

# Historia de la formación de las estrellas

Los distintos procesos de formación de las galaxias, grandes y pequeñas, condicionaron el ritmo del nacimiento estelar

Alan Heavens

**M**ás de nueve mil trillones ( $9 \times 10^{21}$ ) de estrellas se han formado en el universo observable en los 13.700 millones de años que lleva existiendo. A pesar de esa profusión de estrellas, el universo fue bastante oscuro durante sus primeros mil millones de años, según los modelos cosmológicos. En esa época opaca contaba con nubes de gas y materia oscura, y poco más; las primeras estrellas no se formaron hasta pasados cientos de millones de años. Una vez que la maquinaria cósmica productora de estrellas se puso en marcha, la fabricación estelar prosiguió a un ritmo prodigioso. Pero, ¿se mantuvo constante a lo largo de la historia del universo? ¿O se trató de una explosión de natalidad?

Esas preguntas se refieren a algo más que meras curiosidades cósmicas. La explosiva natalidad subsecuente a la Segunda Guerra Mundial reflejaba profundos cambios sociales y económicos en los países occidentales. En una suerte de paralelismo, las distintas tasas de formación estelar nos informan de las circunstancias físicas que rodean al nacimiento de las estrellas. A esas “circunstancias físicas” las llamamos galaxias: la frecuencia de la producción de estrellas está íntimamente ligada al proceso de formación galáctica.

Con la ayuda de los telescopios y ordenadores actuales podemos dar respuestas aceptables a esas preguntas. Con mis colaboradores algo he aportado a la determinación de la historia de la formación de estrellas en el universo. Nos hemos apoyado en el análisis de la luz estelar de 96.545 galaxias. Los resultados sorprenden: a primera vista, parecen contradecir algunos de los principios que rigen la configuración de las galaxias. La paradoja encuentra explicación si se presupone que no todas las galaxias siguieron la misma pauta de formación.

## El universo fabrica estructuras

Desde que Vesto Slipher se percató en 1917 de que las líneas espectrales de la luz que recibimos de una galaxia están sistemáticamente desplazadas hacia mayores longitudes de onda (más rojas), contamos con pruebas firmes de que el universo se halla en expansión. La naturaleza de esta expansión depende de la cantidad de masa que hay en el universo; de ahí el interés por determinar la densidad de la materia. Las observaciones recientes de explosiones de estrellas lejanas, de la macroestructura del universo y de la radiación residual de la gran explosión —el fondo cósmico de microondas— nos han mostrado que el universo no cuenta con la materia suficiente para detener la expansión. Es más, la mayor parte de



la materia parece tener una extraña naturaleza. Apenas el 4 por ciento de la densidad consta de neutrones, protones y electrones, la materia de que están hechos los planetas y de la que estamos hechos nosotros. Un 23 por ciento consiste en materia oscura, una forma de materia extraordinaria y desconocida que no se observa en la Tierra. Y el 73 por ciento es energía oscura, una “sustancia” aún más rara: como presenta “gravedad repulsiva”, acelera la expansión del universo.

A pesar de los aspectos que siguen envueltos en el misterio, conocemos los mecanismos de formación de las estructuras que apreciamos hoy. Las observaciones del fondo cósmico de microondas, que data de cuando el universo tenía sólo 300.000 años, muestran la falta de uniformidad de éste en su primera época. Las han obtenido diversos instrumentos instalados en tierra, en globos y en el espacio; el más famoso de ellos fue el Explorador del Fondo Cósmico (COBE), de principios de los noven-

1. LA GALAXIA ESPIRAL NGC 3370 contiene estrellas jóvenes, en las regiones más azules, y una población más envejecida en el centro amarillento. Las diferencias de color indican las temperaturas y edades de las estrellas. El estudio del rango de colores emitido por la galaxia —su espectro— permite determinar la edad relativa de las estrellas y deducir así la tasa de formación estelar en diferentes épocas de la historia galáctica. El promedio de los resultados de muchas galaxias proporciona la historia de la formación de estrellas en el universo.

ta; ahora destaca la sonda Wilkinson para la Anisotropía de Microondas, de mayor resolución que COBE. Esas mediciones han descubierto unas pequeñas irregularidades en la densidad del universo primigenio. Se trataba de irregularidades inestables: al tener mayor densidad que otras regiones, su gravedad era un poco superior, por lo que atraían hacia sí materia y la acumulaban. Mediante la combinación de una acreción suave y la fusión de pequeñas unidades, se constituyeron, andando el tiempo, los objetos densos.

Aunque parezca paradójico, para que una estrella tan caliente se forme, ha de enfriarse primero el gas.

