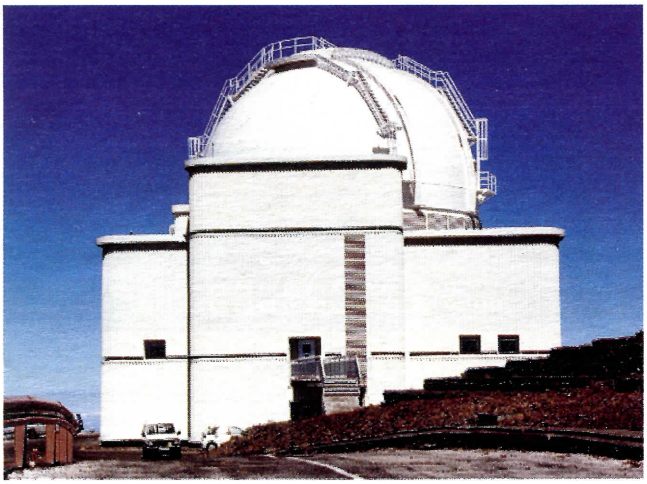
Nos ocupamos, en particular, de los posibles efectos sistemáticos que puedan introducirse en el método. Con ese fin vamos acopiando muestras de supernovas a distintos corrimientos al rojo (z), en busca de diferencias sistemáticas entre las muestras más lejanas y las más cercanas. Se trata de observar los mismos campos de galaxias con una diferencia de unas tres semanas, identificar las supernovas que se producen y seguir con rigor la curva de luz.

El descubrimiento y el seguimiento de la curva de luz se efectúa en el telescopio Isaac Newton de 2,5 metros, que está provisto de una cámara de amplio campo y detectores de gran eficiencia. La identificación espectral de las supernovas se realiza en el telescopio de 4,2 m William Herschel. Para ello necesitamos medir con gran precisión la posición de las supernovas en el cielo en nuestras imágenes del telescopio Isaac Newton. Por ser objetos muy débiles, no se perciben en la cámara de ayuda instalada en el William Herschel. Ahora bien, el telescopio puede apuntarse con exquisita precisión; hasta el segundo de arco, que es la precisión necesaria para situar la rendija de nuestro espectrógrafo de modo que capte la luz del objeto y descomponga la luz que se recibe en sus longitudes de onda. Para obtener un espectro necesitamos sumar luz durante una hora, o incluso más, dependiendo de la distancia.

En el telescopio Isaac Newton y en el telescopio Nórdico (de 2,6 m) situado en el Observatorio del Roque seguimos las supernovas de más alto z que nuestros colegas de otros institutos han descubierto. Con la coordinación de estas labores y el análisis detallado de los datos es posible llegar a resultados óptimos.



2. IMAGEN DE UNA SUPERNOVA (*indicada por la flecha*) en una galaxia elíptica a unos miles de millones de años-luz. Imagen obtenida con el telescopio Isaac Newton.



1. TELESCOPIO ISAAC NEWTON del Observatorio del Roque de los Muchachos. Con él descubrimos supernovas a alto z.

A lo largo del tiempo, la evolución de esta energía de radiación difiere de la evolución seguida por la materia. Conforme se expande el universo, la densidad de materia decrece de forma inversa al aumento de volumen; evoluciona de acuerdo con una razón o ley de t^{-3}. Cuando la escala del universo crece proporcionalmente al tiempo, la densidad de radiación decrece con una potencia mayor, t^{-4}; llegará así un momento en que la densidad de radiación pierda importancia, comparada con la materia, en el desarrollo dinámico del universo.

En el universo cercano a la gran explosión, la densidad de radiación dominaba sobre la densidad de materia. Desde entonces empezó a decrecer deprisa la densidad de radiación; ahora, la componente de radiación ejerce un efecto despreciable sobre la dinámica del cosmos. A diferencia de lo que acontecía en los momentos subsiguientes a la gran explosión —con predominio de la radiación— nos encontramos ya en la era en que el papel principal de la evolución del cosmos lo representa la materia.

La materia que interviene en la evolución dinámica del universo abarca la materia ordinaria y la materia oscura. Conocemos de ésta sus efectos en el movimiento de las estrellas, pero ignoramos de qué partí-

culas consta. En nuestro proyecto medimos los valores globales de la densidad de materia (toda la que ejerce un efecto dinámico, no sólo la hecha de protones y neutrones) y de la densidad de energía del universo que mejor se ajustan a las observaciones.

Durante el año 1997, conforme íbamos recogiendo y analizando datos de supernovas nos dimos cuenta de un primer resultado con importantes implicaciones: la baja densidad del universo, muy inferior al valor crítico que determinaría la inversión de su evolución hasta acabar en un gran colapso ("big crunch"). Podemos descartar esa evolución futura en un universo en que las galaxias se acercarían unas a otras chocando a un ritmo cada vez mayor con el encogimiento del cosmos.

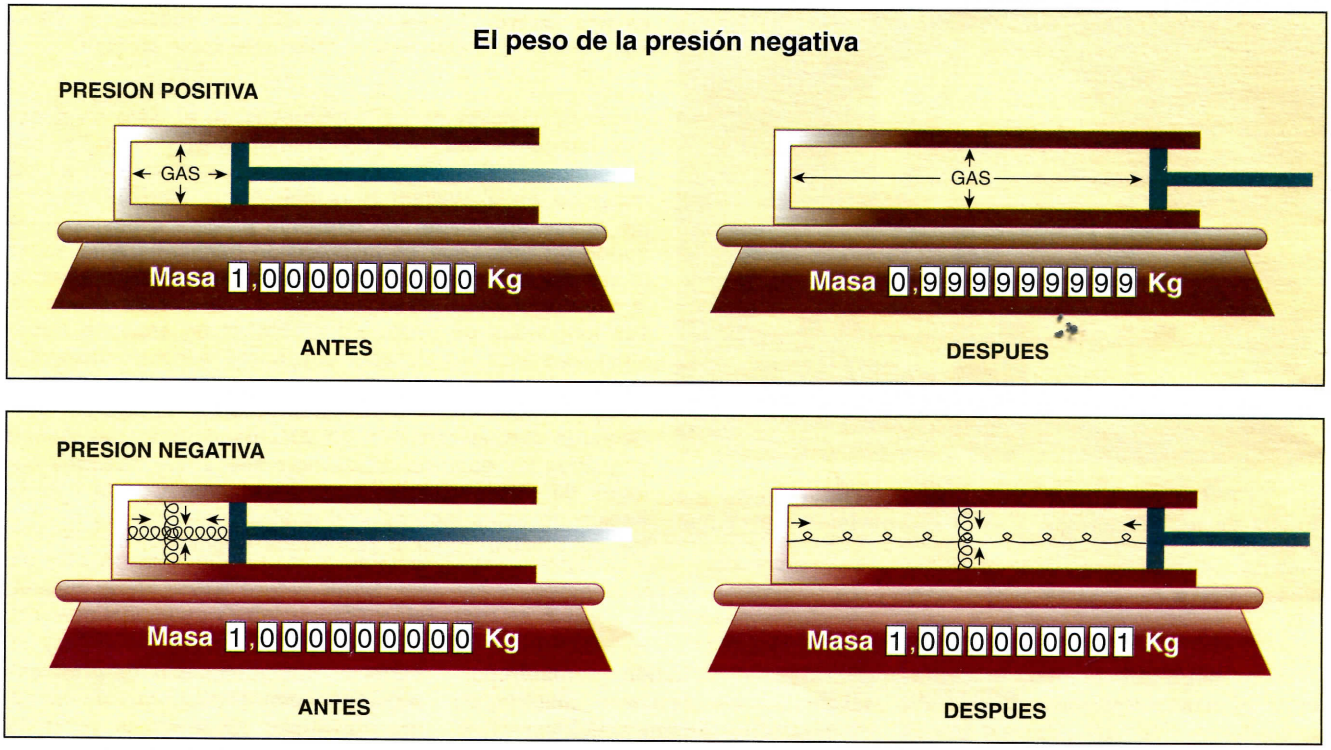
Nuestro universo se irá apagando e hinchándose indefinidamente. El destino del universo es el de una expansión que diluye la materia en un volumen cada vez mayor y separa a distancias infinitas los restos de las galaxias, cada vez menos brillantes.

Cuando afirmamos que la densidad de materia es baja nos referimos a que el parámetro de densidad de materia Ω_m es menor que 1. Nos dimos cuenta de esa baja densidad trabajando con una muestra de supernovas cuya mayoría no presentaba un valor de z muy alto. A ese resultado le acompañó otro. Conforme observábamos y analizábamos más supernovas, y más alejadas, se nos reveló algo inesperado. La exploración del cambio de escala del universo, merced a la investigación con supernovas, nos descubría que en el pasado el proceso de agrandamiento avanzó más lento. O lo que era lo mismo: el universo, en vez de disminuir su velocidad de expansión, la aumentaba.

El universo que nos ha dibujado la observación de supernovas muy lejanas está muy vacío y dominado por una componente de energía de presión negativa, ya que sólo así se explica la aceleración de la expansión. Su identificación, objeto de debate todavía, apunta hacia la constante cosmológica, o energía de vacío Λ (densidad dada en Ω_Λ, parámetro de densidad de energía de vacío). La energía asociada a la constante cosmológica llena el espacio con densidad constante; hace poco podría haber pasado a dominar sobre la materia en la evolución dinámica del universo, de la misma forma que la materia empezó a dominar sobre la radiación en un momento primitivo del cosmos.

Λ, la constante cosmológica

Semejante descubrimiento de la existencia de una forma de energía que actúa como una "energía de vacío" ha sido recibido con sumo interés por los físicos que estudian los primeros instantes del universo. De acuerdo con el nuevo modelo, la expansión se está acelerando y el pistón que la empuja es una componente que además parece dominar sobre la materia. En efecto, en el balance de energía-materia registrado, un 30 % lo proporciona la materia y un 70 % corresponde a la energía de vacío. A esa energía de vacío algunos han em-



4. EXPERIMENTO IDEAL. La masa-energía en un pistón llenado con una substancia de presión positiva (*arriba*) y negativa (*abajo*) cambia en virtud de la expansión del émbolo. Para que la presión fuera del pistón no desempeñe ninguna función, demos por supuesto que el experimento se hace en el vacío. Arriba pesamos un pistón lleno con gas comprimido, lo expandimos y volvemos a pesar. En el panel inferior, hacemos lo mismo con una substancia de presión negativa, representada por el muelle estirado. La balanza es sensible a pequeños cambios en la masa-energía (en relatividad estas dos cantidades son equivalentes). La substancia de presión positiva, al expandirse en un volumen mayor, relaja su densidad y energía interna. Pesa menos en la posición final que en la inicial. La substancia de presión negativa tal como el muelle dentro del pistón (o, en nuestro universo, la energía de vacío o constante cosmológica) aumenta su energía interna al expandirse y pesa más en nuestra balanza.

¿No hay efectos de evolución?

El fundamento del método escogido para estudiar el ritmo de expansión del universo fallaría si las supernovas de alto corrimiento hacia el rojo siguieran relaciones diferentes de las observadas en las supernovas de bajo corrimiento al rojo. Las estrellas que dan lugar a enanas blancas y explotan en supernovas termonucleares tardan miles de millones de años en recorrer ese trayecto. El entorno en que nació una estrella hace 10.000 millones de años (la edad de las supernovas más lejanas) y el medio que acunó a otro de sólo decenas de millones de años (supernovas de la colección más cercana) diferían notablemente. Sin embargo, son muy parecidas al observador. ¿Por qué?

A lo largo de la evolución que da lugar a la enana blanca, la estrella original, con una masa de entre 3 y 10 veces la solar, ha ido perdiendo sus capas externas y comprimiéndose bajo el efecto de la gravedad. Al final, lo que queda de la estrella es un núcleo comprimido hasta una densidad que multiplica millones de veces la de la materia ordinaria. Este núcleo estelar contiene carbono y oxígeno; los electrones están tan confinados, que son compartidos entre los distintos átomos y se comportan como un único gas. La presión de este gas de electrones mantiene a la estrella frente a la contracción gravitatoria. Pero no nos hallamos ante un gas ideal que incremente la presión en respuesta a la mayor temperatura o a una contracción. La presión no aumenta con la temperatura; la estrella no puede relajar su estructura expandiéndose.

Si la enana blanca gana masa al atraer materia de una estrella compañera, la densidad y temperatura de su interior pueden seguir creciendo sin que se expanda el material del interior. Cuando la temperatura adquiere cierto valor, la estrella estalla al desencadenarse en su interior reacciones nucleares que queman el carbono y el oxígeno y originan elementos pesados.

La explosión termonuclear puede ser más o menos energética y sintetizar más o menos elementos pesados. De éstos algunos son radiactivos y emiten radiación gamma en su desintegración; son los responsables de la luminosidad de las supernovas.

Las explosiones que han quemado más carbono y oxígeno y forman más elementos pesados engendran supernovas más brillantes; las explosiones que han quemado poco material dan supernovas menos brillantes. La evolución de la luminosidad en el tiempo que experimentan unas y otras, muy regular, no depende del entorno en que se ha producido la explosión.

No queda ningún residuo estelar. El material quemado se expande a enormes velocidades y la radiación que lo atraviesa experimenta interacciones con los átomos del material en expansión dando lugar a un espectro característico que va cambiando a medida que pasa el tiempo. Tan regular es también el espectro, que al medirlo vemos a qué fase de la explosión corresponde.

