

La red cósmica

Las observaciones y las simulaciones del medio intergaláctico descubren las mayores estructuras del universo

Robert A. Simcoe

No existe el espacio vacío. Nada se acerca más al vacío que las desiertas extensiones entre las estrellas y las galaxias. Y sin embargo, incluso el más remoto paraje del universo está inundado de gas. De muy baja densidad, eso sí; y cuanto más lejos esté de las galaxias, más enrarecido se hallará. Cada centímetro cúbico de aire contiene unos 5×10^{19} átomos; el medio intergaláctico, 10^{-6} , como si cada átomo habitase en un cubo privado de un metro de lado. Pero no debe deducirse que entre las galaxias escasea la materia. El volumen del espacio que las separa es inmenso; la suma de la masa que encierra se agiganta en la misma escala. Puede que la masa atómica del gas intergaláctico sobrepase la masa atómica combinada de las estrellas y galaxias del universo en un 50 por ciento.

A medida que los cosmólogos van ofreciendo nuevas exposiciones de la evolución del universo desde sus comienzos —la gran explosión— hasta el momento actual, resulta cada vez más patente que, mientras no comprendamos la física de la materia intergaláctica, no sabremos cómo se formaron las galaxias, las estrellas y los planetas. Gracias a los rápidos avances de los telescopios y de la potencia de los ordenadores, hemos estudiado en los últimos diez años las profundidades del espacio intergaláctico con un detalle sin precedentes. Nuestro conocimiento del nacimiento y evolución de las grandes estructuras del universo ha ganado mucho con ello.

En el rojo

El gas intergaláctico es tan tenue y oscuro —por sí mismo, no produce luz—, que cabe preguntarse cómo se las ingenian los astrónomos para observarlo. La detección es indirecta; se basa en analizar su efecto en la luz procedente de las fuentes más lejanas. Las más comunes en este tipo de observaciones son los cuásares, un tipo particular de galaxia con un agujero negro de masa muy elevada en su centro. El gas que rodea al agujero emite una radiación intensa que, con frecuencia, llega a centuplicar, a veces con creces, el brillo de la propia galaxia. Puesto que los cuásares son tan luminosos, podemos observarlos a grandes distancias y medir los efectos del gas intergaláctico en su luz a lo largo del universo.

Recogemos los fotones procedentes de estos faros con los telescopios más poderosos, y los ordenamos en los espectros conforme a su longitud de onda (véase la figura 4). El rasgo más característico de los espectros es una línea de emisión, producida por los átomos de hidrógeno cerca del agujero negro del cuásar. Los electrones de estos átomos están excitados a un nivel cuántico más alto que su estado fundamental. Cuando regresan a éste, emiten fotones de una determinada longitud de onda, 121,56701 nanómetros; esa emisión recibe el nombre de “transición Lyman- α ”. Sin embargo, observamos la línea a una longitud de onda mucho mayor, a 560 nanómetros. Se debe a que el cuásar se aleja de nosotros como parte de la expansión del universo. La expansión hace que los objetos más distantes de nosotros se vayan alejando proporcionalmente más deprisa que los más cercanos. A medida que un objeto se aleja, la luz que emite se desplaza a mayores longitudes de onda; este fenómeno puede compararse al efecto Doppler, que baja el tono del pitido de un tren que se aleja. A ese aumento de la longitud de onda se le llama “corrimiento al rojo” porque los objetos cósmicos más lejanos aparecen siempre más rojos.

Pensemos ahora en qué le ocurre a la luz del cuásar cuando atraviesa el medio intergaláctico. A medida que avanza hacia la Tierra, algunos de sus fotones se encontrarán con átomos de hidrógeno por el camino. Aquellos que, tras haber recorrido el espacio en expansión entre el cuásar y los átomos, presenten una longitud de onda de 121,56701 nanómetros, serán absorbidos por los átomos, que pasarán a tener electrones en un estado excitado. Cuando los electrones regresen al estado fundamental emitirán nuevos fotones, pero en direcciones arbitrarias, que no tendrán por qué apuntar hacia la Tierra (véase la figura 2). Por lo tanto, la nube de átomos de hidrógeno absorbe la luz en una longitud de onda muy específica y la dispersa eficientemente. Este efecto se manifiesta como una “muesca” en el espectro.

El medio intergaláctico contiene muchas nubes de hidrógeno situadas a diferentes distancias de nosotros. Y puesto que esas nubes tienen distintos desplazamientos al rojo, el espectro de un cuásar exhibe muchas líneas de absorción a diferentes longitudes de onda.

Las longitudes de onda menores que la de la línea de emisión parecerán “comidas”, según sea la ubicación de cada nube entre el cuásar y nosotros. En los últimos años, gracias a los nuevos instrumentos de los grandes telescopios, hemos examinado los espectros de los cuásares con resoluciones muy finas y una intensidad de señal muy alta con respecto al nivel de ruido. Estos datos dividen el medio intergaláctico en distintas nubes individuales.