Las nubes grandes de gas se sostienen por presión si están calientes, pero si el gas se enfría, entonces la presión se relaja y la nube colapsa. A las escalas más pequeñas, las fases últimas de ese derrumbe calientan la nube y, si la temperatura alcanza varios millones de grados, comienzan las reacciones nucleares y el objeto se convierte en una estrella.

A mayores escalas, el proceso de colapso sucede de abajo arriba. Primero colapsan objetos no muy grandes (de alrededor de un millón de veces la masa solar). A medida que el gas denso se enfría, se fragmenta en nubes más pequeñas, cuyo derrumbe crea estrellas. Estos cúmu-



2. LAS ESTRELLAS CALIENTES DE GRAN MASA, como las del cúmulo de las Pléyades, emiten luz ultravioleta. Las estrellas de masa imponente, como éstas, tienen una vida corta; la presencia de luz ultravioleta en una galaxia apunta a una formación reciente de estrellas en su seno. El método tradicional de medición de la tasa de formación de estrellas explota esta propiedad y analiza la emisión ultravioleta de las galaxias lejanas.

los de muchas estrellas se agrupan, por efecto de la gravedad, en sistemas mayores, que pueden también mezclarse entre sí. Y de ese modo continúa el proceso. Jerárquicamente, se van construyendo sistemas de tamaño creciente: galaxias pequeñas, galaxias grandes, grupos de galaxias, cúmulos de galaxias y supercúmulos galácticos. Hoy día, las estructuras de mayor tamaño que han sufrido su desplome absoluto son los cúmu-

los de galaxias. Contienen materia oscura, gas y galaxias repletas de estrellas; en total suman cientos de billones de masas solares.

Gracias a este esquema jerárquico de la formación de galaxias conocemos el mecanismo de rotación de las galaxias espirales, por qué hay galaxias de masa muy dispar y por qué existe un límite para los mayores objetos observados. Cierta es que muchos detalles se nos escapan en su

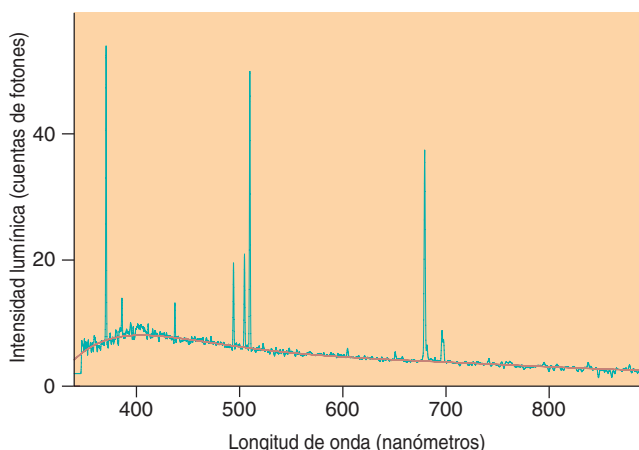
pleno sentido. La formación de una galaxia es un proceso complejo; nos hallamos lejos de dominar el proceso a través del cual transforma su gas en estrellas. Así, aunque sabemos que las estrellas influyen en el gas mediante las supernovas y los vientos en un proceso de “retroalimentación”, y que la retroalimentación puede favorecer o inhibir la formación estelar, carecemos de estimaciones fiables de los mecanismos involucrados.

Algunos astrónomos y cosmólogos intentamos determinar el momento en el que el universo creó la mayoría de las estrellas y la trayectoria evolutiva y cambiante de esa tasa de formación.

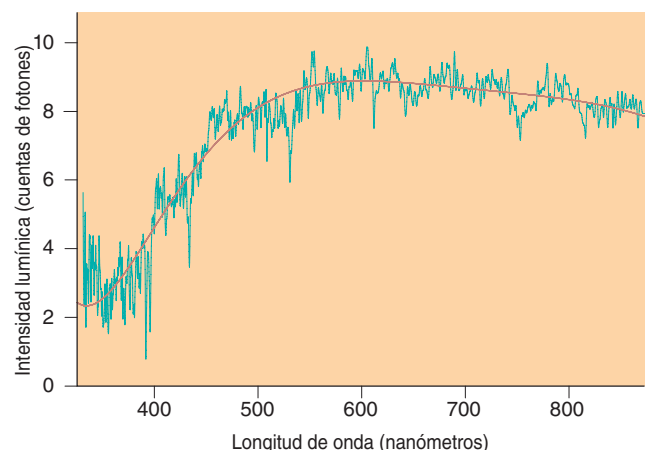
### Fósiles contra recién nacidos

El problema de averiguar cuántas estrellas se han ido formando con el tiempo recuerda al de establecer la historia de la tasa de natalidad humana. Se podría indagar en los archivos históricos del registro civil o sacar instantáneas de personas y estimar su edad. Si se utiliza el segundo método se deberían incluir todos los lugares donde haya seres humanos, tumbas incluidas. En el primer método importa disponer de unos registros históricos exhaustivos. Si no hay errores, los dos métodos deberían producir resultados análogos.

