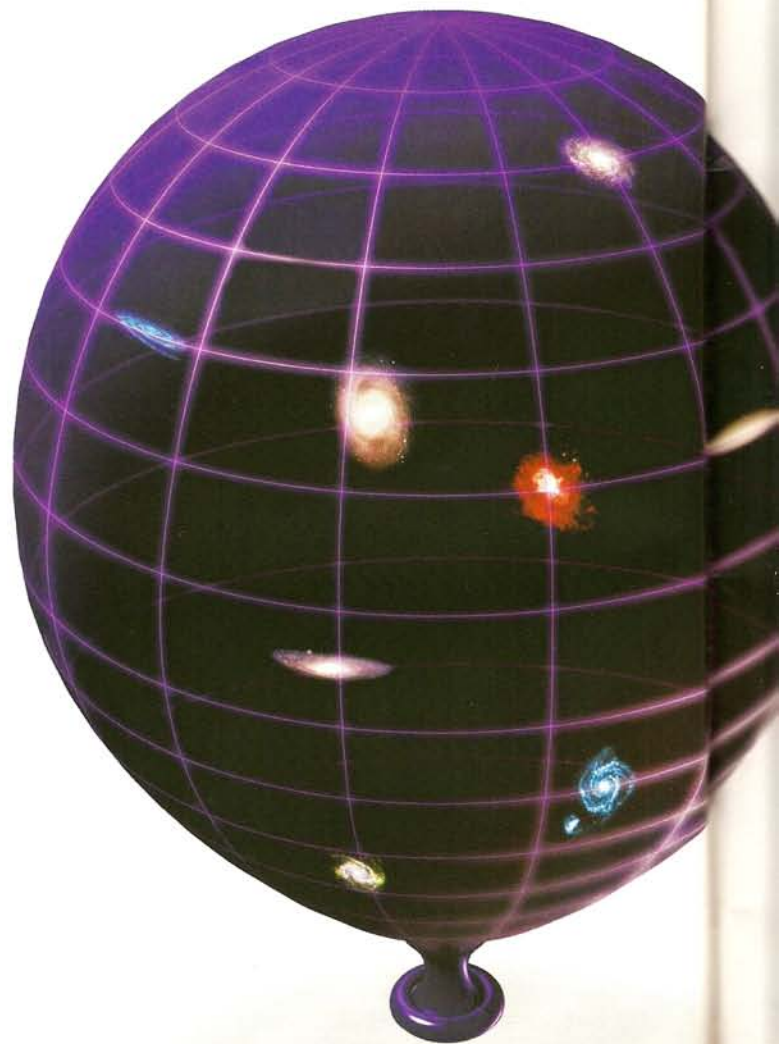
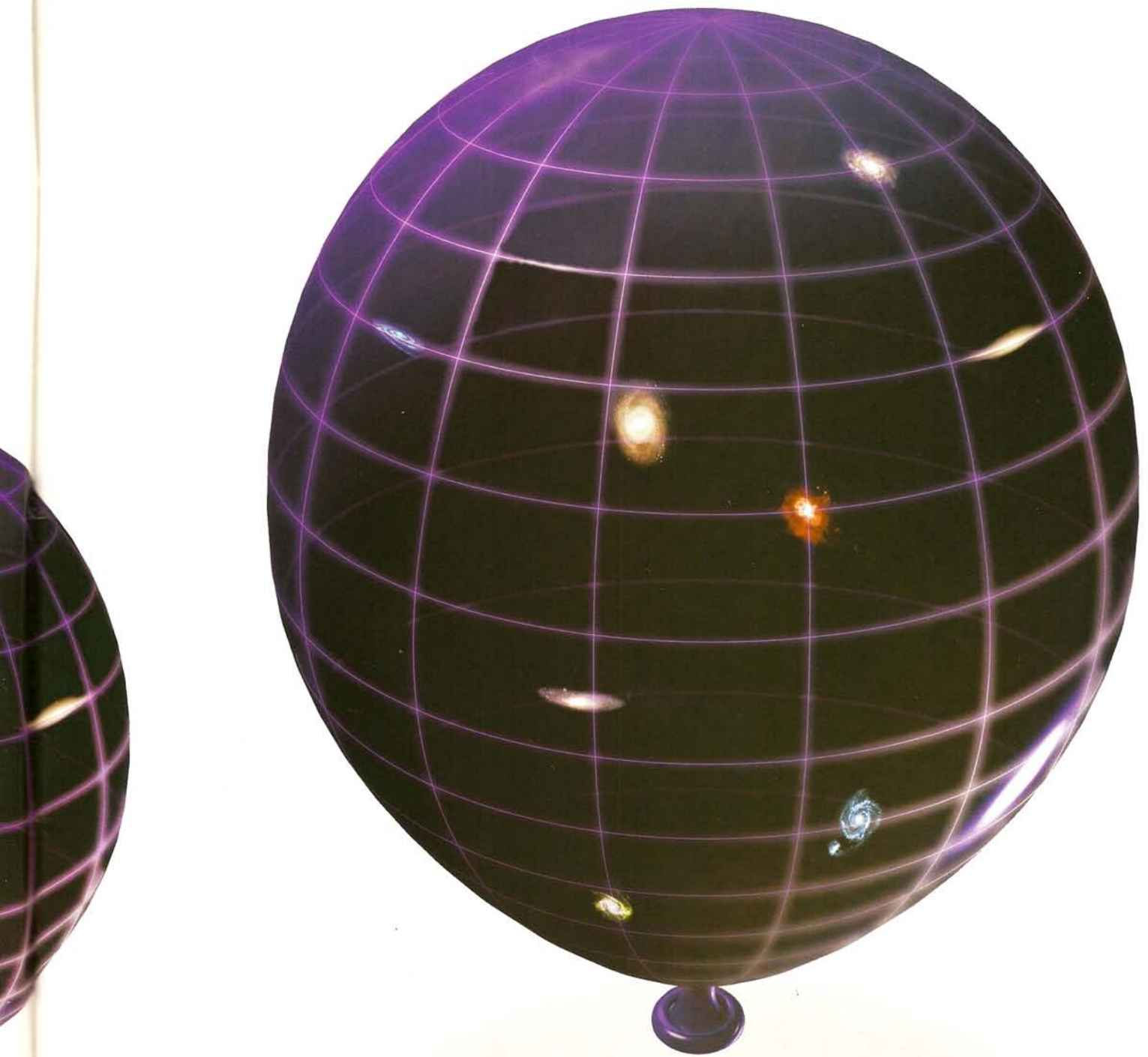


