

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 1994. Su apariencia puede haber cambiado al ser reprocesado con pdflatex y nuevos ficheros de estilo.

## LA INFANCIA DE LAS GALAXIAS Santiago García Burillo

*Centro Astronómico de Yebes*  
Instituto Geográfico Nacional

### Introducción

En este artículo se hace una breve revisión del estado actual del estudio de las protogalaxias, es decir, de lo que los astrónomos consideran como los progenitores o antecedentes de las galaxias actuales. En la primera parte se describe el grado de conocimiento de las grandes estructuras del universo observable (el universo "a gran escala"), y cómo el estudio de la distribución aparente de la materia "visible", en forma de galaxias, nos puede ayudar a comprender la forma en que éstas han nacido. La segunda parte recoge un resumen de las teorías actuales sobre la formación de galaxias. Por último se acaba con un apartado "práctico", donde se analizan las dificultades existentes para la búsqueda de posibles candidatos a protogalaxias, así como la forma en que algunos astrónomos han superado tales impedimentos observacionales. Estos intentos han dado muy recientemente su fruto en la detección del primer candidato claro a protogalaxia.

La finalidad de este artículo es más informativa que erudita. El lector interesado en estos temas debe buscar entre la abundante bibliografía especializada si desea profundizar sus conocimientos.

### El universo a gran escala

A principios del siglo XX (1920–1930), Shapley y Hubble establecieron fehacientemente la naturaleza extragaláctica de la mayoría de las nebulosas brillantes, que Herschel y Dreyer ya habían empezado a catalogar en el siglo XIX. Dichas nebulosas pasaron así a ser consideradas como "galaxias" (a semejanza de la nuestra). El estudio de su distribución fue el punto de partida para el desarrollo de la astronomía extragaláctica y de la cosmología observacional.

En una definición simplista, puede decirse que las galaxias son entidades donde se concentra la mayor parte de la masa aparente (o "visible") del universo. Así, mientras la densidad media en el interior de una galaxia es del orden de  $2 \cdot 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$ , la densidad media del universo oscila probablemente entre  $10^{-29}$  y  $10^{-31} \text{ g cm}^{-3}$ .

Los estudios más completos sobre la estructura a gran escala del universo revelan que las galaxias están distribuidas uniformemente (con una incertidumbre cifrada en un factor 2) si subdividimos el cielo observable en celdas con  $100 \text{ Mpc}^1$  como tamaño característico. También aparecen distribuidos isotrópicamente cuásares y radiofuentes<sup>2</sup>. De la misma forma, la radiación cósmica de fondo (considerada un vestigio de la explosión inicial, conocida como "Big Bang") presenta un elevado grado de isotropía que ha sido corroborada por las últimas observaciones del satélite COBE. Con estos nuevos datos se limita su grado de anisotropía espacial relativa a una parte en  $10^5$ . Finalmente, la ley de expansión universal de Hubble<sup>3</sup> parece ser independiente de la dirección de observación. Este conjunto de evidencias observacionales respaldan la hipótesis del llamado Principio Cosmológico, que sirve de punto de partida para la construcción de cualquier modelo plausible de universo<sup>4</sup>.

Sin embargo, cuando descendemos a escalas inferiores a  $100 \text{ Mpc}$ , la distribución de las galaxias dista mucho de ser homogénea. Antes al contrario, las galaxias aparecen agrupadas en parejas, asociaciones, cúmulos, supercúmulos y filamentos (en orden creciente de jerarquía asociativa). Nuestra propia Galaxia forma, junto con M31 (Andrómeda) y otras diez galaxias enanas, el Grupo Local; a su vez éste es parte integrante del llamado Supercúmulo Local o de Virgo, que contiene unas 50 asociaciones de galaxias.

El establecimiento de tales asociaciones es posible gracias a la estimación de distancias proporcionada por la ley de expansión de Hubble<sup>5</sup>. De este modo pueden confeccionarse mapas en tres dimensiones del uni-

<sup>1</sup>En astronomía extragaláctica las distancias y los tamaños suelen expresarse, respectivamente en megaparsecs ( $1 \text{ Mpc} \simeq 3 \cdot 10^{24} \text{ cm}$ ) y kiloparsecs ( $1 \text{ kpc} \simeq 3 \cdot 10^{21} \text{ cm}$ ). El diámetro de la Vía Láctea es de unos  $30 \text{ kpc}$  y su distancia a la galaxia de Andrómeda es de  $0.7 \text{ Mpc}$

<sup>2</sup>Estos objetos son usualmente considerados como galaxias o núcleos de galaxias en sus primeras etapas de evolución.