De igual forma, la historia de la tasa de formación estelar puede determinarse de dos maneras. El método tradicional se basa en la velocidad finita de la luz, que nos permite ver tiempos pasados. Al analizar la luz

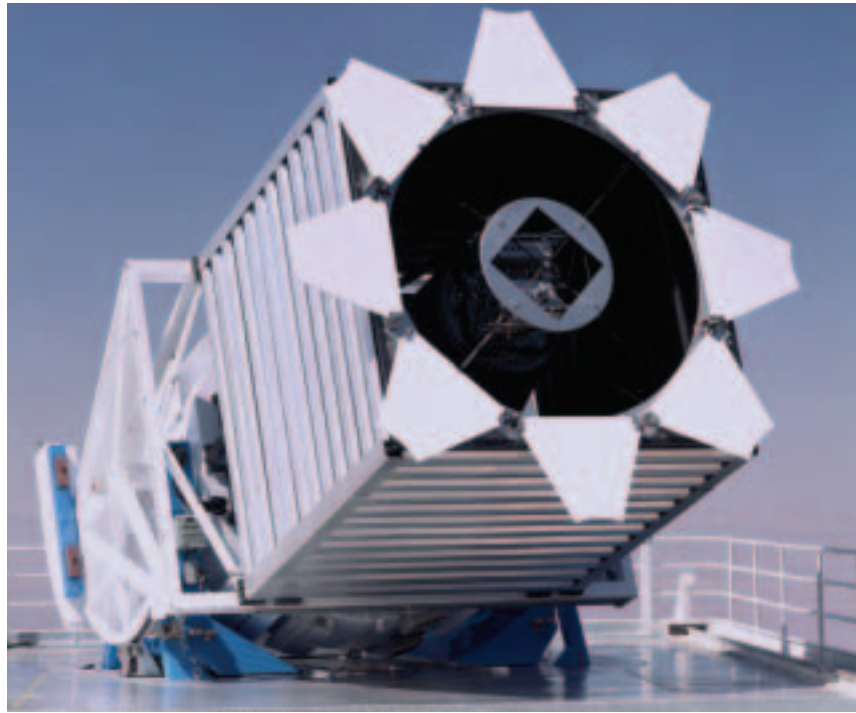


3. EL ESPECTRO DE UNA GALAXIA ilustra las cantidades relativas de luz emitidas a distintas longitudes de onda. Una galaxia con una población joven de estrellas emite más luz en la parte azul del espectro, alrededor de los 400 nanómetros (*izquierda*).



Por el contrario, una galaxia con una población estelar más antigua emite sobre todo luz en el rojo, por encima de los 500 nanómetros (*derecha*). El nuevo método para medir la tasa de formación estelar hace uso del espectro completo de una galaxia.

4. EL ESTUDIO DIGITAL SLOAN recorre los cielos con un telescopio de apertura de 2,5 metros. Los dos espectrógrafos del telescopio recolectan la luz de miles de galaxias cada noche. Se han analizado los espectros de casi 100.000 galaxias para determinar la tasa de formación estelar del universo.