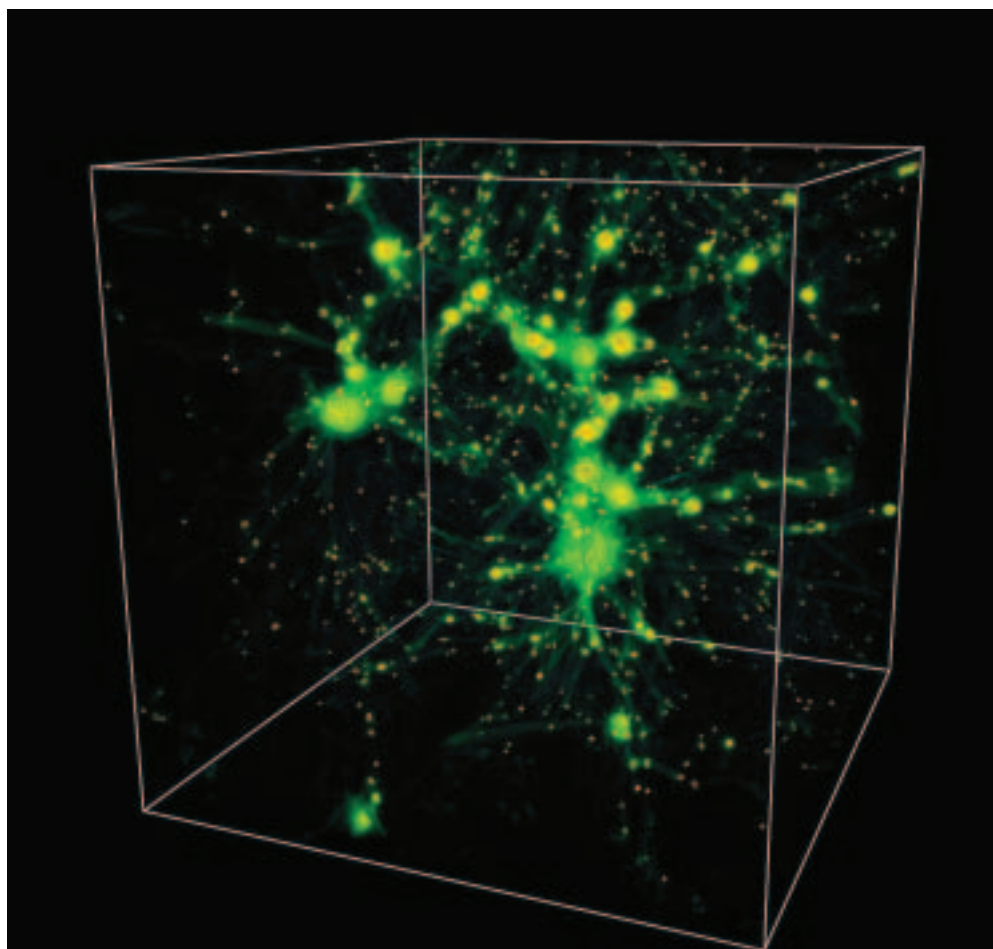
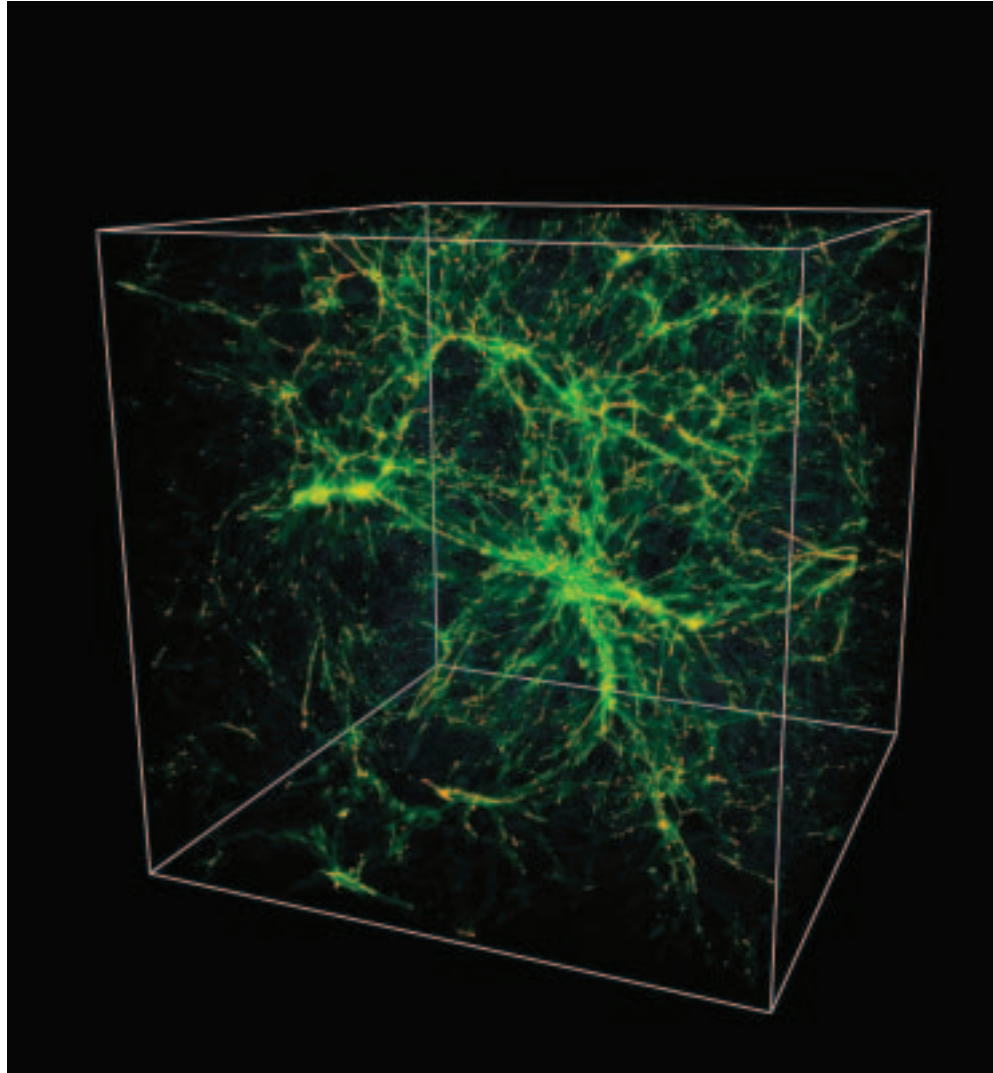
Una telaraña cósmica

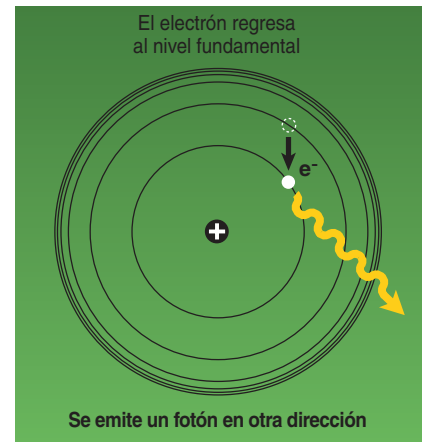
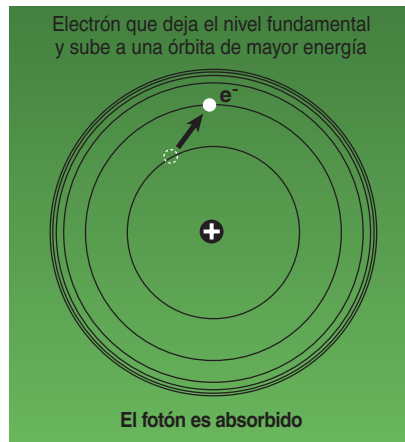
Cuando se estudiaron por primera vez las líneas de absorción de los cuásares, no estaba del todo claro cómo interpretarlas, sobre todo porque se carecía de los datos de gran calidad que hoy tenemos. Entre finales del decenio de 1970 y principios del siguiente, el equipo de Wallace Sargent tomó una serie de medidas en el Observatorio de Monte Palomar que convencieron a la mayoría de que las líneas de absorción se debían a la materia intergaláctica. Sin embargo, había bastantes modelos teóricos compatibles con los datos disponibles; en su mayoría atribuían las líneas a cúmulos de nubes de gas sueltas, esféricas.

En los últimos años, a los avances en las técnicas de observación

1. LAS SIMULACIONES NUMERICAS

muestran la distribución del gas intergaláctico en los filamentos (*verde*) y vacíos (*negro*) de la red cósmica. Gracias a modelizaciones por ordenador y a las observaciones de los telescopios, sabemos que la red cósmica ha cambiado de aspecto: una madeja de hebras cuando el universo contaba con dos mil millones de años (*arriba*), hoy (*abajo*), transcurridos desde entonces casi doce mil millones de años, parece más gruesa. Ese cambio es el resultado natural de la atracción gravitatoria, que fue cebando cualquier pequeño aumento de densidad con más y más materia. La caja de la simulación de arriba tiene unos 30 millones de años-luz de lado; la de abajo es cuatro veces mayor (debido a doce mil millones de años de expansión cósmica). En las escalas de esta figura, la Vía Láctea aparecería como una mota, casi imperceptible, de apenas un milímetro de diámetro.