<sup>3</sup>La ley de Hubble establece la existencia de una velocidad de recesión universal de las galaxias que es proporcional a la distancia al observador.

<sup>4</sup>El Principio Cosmológico afirma que ningún observador del universo es privilegiado y que éste se presenta ante él como globalmente isótropo.

<sup>5</sup>La ley de Hubble debe calibrarse a su vez a partir de otros estimadores independientes de distancias.

verso. Un ejemplo ilustrativo se muestra en la figura 1, donde queda representada la distribución de unas 1000 galaxias en un intervalo de 6 grados en declinación, 9 horas en ascensión recta y profundidad dada por una velocidad de recesión  $v_{exp} \simeq 12.000 \text{ kms}^{-1}$ . Una simple inspección de este mapa tridimensional (3-D) nos revela el grado de anisotropía en la distribución de las galaxias y la peculiar organización y topología de dicha distribución: las galaxias se agrupan en filamentos y forman las paredes de cavidades más o menos esféricas (a modo de "burbujas"), desde escalas del orden de  $10 \text{ kpc}$  hasta  $100 \text{ Mpc}$ . Hay que subrayar que el trazado de estas estructuras ha sido posible gracias a la realización de exploraciones que muestrean zonas cada vez más extensas del cielo, tanto en ascensión recta y declinación como en magnitud límite accesible, o equivalentemente en profundidad o corrimiento hacia el rojo (velocidad de recesión).

La labor de los astrónomos teóricos en el campo de la formación de las galaxias y la de los cosmólogos observacionales en busca de nuevos datos sobre la estructura del universo a gran escala, no acaba sino de empezar. No obstante, y como se analiza más adelante, en la actualidad pueden distinguirse grosso modo dos teorías sobre la formación de galaxias: la primera de ellas, denominada teoría *Top down* (de gran a pequeña escala) considera que las primeras estructuras que se formaron fueron filamentos, supercúmulos y cúmulos, siendo las galaxias el último paso en la fragmentación por inestabilidad gravitacional. La segunda teoría *Bottom up* (de pequeña a gran escala) contempla una secuencia jerárquica en que primero se forman estructuras subgalácticas (cúmulos estelares), después las galaxias y por atracción gravitacional entre éstas se constituyen asociaciones de galaxias, y en última instancia cúmulos y supercúmulos.

Las teorías sobre la formación y evolución de las galaxias deben responder a una serie de cuestiones básicas: no sabemos con certeza si todas las galaxias resultaron de la condensación diferencial del fluido cósmico, por procesos de inestabilidad gravitacional, o si algunas pudieron formarse en explosiones u otros fenómenos violentos. También es incierto si la formación de galaxias tuvo lugar en una época bien definida o si éste es todavía un proceso activo. Debemos asimismo dar cuenta de la topología observada en la distribución de las galaxias en el universo. Por otra parte cualquier teoría sobre formación de galaxias debe tratar de explicar si la secuencia de Hubble<sup>6</sup> es o no una secuencia evolutiva y en caso de no serlo, identificar los parámetros (masa, momento angular, turbulencia, ...) que determinan la formación de uno u otro tipo de galaxia preferentemente.

<sup>6</sup>La secuencia de Hubble clasifica los diferentes tipos morfológicos observados de galaxias: elípticas, lenticulares, espirales e irregulares.