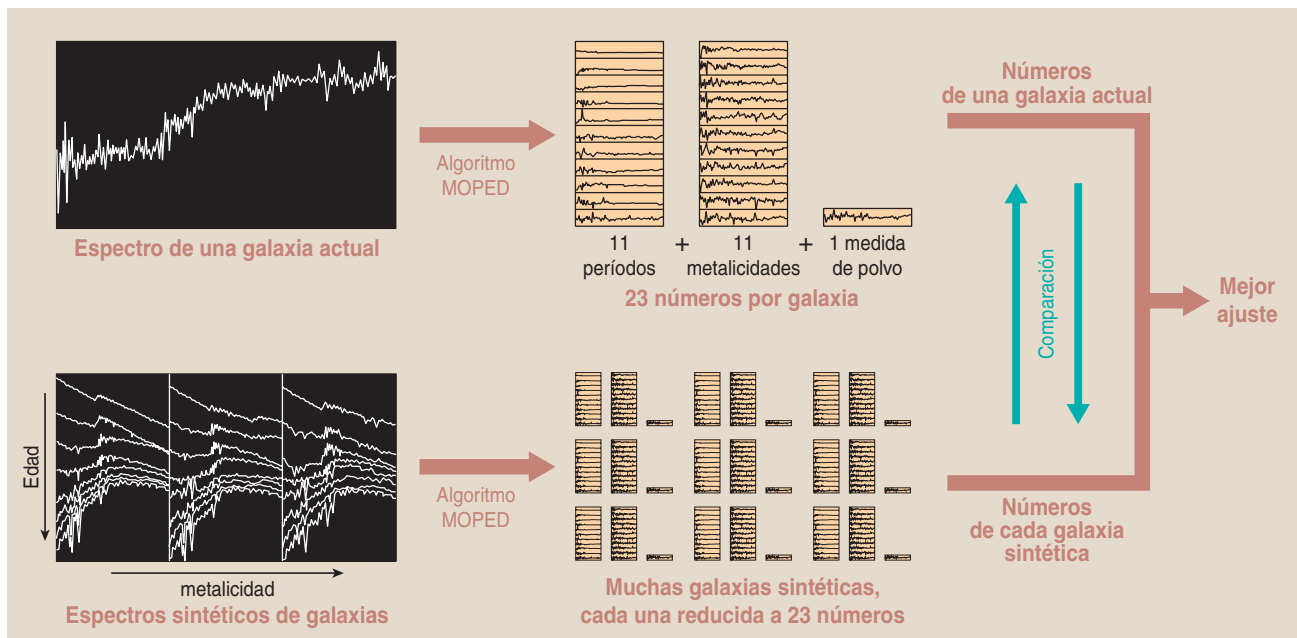
procedente de objetos muy lejanos, los vemos tal y como eran hace miles de millones de años. Se buscan indicios de estrellas recién formadas por entonces. El método alternativo adopta un enfoque “fósil”. Se estudia una muestra muy amplia de galaxias cercanas y se calculan las edades de las estrellas de cada una. Este es el enfoque que he adoptado, en estrecha colaboración con Raúl Jiménez, de la Universidad de Pennsylvania, y Ben Panter y James Dunlop, de la Universidad de Edimburgo.

Hasta hace poco, el análisis de la historia de la formación estelar del universo ha estado dominado por la búsqueda de signos que revelasen la presencia de estrellas recién nacidas; en la analogía, vendría a ser la lectura de los “registros históricos” del nacimiento estelar. Con frecuencia se observaban galaxias

lejanas, es decir, con un notable corrimiento hacia el rojo.

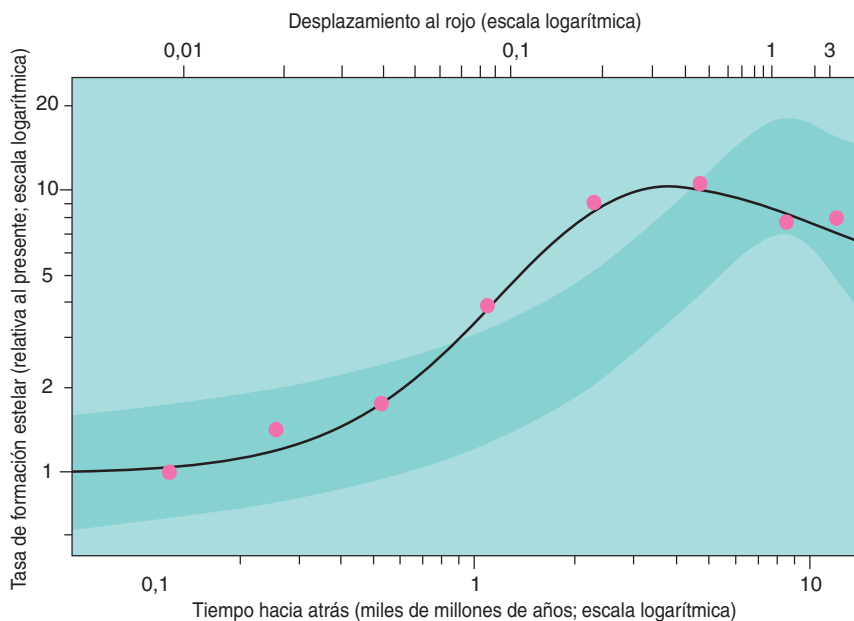
Un indicador de la formación reciente de estrellas es la cantidad de luz ultravioleta emitida. La luz ultravioleta procede sobre todo de estrellas muy calientes, como las que

se observan en el cúmulo estelar de las Pléyades. Las estrellas muy calientes poseen una masa imponente, queman su combustible nuclear muy deprisa y mueren pronto; por tanto, sólo las vemos jóvenes. La presencia de luz ultravioleta es sin duda un



