

La constante de Hubble y el universo en expansión

El valor de H_0 , la velocidad de expansión del universo, podría, merced a su refinamiento reciente, allanar el camino de la investigación cosmológica

Wendy Freedman

Quizá sea yo la única astrónoma que se haya quedado encerrada en una especie de jaula en lo más alto de un gran telescopio. Fue en la cumbre del Mauna Kea, a más de 4000 metros de altura. Hace veinte años, antes de que pasáramos las noches en cálidas salas de ordenadores, los astrónomos observábamos en pequeñísimos cubículos situados en el foco primario de los telescopios gigantes. Aunque las largas noches de invierno eran insoportablemente frías, contemplábamos hermosas vistas del oscuro cielo nocturno y escuchábamos música con auriculares mientras registrábamos imágenes y espectros de nuestros blancos celestes. Una noche, terminada la sesión, un ascensor se quedó atascado y no pude abandonar la jaula. No fue un inconveniente menor: el lavabo más cercano quedaba doce metros más abajo y yo estaba, no fue muy agradable, embutida en un doble mono de esquí. Pasaron siete horas antes de que un grupo de ingenieros subiera desde el nivel del mar, prepara para por la cúpula del telescopio y liberara el ascensor con una palanca. ¿Por qué nos sometíamos los astrónomos a tales estrecheces?

Como cosmóloga dedicada a la observación, puedo decir que las satisfacciones compensan con creces las incomodidades ocasionales. Pretendemos entender la formación y la evolución del universo. Para ello, recurrimos a observaciones y experimentos que como respuesta nos proporcionan números: los valores de los parámetros cosmológicos. Aprendemos así acerca del universo: cuánta materia contiene, si está curvado o es plano, incluso cómo acabará quizá. Para comprender el significado de estos números y el porqué de que se persiga su determinación, se requiere un breve repaso de la historia.

La moderna ciencia de la cosmología se basa en la relatividad general —la teoría de la gravitación de Albert Einstein—, cuyas ecuaciones describen el comportamiento global de la materia, la energía y el espaciotiempo. Algunas soluciones de estas ecuaciones, especialmente las encontradas por el matemático ruso

Alexander Friedmann en el decenio de 1920, sugieren que el universo nació de una “gran explosión” (*big bang*) en un estado muy denso y caliente. Desde entonces se ha estado expandiendo. La dinámica de la expansión se expresa mediante las ecuaciones de Friedmann, que describen la evolución del universo según su densidad y geometría. Su aplicación exige que sepamos el valor de algunos parámetros que contienen: H , el parámetro de Hubble, que define el ritmo de la expansión; Ω_m , la densidad de masa del universo; y Ω_k , la curvatura del universo. La ecuación no determina sus valores. Hay que medirlos.

Los primeros esfuerzos por realizar esas mediciones se remontan a 1929, año en que Edwin Hubble descubrió que nuestro universo se expandía. Demostró que cuanto más alejada de nosotros esté una galaxia, más deprisa se separa de nosotros. A esta relación velocidad-distancia se la llama hoy ley de Hubble. El ritmo *actual* de expansión es H_0 . Hubble fue el primero en medirlo; dedujo un valor de 500 kilómetros por segundo por megaparsec. (Un parsec es igual a 3,26 años luz.) Por distintas razones, ese resultado caía lejos de la realidad, pero incluso hasta hace poco más de tres años, las estimaciones de H_0 variaban en un factor dos; en general, se hallaban entre 50 y 100 (sus valores se suelen dar sin las unidades de medida).

Esta falta de precisión resultaba muy perjudicial, ya que H_0 es un parámetro clave, necesario para estimar tanto la edad como el tamaño del universo. Un factor de dos en H_0 se convierte en un intervalo inaceptablemente ancho para la edad del universo: entre 10 y 20 mil millones de años. Con tal incertidumbre, pocas restricciones había para los modelos cosmológicos.

Pero ya no es así. H_0 , junto con algunos otros parámetros cosmológicos, va siendo cada vez más susceptible de medidas precisas, al paso que nuevas técnicas nos han permitido observar el universo a distancias mayores de lo que jamás había sido posible. El telescopio espacial Hubble (TEH), puesto en órbita en 1990, es uno de tales avances técnicos. Entre las principales razones por las que se construyó, se encontraba la de



determinar H_0 con mayor precisión. *Key project* (Proyecto clave) se denominó el programa del TEH encaminado a conseguirlo. Participaron 30 astrónomos (yo fui una de los tres responsables) y concluirlo llevó ocho años de trabajo y cerca de 1000 horas del tiempo del TEH. Fue el mayor proyecto de los acometidos por el telescopio en su primer decenio. Quedó acabado en 2001.

Una variable y una constante

En principio, la constante de Hubble debería ser un cálculo sencillo. Sólo requiere la medida de la distancia y la velocidad de una galaxia. Sin embargo, en la práctica, diseñar un método para medir distancias a escalas cosmológicas dista de resultar trivial. Incluso medidas de velocidad que parecen bastante sencillas se complican porque las galaxias suelen tener otras cerca. La mutua interacción gravitatoria perturba sus movimientos. Las consiguientes *velocidades peculiares* difieren de las velocidades de recesión (la *corriente de Hubble*) de las galaxias en el universo en expansión. Hay que descontar o minimizar este efecto.