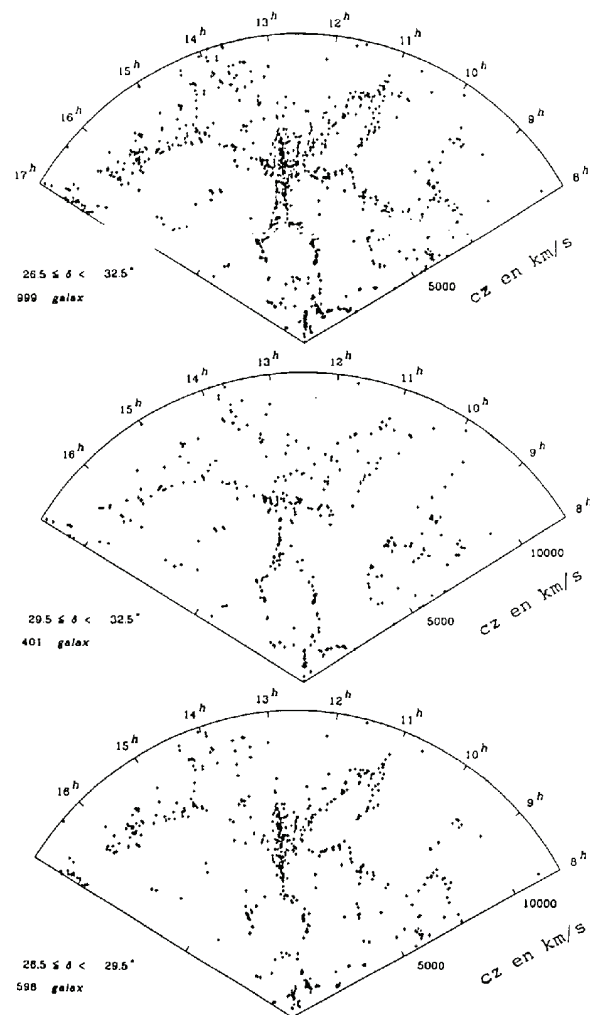


Figura 1: La figura constituye un mapa 3D, donde se representan, para un intervalo de declinación de 3 grados, las velocidades de recesión de 1000 galaxias, medidas en un intervalo común de ascensión recta de 9 horas. Nótese la particular disposición de las galaxias en estructuras a modo de filamentos, cavidades y burbujas. Los mapas A, B y C designan respectivamente diferentes muestras conteniendo 1000, 400 y 600 galaxias, donde A es el resultado de la combinación de B y C.

## Las teorías sobre la formación de galaxias

Todas las teorías sobre la formación de galaxias coinciden en suponer que éstas nacen del crecimiento de inestabilidades gravitacionales de la materia que constituía el universo "joven" (lo que antes hemos llamado "fluido cósmico de Hubble"). Queda por determinar ahora el momento en que esas inestabilidades se producen, su origen, el tipo de materia a la que afectan (materia bariónica, esto es, básicamente protones y neutrones, o bien materia oscura sea cual sea su naturaleza exacta), y su evolución en el tiempo.

Es muy improbable que las perturbaciones iniciales que desencadenan el proceso se hayan producido de forma espontánea y sean el reflejo de fluctuaciones puramente estadísticas del fluido cósmico. En efecto, si suponemos que dicho fluido, de densidad media  $\rho$ , se comporta como un gas perfecto, las fluctuaciones relativas de la densidad  $\delta\rho/\rho$  serían proporcionales a  $N^{-1/2}$ , donde  $N$  es el número de partículas que forman la "muestra" de materia en la que hacemos el cálculo. Obviamente nos interesa analizar cuál sería el nivel de fluctuaciones esperado para una muestra que pudiera dar lugar a una protogalaxia. Si se toma  $N$  como el número de bariones y siendo éste de  $\approx 2 \cdot 10^{69}$  para una galaxia típica de masa  $M \approx 2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ <sup>7</sup>, el nivel relativo de fluctuaciones  $\delta\rho/\rho$  sería de  $2 \cdot 10^{-35}$ . Teniendo en cuenta que actualmente el contraste de densidades observado en el universo, definido como  $\rho_{galaxia}/\rho_{universo}$ , es de  $\approx 10^6$ , una fluctuación estadística debería crecer un factor  $5 \cdot 10^{40}$  para llegar a desencadenar la formación de una galaxia. Un factor tan grande no es considerado seriamente por ninguna de las teorías actuales sobre formación de galaxias, que prevén un crecimiento  $\approx 10^{30}$  veces inferior.

Independientemente de la naturaleza (aún hoy desconocida) de las fluctuaciones originales de la densidad, la idea del crecimiento de éstas por inestabilidad gravitacional es simple e intuitiva: Una acumulación de materia producida en un medio estático de densidad uniforme ( $\rho$ ), puede eventualmente atraer a material circundante, amplificándose la perturbación por efecto de la gravedad, siempre que ésta venza el efecto dispersivo de la energía cinética o presión. Si se realiza un análisis de perturbaciones en primer orden de la ecuación de estado del fluido, es decir, cuando buscamos soluciones a pequeñas perturbaciones de la densidad y nos ocupamos de su crecimiento en la fase lineal<sup>8</sup>, se obtienen dos familias de soluciones para

<sup>7</sup>Mediante el símbolo  $M_{\odot}$  indicamos la masa del Sol, unidad "natural" de masa en astrofísica. Equivale a  $\approx 2 \cdot 10^{30}$  kg

<sup>8</sup>Llamamos fase lineal a aquella que va desde el inicio de la perturbación  $\delta\rho_{t=0}$ , donde