2. LOS ATOMOS DE HIDROGENO absorben y emiten fotones a la longitud de onda (λ) de 121,56701 nanómetros, correspondiente a la diferencia de energía entre el primer y segundo nivel electrónico (la transición Lyman- α). Cuando un átomo intercepta un fotón procedente de un cuásar lejano (*izquierda*), la energía que absorbe envía su único electrón a un nivel orbital más alto (*cen-*

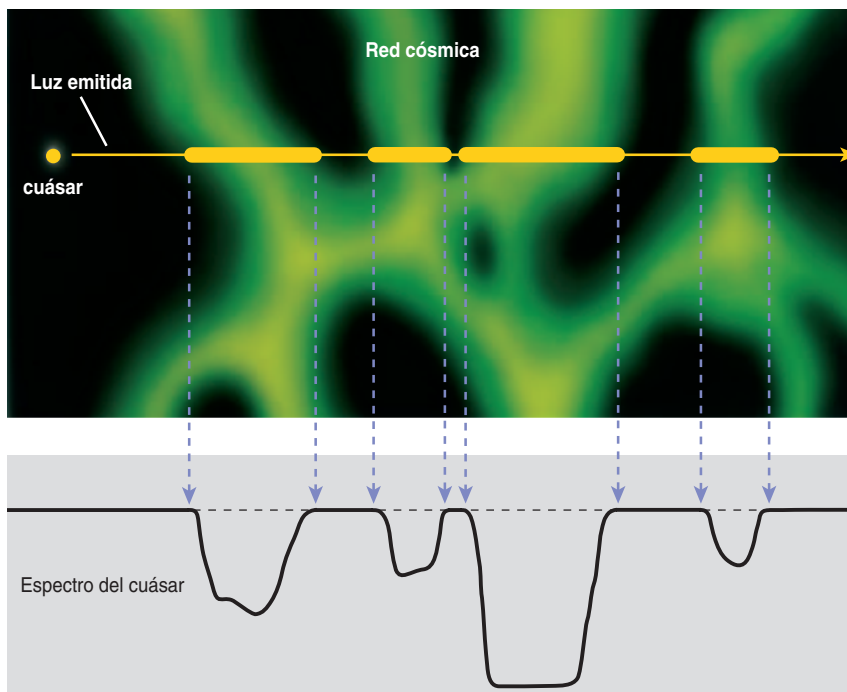
tro). Cuando el electrón regresa al nivel fundamental (*derecha*), se emite un fotón, pero en una dirección aleatoria que no tiene por qué coincidir con la dirección de la Tierra. Esto explica que las nubes de gas hidrógeno del medio intergaláctico debiliten la luz de los cuásares lejanos, pese a que emiten tantos fotones cuantos absorben.

se ha sumado la creciente capacidad de los modelos computacionales. Su ejecución ha requerido numerosas colaboraciones entre grupos de astrónomos y meses de cálculo con superordenadores. Estas simulaciones informáticas diseñan una caja imaginaria que abarca un volumen representativo del universo.

La dividen en una red de células tridimensionales y distribuyen por ella la materia. Ese estado inicial se atiene a las condiciones determinadas por las observaciones del universo temprano. Tras introducir en el modelo los procesos físicos que afectan a la evolución del medio intergaláctico, se ejecuta la si-

mulación: la materia y la energía fluyen de célula a célula dentro de la caja, gobernadas sólo por las leyes físicas. El resultado final viene a ser una sucesión de planos fijos de ese fragmento de universo, cada uno de los cuales comprime varios millones de años de historia cósmica. El programa examina la distribución de materia en la caja plano a plano, es decir, tras cada intervalo de tiempo, y evalúa la fuerza total que se ejerce sobre cada partícula, para determinar hacia dónde se moverá en el siguiente paso. A intervalos regulares, el ordenador registra la densidad del gas en el medio intergaláctico y compara los resultados con las observaciones reales de los espectros de los cuásares. Así, comprueba la precisión de los modelos físicos.

Efectuaron una de estas simulaciones Jeremiah Ostriker y Renyue Cen, de la Universidad de Princeton. Uno de sus "planos" muestra el universo cuando tenía un 15 por ciento de su edad actual, es decir, unos dos mil millones de años. El rasgo más característico es la tendencia del gas a condensarse en una red de filamentos que se entrelazan a través de inmensos huecos de baja densidad. Todos los nuevos modelos sintéticos exhiben este tipo de estructura; se la ha bautizado con el nombre de red, o telaraña, cósmica.



3. LA RED COSMICA DE FILAMENTOS GASEOSOS (*arriba, verde*) del medio intergaláctico, al interrumpir la luz de un cuásar lejano antes de que alcance la Tierra, produce las líneas de absorción que se observan en el espectro del cuásar (*abajo*).

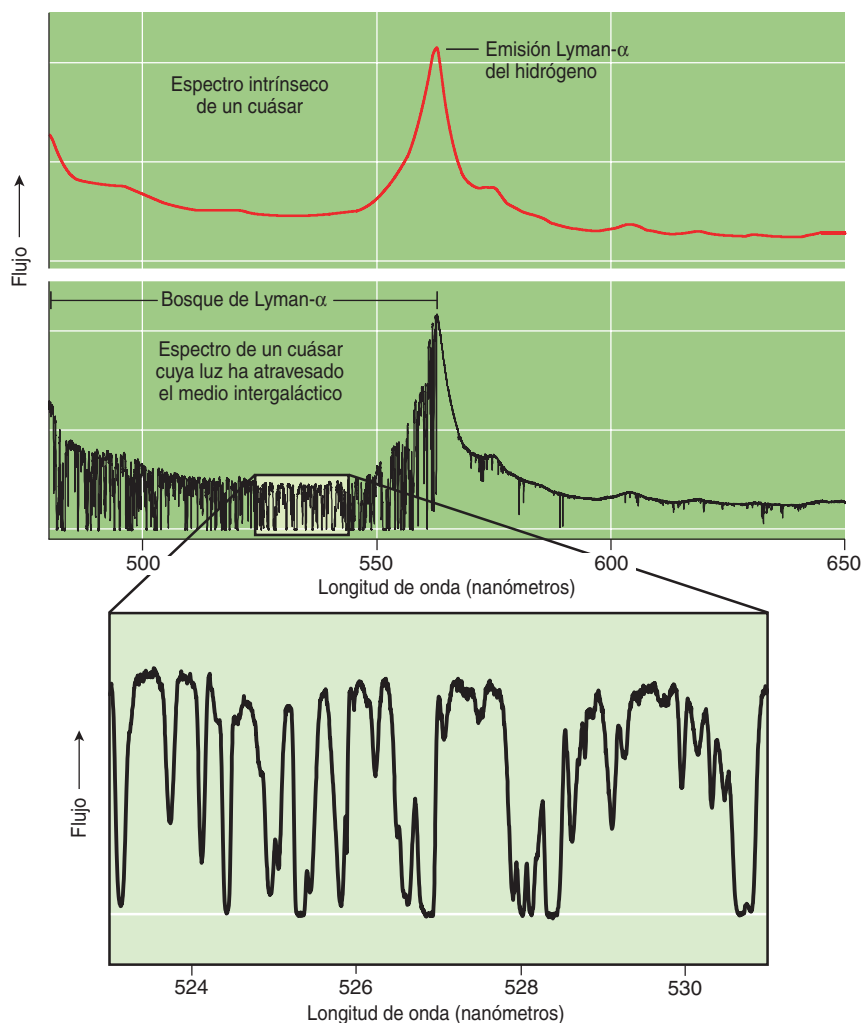
Para comparar esta predicción con las observaciones, se generan múltiples espectros artificiales de cuásares, trazando líneas aleatorias a través de la caja de la simulación. Mediante el cálculo de las variaciones de la densidad de gas a lo largo de una línea, se computa la cantidad de absorción que se debería observar en un espectro tomado en esa línea de visión. Tal proceder viene a ser como si un observador se encontrara en una cara de la caja y midiera el espectro de un cuásar sito en el lado opuesto.