5. EL ANALISIS DEL ESPECTRO DE UNA GALAXIA ha de compararse con los espectros sintéticos de muchas galaxias hasta encontrar el mejor ajuste. Las galaxias sintéticas divergen en función de su edad y composición química (“metalicidad”). El algoritmo MOPED reduce el espectro de cada galaxia a 23

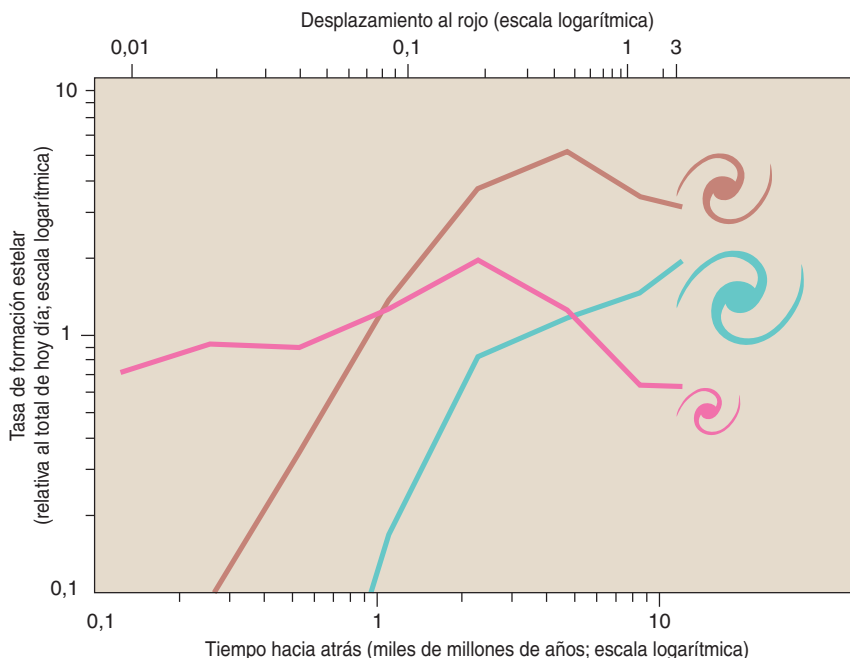
números, el resultado de la suma ponderada de cada espectro. El mejor ajuste de los 23 números de la galaxia real con los de las galaxias sintéticas proporciona la historia de la formación estelar, la de la metalicidad y el contenido de polvo de la galaxia.



buen indicador de estrellas recién formadas en una galaxia.

Por otra parte, a medida que la población estelar envejece, las estrellas azules enrojecen y la luz estelar adopta un tono rojizo o amarillento. Existen otros indicadores de una formación reciente de estrellas, como la emisión de líneas de hidrógeno

procedentes del gas ionizado que rodea las estrellas masivas. La luz azul de estos astros ioniza enormes volúmenes de hidrógeno y los hace brillar. Sin embargo, el estudio de galaxias con un corrimiento hacia el rojo consume mucho tiempo, además, amén de hallarse limitado a la observación de los sistemas de mayor



**7. LA TASA DE FORMACION ESTELAR** varía con la masa de la galaxia. Las galaxias mayores (*azul*) alcanzan la tasa máxima antes que las galaxias de tamaño intermedio (*marrón*) y las pequeñas (*rosado*). Los métodos tradicionales para determinar la tasa de formación de estrellas en el universo presentan un sesgo hacia las galaxias mayores y conducen, por ello, a un resultado equivocado.

**6. EL PROMEDIO DE LA TASA DE FORMACION** estelar ha cambiado con el tiempo. El universo tiene unos 13.700 millones de años, pero la tasa de formación de estrellas llegó a su máximo hace unos 5000 millones (*línea negra*). Las determinaciones anteriores de la tasa de formación (*la banda de color azul*) apuntaban a una actividad máxima más precoz, hace unos 8000 millones de años. Esta discrepancia se explica por el sesgo que los métodos tradicionales introducen en la población de galaxias que estudian. Aquí se muestran ocho de los once períodos temporales (*puntos rosados*) de las historias galácticas.

masa porque los pequeños resultan demasiado débiles para detectarlos a grandes distancias.