He ahí la respuesta al por qué de arriba: la estrella que acaba explotando como supernova termonuclear, desprovista de sus ornamentos externos, quedó reducida a un núcleo de estructura definida sólo por su masa.

No es el único ejemplo de estrella cuya estructura queda prácticamente definida por un solo parámetro. Las estructuras de las estrellas de neutrones y los agujeros negros también quedan definidas por la masa. Pero, a diferencia de las enanas blancas, las estrellas de neutrones y los agujeros negros no explotan. Y por tanto, no proporcionan el brillo calibrado que nos proporcionan las enanas blancas.

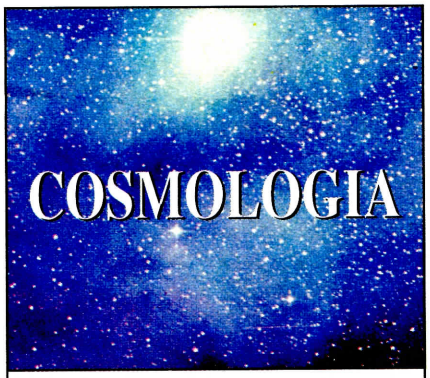
pezado a llamarla energía oscura, en paralelismo con la materia oscura cuya naturaleza desconocemos, si bien detectamos sus efectos dinámicos en las galaxias.

Podemos imaginarnos la constante cosmológica como una forma exótica de materia cuya densidad no cambia al expandirse o contraerse el volumen que la confina. No es intuitiva la idea de una densidad independiente del volumen; antes bien, la experiencia diaria nos muestra que la materia se diluye, se torna menos densa, al aumentar el volumen. La posibilidad de que una substancia mantenga su densidad al expandirse es una consecuencia directa de la relación de Einstein, $E = mc^2$. Al ser equivalentes materia y energía, si expandimos una substancia elevando su energía interna podremos conseguir que su densidad no decrezca.

Ilustraremos ese efecto con un sencillo experimento ideal. Sea un pistón que confina substancias con presión positiva y negativa, respectivamente. Por substancia de presión positiva tomaremos un gas intensamente comprimido; por substancia de presión negativa, un muelle sujeto por los cuatro lados a las paredes del pistón y que se estira al expandirse el volumen del mismo. El muelle ejerce una presión sobre las paredes del volumen negativa, en la dirección que tiende a reducir el volumen confinado por el pistón.

En el experimento ideal se utiliza una balanza capaz de medir masa-energía, para detectar el cambio operado en la masa y causado por la expansión del pistón. En el caso del gas comprimido, con presión posi-

PILAR RUIZ-LAPUENTE, ALEX G. KIM y NICHOLAS WALTON comparten un mismo interés por las explosiones de supernova y colaboran en el Proyecto Supernovas y Cosmología ("Supernova Cosmology Project"). Ruiz-Lapuente, profesora de la Universidad de Barcelona, estudia las últimas etapas de la evolución estelar. Ha sido investigadora contratada por la Universidad de Harvard e invitada por el Instituto Max-Planck de Astrofísica de Garching. Kim trabaja en el Laboratorio de Física Corpuscular y Cosmología del Colegio de Francia en París e investiga asimismo sobre la naturaleza de la materia oscura. Walton, astrofísico especialista en instrumentación, desarrolla su investigación en el grupo Isaac Newton del observatorio del Roque de los Muchachos. Además del final explosivo de estrellas le interesa la formación de nebulosas planetarias.



INVESTIGACION Y CIENCIA

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Destellos de rayos gamma,
de Gerald J. Fishman
y Dieter H. Hartmann
Septiembre 1997

Mercurio:
el planeta olvidado,
de Robert M. Nelson
Enero 1998

La misión Ulises,
de Edward J. Smith
y Richard G. Marsden
Marzo 1998

Seis meses en la Mir,
de Shannon W. Lucid
Julio 1998

La exploración de Marte,
de Matthew P. Golombek
Septiembre 1998

Protoestrellas,
de Rafael Bachiller
Septiembre 1998

La nube de Oort,
de Paul R. Weissman
Noviembre 1998

Galaxias ocultas
tras la Vía Láctea,
de Renée C. Kraan-Korteweg
y Ofer Lahav
Diciembre 1998

Prensa Científica, S.A.

tiva, el gas pierde energía interna al expandirse el pistón. Debido a la relación $E = mc^2$ esta disminución en energía interna se traduce en una disminución de la masa, medida por la balanza de fina precisión. Por otra parte, en el caso de la substancia de presión negativa, representada por el muelle, se debe realizar trabajo para estirar el resorte, trabajo que aumenta la energía interna del muelle y, por tanto, su masa, según detecta la balanza.

Para muelles hechos de materia ordinaria el incremento de energía interna y masa es minúsculo. Mas, para la constante cosmológica, la presión negativa es enorme y el aumento de masa es proporcional al volumen, de forma que la densidad no cambia al crecer el volumen.

La ecuación de estado para Λ, la energía de vacío, es $p = -\rho$. Para la materia ordinaria (salvo en el caso en que se mueve a velocidades cercanas a la de la luz) la presión es insignificante. Si tenemos materia y energía de vacío como componentes del cosmos, la deceleración viene dada por $q_0 = {}^1/_2\ \Omega_m - \Omega_\Lambda$. En estos términos hemos presentado nuestros resultados.

Pero los resultados de la aceleración de la expansión son también compatibles con la presencia de una forma de energía distinta de la energía de vacío Λ, cuya ecuación de estado sea $p = w\rho$, con w negativo aunque distinto de -1. En esta hipótesis, la energía de vacío podría ser cero.

Para explicar la aceleración habría que buscar, pues, otra componente energética de naturaleza diferente. Algunos optan por esta opción, sabedores de que, en el universo primitivo, la energía de vacío es la energía asociada a la pérdida de simetrías entre las distintas fuerzas fundamentales. En ese contexto, valores como el deducido del diagrama de supernovas son difíciles de explicar: los valores esperados son o bien cero o valores enormemente altos.

No faltan quienes prefieren a la constante cosmológica un tipo de campo escalar que tenga ecuación de estado variable con el tiempo. Este campo habría ido evolucionando desde la gran explosión y ahora estaría en un punto en que su energía asociada da el 70 % de la densidad de masa-energía del universo. La diferencia de esta componente en relación a la constante cosmológica estriba en la densidad de energía, que es variable con el tiempo, mientras que en el caso de la constante cosmológica no lo es. El índice de la ecuación de estado cambia y no llega a ser -1 en la actualidad (-1 es lo que caracteriza a la constante cosmológica).

Otro candidato a componente con presión negativa lo constituyen los defectos topológicos en la textura del espacio-tiempo que ejercen presión negativa y pueden llevar asociadas una densidad de energía considerable.

Lo mismo el equipo High-Z que el nuestro proseguimos estudiando la naturaleza del componente de presión negativa. De momento, los resultados provisionales excluyen algunos candidatos a energía oscura; quedarían fuera algunos tipos de defectos topológicos y campos escalares, mientras que Λ, la constante cosmológica, parece la opción más favorable. En los próximos años, prosiguiendo este trabajo, esperamos poder trazar la historia de la aceleración de la expansión del universo y ayudar a discernir cuál es la característica auténtica de lo que llena el cosmos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THERMONUCLEAR SUPERNOVAE. Dirigido por P. Ruiz-Lapuente, R. Canal y J. Isern. Kluwer Academic Publisher 1997.

MEASUREMENTS OF Ω_M AND Ω_Λ FROM 42 HIGH-REDSHIFT SUPERNOVAE. S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goobar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaeffer, B. J. Boyle, A. V. Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Panagia, H. J. M. Newberg y W. J. Couch. (The Supernova Cosmology Project) en *Astrophysical Journal* (en prensa). Preprint en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9812133.

SUPERNOVA LIMITS ON THE COSMIC EQUATION OF STATE. P. M. Garnavich, S. Jha, P. Challis, A. Clocchiatti, A. Diercks, A. V. Filippenko, R. L. Gilliland, C. J. Hogan, R. P. Kirshner, B. Leibundgut, M. M. Phillips, D. Reiss, A. G. Riess, B. P. Schmidt, R. A. Schommer, R. C. Smith, J. Spyromilio, C. Stubbs, N. B. Suntzeff, J. Tonry y S. M. Carroll en *Astrophysical Journal* (en prensa). Preprint en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9806396.

Cuando la aceleración cambió de signo

Las supernovas revelan el momento crucial en que la expansión del universo pasó de decelerada a acelerada

Adam G. Riess y Michael S. Turner

Desde los tiempos de Isaac Newton hasta las postrimerías del siglo XX, la propiedad definitoria de la gravitación fue su naturaleza atractiva. La gravedad nos mantiene pegados al suelo. Frena y detiene el ascenso de una bala y mantiene a la Luna en órbita en torno a la Tierra. Impide que nuestro sistema solar se desmantele y aglutina enormes cúmulos de galaxias. Aunque la teoría einsteiniana de la relatividad general admite que la gravedad sea no sólo atractiva sino también repulsiva, casi todos los físicos han considerado que se trataba de una mera posibilidad teórica, irrelevante en el universo actual. Hasta hace poco, se tenía plena confianza en que la gravedad frenaría la expansión del cosmos.

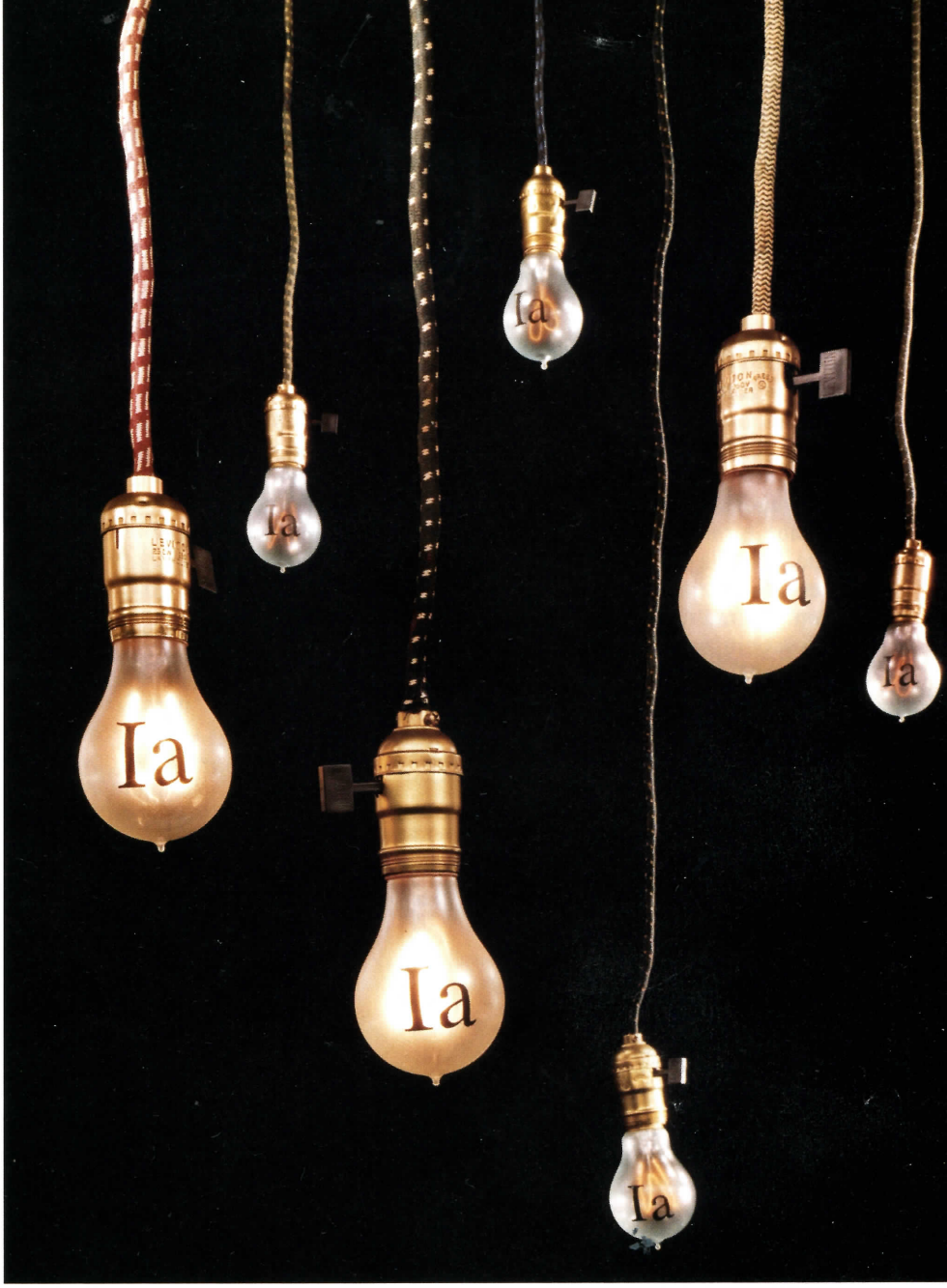
Pero en 1998 se descubrió la faceta repulsiva de la gravedad. La observación detallada de supernovas remotas (las supernovas son explosiones estelares que durante un efímero período fulguran con un brillo de diez mil millones de soles) halló que lucían más débilmente de lo esperado. La luz de esas supernovas, que hicieron explosión hace miles de millones de años, hubo de viajar una distancia mayor de la pronosticada por la teoría. Es la explicación más verosímil. Y esta explicación, a su vez, llevó a la conclusión de que la expansión del universo se acelera, en vez de frenarse. Tan radical fue este descubrimiento, que no faltaron cosmólogos que propusieran que la pérdida de brillo de las supernovas debíase a otros efectos, como la interposición de polvo intergaláctico, que atenuaría la luz. Pero el estudio de supernovas todavía más remotas ha consolidado la tesis de la aceleración cósmica.