Desde el punto de vista estadístico, los “espectros” de este universo artificial apenas si se distinguen de los espectros reales de los cuásares. Los modelos predicen con exactitud el número de líneas de absorción, la distribución de sus intensidades y anchuras, y su evolución con el tiempo. En lo básico, los modelos confirman los procesos físicos que dominan la evolución del universo a gran escala.

Concentraciones

La técnica nos ha facilitado los medios necesarios para observar los parajes recónditos del medio intergaláctico e interpretar esas observaciones en el contexto de un modelo cosmológico. Una vez que hemos descrito los métodos, demos ahora un paso atrás y examinemos el modelo en sí. Narremos la formación de las galaxias y la estructura intergaláctica.

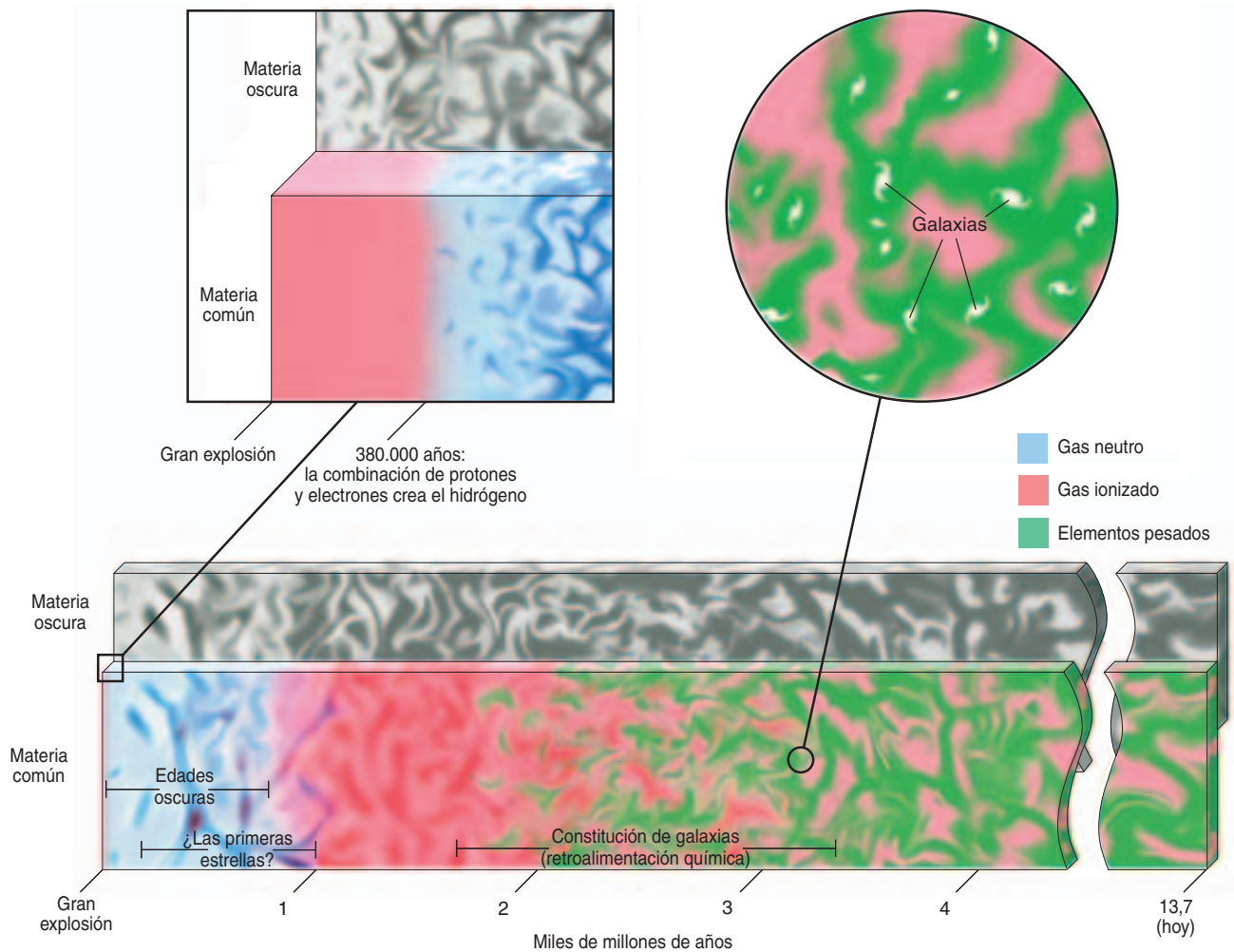
La historia empieza hace más de 13.000 millones de años, unos 380.000 años después de la gran explosión; aquel universo divergía mucho del nuestro. No había ni estrellas, ni galaxias, ni redes, sólo una sopa uniforme de protones y electrones libres. La distribución del gas era tan homogénea, que sus picos de densidad diferían en apenas una parte en cien mil del promedio cósmico. Pero llegó un momento en que la sopa evolucionó hacia un estado muy grumoso, donde tiras “densas” de galaxias y gas surcaban las vastas extensiones de espacio. Hoy día, el rango de densidades es muchísimo mayor: 32 órdenes de magnitud van de la densidad atómica del interior del Sol a la del espacio intergaláctico.