La velocidad de una galaxia se calcula a partir del desplazamiento

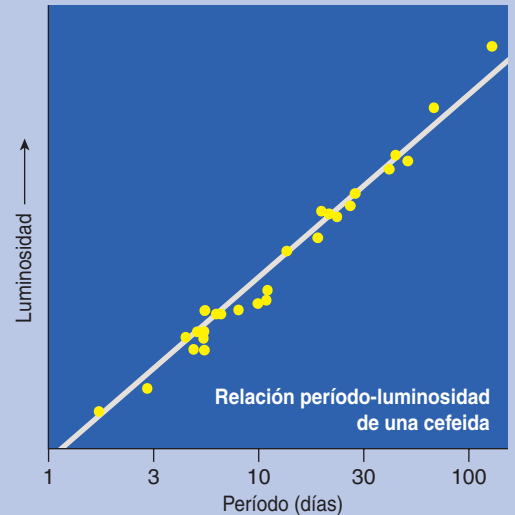
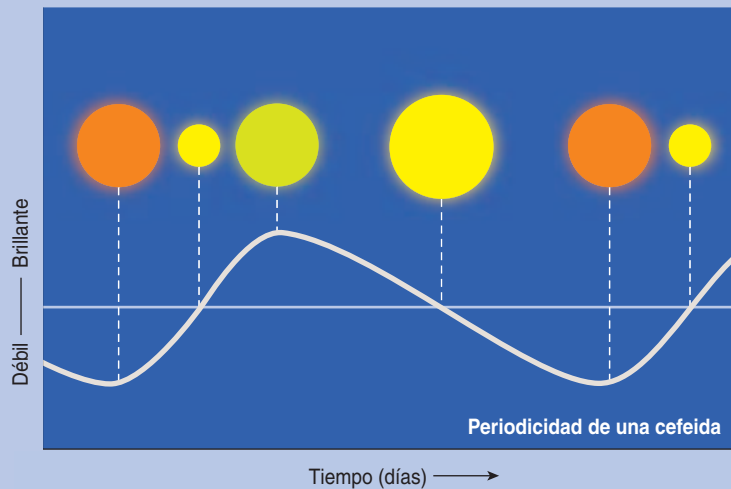
1. LA GALAXIA ESPIRAL NGC 4414 se nos aleja, arrastrada por la expansión del universo. El ritmo al que se expande el universo, descrito por la constante de Hubble, se determina midiendo las velocidades y las distancias de las galaxias. Sin embargo, la medición precisa de galaxias distantes resulta muy difícil. El lanzamiento del Telescopio Espacial Hubble en 1990 facilitó la tarea. La NGC 4414 se halla casi a 19,1 megapársecs de distancia (unos 62 millones de años luz), y se aleja a una velocidad de unos 1400 kilómetros por segundo.

observado de las líneas de su espectro (el patrón de las longitudes de onda de la radiación electromagnética que emite). Las galaxias que se están alejando de nosotros emiten luz desplazada hacia longitudes de onda mayores (más rojas); se estira, o “corre hacia el rojo”, a causa de la recesión. Cuanto mayor sea el desplazamiento de la longitud de onda, mayor será la velocidad de la galaxia. Como la velocidad de recesión es proporcional a la distancia (de nuevo la ley de Hubble), cuanto más lejos se puedan hacer las medidas de distancia, menor será la repercusión proporcional de las velocidades peculiares en la velocidad de expansión global. Aún cabe reducir más la incertidumbre tomando un cierto número de galaxias distribuidas por el cielo, de manera que los movimientos peculiares se promedien.

La medida de las distancias presenta dificultades aún mayores. No existe el equivalente cosmológico de un telémetro terrestre; el universo es tan grande, que ningún método puede medir su tamaño absoluto. Hay que recurrir a una serie de técnicas, cada una de ellas adecuada para un cierto intervalo de distancias. El conjunto de estos métodos construye la “escala de distancias cosmológicas”.

La distancia de las estrellas más cercanas puede medirse mediante la paralaje trigonométrica, que aprovecha el diámetro de la órbita de la Tierra para efectuar, por medio de la simple trigonometría escolar, una triangulación. Las estrellas más lejanas de nuestra galaxia y los objetos extragalácticos requieren otros indicadores de la distancia menos directos. En estos casos, se toman objetos que presentan un brillo cons-

Una alejada candela en la oscuridad



LAS CEFEIDAS son estrellas de una masa que, como poco, triplica la del Sol; han alcanzado un punto inestable en su evolución. Durante la fase cefeida, las atmósferas exteriores de estas estrellas pulsán —cambian de tamaño y de color (*izquierda*) y, por tanto, de brillo o luminosidad— siguiendo un período muy regular, que va de 2 a más de 100 días. (Determina más el brillo de una cefeida su color que su tamaño.) Las estrellas más brillantes tienen períodos mayores, según una relación lineal (*derecha*); gracias a esta relación, se calibra la luminosidad de una estrella a partir de su período. La ley del inverso del cuadrado aplicada a la radiación permite entonces determinar la distancia absoluta de la cefeida. La propia escala de distancias de las cefeidas se calibra indirectamente con las medidas de estas estrellas en la Gran Nube de Magallanes, cuya distancia se determina mediante una combinación de métodos.