Muy distinto es el enfoque fósil. Se basa en el espectro de la luz de una galaxia a lo largo de un rango amplio de longitudes de onda. La mayor parte de la luz procede de las estrellas que componen la galaxia, aunque el gas caliente emite una fracción. Si eliminamos las líneas de emisión del gas, nos quedamos sobre todo con luz estelar. Cada estrella contribuye de una manera singular al espectro, en razón de su edad y de la composición química del gas del que se formó. Puesto que los elementos se fabrican dentro de las estrellas, los elementos más pesados —llamados “metales” por los astrónomos— se acumulan en el gas y en las nuevas generaciones estelares a medida que la galaxia evoluciona. El estudio minucioso del espectro nos proporciona la edad de las estrellas y revela cuántas de ellas se formaron en diferentes períodos de la historia galáctica. Podemos entonces deducir el cambio de la composición química del gas con el tiempo.

Consideremos el espectro de una galaxia que alberga estrellas jóvenes, incluidas algunas dotadas de masa enorme que emiten luz azul. Esta característica se manifiesta a través de emisiones intensas en longitudes de onda “azules”, alrededor de los 400 nanómetros. Y sea el espectro de otra galaxia que presente muy poca luz azul, indicio de que las estrellas de gran masa y calientes ya no brillan. Una galaxia así ha tenido poca formación estelar

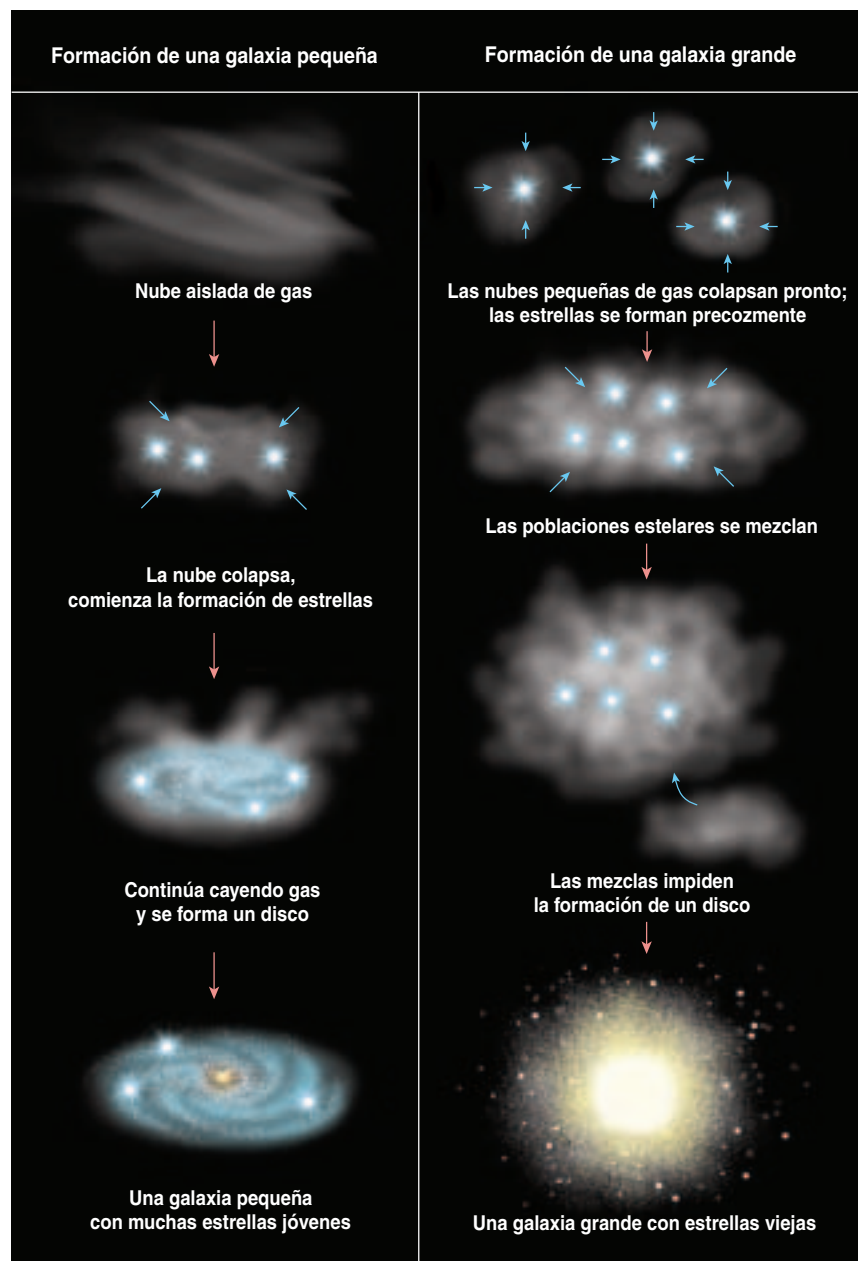
**8. LOS DIFERENTES PROCESOS DE FORMACION** de galaxias grandes y pequeñas afectan al ritmo de producción de estrellas. Una galaxia muy pequeña puede crearse a partir de una nube solitaria, de tamaño moderado, que empezó a fabricar estrellas cuando el universo llevaba existiendo ya un tiempo considerable. Por el contrario, una galaxia grande pudo originarse por la mezcla (fusión) de muchas nubes pequeñas de gas que crearon sus estrellas en una época precoz de la historia del universo. No se contradice el principio general que establece que en el universo las estructuras menores tienden a desarrollarse antes que las mayores. Las fusiones destrozan la estructura espiral; las galaxias mayores suelen ser elípticas.