4. EL ESPECTRO INTRINSECO de un cuásar (*arriba*) exhibe la cantidad de luz que emitió a diferentes longitudes de onda. Produjeron el pico central los átomos de hidrógeno, con su emisión de fotones de una longitud de onda de 121,56701 nanómetros. Recibe el nombre de línea de emisión de Lyman- α . Aquí aparece en 560 nanómetros porque la expansión del universo desplaza la luz a mayores longitudes de onda, desde el ultravioleta hacia el rojo. A medida que la luz del cuásar atraviesa el medio intergaláctico, éste va mordiendo el espectro (*centro*, “bosque” de rayas a la izquierda del pico), porque las nubes de hidrógeno interpuestas absorben la luz localmente a la longitud de onda de 121,56701 nanómetros; pero como estas absorciones ocurren a diferentes distancias de la Tierra, se genera el “bosque de Lyman- α ”. Algunos elementos pesados también absorben fotones a mayores longitudes de onda, añadiendo las pocas líneas de absorción que se observan a la derecha del pico. En los últimos años, los espectros de alta resolución (*abajo*) han permitido estudiar nube a nube el medio intergaláctico.

Se cree que esta transición de lo homogéneo a lo grumoso se debió a la gravedad. Imaginemos una caja con una distribución uniforme de materia tal, que la densidad de las partículas sea constante. Supongamos que, en un punto de la caja, las partículas se agitan por alguna razón y se produce un ligero aumento de densidad. Esta nueva concen-

tración de materia ejercerá una fuerza gravitatoria que atraerá hacia sí las partículas colindantes. La materia precipitada aumentará la masa del grumo, lo que a su vez incrementará su atracción gravitatoria, caerá más materia y así sucesivamente. Con tiempo suficiente, el pequeño incremento de densidad original se transformará en un denso



5. LA EVOLUCION DEL MEDIO INTERGALACTICO comenzó inmediatamente después de la gran explosión, mientras la densidad de la materia común —protones, electrones y fotones— oscilaba bajo las influencias contrapuestas de la gravedad y la presión. Al mismo tiempo, la materia oscura ensamblaba en silencio una primitiva red cósmica. Transcurridos 380.000 años desde la gran explosión, los protones y los electrones se combinaron para formar gas de hidrógeno neutro (*azul*), enseguida atraído por la gravedad

hacia el ya existente entramado de materia oscura. El gas y la materia oscura continuaron su proceso de ensambladura en la fría oscuridad hasta que nacieron las primeras estrellas en las regiones más densas de la red cósmica. La luz de estas estrellas reionizó el medio y calentó el universo, muy probablemente durante los primeros mil millones de años (*rosa*). A medida que las galaxias tomaban forma, la producción estelar continua de elementos pesados empezó a “contaminar” el medio intergaláctico (*verde*).

grupo que contendrá la mayor parte de la masa que antes se repartía por todo el volumen.

En este simple fenómeno se fundamenta toda teoría que intente explicar la estructura a gran escala del universo. No obstante, para que ese fenómeno interviniera, el universo debió contar, ya en un momento anterior, con un entramado de fluctuaciones de la densidad primordiales, que luego se condensarían y crearían las estructuras que tenemos hoy día. Estas perturbaciones se manifiestan por medio de pequeñas variaciones en la distribución de temperatura de los fo-

tones que, con longitudes de onda del intervalo de las microondas, nos llegan de las distintas regiones del cielo. La caracterización de ese fondo de microondas es, hoy por hoy, uno de los asuntos más importantes de la investigación astrofísica, ya que sus pequeñas perturbaciones representan las antiguas semillas gravitatorias de la estructura cósmica.

Parecería que disponemos de todas las piezas necesarias para entender el origen de la red cósmica. Hemos observado las variaciones de densidad en el universo inicial y tenemos un modelo potente que

explica la evolución de estas perturbaciones hasta convertirse en estructuras de mayor escala. Sin embargo, hay un problema. Las variaciones primordiales eran tan pequeñas, que 13.700 millones de años no bastan para que crecieran hasta crear las ensambladuras actuales. Este dilema recibió gran atención durante los años setenta, quizás alimentado por la política de la Guerra Fría. Entraron en liza dos teorías para explicar la formación de las estructuras, una concebida por Yakov Zel'dovich, de la Escuela Rusa de Astrofísica de Moscú, y otra por James Peebles y su grupo,

de la Universidad de Princeton. Los debates posteriores pusieron de manifiesto la fragilidad de ambas teorías. La solución exigía un nuevo ingrediente en los modelos cosmológicos, al que se denominó “materia oscura”. Es uno de los grandes descubrimientos de la cosmología moderna.

Materia oscura

Esta materia oscura difiere de la materia común de la que están hechas las estrellas, los planetas y las personas. No sólo no brilla, sino que interacciona con “nuestra” clase de materia sólo mediante la fuerza de gravedad. Se cree que está formada por partículas exóticas, que no ejercen ningún otro efecto en los átomos y moléculas comunes. Es más, la materia oscura parece más abundante, en un factor cuatro a uno, que la materia normal a lo largo de todo el universo. En razón de su extrañeza, encontró oposición cuando la propuso Fritz Zwicky, en los años treinta. Sin embargo, ante las pruebas abrumadoras ha acabado por aceptarse su existencia. Aunque no

entendemos bien qué es la materia oscura, sí sabemos qué hace: mantiene unidas a las galaxias, curva la luz, frena la expansión del universo y dirige la formación de la estructura intergaláctica.

En relación a este último punto, volvamos a la niñez del universo. Durante los primeros 380.000 años, el calor residual de la gran explosión mantuvo caliente el universo (más de 3000 kelvin); por eso mismo, los electrones y protones de la sopa primordial no podían combinarse para formar átomos de hidrógeno neutro. Este tipo de gas ionizado, formado por electrones disociados y protones, se denomina plasma. Cuando las partículas del plasma están libres, intercambian energía y momento con la luz. En los primeros tiempos del universo, esa dispersión aumentó dentro de la sopa cósmica la presión del gas. Por lo tanto, cuando la gravedad intentaba comprimir las primeras perturbaciones de densidad, la presión gaseosa contrarrestaba su efecto, al igual que un globo cuando se lo estruja. Mientras los electrones y

los protones permanecieron separados, el gas no pudo formar estructuras mayores. Las estructuras potenciales oscilaban a medida que la fuerza atractiva de la gravedad luchaba contra la presión expansiva del gas.

Pero cuando el universo alcanzó la edad de 380.000 años, ocurrió algo decisivo. En ese momento, la temperatura del universo, que se iba enfriando al expandirse, permitió que los electrones y los protones se combinaran y crearan átomos de hidrógeno. Estos y los fotones se desacoplaron de repente —la interacción de las partículas materiales y de la luz dejó de ser tan intensa—; por consiguiente, se redujo mucho la presión que había estado contrarrestando la gravedad. Con la gravedad libre para actuar sobre los átomos recién formados, la constitución de estructuras empezó a buen ritmo.