Ahora bien, ¿ha estado la expansión cósmica acelerándose durante toda la vida del universo, o se trata, por el contrario, de un acontecimiento reciente, de los últimos cinco mil millones de años? La respuesta tiene profundas implicaciones, pues si se descubriera que la expansión del universo siempre se ha estado acelerando, habría que revisar por entero la evolución cósmica. Por el contrario, si como predicen los cosmólogos, la aceleración fuera un fenómeno reciente, tal vez cupiese determinar su causa (y quizás averiguar el destino del universo) estableciendo cuándo y cómo empezó la expansión del universo a ganar velocidad.

Batalla de titanes

Hace unos 75 años, Edwin Hubble descubrió la expansión del universo al advertir que otras galaxias se alejaban de la nuestra. Observó que las más distantes se separaban más deprisa que las cercanas, de acuerdo con la ahora llamada "ley de Hubble" (la velocidad relativa es igual a la distancia multiplicada por la constante de Hubble). Tomada en el contexto de la teoría de la relatividad general, la ley resulta de la expansión uniforme del espacio, mera dilatación o cambio de escala del tamaño del universo (*véase el recuadro* "Espacio en expansión").

En la teoría de Einstein, la gravitación con carácter de fuerza atractiva sigue siendo válida, incluso a escala cósmica, para todas las formas conocidas de materia y energía. En consecuencia, la relatividad general pronostica que la expansión del universo debería ir haciéndose más lenta, a un ritmo determinado por la densidad de materia y energía que alberga. Pero la relatividad general también admite que pueda haber formas de energía con propiedades extrañas, que producirían gravitación repulsiva (*véase el recuadro* "¿Cómo es posible que haya repulsión gravitatoria?). El descubrimiento de una expansión que en lugar de irse frenando se acelera parece haber revelado la presencia de "energía oscura".



LA MEDICION DE DISTANCIAS en el universo se basa en las supernovas de tipo Ia.

La ralentización o la aceleración de la expansión es el resultado de una batalla entre dos titanes: el tirón gravitatorio, atractivo, de la materia y el empuje, gravitatorio también, pero repulsivo, de la energía oscura. En esta disputa, lo que verdaderamente importa son las densidades de aquélla y de ésta. La densidad de materia disminuye al expandirse el universo, porque aumenta el volumen de espacio. (Sólo una pequeña fracción de la materia se encuentra en forma de estrellas luminosas; se cree que el grueso consiste en materia oscura, que no interacciona de forma apreciable ni con la materia ordinaria ni con la luz, pero posee gravedad atractiva.) Aunque es poco lo que se sabe respecto de la energía oscura, se cree que su densidad varía de un modo paulatino, o incluso que no lo hace en absoluto, a medida que se expande el universo. La densidad de energía oscura es, en este momento, mayor que la densidad de materia, pero en un pasado remoto debió de ser al contrario: en aquel entonces, la expansión del universo se habría estado decelerando (*véase el recuadro* "El punto de transición").

Existen también otras razones para esperar que la expansión del universo no se haya estado acelerando siempre. Si no hubiera dejado nunca de acelerarse, no se podría explicar la existencia de las estructuras cósmicas observadas en el universo actual. De acuerdo con las teorías cosmológicas, las galaxias, los cúmulos galácticos y otras estructuras todavía mayores evolucionaron a partir de pequeñas inhomogeneidades de la densidad de materia del universo primitivo, que hoy se manifiestan en las fluctuaciones de la temperatura de la radiación cósmica de fondo en la banda de microondas (FCM, Fondo Cósmico de Microondas). La mayor intensidad de la gravitación atractiva de las regiones hiperdensas de materia detuvo su expansión y permitió que se convirtieran en objetos ligados por la gravedad, de galaxias como la nuestra a los grandes cúmulos galácticos. Pero si la expansión del universo se hubiera estado acelerando siempre, habría ido descomponiendo las estructuras antes de que terminaran de constituirse. Además, con una expansión siempre acelerada, dos aspectos esenciales del protouniverso —las pautas de variaciones del FCM y las abundancias de elementos ligeros producidos a los pocos segundos de la gran explosión— no concordarían con las observaciones de hoy.

No obstante, deben buscarse pruebas directas de una fase anterior de expansión decelerada. Contribuirían a confirmar el modelo cosmológico estándar y darían pistas sobre la causa del período actual de expansión cósmica acelerada. Dado que los telescopios retrogradan en el tiempo al buscar luz procedente de estrellas o galaxias muy alejadas, cuando se enfocan objetos remotos se estudia la historia de la expansión del universo, codificada en la relación entre las distancias y las velocidades de recesión de las galaxias. Si la expansión se estuviera decelerando, la velocidad de una galaxia distante sería mayor que la pronosticada por la ley de Hubble; menor, en caso contrario. O expresado de otro modo: si el universo se acelerase, las galaxias que tuvieran una determinada velocidad de recesión se hallarían más aleja-

DAVID EMMITE (*fotografía*)

das de lo previsto, y por ende su luz sería más tenue.

A la busca de supernovas

Para sacar provecho de este fenómeno simple, hay que hallar objetos astronómicos que posean una luminosidad intrínseca conocida (la cantidad de radiación que producen por segundo) y puedan ser vistos en una parte del universo muy alejada. Una clase particular de supernovas, las del tipo Ia, resultan adecuadas a tal fin. Estas explosiones estelares son tan brillantes, que los telescopios terrestres pueden observarlas aun cuando se hallen a mitad del universo visible; el telescopio espacial Hubble, a mayor distancia todavía. La luminosidad intrínseca de las supernovas de tipo Ia se ha calibrado con precisión a lo largo de los últimos años; la distancia que hay hasta una de ellas puede, pues, determinarse por su brillo aparente.

El corrimiento hacia el rojo de la luz que nos llega de su galaxia da la velocidad de recesión de una supernova. La radiación procedente de objetos en recesión exhibe un desplazamiento hacia longitudes de onda más largas; por ejemplo, la longitud de onda de la luz emitida cuando el universo tenía la mitad del tamaño actual se duplicará y tornará más roja. Calibrando el corrimiento al rojo y el brillo aparente de un gran número de supernovas situadas a diferentes distancias resulta posible la creación de un registro de la expansión del universo.

Por desdicha, las supernovas de tipo Ia son raras; en una galaxia como la Vía Láctea sólo aparecen una vez cada dos o tres siglos, por término medio. La técnica utilizada por los cazadores de supernovas consiste en observar repetidamente una parcela del firmamento que contenga millares de galaxias para cotejar, luego, las imágenes obtenidas. Un punto de luz transitorio, que fuese visible en una imagen pero no en la anterior, podría ser una supernova. Los resultados que en 1998 dieron indicios de la aceleración cósmica se basaron en las observaciones de dos equipos; examinaban supernovas que detonaron cuando el tamaño del universo era unos dos tercios del actual, hará unos cinco mil millones de años.

No faltaron quienes se preguntasen si los equipos habían interpretado correctamente los datos de las supernovas. ¿No cabría la posibilidad de que otros efectos, sin relación con la aceleración cósmica, pudieran ser la causa de que el brillo de las supernovas fuese menor del esperado? También el polvo que llena el espacio intergaláctico podría haber debilitado la luz de supernovas. Cabía incluso la posibilidad de que las supernovas antiguas fueran más débiles desde su nacimiento: la composición química del universo habría sido entonces, por lo tanto, diferente de la actual y menor la abundancia de los elementos pesados producidos por las reacciones nucleares en las estrellas.

Felizmente, se dispone de cotejos que discriminan bien entre estas hipótesis. Si las supernovas ofreciesen un brillo menor del esperado por una causa astrofísica —una ubicua pantalla de polvo o una menor intensidad de las supernovas en el pasado—, el efecto atenuador debería acentuarse con el corrimiento al rojo. En cambio, si la atenuación fuese resultado de una aceleración cósmica reciente, subsiguiente a una era de deceleración, las supernovas ocurridas en ésta parecerían más brillantes de lo que les correspondería según las otras hipótesis. Por consiguiente, la observación de supernovas que hicieran explosión cuando el tamaño del universo era de menos de dos tercios de su tamaño actual proporcionaría datos para saber por cuál de las hipótesis hay que inclinarse. (Es posible, claro está, que un efecto astrofísico desconocido imitara a la perfección los respectivos efectos de la aceleración y la deceleración, pero las explicaciones artificialmente ajustadas no suelen tener buena acogida.)

Una tarea ardua

Mas el hallazgo de estas supernovas antiguas y distantes es dificultoso. Una supernova de tipo Ia que detonó cuando el universo tenía un tamaño mitad del actual presenta un brillo aparente unas 10.000 millones de veces más débil que Sirio, la estrella más brillante del firmamento. Los telescopios instalados en tierra no pueden detectar fiablemente tales objetos, pero el telescopio Hubble, desde el espacio, sí.

Uno de los autores (Riess) anunció en 2001 que el telescopio espacial había obtenido por un feliz azar varias imágenes de una supernova de tipo Ia sumamente distante (SN 1997ff). En vista del corrimiento al rojo de la luz de esta explosión estelar, que ocurrió hace unos 10 mil millones de años, cuando el universo tenía la tercera parte de su tamaño actual, el objeto mostraba un brillo mucho mayor del que hubiera ofrecido de ser cierta la hipótesis del universo polvoriento. Este resultado constituyó la primera prueba directa de la época en que hubo deceleración. Sostuvimos los autores de este artículo que la observación de supernovas que exhibieran corrimientos al rojo muy elevados podría zanjar la cuestión y dataría con precisión la transición de la ralentización a la aceleración.

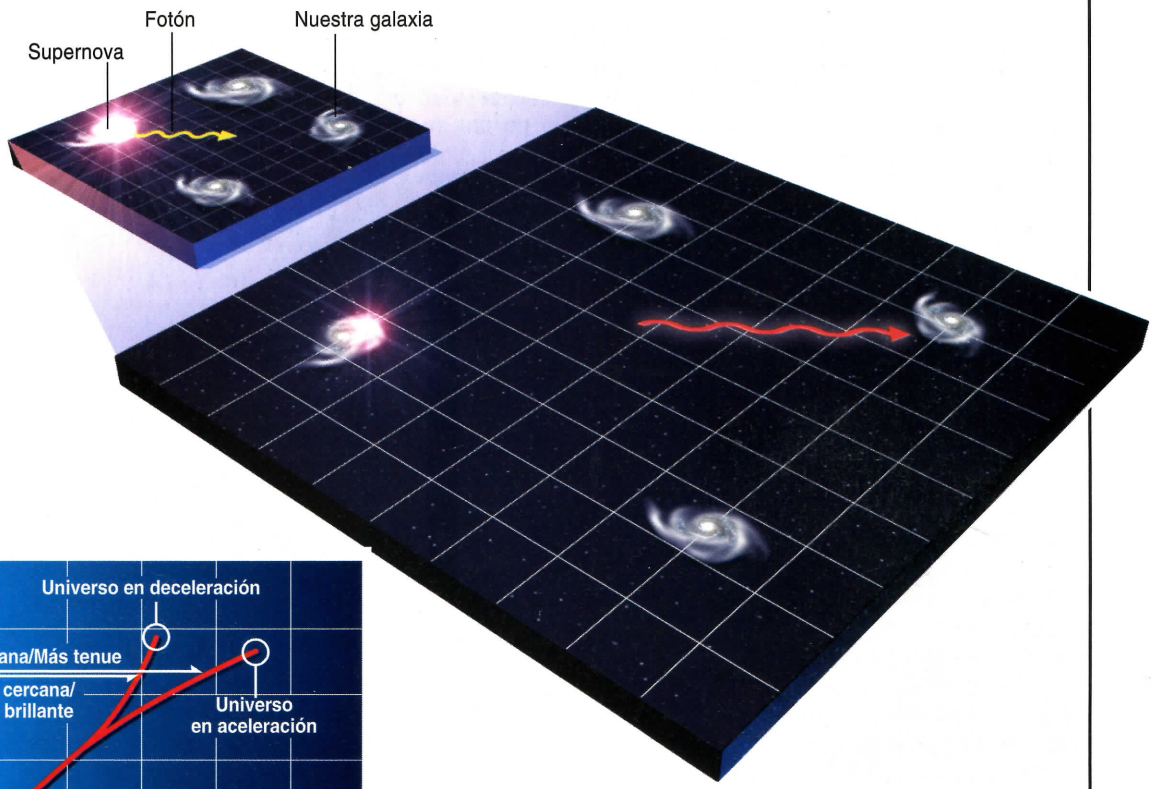
La Cámara Avanzada de Sondeo, un nuevo instrumento de obtención de imágenes instalado en el telescopio espacial en 2002, ha convertido al Hubble en un buscador de supernovas. Riess dirigió la obtención de una muestra, tan necesaria, de supernovas remotas de tipo Ia. Se basó para ello en el Sondeo

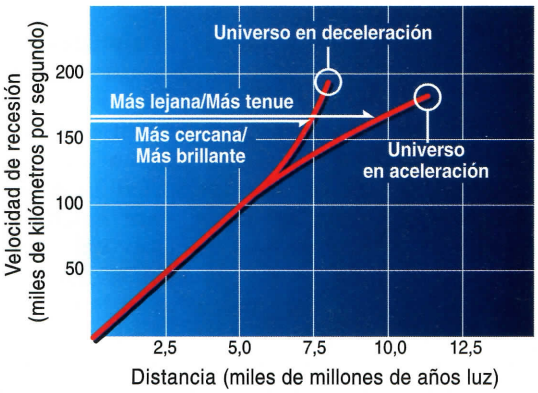
Resumen/Expansión cósmica

- En 1998, las observaciones de unas supernovas distantes indicaron que la expansión del universo se está acelerando. Desde aquella fecha, se han acumulado las pruebas que lo ratifican.
- El estudio de supernovas cada vez más remotas ha proporcionado pruebas de que la expansión se deceleró antes de acelerarse, tal y como pronosticaba la cosmología.
- La determinación del momento en que la expansión pasó de la deceleración a la aceleración podría revelar la naturaleza de la energía oscura y hacernos saber la suerte que finalmente correrá nuestro universo.