Las paradojas de la gran explosión

¿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





SLIM FILMS

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.

¿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 pertenece, pero los cúmulos de galaxias se hallan, a casi todos los efectos, en reposo. La expresión “en reposo” admite una descripción rigurosa. La

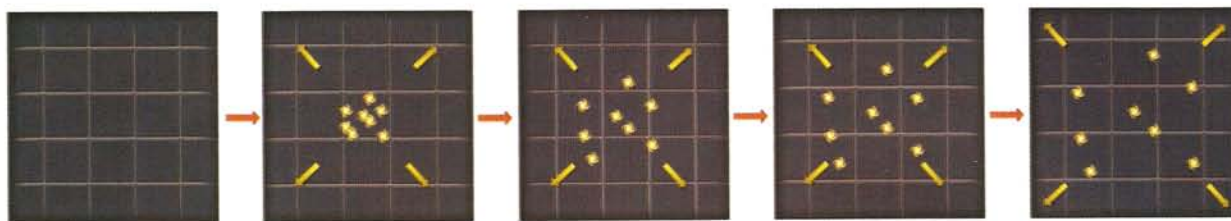
Resumen/Confusión cósmica

- 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 hartamente 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.

¿QUE TIPO DE EXPLOSION FUE LA GRAN EXPLOSION?

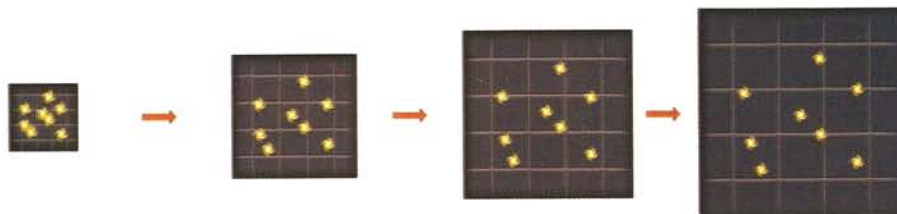
FALSO: La gran explosión fue como una bomba que estalla en un lugar determinado de un espacio por lo demás vacío.

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.

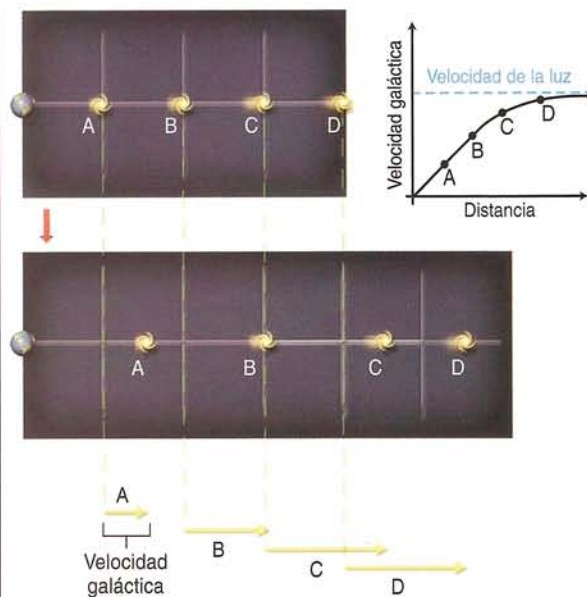
La omnipresencia de la gran explosión persiste, sin importar el tamaño del universo, ni su carácter de finito o infinito. Los cosmólogos afirman en ocasiones que el universo tuvo el tamaño de un pomelo para indicar que el universo que hoy contemplamos tuvo el tamaño de un pomelo.