¿Qué papel desempeñó ahí la materia oscura? Iba escribiendo su propia historia, paralela a la de los protones, electrones y fotones sometidos a las influencias de la gra-

CONVOCATORIA DEL I PREMIO INTERNACIONAL DE ENSAYO “ESTEBAN DE TERREROS”

de la
FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

Para obras inéditas en español sobre cultura científica y tecnológica

Dotación del premio : 10.000 euros

Bases e información:

<http://www.fecyt.es> (Convocatorias/Novedades)

Fecha límite de presentación:

30 de abril de 2005

Rosario Pino, 14-16, 7º Madrid, 28020 España

vedad y la presión. Puesto que la materia oscura interactuaba con la materia común mediante la gravedad, la presión que impedía que el gas normal colapsara no actuaba sobre ella. Las partículas de la materia oscura configuraron sus macroestructuras mucho antes de que el gas normal comenzara a organizarse. Cuando la materia común se desacopló de los fotones, la oscura ya había constituido una telaraña primitiva. Tan pronto como la materia normal perdió el sostén de la presión fotónica, la gravedad de las estructuras de materia oscura preexistentes la atrajo hacia la telaraña. En este sentido, la materia oscura le dejó marcado un camino gravitatorio a la materia ordinaria.

Una vez en marcha el proceso, quedó asentada la infraestructura gravitatoria del medio intergaláctico. La caída libre de las materias oscura y común hacia concentraciones de masa cada vez mayores proseguía hasta que la creciente presión del gas frenaba la caída. El entramado de la red cósmica tomó su forma, pero aún no había empezado la generación de estrellas y el gas del universo se hallaba en estado eléctricamente neutro. El universo había entrado en una fase en

que la materia vagaba por la oscuridad y se ensamblaba lentamente bajo la influencia gravitatoria. Continuó así hasta un determinado punto —entre los 200 millones y los mil millones de años después de la gran explosión—, hasta que un suceso alteró de raíz la naturaleza del medio intergaláctico y del universo en cuanto tal: nacieron las primeras estrellas.

Hágase la luz

Resulta desconcertante, a primera vista, que las estrellas, tan pequeñas, repercutieran en el devenir de un universo a escalas intergalácticas. Sólo tienen un diámetro de unos pocos segundos-luz, mientras que los filamentos de la red cósmica se extienden a lo largo de miles de millones de años-luz. ¿Cómo es posible que un objeto tan diminuto afecte a volúmenes tan inmensos? La respuesta se encuentra en el funcionamiento de las estrellas, los lugares donde se hallan y lo que ocurre cuando desaparecen.

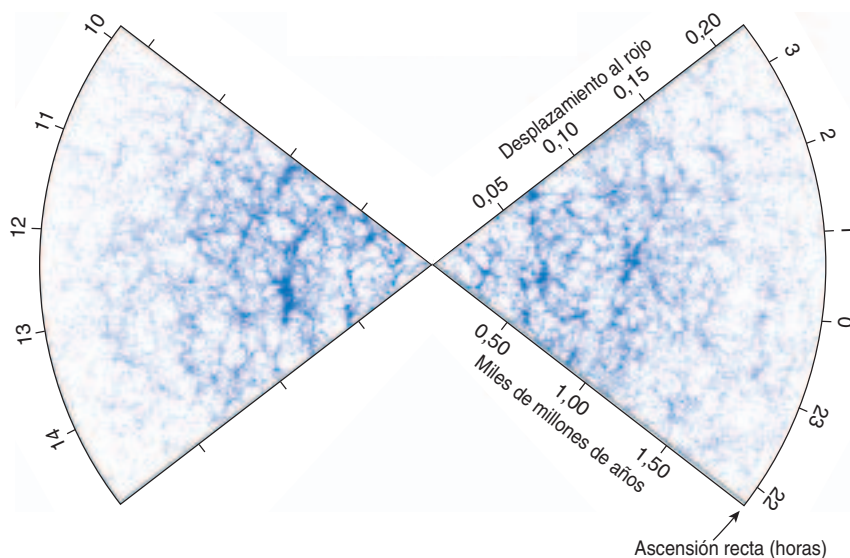
Antes de que hubiera estrellas, la materia común del universo constaba de hidrógeno y helio. Se llama gas primordial a esta mezcla porque refleja la composición química original del cosmos, justo después

de la gran explosión. Desde entonces, casi todo átomo de cualquier otro elemento —desde el argón hasta el cinc— se ha forjado en el interior de las estrellas, reactores nucleares muy eficientes: la gravedad comprime el gas a densidades tan altas, que los núcleos de los átomos chocan entre sí y se convierten en elementos más pesados. Esta nucleosíntesis estelar libera grandes cantidades de energía; es la fuente de la luz de las estrellas.

La nucleosíntesis tuvo varios efectos importantes en el medio intergaláctico. Primero, generó la luz estelar, que escapó hacia el espacio intergaláctico e interactuó con los átomos neutros. Después, fuertes vientos galácticos —poderosos efluvios de gas caliente— arrojaron al medio intergaláctico los nuevos elementos, que “contaminaron” vastas regiones del universo.

Consideremos estos procesos en más detalle y regresemos a la red cósmica. Puesto que las galaxias son unas diez mil veces más densas que el promedio cósmico, esperaríamos encontrar sistemas semejantes a la Vía Láctea dentro de las regiones más densas de la red, donde se hallan los materiales básicos (las reservas de gas) necesarios para la formación de estrellas y galaxias.

En las simulaciones, las regiones más densas se sitúan en los filamentos de la red, sobre todo allí donde se cruzan varios. Por lo tanto, a escala cósmica, las galaxias deberían comportarse como partículas atrapadas en las hebras de la red; su distribución debería reproducir las estructuras delineadas por el gas intergaláctico. Los censos tridimensionales más recientes de galaxias, como el Estudio Digital Sloan de los Cielos y el Estudio de Desplazamiento al Rojo Galáctico 2dF, revelan que las galaxias se agrupan en filamentos. Sendos grupos de investigación dirigidos por Max Tegmark, de la Universidad de Pennsylvania, y Rupert Croft, de la Universidad Carnegie Mellon, han acometido la comparación de la estadística de los agrupamientos galácticos con la del gas intergaláctico, deducida de los espectros de los cuásares. Sus primeros resultados apuntan a que los mismos procesos físicos explican la constitución de



6. LAS EXPLORACIONES del universo cercano estudian la distribución de unas 75.000 galaxias (puntos pequeños y azules). El lugar que ocupa cada galaxia en la dirección radial es proporcional a su distancia a la Tierra (situada en la intersección de las dos cuñas). La posición angular (o ascensión recta en horas) corresponde a su localización a lo largo de una fina tira del cielo. Las galaxias trazan una clara red de estructuras filamentosas análoga a la red cósmica de las simulaciones numéricas.

la red de gas intergaláctico y de las macroestructuras galácticas.