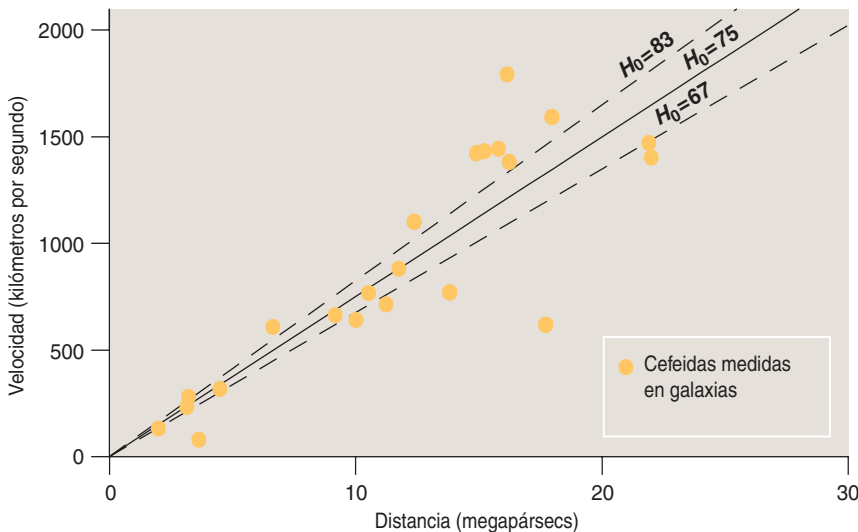
tante —o “candelas estándar”— o que guarde relación con alguna cualidad del objeto que no dependa de la distancia, como el período de oscilación, la velocidad de rotación o el color. Las candelas estándar deben entonces calibrarse por separado con una unidad de medida absoluta, para que así sirvan para determinar la distancia verdadera.

El método más preciso de medir distancias se basa en la observación de las variables cefeidas, estrellas cuyas atmósferas pulsán de una ma-

nera muy regular, con períodos de entre 2 y más de 100 días. En la primera mitad del siglo XX, Henrietta Leavitt descubrió una relación entre el brillo (o luminosidad) medio intrínseco de una cefeida y su período de pulsación: las estrellas más brillantes tienen períodos más largos. Conociendo su brillo intrínseco, los astrónomos pueden deducir la distancia a una cefeida ya que el brillo aparente de la estrella decrece con el inverso del cuadrado de su distancia. Las cefeidas, además, son

estrellas brillantes de por sí; resulta posible observarlas más allá de la Vía Láctea, en otras galaxias. Hubble descubrió galaxias exteriores a la Vía Láctea gracias a sus mediciones de cefeidas. Merced a esas y otras distancias, determinó que el universo se expande.

La clave para observar cefeidas en otras galaxias es un telescopio con suficiente poder de resolución como para distinguirlas de las demás que contribuyen al conjunto luminoso de la galaxia. Aquí es donde el TEH desempeña un papel central. Como orbita por encima de la turbulenta atmósfera de nuestro pla-



2. LAS MEDIDAS DE VELOCIDADES Y DISTANCIAS de galaxias en este diagrama de Hubble, basadas sólo en estrellas variables cefeidas de 22 galaxias, dan una constante de Hubble H_0 de 75 kilómetros por segundo por megapársec (*pendiente de la línea sólida*). Como las cefeidas sólo se pueden medir con precisión hasta distancias de 20 o 30 megapársecs, se combinaron estos resultados con los de otros métodos para determinar un valor más preciso de H_0 . (Las líneas de trazos muestran el valor con errores de más o menos un 10 por ciento.)

neta, su resolución es unas diez veces mejor que la de los telescopios terrestres. Así, abrió la posibilidad de observar cefeidas en un volumen de espacio extragaláctico mil veces mayor que antes. (Recordemos que el volumen aumenta con el cubo de la distancia lineal.) Con el TEH, cabe medir esas estrellas variables hasta en algunos grandes cúmulos de galaxias cercanos, a unos 30 megapársecs de distancia. Para extender la escala de distancias extragalácticas más allá de esta distancia, se necesitan otros métodos.

Tres de ellos se basan en las propiedades globales de las galaxias espirales y elípticas. Por ejemplo, la *relación de Tully-Fisher* establece que la velocidad rotacional de una galaxia espiral está correlacionada con su luminosidad: las galaxias intrínsecamente brillantes giran más deprisa que las débiles. Esta correlación se ha comprobado en centenares de galaxias. Hay una relación análoga para las galaxias elípticas: el intervalo de las velocidades orbitales de las estrellas de las galaxias más brillantes tiende a ser mayor; o, dicho de otra forma, presentan una mayor dispersión de velocidades. Un tercer método aprovecha que cueste más resolver en estrellas una galaxia cuanto más lejos se halle. Por ejemplo, una imagen de una galaxia próxima podría alojar una media de 10 estrellas por píxel (o elemento de imagen), mientras que una galaxia distante tendría quizá mil. La galaxia cercana parecerá granulosa; su brillo superficial global exhibirá unas fluctuaciones de una magnitud considerable. A la galaxia lejana, en cambio, se la verá más difusa. Cada uno de estos métodos puede aplicarse a galaxias que no se encuentren a más de 150 megapársecs de distancia.