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-

¿PUEDEN LAS GALAXIAS ALEJARSE MAS RAPIDO QUE LA LUZ?

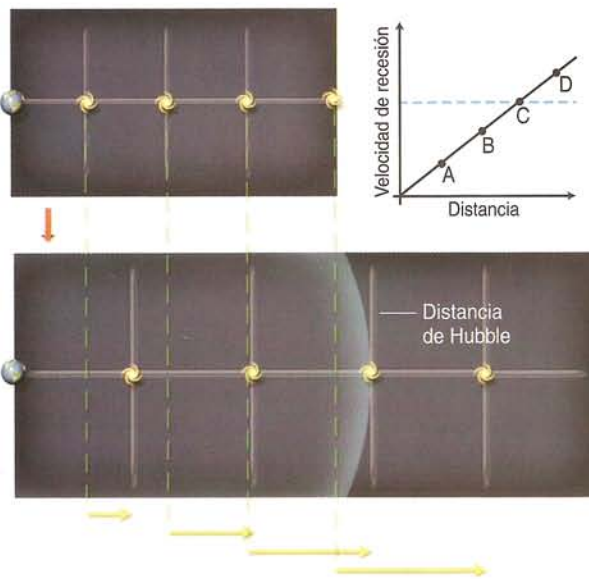
FALSO: Por supuesto que no. La teoría especial de la relatividad lo prohíbe.

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 segun-

do, 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 en-

tre 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 cons-

tante 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.

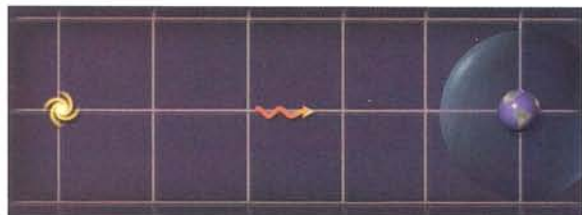
La galaxia de la que proceden, por el contrario, quizá seguiría alejándose a una velocidad mayor que la de la luz. Por tanto, podemos observar la luz de galaxias que han estado siempre y estarán siempre moviéndose más deprisa que la luz. Otra manera de expresarlo: la distancia de Hubble no es fija y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

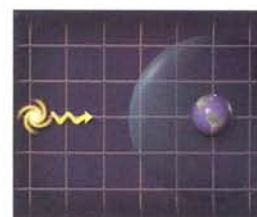
FALSO: Por supuesto que no. La luz de esas galaxias nunca nos alcanza.

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.

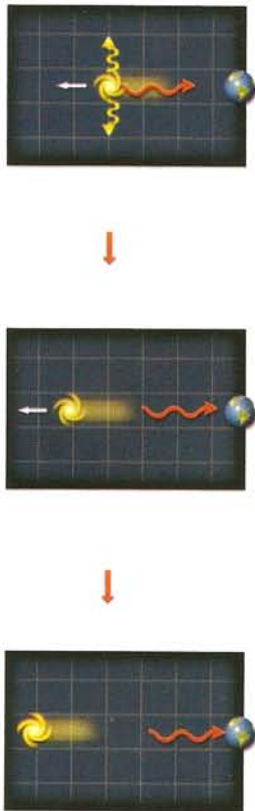
El fotón es en principio incapaz de alcanzarnos. Pero la distancia de Hubble no es constante; está en aumento; puede englobar al fotón. Una vez que esto ocurra, el fotón se nos acercará y con el tiempo nos alcanzará.