A medida que las galaxias se condensaban en la red y empezaban a brillar, el universo se fue llenando de la primera luz tras la gran explosión: la era oscura había finalizado. Y las estrellas empezaron con diligencia a producir elementos pesados. Cuando se hubo formado un número notable de estrellas, la producción acumulativa de luz y productos químicos alteró la naturaleza del medio intergaláctico. La expresión “retroalimentación galáctica” designa el conjunto de estos efectos, porque las galaxias actúan sobre el medio que las creó. Aquí trataré sólo de dos tipos de retroalimentación: la radiación y la contaminación química.

El primer agente de la retroalimentación galáctica fue la luz estelar, que reionizó el medio intergaláctico. Recuérdese que la materia común empezó a construir grandes estructuras durante la era de la recombinación, cuando la unión de protones y electrones creó los átomos de hidrógeno. El gas del universo se mantuvo en un estado eléctricamente neutro durante algún tiempo. Las temperaturas, muy frías, apenas alcanzaban unas decenas de grados sobre el cero absoluto. Cuando los primeros fotones estelares escaparon de las galaxias, interactuaron con los átomos de hidrógeno; les arrancaron electrones que habían permanecido ligados a esos átomos desde la recombinación. El gas se calentó hasta los 10.000 kelvin. Esa reionización ocurría en burbujas centradas alrededor de las incipientes galaxias; la luz de las estrellas no había tenido tiempo de internarse mucho en el espacio intergaláctico. Pero según iban encendiéndose más galaxias, las burbujas ionizadas crecieron hasta que las procedentes de galaxias vecinas llegaron a solaparse. Pronto, el volumen entero del universo volvió a estar ionizado otra vez (véase la figura 5).

Ahora creemos que el universo salió de su época oscura y se reionizó cuando apenas contaba con mil millones de años, menos de un 10 por ciento de su edad actual. Hoy día, sólo un átomo de hidrógeno de cada 10.000 se halla en estado neutro.



7. EL “VIENTO GALACTICO” procedente de la galaxia M82 expulsa enormes cantidades de material rico en elementos pesados (*rojo*) al medio intergaláctico. El centro de M82 está pasando por un período de intensa formación estelar (un “brote de formación de estrellas”). Las estrellas de mayor masa mueren a poco de nacer, en una sucesión de explosiones supernova que arroja materia fuera de la galaxia.

La temperatura media del gas intergaláctico sigue siendo de unos 10.000 kelvin.

Poderoso viento

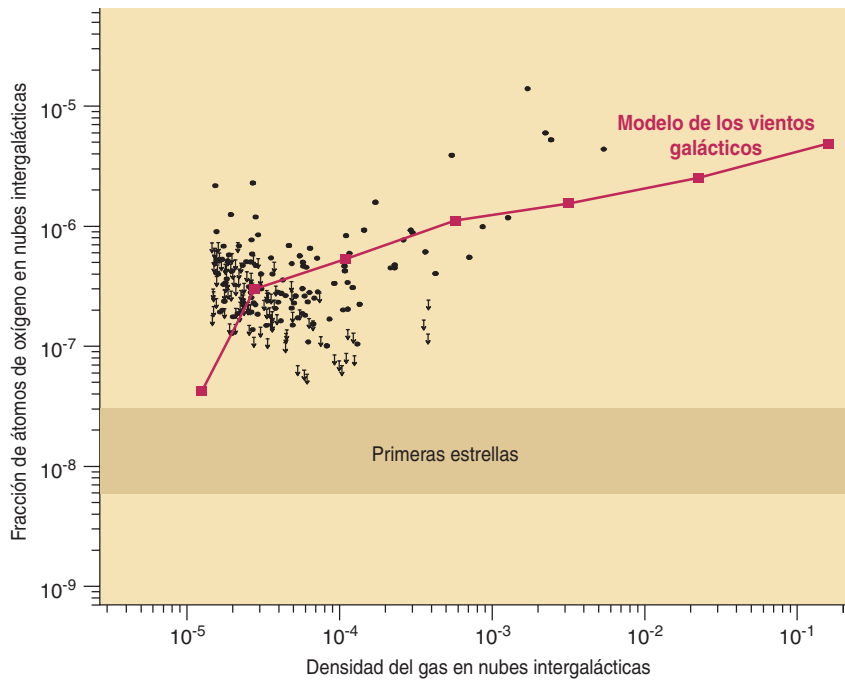
Durante mucho tiempo se ha creído que el medio intergaláctico era primigenio y que sólo se producían y repartían nuevos elementos dentro de las propias galaxias. Pero en los espectros de los cuásares se observaron débiles rayas de absorción, más hacia el extremo rojo del espectro que la línea de emisión del hidrógeno. Las generaban diferentes elementos —en el caso de la figura 2, carbono y silicio—, cuyas longitudes de onda características son más rojas que la línea de hidrógeno de 121,56701 nanómetros.

Las líneas de absorción de estos elementos pesados se observan en regiones que también contenían cantidades ingentes de hidrógeno, los halos gaseosos que rodeaban a las primeras galaxias, a cuyas estrellas, se suponía, se debía ese enriquecimiento químico. Sin embargo, a principios de los años noventa, los espectros de cuásares tomados por Lennox Cowie y Antoinette Songaila con los nuevos telescopios Keck mostraban elementos pesados en regio-

nes muy alejadas de cualquier galaxia. Este descubrimiento indicó que la contaminación química del medio intergaláctico pudo haber sido mucho más eficiente de lo que se pensaba.

No obstante, la concentración de elementos pesados en el medio intergaláctico es muy baja: por ejemplo, sólo hay un átomo de carbono por cada millón de átomos (casi todos de hidrógeno). Es decir, una caja de espacio intergaláctico de 100 metros de lado contendría sólo un átomo de carbono. Aun así, esta pequeña cantidad demuestra que había una mezcla de elementos pesados por toda la red cósmica en la juventud del universo. ¿Cómo pudieron llegar hasta allí, tan lejos de las estrellas y las galaxias que los fabricaron?

Los indicios sugieren que los proyectaron violentos vientos galácticos. Estas corrientes de materia fluyen desde las galaxias en las que se están formando estrellas copiosamente. En todas las galaxias, las estrellas más pesadas despiden un brillo mayor y producen nuevos elementos. Quemar tan deprisa, que consumen todo su combustible nuclear y no pueden continuar convir-



8. LA CONCENTRACION DE OXIGENO en las nubes intergalácticas señala que los elementos pesados se dispersaron a lo largo de la red cósmica, impulsados por los vientos galácticos, no por las primeras estrellas. La fracción de oxígeno es un trazador de la distribución de los elementos pesados. La densidad relativa del gas de las nubes varía casi exactamente con la inversa de la distancia entre éstas y la galaxia. Si las primeras estrellas hubieran sido los principales dispersores, el oxígeno habría tenido tiempo suficiente para mezclarse de manera homogénea por la red cósmica y mostraría una concentración baja y constante (*barra más oscura*). Las concentraciones de oxígeno (*puntos*) respaldan el modelo de los vientos galácticos, aunque en algunos casos (*flechas pequeñas*) sólo se pueden establecer límites superiores. Las distancias, determinadas por el desplazamiento al rojo, de las nubes observadas nos llevan al universo de hace 11.200 millones de años, cuando la densidad gaseosa media era unas 40 veces mayor que hoy día.

tiendo elementos ligeros en elementos pesados. Cuando el reactor de una estrella de gran masa se apaga, la estrella acaba su vida en una explosión de supernova. La energía del estallido de una supernova típica es comparable a la detonación de 10^{31} bombas atómicas; los restos de la estrella moribunda, incluidas las nuevas sustancias generadas, salen lanzados al espacio.