Entre los indicadores de distancias cosmológicas más prometedores se halla el brillo máximo de las supernovas del tipo Ia. Se producen estas explosiones cuando el material de una estrella cae sobre la enana blanca con la que forma un sistema binario. Con esa masa extra, la enana blanca acaba por superar el límite de su estabilidad (el *límite de Chandrasekhar*). El siguiente colapso gravitatorio conduce a la combustión explosiva de



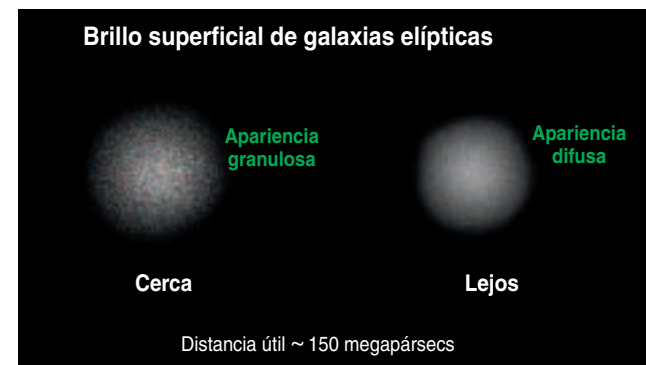
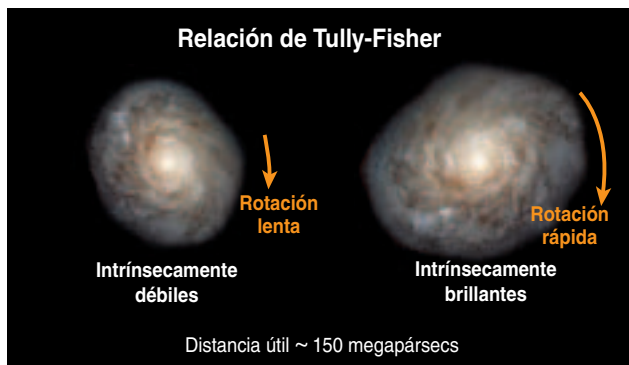
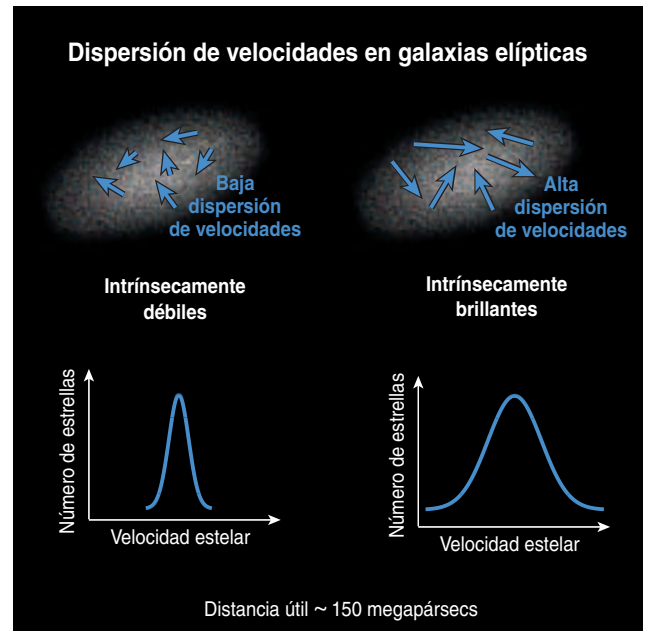
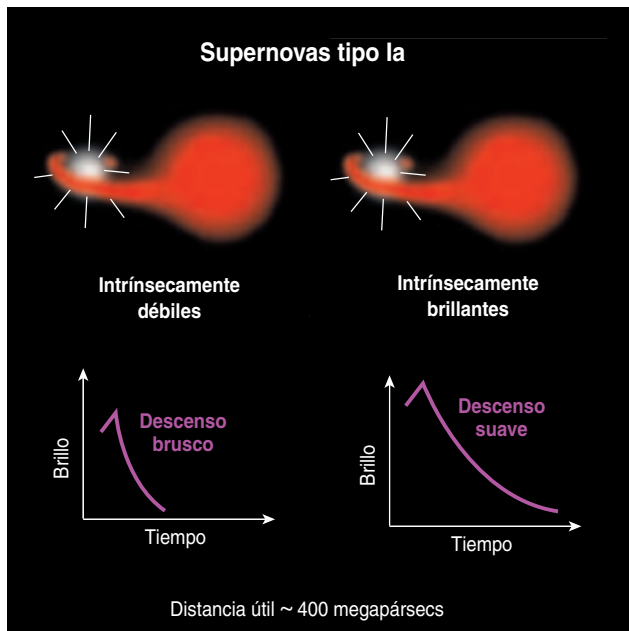
3. LAS SUPERNOVAS DE TIPO Ia, como 1994D (*punto brillante, abajo a la izquierda*), de la galaxia espiral NGC 4526, valen para marcar distancias a partir de la determinación de su brillo relativo. Han desempeñado un papel dual en cosmología. Las que se encuentran a menos de 400 megapársecs se usan para estimar H_0 , pero más allá de esas distancias la representación del diagrama de Hubble de sus velocidades y distancias deja de ser lineal. Este alejamiento de la linealidad en el universo remoto revela que el ritmo de expansión del universo se está acelerando, un fenómeno que pocos se esperaban.

su carbono. La enana estalla entonces. Radiará brevemente tanto como una galaxia entera. La forma de la *curva de luz* de la supernova (la gráfica de cómo cambia su brillo con el tiempo) indica su luminosidad máxima: las supernovas brillantes tienden a presentar curvas más suaves (de la misma manera que los períodos de las cefeidas brillantes tienen períodos más largos) y la luminosidad relativa de la supernova se puede determinar con bastante precisión. Como las supernovas son tan brillantes, valen para medir H_0 allá donde las velocidades de recesión se acercan a los 30.000 kilómetros por segundo (a distancias de unos 400 megapársecs) y los efectos del movimiento peculiar de las galaxias se reducen a menos de un uno por ciento. (Las velocidades peculiares de las galaxias vienen a ser de entre 200 y 300 kilómetros por segundo.)