reciente; la población es vieja, la luz está dominada por las estrellas rojas y frías. Tras el análisis de un número sustantivo de estos espectros llegamos a vislumbrar cuánta formación estelar ha acontecido en un momento particular de la historia del universo.

### MOPED

El Estudio Digital Sloan de los Cielos es una fuente de especial valor para nuestro trabajo. Cubrirá cerca de un cuarto del cielo y medirá el espectro de cientos de miles de galaxias hasta una distancia de tres mil millones de años-luz. La parte norteamericana del proyecto emplea un telescopio de 2,5 metros instalado en Punta Apache, Nuevo México. Está conectado a 30 detectores de carga acoplada (CCD) que producen cada noche 200 gigabytes de datos de imágenes. En cada instantánea se obtienen los espectros de 640 galaxias, cuya luz llega, a través de fibras ópticas, a dos espectrógrafos.

No es fácil interpretar un espectro. Por comodidad de cálculo, dividimos la historia de una galaxia en 11 períodos. Determinamos la fracción de estrellas de la galaxia nacidas en cada período. También analizamos la composición química galáctica para cada intervalo temporal. La tarea se complica porque muchas galaxias contienen polvo que absorbe la luz azul, por lo que la galaxia aparece más roja de lo que realmente es. En total, los 11 períodos de formación estelar,



las 11 mediciones de la composición química y una del polvo suman 23 números por galaxia.

Para obtener esos valores buscaremos un espectro modelo que coincida en el mayor grado posible con el observado. En teoría resulta posible, pero en la práctica se hace exasperantemente lento, sobre todo considerando que tenemos cerca de cien mil galaxias para analizar. Por eso recurrimos a un algoritmo de compresión de datos —MOPED (siglas en inglés de Compresión y Estimación Múltiple Optimizada de Datos)— que reduce cada galaxia a 23 números en sustitución de los

varios miles de puntos del espectro. El análisis centuplica así su velocidad sin merma de precisión. MOPED es una técnica patentada que se concibió especialmente para nuestros objetivos, pero es aplicable a otros problemas de búsqueda inversa muy dispares. No obstante, se necesitan varias semanas para que 20 computadoras procesen el sondeo galáctico completo.

MOPED nos proporciona una historia completa de la formación estelar para cada galaxia. Si sumamos adecuadamente todas las galaxias de la exploración, tendremos el promedio de la tasa de formación estelar

por unidad de volumen en el universo. Nuestros resultados concuerdan con los ya conocidos por otras técnicas para la época primigenia del universo y para su historia más reciente, pero no coinciden en los tiempos intermedios. Según los métodos tradicionales, la tasa de formación de estrellas llegó a su máximo hace unos 8000 millones de años; los nuevos, en cambio, indican que el máximo ocurrió hace 5000 millones, más o menos cuando se formaron el Sol y el sistema solar. Los dos métodos revelan que la formación estelar ha decaído rápidamente; hoy en día la tasa es apenas entre un 10 y un 15 por ciento de lo que fue en su apogeo. El nuevo máximo encontrado por el "método del fósil" debería confirmarse por otros métodos, pero no será fácil, dada la dificultad de observar todas las galaxias a grandes distancias y no sólo las más brillantes.

¿Cómo explicar una discrepancia de nada menos que 3000 millones de años? Para lograrlo, acudiremos a las tasas de formación estelar de galaxias de masas diferentes. Hay una tendencia obvia: las galaxias de mayor masa presentan antes el máximo de formación estelar. Es decir, la mayoría de las estrellas de las galaxias grandes, nuestra Vía Láctea entre ellas, nacieron pronto; ahora no nacen muchas estrellas en su seno. Nuestra galaxia apenas produce ya un puñado de estrellas nuevas por año. Por otro lado, las galaxias de poca masa forman estrellas más tarde y continúan creándolas a un buen ritmo.