Pese a su fuerza explosiva, una sola supernova no basta para contaminar el medio intergaláctico: el campo gravitatorio de la galaxia atrapa de nuevo los restos de la explosión antes de que puedan escapar. Sin embargo, las galaxias experimentan en ocasiones intensos brotes de formación de estrellas en los que éstas nacen y mueren entre 10 y 50 veces más deprisa de lo normal. En estos brotes de formación

estelar se suceden velozmente las supernovas. La suma de su energía impulsa los restos hacia el exterior de la misma forma que un cohete se lanza en varias fases, hasta romper la barrera gravitatoria y expulsar los elementos pesados al medio intergaláctico. Se ha observado este fenómeno en algunas galaxias cercanas.

A pesar de que podemos estudiar con gran detalle los brotes cercanos y sus chorros de materia, estas galaxias son escasas en el universo local. La mayoría de las galaxias forman con discreción estrellas y retienen los elementos pesados que producen. Sin embargo, en el universo joven, la situación tuvo que ser diferente. Las observaciones de galaxias lejanas, realizadas por Max Pettini, de la Universidad de Cambridge, muestran que los chorros de

gas eran muy frecuentes cuando el universo tenía un 15 por ciento de su edad actual. De ahí se siguen dos consecuencias importantes: casi todas las galaxias que vemos hoy han conocido un período de intensa formación estelar en el pasado; y grandes cantidades de elementos pesados se arrojaron al medio intergaláctico en una fase temprana de la historia del universo. Por lo tanto, ha habido tiempo suficiente para que este material haya recorrido grandes distancias y se haya mezclado con el gas intergaláctico primordial.

Los estudios de las galaxias primitivas y de su contribución al medio intergaláctico definen una frontera fundamental en nuestro conocimiento de las primeras estrellas y de las estructuras cósmicas. Quedan aún por responder numerosas preguntas. ¿Cuándo y cómo nacieron las primeras estrellas? Los elementos pesados, ¿han invadido el universo entero o todavía queda gas no contaminado procedente de la gran explosión? ¿Fueron las estrellas que reionizaron el medio las mismas que produjeron los elementos pesados intergalácticos?

Durante los últimos años he investigado algunas de estas cuestiones con Wallace Sargent, del Instituto Tecnológico de California, y Michael Rauch, de los Observatorios Carnegie. Hemos medido las concentraciones de elementos pesados en la red cósmica temprana con el fin de saber si hay rincones del universo libres de contaminación a los que todavía no hayan llegado los vientos galácticos. Por ahora hemos detectado elementos pesados en todas las hebras de la red cósmica, pero no está claro que la esfera de influencia de los vientos se extienda más allá de los filamentos, dentro de los vacíos intergalácticos. En estas regiones remotas, las densidades esperadas de elementos pesados son tan pequeñas, que ni siquiera las observaciones más sensibles resuelven las líneas de absorción. No obstante, nuestros resultados apuntan a que el contenido de los vientos galácticos se ha dispersado por el universo entero, antes de que el cosmos tuviera apenas un 20 por ciento de su edad actual.

También hemos comparado nuestras observaciones con distintos mo-

delos de formación estelar y producción química para determinar si las estrellas que reionizaron el universo fueron las mismas que contaminaron el medio intergaláctico. Nuestros resultados dan a entender que las primeras estrellas no contribuyeron significativamente al enriquecimiento químico del medio, sobre todo porque su momento de máximo auge fue muy corto. Creemos que la retroalimentación galáctica sucedió en diferentes oleadas. La primera generación de estrellas reionizó el universo; las generaciones posteriores lo han ido enriqueciendo poco a poco con metales.

Desde el punto de vista teórico, las simulaciones cósmicas más avanzadas incorporan ahora modelos realistas de los vientos galácticos y del enriquecimiento químico del universo. La física de la formación estelar y de los chorros de materia es tan compleja, que incluso los modelos numéricos más refinados tienen que recurrir a aproximaciones para que el problema sea abordable con métodos computacionales. Este campo progresa deprisa, de la

mano del avance de la teoría y las observaciones.

Hay, sin embargo, muchos detalles que afinar. ¿Exactamente cuándo y cómo surgieron las primeras estrellas? ¿Cómo interaccionan las galaxias y el medio intergaláctico? Y, quizá sea lo más importante, ¿cuál

es la naturaleza de la materia oscura? Cuando haya transcurrido el tiempo suficiente para tener una perspectiva histórica, los últimos diez años se recordarán por la creación de un modelo estándar del cosmos que reúne todo lo que sabemos de las galaxias y del medio intergaláctico.

El autor

Robert A. Simcoe tiene una beca Pappalardo en física del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Trabaja a menudo con los telescopios gemelos Magallanes de 6,5 metros, en el desierto chileno de Atacama.

© *American Scientist Magazine*.

Bibliografía complementaria

THE LYMAN ALPHA FOREST IN THE SPECTRA OF QSOs. M. Rauch en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 36, págs. 267-316; 1998.

THE REST-FRAME OPTICAL SPECTRA OF LYMAN BREAK GALAXIES: STAR FORMATION, EXTINCTION, ABUNDANCES, AND KINEMATICS. M. Pettini et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 554; págs. 981-1000; 2001.

CHARACTERIZING THE WARM-HOT INTERGALACTIC MEDIUM AT HIGH REDSHIFT: A HIGH-RESOLUTION SURVEY FOR OVI AT REDSHIFT 2.5. R. A. Simcoe, W. L. W. Sargent, M. Rauch en *The Astrophysical Journal*, vol. 578, págs. 737-762; 2002.

THE DISTRIBUTION OF METALLICITY IN THE INTERGALACTIC MEDIUM AT REDSHIFT 2.5: OVI AND CIV THE SPECTRA OF 7 QSOs. R. A. Simcoe, W. L. W. Sargent, M. Rauch en *The Astrophysical Journal*. En prensa.

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

Desde el pasado 1 de enero de 2004, la FECYT tiene suscrita una licencia nacional que permite a la comunidad científica e investigadora española el acceso libre y gratuito a través de internet a la Web of knowledge, de Thomson Scientific

Durante 2004, se han atendido **3.000.000 de consultas**, se ha dado acceso a **639 entidades** y se ha proporcionado formación a **6.246 usuarios**

Para más información:

www.fecyt.es

infowok@fecyt.es

Rosario Pino, 14-16, 7º Madrid, 28020 España. Tel.: 91 425 09 09