También sirve para evaluar distancias otra clase de explosiones estelares, las supernovas de tipo II, que se producen en estrellas de diversos tamaños, pero siempre de masa muy elevada. Muestran un intervalo de luminosidad más amplio que las supernovas Ia. Aunque no son candelas estándar, la espectros-

copía de sus atmósferas en expansión y las medidas fotométricas de su tamaño angular determinan a qué distancia se encuentran, mientras sea inferior —al menos con los medios actuales— a 200 megapársecs.

Con estos indicadores se miden las distancias relativas de las galaxias. Sin embargo, como con cualquier mapa, necesitamos una escala absoluta. La calibración de estos métodos se basa hoy en día en la escala de distancias de las cefeidas —el escalón más bajo de la escala de distancias—; los otros métodos se consideran secundarios. (En principio, las supernovas de tipo II pueden proporcionar medidas de distancia absolutas, pero en nuestro trabajo las calibramos por medio de las cefeidas.) Con una excepción, todos los indicadores de distancia secundarios se calibran directamente midiendo las distancias a las cefeidas de galaxias que muestren una o varias de las propiedades empleadas por el método secundario. La técnica de la dispersión de velocidades en las galaxias elípticas no se puede calibrar directamente con las cefeidas. Ese método se calibró indirectamente mediante las distancias a cefeidas de cúmulos de galaxias donde se encuentran las ga-



4. LOS INDICADORES DE DISTANCIAS SECUNDARIOS se utilizan para medir la constante de Hubble en el universo lejano (hasta 400 megapársecs o 13.000 millones de años luz de distancia). Cada uno de estos cuatro métodos proporciona una manera independiente de medir la distancia relativa de una galaxia. En cada caso, se correlaciona alguna propiedad medible con el brillo intrínseco o la distancia relativa del objeto. Así, las curvas de luz de las supernovas del tipo Ia intrínsecamente brillantes tienen una

caída suave (*arriba a la izquierda*), mientras que las estrellas de galaxias elípticas intrínsecamente brillantes exhiben un intervalo de velocidades más amplio (*arriba a la derecha*), las galaxias espirales intrínsecamente brillantes giran más deprisa (*abajo a la izquierda*) y las galaxias elípticas alejadas parecen más difuminadas que las más cercanas (*abajo a la derecha*). Las distancias relativas determinadas con estos métodos se calibran (directa o indirectamente) con la escala de distancias de las cefeidas.

laxias elípticas; ninguno padece de mayor incertidumbre.

$H_0 \approx 72$

Aunque cada uno de los métodos de medida de distancias secundarios proporciona por sí mismo una estimación de H_0 , el *Key project* del TEH se concibió de manera que no corriese el riesgo de apoyarse en un solo método: combinó los resultados de diversos planteamientos. A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que existe un razonable grado de coincidencia en el valor de H_0 obtenido por los distintos

métodos: el de las cefeidas da 75; las supernovas del tipo Ia, 71; la relación de Tully-Fisher, 71; la dispersión de velocidades en galaxias elípticas, 82; las fluctuaciones del brillo superficial, 70; y las supernovas de tipo II, 72. Una media ponderada de estos valores da un resultado para H_0 de 72 ± 8 . Esta convergencia se puede apreciar gráficamente (*véanse las figuras 5 y 6*) y es especialmente notable para las galaxias con velocidades de desplazamiento hacia el rojo de más de 5000 kilómetros por segundo (es decir, a más de unos 70 megapár-

secs de distancia), en las que los efectos de los movimientos peculiares son pequeños, comparados con la corriente de Hubble.

¿Qué significado tiene ese 72? Recordemos que H_0 es el ritmo actual de expansión del universo. Aunque la constante de Hubble constituye el parámetro principal en el cálculo de la edad del universo, la determinación de una edad precisa requiere que sepamos cómo el ritmo de expansión actual difiere del ritmo en el pasado. Si la expansión se ha frenado o acelerado, los cálculos de la edad del

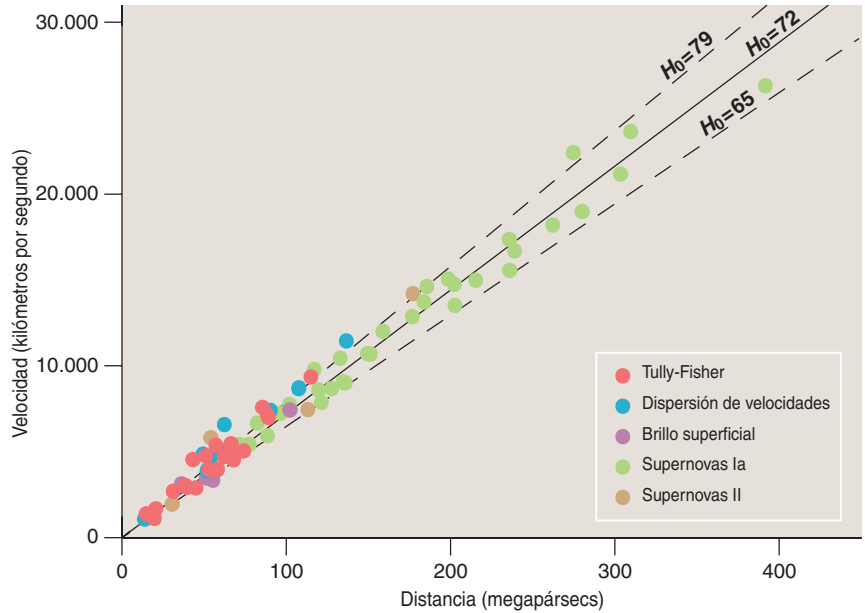
5. EL DIAGRAMA DE HUBBLE de cinco indicadores de distancia secundarios indica un valor medio combinado de la constante H_0 de 72. La integración de este valor de H_0 en la ecuación de Friedmann sugiere que el universo se ha estado expandiendo durante unos 13.000 millones de años.