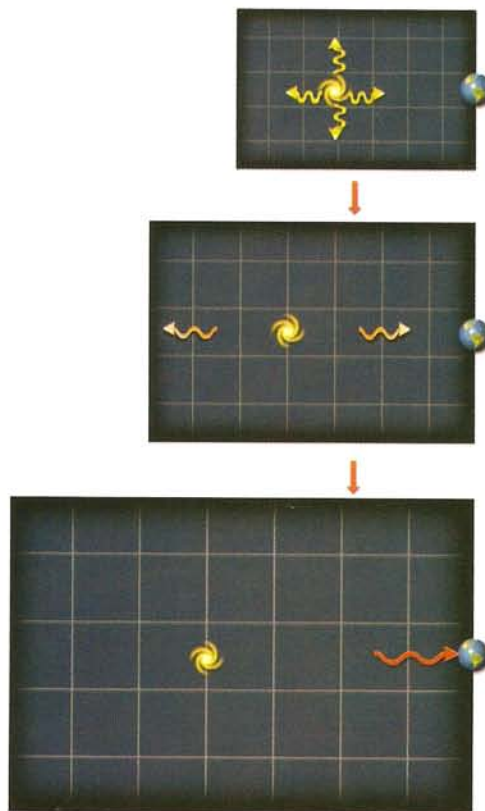
¿POR QUE EXISTE UN CORRIMIENTO HACIA EL ROJO COSMICO?

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.

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 cre-

cer 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?

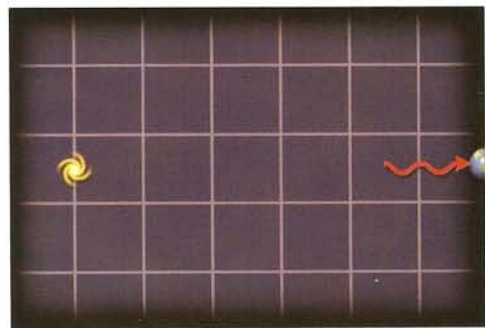
FALSO: El universo tiene 14.000 millones de años, por lo que el radio de la parte observable es 14.000 millones de años-luz.

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.



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.



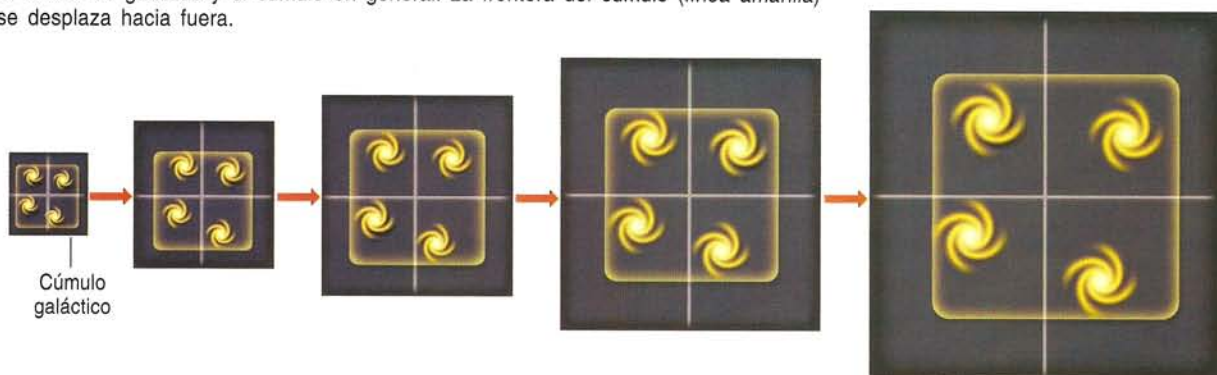
46.000 millones de años-luz

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?

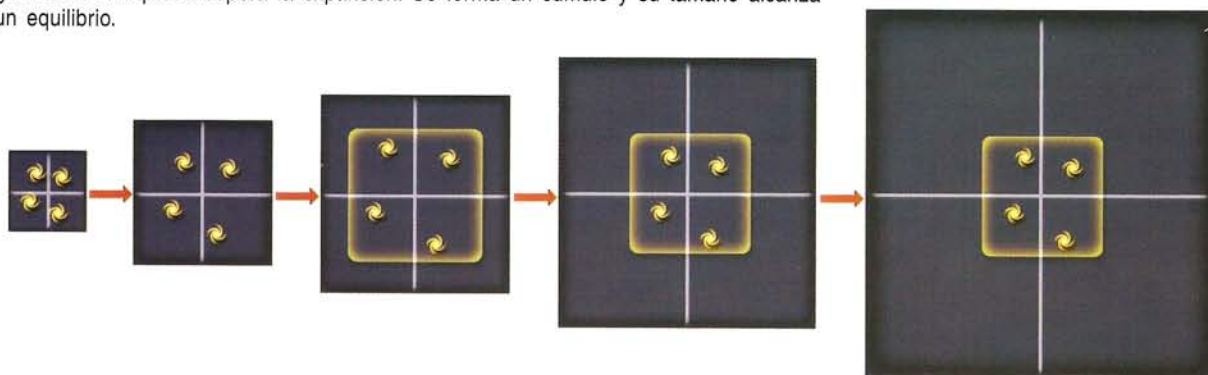
FALSO: Sí. La expansión hace que el universo y todo su contenido crezca.

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. Srikanand, 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.