ESPACIO EN EXPANSION

SUPONGAMOS QUE UNA SUPERNOVA hiciera explosión en una galaxia muy alejada, cuando el universo tenía un tamaño mitad del actual (*izquierda*). Al llegar la radiación emitida por la explosión a nuestra galaxia, su longitud de onda se habría duplicado, desplazando la luz hacia el extremo rojo del espectro (*derecha*). (Las galaxias no se han dibujado a escala; la distancia que las separa sería en realidad mucho mayor que la ilustrada.) Si la expansión del universo se estuviera decelerando, las supernovas se encontrarían más cercanas a nosotros y su brillo aparente sería mayor de lo esperado; si la expansión se acelerase, se hallarían a mayor distancia y las veríamos más tenues (*gráfico al pie*).





Profundo de los Orígenes por los Grandes Observatorios. El equipo halló seis que hicieron explosión cuando el universo tenía menos de la mitad de su tamaño actual (hace más de 7000 millones de años): junto con la SN 1977ff, se trata de las más antiguas supernovas de tipo Ia descubiertas. Confirman la existencia de un período primitivo de deceleración y sitúan el punto muerto de transición entre deceleración y aceleración hace unos 5000 millones de años. Este hallazgo concuerda con las expectativas teóricas y reafirma a los cosmólogos. La aceleración cósmica llegó por sorpresa y supuso un nuevo problema que debía resolverse. Pero no nos ha obligado a remozar una parte demasiado grande de lo que ya creíamos saber sobre el universo.

Nuestro destino cósmico

Las supernovas arcaicas proporcionaron también nuevos indicios de la energía oscura, causa implícita de la aceleración cósmica. La candidata principal para explicar los efectos de la energía oscura es la energía del vacío, matemáticamente equivalente a la constante cosmológica que Einstein concibió en 1917. Dado que Einstein consideró que su modelo de universo debía ser estático, "apañó las cuentas" con ese factor cosmológico que compensaba la gravitación atractiva de la materia. Para lograr ese estatismo, la densidad asociada a la constante tenía que valer la mitad de la densidad de materia. Mas para producir la aceleración observada del universo, ha de duplicarla.

¿De dónde podría venir esta densidad energética? El principio de incertidumbre de la mecánica cuántica exige que el vacío esté lleno de partículas que viven merced a un "préstamo" de tiempo y de energía, cobran existencia sin cesar y

BRYAN CHRISTIE DESIGN

¿Cómo es posible que haya repulsión gravitatoria?

EN LA TEORIA DE NEWTON, la gravedad es siempre atractiva y su intensidad, proporcional a la masa del objeto atrayente. Según la teoría de Einstein, la intensidad de la fuerza de atracción ejercida por un objeto depende también de su composición. En física, la composición de una sustancia se caracteriza por su presión interna. La gravedad de un objeto es proporcional a la suma de su densidad de energía y el triple de su presión interna. El Sol, por ejemplo, es una esfera de gas caliente con presión positiva (dirigida hacia el exterior); dado que la presión del gas se eleva con la temperatura, la atracción gravitatoria del Sol resulta un poco mayor que la de una bola de materia fría de masa equivalente. Por otra parte, un gas de fotones tiene una presión igual a la tercera parte de su densidad energética, por lo que su atracción gravitatoria doblaría la de una masa equivalente de materia fría.

La energía oscura se caracteriza por su presión negativa. (Los objetos elásticos —una lámina de goma estirada, por ejemplo— tienen también presión negativa, es decir, hacia su interior). Si su presión alcanza un valor inferior a $^{-1}/_{3}$ de la densidad de energía, la suma de la energía y tres veces la presión será negativa: se tendrá una fuerza gravitatoria repulsiva. La presión del vacío cuántico vale –1 veces su densidad de energía: la gravedad de un vacío es muy repulsiva. Otras formas hipotéticas de energía oscura tienen una presión que se encuentra entre $^{-1}/_{3}$ y –1 veces su densidad de energía. Se ha recurrido a algunos de estos tipos de energía con el fin de explicar la época inflacionaria, un período de aceleración cósmica muy temprano. Otros tipos podrían corresponder a la energía oscura que alimenta la aceleración observada hoy.

desaparecen casi en el acto. Pero cuando se calcula la densidad de energía asociada al vacío cuántico, se obtienen valores demasiado abultados: sobran 55 órdenes de magnitud. Si el valor de la energía del vacío fuera tal, toda la materia del universo habría salido disparada instantáneamente y las galaxias no hubieran llegado a formarse jamás.

Se ha dicho que no hay discrepancia más embarazosa en toda la física teórica. Pero tal vez suponga una gran oportunidad. Aunque es posible que nuevas tentativas de estimación de la densidad de energía del vacío produzcan la cantidad exacta que explica la aceleración cósmica, muchos están convencidos de que un cálculo correcto, que incorpore un nuevo principio de simetría, llevará a la conclusión de que la energía asociada con el vacío cuántico es cero (la nada cósmica no pesaría). En tal caso, tendría que intervenir otra causa para que la expansión del universo se esté acelerando.

Se han propuesto múltiples ideas, que van de la influencia de dimensiones extra, ocultas, hasta la energía asociada con un nuevo campo de la naturaleza, a veces llamado "quintaesencia" [*véase* "Salir de la oscuridad", por George Dvali, *en este mismo número*]. En general, estas hipótesis postulan una densidad de energía oscura que no es constante: por lo común, decrece conforme se expande el universo (pero también se ha propuesto que aumenta). Tal vez la idea más radical consista en que la energía oscura no existe en absoluto y que, por lo tanto, es preciso modificar la teoría de la gravitación de Einstein.

Dado que la forma en que varía la energía oscura depende del modelo teórico, cada teoría pronostica un momento diferente para el punto de transición en que el universo pasó de la ralentización a la aceleración. Si la densidad de energía oscura disminuyera al expandirse el universo, el punto de inversión se anticiparía en el tiempo al correspondiente a un modelo que supusiera una densidad constante de la energía oscura. Incluso los modelos teóricos que modifican la gravedad dejan su impronta en el tiempo en que se produce el cambio. Los últimos resultados sobre supernovas concuerdan con las teorías que postulan una densidad constante de energía oscura, pero también son compatibles con la mayoría de los modelos que suponen su variabilidad. Tan sólo quedan descartadas aquellas teorías que estipulan grandes variaciones en la densidad de la energía oscura.

Investigación abierta

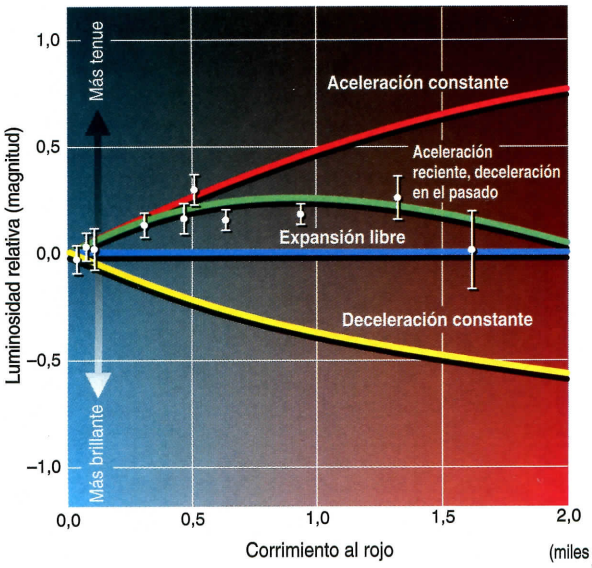
Con el fin de cerrar el abanico de posibilidades teóricas, el telescopio espacial Hubble continúa recogiendo datos de supernovas que pudieran precisar los detalles de la fase de transición. A pesar de que el telescopio espacial sigue siendo el único medio para calar en la historia antigua de la expansión cósmica, hay más de media docena de programas que persiguen medir, gracias a instrumentos instalados en tierra, la aceleración cósmica reciente con precisión suficiente para descubrir la física de la energía oscura.

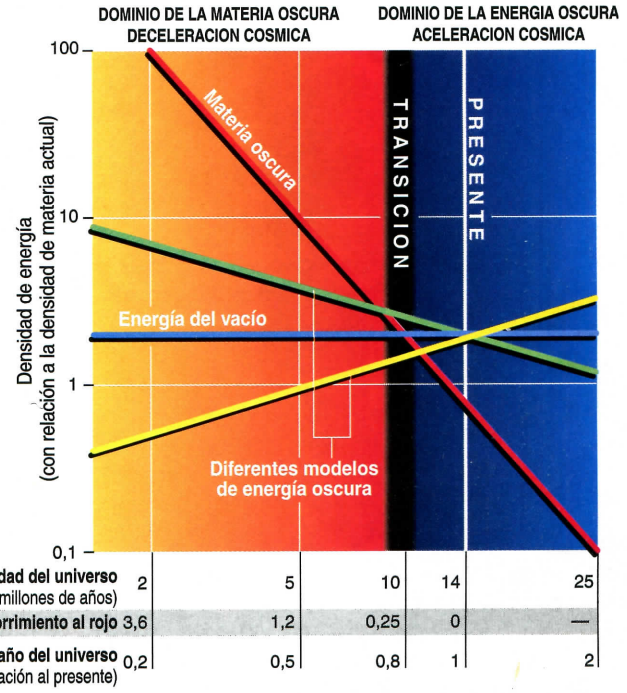
El proyecto más ambicioso es la Misión Conjunta de la Energía Oscura, del Departamento de Energía de los EE.UU. y la NASA. Utilizaría un telescopio espacial de gran angular, con un espejo de dos metros, dedicado al descubrimiento y medición precisa de millares de supernovas de tipo Ia. Los cazadores de supernovas confían en tener en marcha el instrumento en los primeros años del próximo decenio; hasta entonces, para detectar las explosiones estelares más distantes dependerán del telescopio Hubble. [Los planes anunciados por el presidente Bush de reanudar la exploración de la Luna con misiones tripuladas han modificado la programación de la NASA. Se ha retirado la misión conjunta de sus últimas previsiones presupuestarias quinquenales. Según fuentes oficiales, no debe entenderse como una suspensión definitiva. Parece, eso sí, que el departamento de energía sigue interesado. Por otra parte, la NASA ha anunciado también la suspensión de la Misión de Servicio IV, que debería haber efectuado trabajos de mantenimiento en el Hubble en 2006. Se esperaba que el telescopio espacial siguiese funcionando hasta 2010; sin esas reparaciones, no es probable que dure tanto.]

La solución del misterio de la aceleración cósmica nos revelará también el destino de nuestro universo.

EL PUNTO DE TRANSICION

OBSERVACIONES RECIENTES de supernovas muy distantes indican que la expansión del universo se estuvo decelerando antes de que empezara a acelerarse (*gráfico de la izquierda*). Se ha descubierto que las supernovas con corrimientos al rojo mayores de 0,6 eran más brillantes de lo que sería de esperar si el universo se hubiera estado acelerando siempre o si el polvo intergaláctico hubiese atenuando su luz. (Cada punto corresponde a un promedio de supernovas con un corrimiento al rojo parecido.) Los resultados revelan que el punto de transición entre la deceleración y la aceleración debió acontecer hace unos 5000 millones de años. Si se lograse establecer con mayor precisión este punto de transición quizá se podría entender de qué forma ha evolucionado la energía oscura a lo largo del tiempo y quién sabe si descubrir su naturaleza (*a la derecha*).