universo lo deben tener en consideración.

Hasta hace poco, se pensaba que la fuerza gravitacional de la materia estaba frenando la expansión del universo. Según este punto de vista, la expansión habría sido más rápida en el pasado, de manera que la edad estimada del universo sería menor que si se hubiera estado expandiendo siempre al mismo ritmo (debido a que un ritmo más rápido habría permitido que el universo alcanzara el “mismo lugar” en menos tiempo). Y esta desaceleración es lo que se esperaba encontrar cuando se mirase más lejos en el espacio y más atrás en el tiempo.

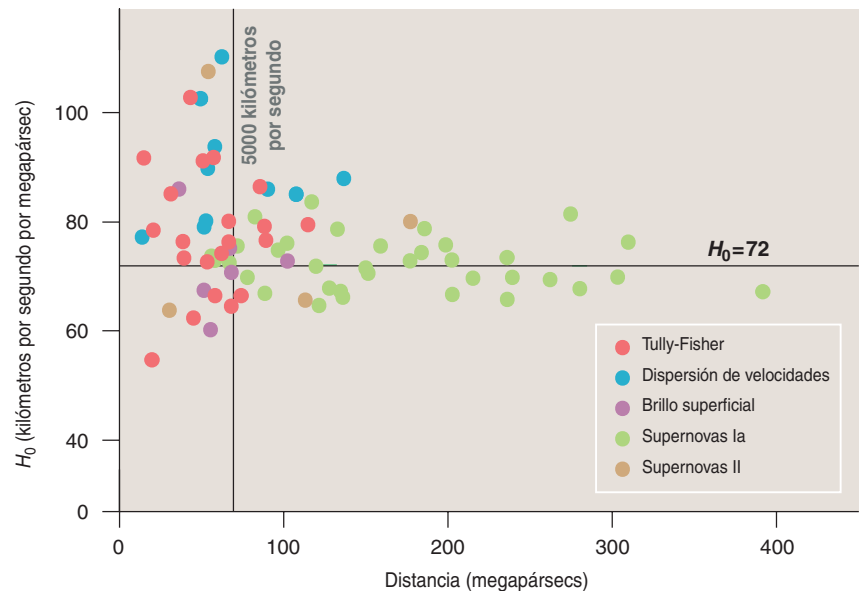
Se comprende que algo falla en esta idea en cuanto se calcula la edad del universo suponiendo que se está frenando. Con una constante de Hubble de 72, un universo en desaceleración sólo tiene 9000 millones de años. El problema es que conocemos estrellas de nuestra galaxia que, por lo menos, existen desde hace 12.000 millones de años. Como las estrellas no pueden ser más viejas que el universo, salta a la vista que algún fallo ha de haber. En el buen acuerdo entre las diversas maneras de estimar las edades de las estrellas viejas se fundan los astrónomos para aceptar que las edades estelares no son erróneas.

La resolución del problema se encuentra en una propiedad recientemente descubierta del propio universo. En 1998, dos grupos de astrónomos que estudiaban supernovas muy lejanas comunicaron un hallazgo notable: las supernovas del tipo Ia más distantes parecen más débiles de lo esperado. Aunque es posible (pero no hay pruebas) que las supernovas fueran más débiles de por sí en el pasado remoto, la explicación más sencilla es que estas explosiones se encuentran realmente más lejos de lo que se hallarían



si el universo se estuviera frenando. En otras palabras: las supernovas de tipo Ia dan a entender que la expansión del universo se acelera. Nuevos estudios han corroborado este resultado. Por eso, muchos creen ahora que debe de haber en el universo una fuerza repulsiva hasta ahora desconocida, que actúa contra la gravedad. Se la denomina *energía oscura*.

Hasta cierto punto, la existencia de la energía oscura fue anticipada por Einstein. Incluso antes de que se descubriera la expansión del universo, las ecuaciones de Einstein que describían la evolución del universo contenían un término que él llamó “constante cosmológica” (Λ). Como según los astrónomos de su tiempo el universo no se movía, introdujo el término para *evitar* cualquier ex-



6. EL VALOR DE LA CONSTANTE DE HUBBLE converge hacia 72 a medida que las velocidades de recesión de las galaxias se miden a distancias cada vez mayores mediante indicadores de distancia secundarios. Más allá de una velocidad de recesión de unos 5000 kilómetros por segundo (a una distancia de unos 70 megapársecs), los efectos de los movimientos peculiares de una galaxia (debidos a las interacciones gravitacionales con otras galaxias) se reducen a menos del 5 por ciento de su velocidad total. Estas galaxias alejadas proporcionan una medida más precisa de H_0 .