La clave se encuentra en que los métodos tradicionales, fundamentados en la observación de las galaxias lejanas, sólo detectan las que gozan de mayor masa. Tal y como hemos aprendido en la exploración Sloan, las mayores galaxias no son representativas porque han formado sus estrellas mucho antes. Por tanto, no sorprende que las determinaciones anteriores encontraran un máximo temprano de la tasa de formación estelar. Siguiendo con la analogía de la natalidad humana, es como si se hubieran perdido los archivos de las parroquias y hubiera que utilizar sólo los de las catedrales. Valdría mientras las catedrales fueran representativas del conjunto, pero si los cambios de-

mográficos hicieron que archivaran una fracción cada vez menor de los nacimientos, sus archivos nos estarían proporcionando una visión sesgada de la realidad.

## Conclusión

¿Cómo encaja todo esto con las teorías sobre la formación de las galaxias? De entrada pone en cuestión el modelo jerárquico, según el cual la formación de los objetos pequeños precede a la de los objetos grandes. Observamos lo contrario: las galaxias de mayor masa producen estrellas antes que las galaxias menores. Pero no debemos olvidar un aspecto importante de nuestro escrutinio de las galaxias del Estudio Sloan. Analizamos las estrellas tal y como las vemos hoy día y deducimos cuándo nacieron. Pero no tenemos un conocimiento directo de dónde se formaron. En concreto, no existe razón alguna para pensar que las estrellas nacidas hace ocho mil millones de años se originaron en la galaxia donde las vemos. Quizá se crearon en galaxias más pequeñas que luego se mezclaron con otras en algún momento de su historia. Y es muy probable que haya ocurrido así: la mayoría de las estrellas que componen una galaxia grande nacieron casi con toda certeza en unidades menores que luego se fueron ensamblando hasta crear la gran galaxia.

Las galaxias de baja masa siguen probablemente un proceso parecido, pero al revés. Primero se reúne toda la masa, y ésta atrae al gas de los alrededores. El gas que cae alimenta la formación de estrellas, o incluso desencadena la producción estelar en el gas ya residente en la galaxia. Se podría ir más lejos y afirmar que en el modelo jerárquico de la formación galáctica de abajo arriba, los objetos que terminan con mayor masa son los que han producido sus estrellas precozmente.

Una de las consecuencias más atractivas de disponer de dos métodos para el estudio de estas cuestiones es la posibilidad que ofrece de comprobar el principio copernicano. El principio establece que nosotros no ocupamos un lugar especial en el universo. Puesto que MOPED nos proporciona información sobre la tasa de formación estelar aquí en el pasado y los otros métodos

nos facilitan la tasa de formación a distancias muy lejanas, podemos comparar los dos resultados y comprobar si nuestra posición es atípica. Puesto que creemos entender el porqué de las diferencias entre los dos métodos de trabajo, concluimos que el principio de Copérnico es cierto a este respecto.

Sabemos que nuestro universo experimentó una explosión demográfica estelar hace unos 5000 millones de años. ¿Es posible otra explosión más adelante? Hemos dejado atrás el apogeo de la formación de estrellas; la tasa se está decelerando. A medida que se constituyen estructuras mayores en el universo, el gas se va calentando, lo que dificulta que se enfríe y colapse para producir nuevas estrellas. Además, el gas del universo se enrarece con el tiempo; es decir, se está agotando el suministro necesario para fabricar estrellas. En el futuro, los cielos se oscurecerán. Pero no es algo que debamos temer: el Sol tiene por delante otros cinco mil millones de años.

## El autor

**Alan Heavens** es profesor de astrofísica teórica de la Universidad de Edimburgo. Estudia la macroestructura del universo, la formación de galaxias y las lentes gravitatorias.

©American Scientist Magazine.

## Bibliografía complementaria

THE STAR-FORMATION HISTORY OF THE UNIVERSE FROM THE STELLAR POPULATIONS OF NEARBY GALAXIES. A. F. Heavens, B. D. Panter, R. Jiménez y J. S. Dunlop en *Nature*, vol. 428, págs. 625-627; 2004.

SYNTHETIC STELLAR POPULATIONS: SINGLE STELLAR POPULATIONS, STELLAR INTERIOR MODELS AND PRIMORDIAL PROTO-GALAXIES. R. Jiménez, J. MacDonald, J. Dunlop, P. Padoan y J. Peacock en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 349, págs. 240-254; 2004.

THE STAR FORMATION RATE OF THE UNIVERSE AT  $Z \sim 6$  FROM THE HUBBLE ULTRA-DEEP FIELD. A. J. Bunker, E. R. Stanway, R. S. Ellis y R. G. McMahon en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 355, págs. 374-384; 2004.