Si la energía oscura es constante, o si aumenta con el tiempo, dentro de unos cien mil millones de años todas las galaxias, salvo unas pocas, tendrán un corrimiento al rojo demasiado grande para poder ser vistas. Pero si la densidad de energía oscura disminuye y la materia vuelve a dominar, nuestro horizonte cósmico crecerá y revelará una parte mayor del universo. También son posibles futuros más extremos (y letales). Si la energía oscura se eleva, en lugar de decaer, el universo acabará experimentando una "hiperaceleración" que haría trizas sucesivamente galaxias, sistemas solares, planetas y núcleos atómicos, en ese orden. También podría suceder que el universo se volviese a colapsar si la energía oscura llegara a ser negativa. La única forma de pronosticar el futuro cósmico es averiguar la naturaleza de la energía oscura.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Los autores

Adam G. Riess y **Michael S. Turner** son figuras destacadas en la investigación de la historia de la expansión del universo. Riess es astrónomo asociado del Instituto Científico del Telescopio Espacial y profesor adjunto asociado de física y de astronomía de la Universidad Johns Hopkins. Fue el autor principal del estudio publicado por el Equipo de Supernovas de z elevado en 1998 que anunció el descubrimiento de un universo en aceleración. Turner, que ostenta la cátedra Rauner de la Universidad de Chicago, desempeña el cargo de director ayudante de ciencias físico-matemáticas de la Fundación Nacional de Ciencias de los EE.UU. Un artículo suyo de 1995, en coautoría con Lawrence M. Krauss, pronosticó la aceleración cósmica. Se le debe la expresión "energía oscura".

Bibliografía complementaria

DO TYPE IA SUPERNOVAE PROVIDE DIRECT EVIDENCE FOR PAST DECELERATION IN THE UNIVERSE? Michael S. Turner y Adam G. Riess en *Astrophysical Journal*, vol. 569, parte 1, páginas 18-22; 10 de abril de 2002.

THE EXTRAVAGANT UNIVERSE: EXPLODING STARS, DARK ENERGY AND THE ACCELERATING COSMOS. Robert P. Kirshner. Princeton University Press, 2002.

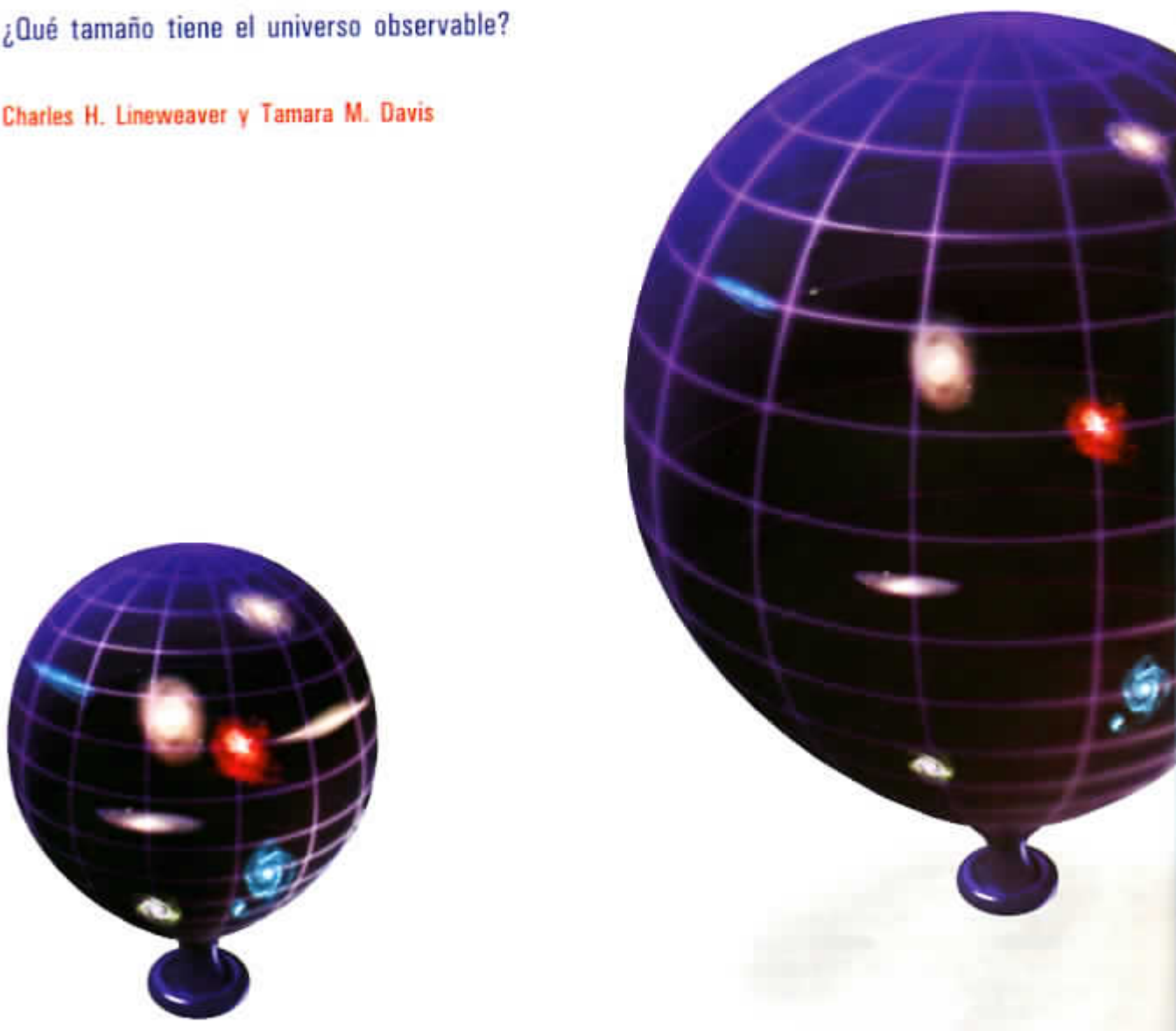
TYPE IA SUPERNOVA DISCOVERIES AT $z > 1$ FROM THE HUBBLE SPACE TELESCOPE. Adam G. Riess *et al.* Disponible en **es.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0402/0402512.pdf**.

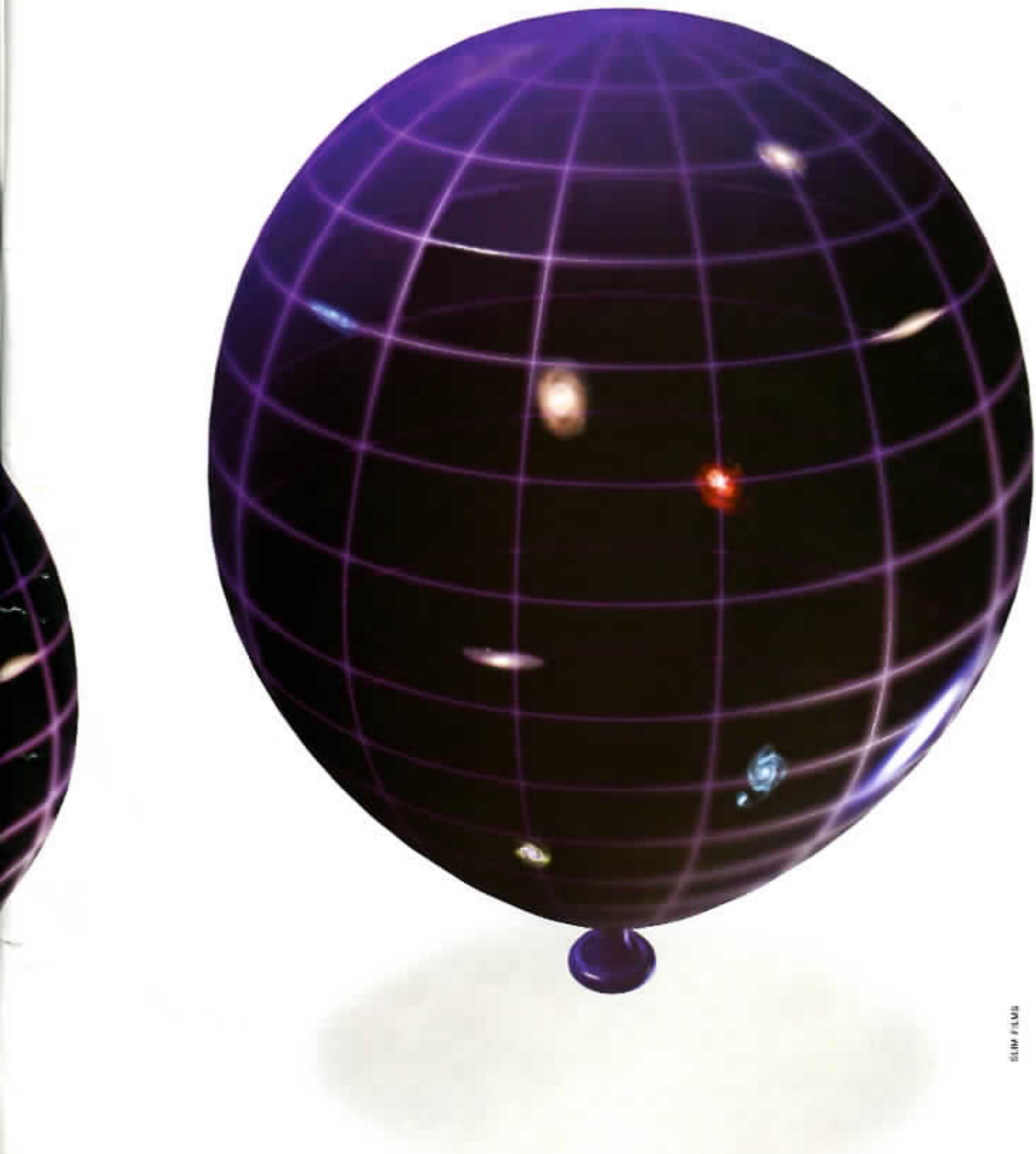
IS COSMIC SPEED-UP DUE TO NEW GRAVITATIONAL PHYSICS? Sean M. Caroll, Vikram Duvvuri, Mark Trodden y Michael S. Turner en *Physical Review Letters* (en prensa).

Las paradojas de la gran explosión

¿Fue realmente lo que sugiere su nombre?
¿Hay galaxias que se alejan de nosotros
a una velocidad mayor que la de la luz?
¿Qué tamaño tiene el universo observable?

Charles H. Lineweaver y Tamara M. Davis





EL SIMIL DEL GLOBO QUE SE INFLA nos ayuda a entender la expansión del universo. Las galaxias se hallan en reposo en la superficie del globo; ello no obstante, a medida que el universo se expande, la distancia entre dos de ellas aumenta, sin que por eso deban las galaxias aumentar su volumen.

Nada se habrá descubierto acerca de nuestros orígenes que revista importancia mayor que la expansión del universo. No estaría usted leyendo este artículo si no fuera por ella. Los seres humanos no existirían. Todo lo que se construye con moléculas frías —se trate de una u otra forma de vida o de un planeta parecido a la Tierra—, no habría llegado a ser si el universo, nacido de una "gran explosión" caliente, no se hubiera expandido y enfriado. La creación de cada estructura del universo, desde las galaxias y las estrellas hasta los planetas y los artículos de *Investigación y Ciencia*, ha estado supeditada a la expansión.

En julio de hace cuarenta años, se anunció un hallazgo que probaba que el universo se había expandido desde un estado primordial más caliente y denso: el fondo cósmico de microondas, rescoldo frío de la gran explosión. Desde su descubrimiento, la expansión y enfriamiento del universo se han convertido en el hilo conductor de la cosmología, de igual forma que la evolución darwinista es el hilo conductor de la biología. La expansión cósmica ofrece el contexto en el que las estructuras simples aparecen y acaban por formar estructuras más complejas. Sin la evolución y la expansión, la biología moderna y la cosmología carecerían de sentido.

La expansión del universo guarda otra semejanza con la evolución darwinista: muchos científicos creen entenderla, pero pocos se ponen de acuerdo acerca de su significado real. Siglo y medio después de *El origen de las especies*, los biólogos siguen debatiendo sobre los mecanismos y las consecuencias del darwinismo, aunque no sobre su realidad, mientras que gran parte del público todavía vive en una ignorancia predarwinista. De igual forma, 75 años después del descubrimiento, sigue habiendo muchos malentendidos sobre la expansión del universo. Un eminente cosmólogo dedicado a la interpretación del fondo cósmico de microondas, James Peebles, de la Universidad de Princeton, escribió en 1993: "La amplitud y riqueza de este entramado conceptual [el modelo de la gran explosión caliente] no se comprende tan bien como pienso que se debería... ni siquiera entre quienes mejores ideas aportan para su progreso".

Físicos célebres, autores de libros de texto de astronomía y prominentes divulgadores de la ciencia han realizado afirmaciones incorrectas o engañosas sobre la expansión del universo. Puesto que la expansión es la base del modelo de la gran explosión, estas interpretaciones erróneas afectan a lo fundamental. La expansión es una idea que maravilla de puro simple; pero, ¿qué se quiere decir cuando se afirma que el universo se está expandiendo? ¿Hacia qué se expande? ¿Se expande también la Tierra? A estas preguntas se le añade ahora otra difícil cuestión, ya que parece que la expansión se acelera. Las consecuencias ponen a prueba nuestro discernimiento.

Resumen/Confusión cósmica

- La expansión del universo, uno de los conceptos fundamentales de la ciencia moderna, constituye también uno de los que peor se interpreta.
- Para evitar la confusión, no deben tomarse al pie de la letra las palabras "gran explosión". La gran explosión no fue una bomba que estallase en el centro del universo y arrojase materia a un vacío que ya existía, sino una explosión del propio espacio. Afectó al todo, lo mismo que la expansión de la superficie de un globo tiene lugar por toda su extensión.
- Aunque la distinción entre expansión "del" espacio y expansión "en" el espacio parezca harto sutil, tiene unas consecuencias muy importantes en el tamaño del universo, el ritmo al que las galaxias se separan, el tipo de observaciones que se pueden realizar y la naturaleza de la expansión acelerada a la que está ahora sometido el universo.
- Estrictamente hablando, el modelo de la gran explosión no aporta información sobre dicha singularidad en sí misma. Describe lo que sucedió después.