LA ECUACION DE FRIEDMANN Y LOS PARAMETROS COSMOLOGICOS

A fin de simplificar sus cálculos, Albert Einstein supuso que el universo era a la vez homogéneo (que tenía la misma densidad en todas partes) e isótropo (que todas las direcciones eran indistinguibles). Las observaciones modernas ratifican que estas hipótesis también son muy buenas aproximaciones del universo real. Según la teoría general de la relatividad, la evolución de un universo así se puede describir mediante la ecuación de Friedmann:

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho_m}{3} - \frac{k}{r^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Parámetro de Hubble = Densidad de masa - Curvatura del universo + Densidad de energía del vacío

en la que H es el parámetro de Hubble, G es la constante de la gravitación de Newton, ρ_m es la densidad de masa media del universo, k es la curvatura del universo, r es el factor de escala (la distancia relativa de las galaxias en función del tiempo) y Λ es la constante cosmológica (introducida por Einstein). Esta ecuación nos permite determinar tanto la edad como el tamaño del universo, siempre y cuando midamos algunos de los parámetros.

Si dividimos los dos lados de la ecuación por H^2 , obtenemos la densidad de masa, $\Omega_m = 8\pi G\rho_m/3H^2$; el término de curvatura, $\Omega_k = -k/r^2H^2$; y la densidad de energía del vacío $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H^2$. Esto da la igualdad $\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$.

Las medidas del fondo cósmico de microondas indican que el universo es plano, $\Omega_k = 0$, de manera que el término de curvatura desaparece y la evolución del universo queda descrita sólo por Ω_m y Ω_Λ . Las observaciones recientes sugieren que el universo no está dominado por la materia, sino más bien por la energía del vacío, que ejerce una presión negativa que acelera su expansión.

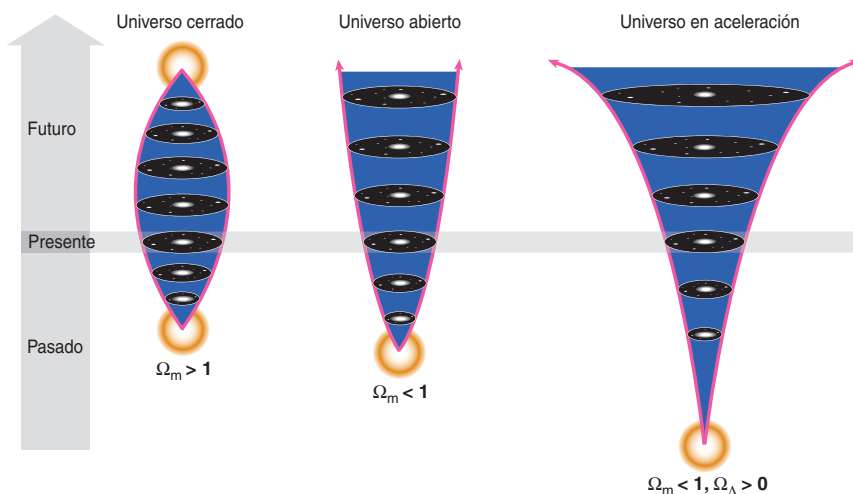
pansión o contracción debidas a los efectos de la gravedad. (La constante cosmológica, Λ , aparece también en la ecuación de Friedmann.) Cuando Hubble descubrió la expansión, parece que Einstein dijo que la constante cosmológica había sido su mayor equivocación: ya no parecía necesaria; había perdido, además, la oportunidad de predecir ese nuevo hallazgo.

Hasta hace unos cuantos años, se solía igualar Λ a cero en la ecuación de Friedmann. Sin embargo, el descubrimiento de que el universo se está acelerando apunta a que, después de todo, ese término quizá sea necesario. La constante cosmológica podría representar la energía oscura o la densidad de energía del vacío (Ω_Λ). Ω_Λ tiene algunas propiedades muy curiosas. Como la materia, curva el espacio y contribuye así a la geometría global del universo, pero al contrario que aquella ejerce una "presión negativa" que provoca la expansión acelerada que observamos.

¿Cómo calculamos la edad de expansión del universo a la luz de estos resultados? El uso de la ecuación de Friedmann no sólo exige una precisa estimación de H_0 , sino también de los parámetros de densidad, Ω_m y Ω_Λ , y el término de curvatura Ω_k . La teoría inflacionaria (un modelo cosmológico muy exitoso, según el cual hubo una fase de expansión rapidísima muy al inicio del universo) y las observaciones de la radiación cósmica de fondo indican que el universo es "plano", es decir, que $\Omega_k = 0$; el término de curvatura desaparece. En un universo plano (por definición) $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$.