¿Qué es la expansión?

Cuando un objeto que nos es familiar se expande —cuando un tobillo se hincha, un imperio se extiende o una bomba estalla—, ocupa el espacio que lo rodea. Los tobillos, los imperios y las bombas tienen un centro y unos bordes. Más allá de los bordes hay lugar para la expansión. El universo no parece tener bordes, ni un centro ni un exterior; ¿cómo puede, pues, expandirse?

Imaginemos que somos hormigas sobre la superficie de un globo que se está inflando, que vivimos en un mundo bidimensional donde las únicas direcciones posibles son adelante y atrás, izquierda y derecha. Desconocemos el significado de "arriba" y "abajo". Un día nos percatamos de que vamos necesitando más tiempo para llegar hasta los pulgones que nos dan de comer: cinco minutos un día, seis al siguiente, siete al tercer día. El tiempo requerido para alcanzar otros sitios conocidos también ha aumentado. Sin embargo, sabemos con toda certeza que no caminamos más despacio y que los pulgones, de moverse, lo hacen al azar y en grupos; no se apartan de nosotros de manera regular.

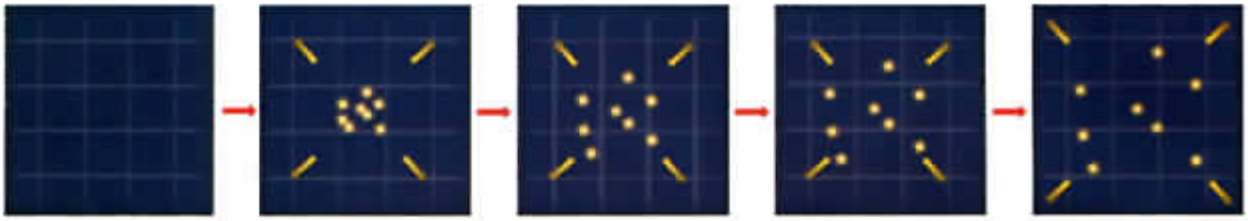
Esta es la idea clave: la distancia a los pulgones está aumentando a pesar de que no se mueven. Ahí siguen, en reposo con respecto a la goma del globo; sin embargo, la distancia entre ellos y de nosotros hasta ellos está creciendo. Una vez asimilados tales hechos, concluimos que el suelo bajo nuestras patas se está expandiendo. Es muy extraño, porque hemos andado por todo nuestro mundo y no hemos visto ningún borde ni exterior hacia donde poder expandirnos.

La expansión de nuestro universo recuerda mucho a ese globo que se hincha. Las distancias a las galaxias remotas aumentan. Dicen por eso los astrónomos que se alejan, que se separan de nosotros, pero no es más que una forma de hablar: las galaxias no viajan a través del espacio; no son los fragmentos de una bomba tras su "gran explosión". El espacio es el que se expande entre las galaxias y nosotros. Cada galaxia se mueve al azar dentro del cúmulo al que pertenezca, pero los cúmulos de galaxias se hallan, a casi todos los efectos, en reposo. La expresión "en reposo" admite una descripción rigurosa. La

¿QUE TIPO DE EXPLOSION FUE LA GRAN EXPLOSION?

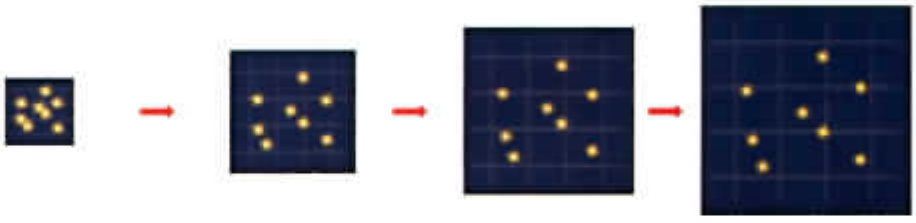
FALSO: **La gran explosión fue como una bomba que estalla en un lugar determinado de un espacio por lo demás vacío.**

Según esta interpretación, el universo nació al expelerse la materia desde ese lugar concreto. La presión era mayor en el centro y menor en el vacío circundante; esta diferencia de presión empujó el material hacia el exterior.



CIERTO: **Fue una explosión del propio espacio.**

El espacio que habitamos está en expansión. No hubo ningún centro en esta explosión; afectó al todo. La densidad y la presión se mantuvieron constantes por doquier. No hubo ninguna diferencia de presión que provocara una explosión en el sentido ordinario de la palabra.



radiación del fondo cósmico de microondas llena el universo y define un sistema de referencia universal, similar a la goma del globo, con respecto al cual se mide el movimiento.

La analogía con el globo no se debe llevar más allá. Desde nuestro punto de vista exterior al globo, cabe la expansión de la bidimensional goma curvada porque está sumergida en un espacio tridimensional. Dentro de las tres dimensiones, el globo tiene un centro y su superficie se expande hacia los alrededores a medida que se infla. Alguien podría pensar que la expansión de nuestro espacio tridimensional necesita la presencia de una cuarta dimensión. Pero la teoría general de la relatividad de Einstein, base de la cosmología moderna, establece que el espacio es dinámico. Puede expandirse, contraerse y curvarse sin necesidad de hallarse sumergido en un espacio de más dimensiones.

En este sentido, el universo se contiene a sí mismo. No requiere ni un centro desde el que dilatarse, ni espacio vacío en el exterior (donde quiera que sea) adonde expandirse. Cuando se agranda, no reclama para sí ningún espacio libre de sus alrededores. Algunas teorías muy recientes, como la teoría de cuerdas, añaden dimensiones, pero la expansión de nuestro universo tridimensional no las necesita.

Una ubicua aglomeración cósmica

En nuestro universo, al igual que en la superficie del globo, todo se aleja de todo. Por tanto, la gran explosión no fue una explosión "en" el espacio; constituyó una explosión "del" espacio. No ocurrió en un punto determinado y de ahí se extendió hacia un vacío preexistente. Sucedió en todos los puntos a la vez.

Imaginemos que atrasamos el reloj. Cualquier región del universo se achica y las galaxias se acercan más y más hasta que tropiezan unas con otras en un atasco cósmico: la gran explosión. La analogía con el atasco sugiere que podría evitarse la congestión con escuchar el informe del tráfico en la radio. Pero la gran explosión es un atasco inevitable. Se parece a una contracción de la superficie terrestre y las autopistas en la que los coches conservasen su tamaño. Con el tiempo, los coches chocarían unos con otros en todas las carreteras. Ningún consejo de la radio nos ayudaría ante la magnitud de tal atasco. La congestión estaría por todas partes.

De igual forma, la gran explosión sucedió en todo lugar. No fue una bomba que explotase en un sitio determinado, al que consideraríamos el centro de la explosión. Continuando con el símil del globo, no hay ningún lugar particular de la superficie que sea el centro de la expansión.

La omnipresencia de la gran explosión persiste, sin importar el tamaño del universo, ni su carácter de finito o infinito. Los cosmólogos afirman en ocasiones que el universo tuvo el tamaño de un pomelo para indicar que el universo que hoy contemplamos tuvo el tamaño de un pomelo.

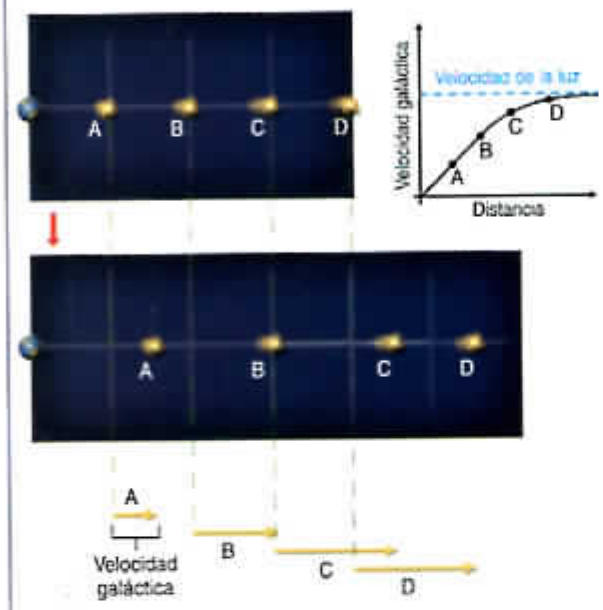
Los observadores de la galaxia Andrómeda tienen su propio universo observable, diferente del nuestro, aunque los dos se solapan en muy buena parte. Los habitantes de Andrómeda pueden ver galaxias que nosotros no alcanzamos a distinguir, por una simple razón: se hallan más cerca de ellas. Su universo observa-

ALFRED T. KAMAJIAN

¿PUEDEN LAS GALAXIAS ALEJARSE MAS RAPIDO QUE LA LUZ?

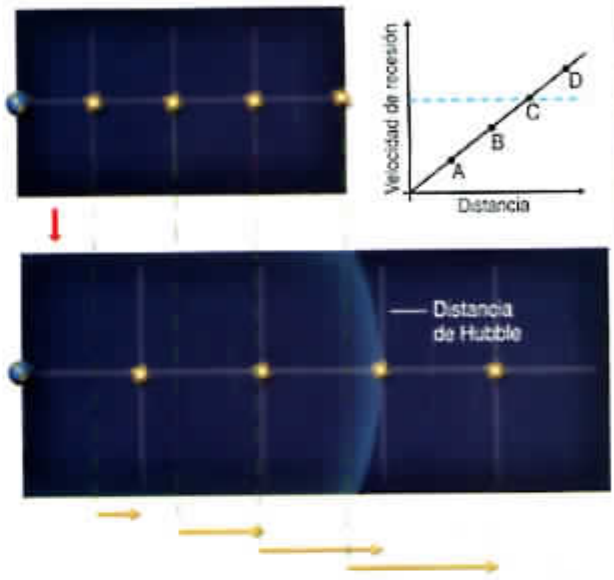
FALSO: **Por supuesto que no. La teoría especial de la relatividad lo prohíbe.**

Considérese una región del espacio con galaxias. Las galaxias se alejan de nosotros; cuanto más lejos, mayor es la velocidad (*flechas de color amarillo*). Si la velocidad de la luz es la velocidad insuperable, la velocidad de una galaxia tenderá a ese límite y no lo sobrepasará.



CIERTO: **¿Y por qué no iban a poder? La relatividad especial no se aplica a la velocidad de recesión.**

En un espacio en expansión, la velocidad de recesión crece con la distancia. Más allá de una distancia determinada, o distancia de Hubble, se sobrepasa la velocidad de la luz. No se viola así la relatividad, puesto que la velocidad de recesión no se origina por un movimiento "en" el espacio, sino por la expansión del propio espacio.



ble también tuvo el tamaño de un pomelo. Concebimos el universo inicial, por lo tanto, como un conjunto infinito, que se extiende por todas direcciones, de pomelos que en parte se superponen. En consecuencia, no debe pensarse que la gran explosión fue "pequeña". La totalidad del espacio podría ser infinita. Aunque se encogiera en una medida cualquiera, seguiría siendo infinita.

Recesión más rápida que la luz

Otros errores de interpretación guardan relación con la descripción cuantitativa de la expansión. El ritmo al cual la distancia entre las galaxias aumenta sigue una pauta particular. Descubierta en 1929 por Edwin Hubble dicha pauta establece que la velocidad de recesión de una galaxia (v) es directamente proporcional a la distancia (d) a la que se encuentra, es decir, $v = Hd$. La constante de proporcionalidad H, o "constante de Hubble", cuantifica la rapidez con que el espacio se expande, no sólo a nuestro alrededor, sino alrededor de cualquier otro observador del universo.

A algunos les confunde que ciertas galaxias no obedezcan la ley de Hubble. Andrómeda, nuestra vecina más próxima y de mayor tamaño, se nos acerca. Estas excepciones se deben a que la ley de Hubble sólo describe la tendencia general de las galaxias. Las galaxias presentan también movimientos locales más modestos; giran unas en torno a otras y se atraen gravitatoriamente, como sucede entre la Vía Láctea y Andrómeda. Las galaxias lejanas presentan, a su vez, tales velocidades locales aleatorias, pero desde nuestra perspectiva (con valores muy grandes de la distancia d) quedan dominadas por las grandes velocidades de recesión v. Por lo tanto, la ley de Hubble se cumple en esos casos con bastante precisión.

Nótese que, según la ley de Hubble, el universo no se expande a una única velocidad. Algunas galaxias se alejan a 1000 kilómetros por segundo, otras (las que están dos veces más lejos) a 2000 kilómetros por segundo, y así sucesivamente. La ley de Hubble predice que más allá de una determinada distancia, llamada en su honor distancia de Hubble, las galaxias se alejan más deprisa que la velocidad de la luz. Para el valor medido de la constante de Hubble, dicha distancia se cifra en unos 14.000 millones de años-luz.

¿Significa que, debido a su predicción de que hay galaxias que se mueven más deprisa que la luz, la ley de Hubble está equivocada? ¿No establece la teoría especial de la relatividad de Einstein que nada puede viajar a velocidad mayor que la de la luz? La cuestión sigue perturbando a generaciones de estudiantes. Pero la relatividad especial sólo se aplica a las velocidades "normales", a los movimientos en el espacio. La velocidad de la ley de Hubble es una velocidad de recesión originada por la expansión del espacio, no un movimiento en el espacio. Se trata de un

efecto de la teoría de la relatividad general: no está sujeto al límite de la relatividad especial. Una velocidad de recesión mayor que la velocidad de la luz no viola la relatividad especial. Sigue siendo cierto que nada adelanta jamás a un rayo de luz.

Expansión y enfriamiento

Las primeras observaciones de la expansión del universo se realizaron entre 1910 y 1930. Los átomos emiten y absorben luz a ciertas longitudes de onda, determinadas en los experimentos de laboratorio. Las mismas pautas aparecen en la luz de las galaxias lejanas, pero desplazadas hacia mayores longitudes de onda. "La luz", se dice, "se ha corrido hacia el rojo". La explicación es inmediata: a medida que el espacio se expande, las ondas de la luz se estiran. Si el universo duplica su tamaño durante el viaje de las ondas, las longitudes de éstas se duplican y su energía se reduce a la mitad.

Se puede describir este proceso por medio de temperaturas. Los fotones emitidos por un cuerpo tienen una temperatura asociada, una cierta distribución de energía que refleja a su vez la temperatura del cuerpo emisor. A medida que los fotones viajan a través de un espacio en expansión, pierden energía y su temperatura disminuye. De esta forma, el universo se enfría mientras se expande; recuerda al enfriamiento del aire comprimido de una botella de submarinismo cuando se deja que escape y se expanda. La radiación del fondo de microondas tiene hoy día una temperatura de unos tres kelvin, mientras que el proceso que la generó sucedió a unos tres mil grados kelvin. Desde que esta radiación fue emitida, el universo ha multiplicado por mil su tamaño; por consiguiente, la temperatura de los fotones ha disminuido en esa misma proporción. Se ha medido directamente la temperatura de la radiación del pasado remoto al observar el gas de las galaxias lejanas. Las mediciones confirman el enfriamiento del universo con el tiempo.

Abundan los malos entendidos acerca de la relación entre el corrimiento al rojo y la velocidad. El desplazamiento al rojo debido a la expansión se confunde con un desplazamiento al rojo que nos resulta más familiar, el efecto Doppler. Este segundo alarga las ondas sonoras si la fuente del ruido se aleja; por ejemplo, la sirena de una ambulancia que se marcha. Este mismo principio se aplica a las ondas de luz; se dilatan si la fuente lumínica se aleja a través del espacio.

Algo parecido, aunque no idéntico, le sucede a la luz de las galaxias lejanas. El desplazamiento al rojo cosmológico no es un corrimiento Doppler normal. Los astrónomos se refieren de igual forma a los dos, y con ello llevan a confusión a sus alumnos. El desplazamiento Doppler y el desplazamiento al rojo cosmológico están gobernados por dos fórmulas diferentes. La primera se deriva de la relatividad especial, que no tiene en cuenta la expansión del espacio; la segunda proviene de la

Una hipótesis agotada

Siempre hay cierto número de lectores que, tras leer un artículo de cosmología, se resiste a creer que las galaxias se alejan de nosotros. Piensan que la expansión del espacio es una ilusión, que los desplazamientos al rojo galácticos se deben a que la luz se "cansa" durante el largo viaje porque algún proceso desconocido la lleva a perder energía espontáneamente según va recorriendo el espacio, con el consiguiente enrojecimiento de su color.

La hipótesis se propuso hace unos 75 años. Al igual que cualquier modelo, realiza predicciones que deben ser investigadas. Y como les ocurre a los modelos fallidos, no encaja con las observaciones. Cuando una estrella explota constituida en supernova, su brillo primero crece y luego se debilita a lo largo de un período de tiempo que, para el tipo de supernova del que se vale la cartografía cósmica, es de dos semanas. Durante estas dos semanas, la supernova emite un chorro de fotones. La hipótesis de la luz fatigada predice que perderán energía al propagarse, pero el chorro fotónico durará, en cualquier caso, dos semanas.

Ahora bien, en un espacio en expansión no sólo los fotones uno a uno se estiran (y por tanto pierden energía), sino que el chorro de fotones en sí también se alarga. Es decir, se necesitan más de dos semanas para que todos los fotones lleguen a la Tierra. Las recientes observaciones confirman ese efecto. Una supernova en una galaxia con desplazamiento al rojo de 0,5 parece durar tres semanas; otra supernova con corrimiento al rojo de 1,0, cuatro semanas.

La hipótesis de la luz cansada entra en conflicto con las observaciones del espectro de la radiación del fondo cósmico de microondas y del brillo superficial de las galaxias remotas.

LAS SUPERNOVAS sirven como testigos de la expansión cósmica. Sus propiedades descartan cualquier hipótesis cosmológica que no incorpore la expansión del espacio. En la ilustración se ofrece una (*señalada con una flecha*) del cúmulo de galaxias Virgo.

relatividad general, que sí la toma en consideración. Las dos ecuaciones, casi coincidentes para las galaxias cercanas, divergen para las lejanas.

De acuerdo con la fórmula del efecto Doppler habitual, los objetos cuya velocidad a través del espacio se aproxima a la velocidad de la luz presentan desplazamientos al rojo próximos a infinito. Sus longitudes de onda se vuelven tan largas, que cuesta observarlas. Si fuera así para las galaxias, las más lejanas de las observables en el cielo se moverían con apenas una pequeña fracción de la velocidad de la luz. Pero la fórmula del desplazamiento al rojo cosmológico conduce a una conclusión distinta. En el modelo cosmológico estándar actual, las galaxias con un desplazamiento de 1,5 —es decir, cuya luz tiene una longitud de onda un 150 por ciento mayor que la de referencia, medida en el laboratorio— se alejan a la velocidad de la luz. Se han observado unas mil galaxias con corrimientos hacia el rojo mayores que 1,5; es decir, unos mil objetos que se alejan de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz. Y viceversa: nosotros nos alejamos de esas fuentes galácticas más deprisa que la luz. La radiación del fondo cósmico de microondas ha viajado desde más lejos y presenta un desplazamiento al rojo de casi 1000. Cuando el plasma caliente del universo joven emitió esta radiación que ahora observamos, se estaba alejando de nuestra posición a unas 50 veces la velocidad de la luz.

Correr para permanecer inmóvil

Eso de ver galaxias más veloces que la luz parecerá una entelequia; sin embargo, es posible gracias a los cambios en la tasa de expansión. Imaginemos un rayo de luz que está más allá de la distancia de Hubble, 14.000 millones de años-luz, e intenta viajar hasta nosotros. Avanzará a la velocidad de la luz con respecto a su espacio local, pero éste se alejará de nosotros más rápidamente que la luz. A pesar de que el rayo avanza a la máxima velocidad posible, no puede superar la expansión del espacio. Igual que un niño que quiere correr en el sentido opuesto al de avance de una cinta mecánica. Los fotones a la distancia de Hubble vienen a ser como la Reina Roja y Alicia, que corrían tanto como podían y se quedaban siempre en el mismo sitio.

Alguien podría concluir que la luz que parta de un lugar más allá de la distancia de Hubble nunca nos alcanzará y, por lo tanto, su fuente nos será indetectable para siempre. Pero la distancia de Hubble no es una cantidad fija, ya que la constante de Hubble, de la cual depende, varía con el tiempo. En concreto, la constante es proporcional a la velocidad a que aumenta la distancia entre dos galaxias dividida por dicha distancia. (Se puede emplear cualquier par de galaxias para el cálculo.) En los modelos del universo que concuerdan con los datos observados, el denominador crece más rápido que el numerador, por lo que la constante de Hubble disminuye y la distancia de Hubble aumenta. Entonces, la luz que inicialmente permanecía fuera de la distancia de Hubble y se alejaba de nosotros puede llegar a encontrarse más acá de la distancia de Hubble. Los fotones se hallarían entonces en una región del espacio que se alejaría más despacio que la luz y nos podrían alcanzar.

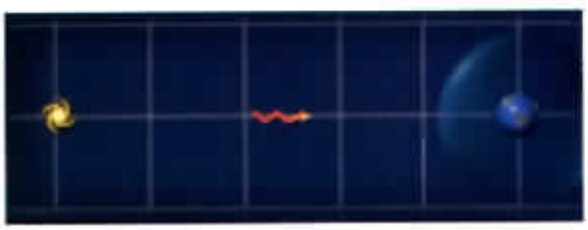
La galaxia de la que proceden, por el contrario, quizá seguiría alejándose a una velocidad mayor que la de la luz. Por tanto, podemos observar la luz de galaxias que han estado siempre y estarán siempre moviéndose más deprisa que la luz. Otra manera de expresarlo: la distancia de Hubble no es fija y no marca la frontera del universo observable.

¿Qué define la frontera del espacio observable? Nos encontramos de nuevo con otra paradoja. Si el espacio no se hubiera expandido, el objeto más lejano que podríamos ver esta-

¿PODEMOS VER GALAXIAS QUE SE ESTAN ALEJANDO MAS DEPRISA QUE LA LUZ?

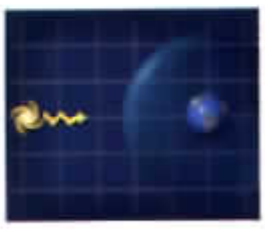
FALSO: **Por supuesto que no. La luz de esas galaxias nunca nos alcanza.**

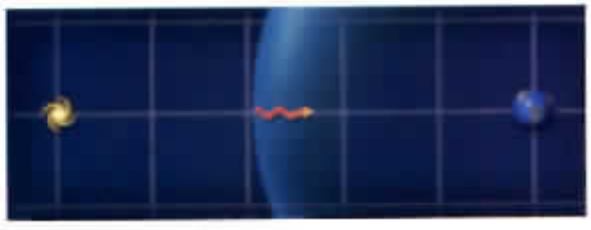
Una galaxia más lejana que la distancia de Hubble (*esfera*) se aleja de nosotros a una velocidad superlumínica. Emite un fotón (*amarillo*). A medida que el espacio se expande, el fotón es arrastrado a la manera de quien nada contra corriente. El fotón nunca nos alcanza.



CIERTO: **Claro que podemos: la tasa de expansión cambia con el tiempo.**

El fotón es en principio incapaz de alcanzarnos. Pero la distancia de Hubble no es constante; está en aumento; puede englobar al fotón. Una vez que esto ocurra, el fotón se nos acercará y con el tiempo nos alcanzará.

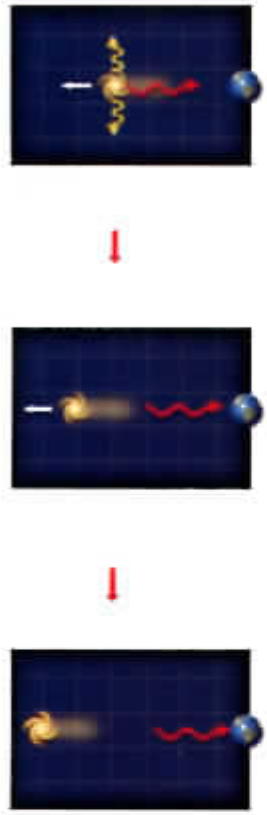




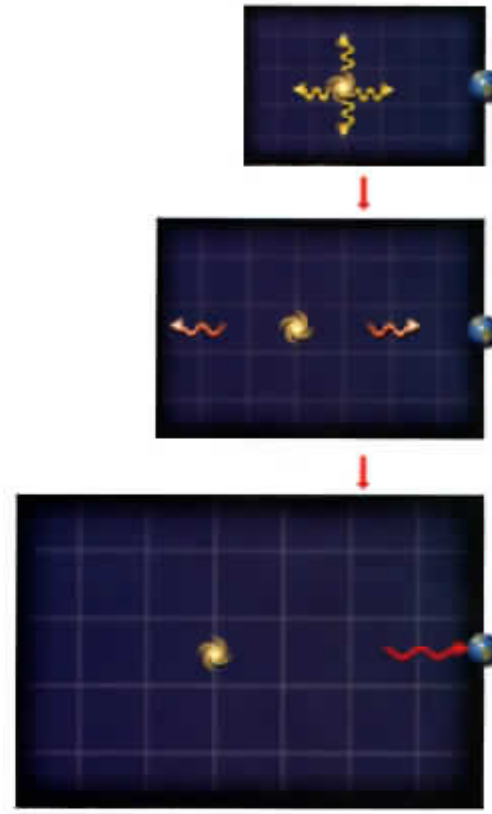
¿POR QUE EXISTE UN CORRIMIENTO HACIA EL ROJO COSMICO?

FALSO: Porque las galaxias, a causa de su movimiento de recesión, exhiben un corrimiento Doppler.

El efecto Doppler asociado al movimiento de recesión de las galaxias estira las ondas de luz y se tornan rojas (*arriba*). La longitud de onda de la luz no cambia mientras se propaga (*medio*). El observador detecta la luz, mide su desplazamiento al rojo y calcula la velocidad.



CIERTO: Porque la expansión del universo agranda las ondas de luz mientras se propagan.