La densidad de masa del universo, Ω_m , debe determinarse mediante la observación y el experimento. No es fácil. Las velocidades de rotación de las galaxias y la dinámica de los cúmulos de galaxias sugieren que la materia visible del universo, la materia de que están hechas las estrellas y las nebulosas brillantes, constituye sólo una frac-

ción de su masa total. El resto parece corresponder a alguna forma de material invisible, o *materia oscura*, que interacciona gravitatoriamente con esos cuerpos luminosos y altera así la dinámica de las galaxias y de los cúmulos de galaxias. Las estrellas y las nebulosas brillantes parecen comprender tan sólo un 1 por ciento de la materia y la energía del universo. Cuerpos no luminosos (parte de la materia oscura), bien semejantes a planetas, bien gases intergalácticos templados, podrían sumar otro cuatro por ciento. Toda esta materia normal (formada por bariones, es decir, sobre todo por protones y neutrones) no totaliza más del 5 por ciento de la densidad crítica. Parece que otro 25 por ciento (el resto de la materia oscura) se trata de formas exóticas de materia no bariónica; se cree que está formada por partículas aún no conocidas que interaccionan con la materia bariónica por medio, casi exclusivamente, de



7. EL CURSO DE LA EVOLUCIÓN del universo en expansión depende de la cantidad total de masa que contiene. El parámetro Ω_m es la razón de la densidad de masa actual en el universo con relación a su valor crítico, que establece la divisoria entre un universo que se expande indefinidamente y uno que finalmente se contrae de nuevo. El valor crítico se define como $\Omega_m = 1$ y corresponde a que haya suficiente materia en el universo para evitar su eterna expansión o su derrumbe final sobre sí mismo. En un universo "cerrado", con $\Omega_m > 1$, el tirón gravitacional de la materia hace que el universo finalmente colapse y sufra una "gran implosión". En un universo abierto, con $\Omega_m < 1$, no hay suficiente materia como para frenar gravitacionalmente la expansión, de manera que ésta continuaría para siempre. Se ha determinado que vivimos en un universo con $\Omega_m < 1$, pero una energía oscura (o del vacío) ($\Omega_\Lambda > 0$) parece que está acelerando la expansión. Cada uno de estos modelos implica también una edad distinta del universo, basándose en su actual ritmo de expansión. (Adaptada de una ilustración de la NASA.)

la gravedad. Esto lleva la densidad total de masa del universo al 30 por ciento (o sea, $\Omega_m = 0,3$). De manera que, en un universo plano, la densidad de energía del vacío debería rondar el 70 por ciento ($\Omega_\Lambda = 0,7$) de la densidad total de masa y energía. Integrando la ecuación de Friedmann con estos valores de las densidades y un valor de H_0 de 72, deducimos una edad del universo de unos 13.000 ± 1000 millones de años, un valor que concuerda con las edades de las estrellas más viejas.

¿Qué toca ahora?

Hace algunos decenios, el universo parecía un lugar mucho más sencillo. No había en él, se creía, sino materia ordinaria, y para describir su expansión bastaba con la constante de Hubble y la densidad de materia. Hoy hay pruebas convincentes de que la materia, bariónica y no bariónica, abarca alrededor de un tercio de la densidad total de masa y energía, y de que el universo se está acelerando, señal de la existencia de una misteriosa energía oscura a la que se deberían los

dos tercios restantes. Hasta ahora, la teoría no puede proporcionar una explicación de la energía oscura. Peor aún: cálculos basados en la física de partículas discrepan de las observaciones (y ya era así incluso cuando se atribuía un valor nulo a la constante cosmológica). Las observaciones astronómicas, pues, anuncian una física radicalmente nueva para un universo donde la naturaleza del 95 por ciento de la masa y la energía total es desconocida.

Es un tiempo apasionante para la cosmología. Quizás han pasado los días del astrónomo solitario sentado en un cubículo frente a un foco primario. Pero un conjunto de observaciones y experimentos planificados están conduciéndonos a una nueva era de observaciones con una precisión sin precedentes. A finales del decenio llegarán mejoras significativas en la medición de la constante de Hubble con el lanzamiento de nuevos satélites interferométricos: la Misión Interferométrica Espacial o SIM, de la NASA, y GAIA, un proyecto de la Agencia Europea del Espacio. Estos instrumentos mejorarán entre cien y mil veces la precisión de las determinaciones trigonométricas de las distancias paralácticas a las cefeidas de nuestra galaxia, que sirven para calibrar las cefeidas extragalácticas. La calibración de las cefeidas es la mayor de las incertidumbres que quedó en las medidas de H_0 del *Key project*.

Muchos experimentos buscan unas partículas que interaccionan débilmente de las que se supone que podrían constituir la materia oscura. Grandes equipos miden con meticulosidad la aceleración del universo y se piensa en construir un satélite dedicado, principalmente, a esa tarea. En las pequeñas fluctuaciones de la radiación de fondo cósmica de microondas hay información codificada acerca de todos estos parámetros cosmológicos. Las mediciones de esa radiación por el satélite WMAP, combinadas con otros análisis, han arrojado una H_0 muy similar a la del *Key Project*: el valor central, dentro del margen de error experimental, es 71.

La autora

Wendy Freedman es astrónoma de los Observatorios Carnegie, en Pasadena, California. Es miembro de la Academia de Ciencias.

Bibliografía complementaria

- THE MEASURE OF COSMOLOGICAL PARAMETERS. W. L. Freedman en *Proceedings of the Inaugural Conference of the Michigan Center for Theoretical Physics*; dirigido por J. J. Duff y J. T. Liu. World Scientific; Singapur, 2003.
- FIRST YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: DETERMINATION OF COSMOLOGICAL CONSTANTS. D. N. Spergel *et al.* en *Astrophysical Journal Supplement Series* 148, pág. 175; 2003.
- MEASURING AND UNDERSTANDING THE UNIVERSE. W. L. Freedman and Michael Turner en *Reviews of Modern Physics* 75, 1433-1447; 2003.