Las galaxias apenas se mueven por el espacio: emiten luz casi de la misma longitud de onda en todas direcciones (*arriba*). La longitud de onda se hace mayor durante el viaje porque el espacio se expande. Por tanto, la luz se enrojece gradualmente (*paneles intermedio e inferior*). La magnitud del desplazamiento al rojo es distinta a la inducida por el desplazamiento Doppler.

ALFRED T. KAMAJIAN

ría situado a unos 14.000 millones de años-luz de nosotros, la distancia que la luz puede viajar a lo largo de los 14.000 millones de años pasados desde la gran explosión. Ahora bien, puesto que el universo está en expansión, el espacio atravesado por un fotón se agranda tras él durante el viaje. En consecuencia, la distancia actual al objeto más lejano que podamos ver es unas tres veces mayor, o 46.000 millones de años-luz.

El descubrimiento reciente de que la tasa de expansión cósmica se acelera hace que todo resulte aún más interesante. Con anterioridad, se creía que vivíamos en un universo en deceleración y que con el tiempo se observarían más galaxias. En un universo en aceleración, sin embargo, nos encontramos rodeados por una frontera más allá de la cual suceden fenómenos que nunca veremos, un horizonte de sucesos cósmicos. Para que la luz de las galaxias que se alejan a una velocidad superlumínica nos alcance, la distancia de Hubble debe aumentar; en un universo en aceleración, ya no lo hace. Los sucesos lejanos envían rayos de luz en nuestra dirección, pero esa luz está atrapada más allá de la distancia de Hubble por la aceleración de la expansión.

Un universo en aceleración se parece a un agujero negro en que tiene un horizonte de sucesos, un borde más allá del cual no podemos ver más. La distancia actual a nuestro horizonte cósmico es de 16.000 millones de años-luz, dentro de lo que nos es observable. La luz emitida por las galaxias que ahora se encuentran más allá del horizonte cósmico nunca nos llegará; la distancia de 16.000 millones de años-luz se agrandará muy rápidamente. Aunque capaces de ver los sucesos que ocurrieron en estas galaxias antes de que cruzaran el horizonte, se hallarán por siempre lejos de nuestro alcance los sucesos posteriores.

¿Se está expandiendo Brooklyn?

En "Annie Hall", el personaje interpretado por Woody Allen le explica a su médico y a su madre la razón de que no haga las tareas. "El universo está en expansión... El universo lo es todo y, si se expande, algún día se romperá, ¡y eso será el final de todo!" A lo que su madre le replica: "Tú estás en Brooklyn, ¡y Brooklyn no se está expandiendo!".

La madre tenía razón. Brooklyn no se expande. Se suele presuponer que, si el espacio se agranda, lo demás se agranda también. La expansión en sí misma —es decir, una expansión en punto muerto, que ni acelere ni decelere— no provoca ninguna fuerza. Las longitudes de onda de los fotones sí se expanden con el universo porque, a diferencia de los átomos y las ciudades, no son objetos

trabados cuyo tamaño esté fijado por un compromiso entre fuerzas. Una tasa variable de expansión añade una nueva fuerza a la mezcla, pero incluso esta nueva fuerza no hará que los objetos aumenten o disminuyan.

Por ejemplo, si la gravedad creciera, nuestra espina dorsal se comprimiría hasta que los electrones de las vértebras alcanzaran un nuevo equilibrio y permaneciesen más pegados. Seríamos más pequeños, pero no seguiríamos encogiéndonos. De la misma forma, si viviésemos en un universo dominado por la fuerza atractiva de la gravedad, tal y como se pensaba hasta hace pocos años, la expansión, que tendría que frenarse, ejercería un suave empuje sobre los objetos del universo y su tamaño en el equilibrio sería menor. Tras esto, no continuarían disminuyendo.

No obstante, en nuestro universo la expansión se acelera; los objetos, pues, sufren una fuerza suave de dilatación. En consecuencia, los objetos trabados son un poco mayores que en un universo que no se acelere, porque el equilibrio entre las fuerzas se alcanza a un tamaño algo superior. En la superficie terrestre, la aceleración que tira desde el centro del planeta hacia fuera es igual a una diminuta fracción (10^{-30}) de la aceleración normal de la gravedad hacia el interior. Si esa aceleración hacia fuera es constante, no agrandará la Tierra; el planeta alcanzará un equilibrio estático, con un tamaño algo mayor del que tenía.

Este razonamiento cambia si la aceleración no es constante, tal y como algunos conjeturan. Si la aceleración sigue aumentando, podría crecer hasta romper todas las estructuras y dar lugar a un "gran desgarrón" (*big rip*). Pero este desgarrón no se debería a la expansión o a la aceleración en sí mismas, sino a una aceleración que se acelera.

El modelo de la gran explosión se basa en la observación de la expansión, del fondo cósmico de microondas, de la composición química del universo y del agrupamiento de la materia. Según resulta habitual entre las hipótesis científicas, este modelo quizá deba ser reemplazado algún día. De momento, reproduce los datos actuales mejor que ningún otro modelo disponible. Cuando medidas futuras más precisas permitan entender mejor la expansión y la aceleración, se plantearán cuestiones fundamentales relacionadas con los primeros tiempos y las mayores

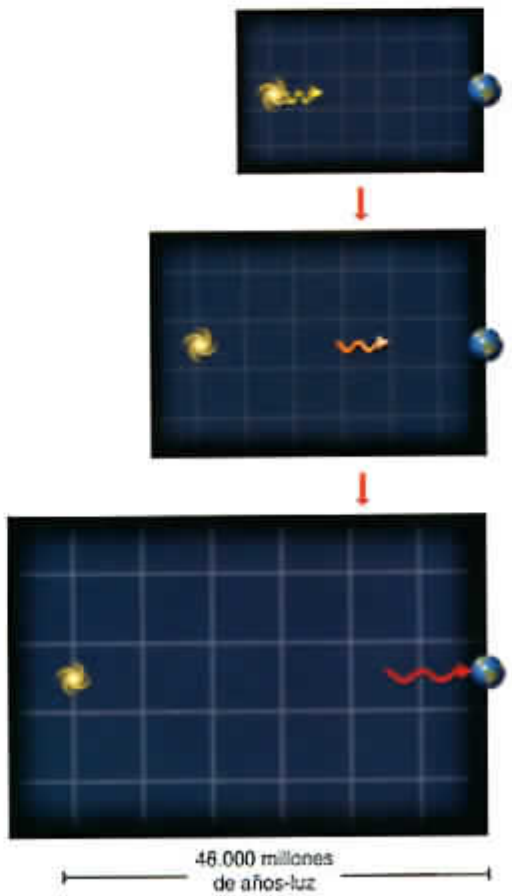
¿CUAL ES EL TAMAÑO DEL UNIVERSO OBSERVABLE?

FALSO: **El universo tiene 14.000 millones de años, por lo que el radio de la parte observable es 14.000 millones de años-luz.**

Imaginemos la galaxia observable más lejana, una cuyos fotones emitidos poco después de la gran explosión nos estén alcanzando ahora. Un año-luz es la distancia que recorre un fotón en un año, luego el fotón de esa galaxia habrá viajado 14.000 millones de años-luz.

CIERTO: **Como el espacio se expande, la parte observable del universo tiene un radio de más de 14.000 millones de años-luz.**

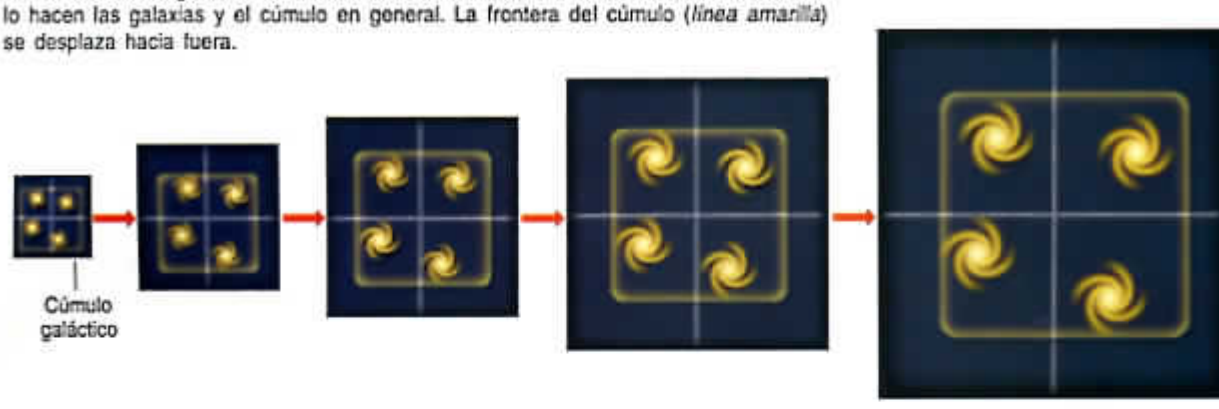
A medida que el fotón viaja, el espacio que atraviesa se expande. Para cuando el fotón nos alcance, la distancia total a la galaxia fuente será mayor que la calculada a partir del tiempo empleado en el viaje; casi tres veces mayor.



¿SE EXPANDEN TAMBIEN LOS OBJETOS DENTRO DEL UNIVERSO?

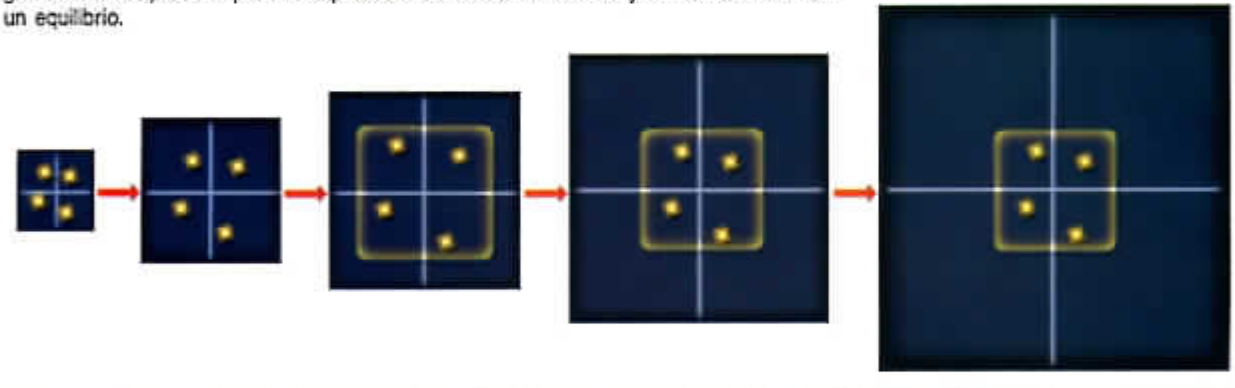
FALSO: **Sí. La expansión hace que el universo y todo su contenido crezca.**

Pensemos en las galaxias de un cúmulo. A medida que el universo aumenta, también lo hacen las galaxias y el cúmulo en general. La frontera del cúmulo (*línea amarilla*) se desplaza hacia fuera.



CIERTO: **No. El universo crece, pero no los objetos trabados que hay en el interior del mismo.**

Las galaxias vecinas se separan inicialmente; sin embargo, con el tiempo la atracción gravitatoria recíproca supera la expansión. Se forma un cúmulo y su tamaño alcanza un equilibrio.



escalas del universo. ¿Cuál fue el origen de la expansión? Muchos lo atribuyen a la "inflación", una forma acelerada de expansión. Se trata sólo de una respuesta parcial; para que empezase la inflación, el universo, debía hallarse ya en expansión. ¿Y qué ocurre con las escalas mayores, más allá de lo que podemos apreciar? ¿Se expanden las distintas regiones del universo de forma diferente y según ritmos diversos, cual si nuestro universo constituyera una burbuja inflacionaria dentro de un multiverso mayor? No se sabe. A pesar de que todavía quedan muchas preguntas por contestar, las observaciones cada vez más precisas dan a entender que el universo continuará su expansión para siempre. Esperamos, no obstante, que disminuya la confusión que la rodea.

Los autores

Charles H. Lineweaver y Tamara M. Davis son astrónomos del Observatorio de Monte Stromlo, cercano a Canberra. Lineweaver formó parte del equipo del Explorador del Fondo Cósmico (COBE), descubridor de las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas. Davis pertenece al equipo de la sonda Supernova/Aceleración, observatorio espacial en proyecto.

Bibliografía complementaria

COSMOLOGY: THE SCIENCE OF THE UNIVERSE. Edward R. Harrison. Cambridge University Press, 2000.

THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND RADIATION TEMPERATURE AT A REDSHIFT OF 2.34. R. Srianand, P. Petitjean y C. Ledoux en *Nature*, vol. 408, n.º 6815, págs. 931-935; 21 de diciembre, 2000.

SOLUTIONS TO THE TETHERED GALAXY PROBLEM IN AN EXPANDING UNIVERSE AND THE OBSERVATION OF RECEDING BLUESHIFTED OBJECTS. Tamara M. Davis, Charles H. Lineweaver y John K. Webb en *American Journal of Physics*, vol. 71, n.º 4, págs. 358-364; abril, 2003.

EXPANDING CONFUSION: COMMON MISCONCEPTIONS OF COSMOLOGICAL HORIZONS AND THE SUPERLUMINAL EXPANSION OF THE UNIVERSE. Tamara M. Davis y Charles H. Lineweaver en *Publications of the Astronomical Society of Australia*, vol. 21, n.º 1, págs. 97-109; febrero, 2004.

ALFRED T. KAMAJIAN