$\delta\rho$  en función del tiempo, dependiendo de que sea la gravedad o la presión las que dominen. En el primero de los casos, tendremos un crecimiento exponencial (solución inestable) de las perturbaciones con un tiempo característico igual al de caída libre ( $T_g \sim (G\rho)^{-1/2}$ ); si es la presión el término dominante, la solución corresponde a una onda sonora de velocidad  $c_s$  (solución oscilatoria estable) y periodo  $T_s \sim c_s^{-1}L$ , donde  $L$  representa las dimensiones del sistema. El límite entre ambas familias, definido por  $T_g \sim T_s$ , sirve para definir la llamada longitud y masa de Jeans<sup>9</sup> ( $L_j$  y  $M_j \sim L_j^3\rho$  respectivamente, donde  $M_j \sim c_s^3 G^{-3/2} \rho^{-1/2}$ ).

La primera e importante corrección a este modelo simple, viene de considerar que el universo está en expansión con un tiempo característico  $T_{exp}$ , que los modelos cosmológicos estiman comparable al de caída libre ( $T_g$ ). Intuitivamente podemos adivinar que el efecto de la expansión va suponer un freno al crecimiento de las inestabilidades gravitacionales. En efecto, cuando se incluye la expansión del universo en las ecuaciones linealizadas del fluido, aparece un término de "fricción" opuesto al de caída, de forma que  $\delta\rho$  crece ahora más lentamente que en un universo estático ( $\delta\rho(t) \sim t^\alpha$ , con  $\alpha \sim 1$ , dependiendo su valor del modelo cosmológico en concreto). En resumen, puede afirmarse que en un universo en expansión las inestabilidades aunque crezcan, lo hacen lentamente.

La segunda importante corrección al primer modelo es la de incluir también en las ecuaciones de evolución del fluido el campo de radiación. Las teorías estándar dividen la vida del universo en dos "Eras", llamadas "Era de la Radiación" y "Era de la Materia" (la primera precede a la segunda), dependiendo de que sea la radiación o la materia quien "domine" en el cómputo de la densidad de energía total. Las dos Eras están separadas en el tiempo por la Epoca de Recombinación<sup>10</sup>, que se localiza a un redshift de  $z_{rec} \sim 10^3$ . Antes de la recombinación, materia y radiación se encuentran acopladas, es decir, interactúan eficazmente; tras la recombinación se produce el desacoplamiento entre materia y radiación. Todas las teorías consideran que el crecimiento de las primeras inhomogeneidades en la materia bariónica sólo puede producirse en la época de recombinación. Esta circunstancia limita dramáticamente la capacidad de crecimiento de las inhomogeneidades de la materia bariónica en la fase lineal a sólo un factor  $\sim 10^3$ . Dado que la fase lineal termina cuando  $\delta\rho_t/\rho \sim 1$ , quiere ello decir que

$\delta\rho_{t=0}/\rho \ll 1$ , hasta el momento en que  $\delta\rho_t/\rho \sim 1$ .

<sup>9</sup>La masa de Jeans puede así definirse como la máxima masa que puede soportar su gravedad sin sufrir colapso gravitacional.

<sup>10</sup>En esta época los electrones se recombinan con protones y neutrones para empezar a formar átomos.

necesitamos inhomogeneidades iniciales en la materia bariónica del orden de  $\delta\rho_{t=0}/\rho \sim 10^{-3}$ , para engendrar galaxias. Esta estimación contradice por completo los valores observados de las fluctuaciones del fondo de radiación cósmica<sup>11</sup> que son inferiores a una parte en  $10^5$ . Sin duda es ésta la principal dificultad a la que debieron hacer frente las primeras teorías de formación de galaxias.

Para resolver la dificultad antes enunciada, los últimos modelos propuestos hacen intervenir una tercera componente adicional en el fluido cósmico, a la que se denomina como "materia oscura". El nombre de "materia oscura" se debe sencillamente a su carácter invisible, esto es, a su ausencia de emisividad en forma de fotones<sup>12</sup>. Las partículas de la materia oscura, cuya naturaleza exacta se desconoce (¿neutrinos masivos?, ¿fotinos?, ...) contribuyen, por una parte, a hacer posible el "cierre" del universo<sup>13</sup> y a ayudar al nacimiento de las galaxias: En efecto, en los modelos con materia oscura, el crecimiento de las perturbaciones sobre la densidad del universo (que afectan ahora también a dicha materia) puede empezar antes de la recombinación. En tal caso, la fase lineal se prolonga durante más tiempo y para llegar a generar galaxias, se necesitan inhomogeneidades iniciales en la densidad de tan sólo  $\sim 10^{-5}$ , que son de este modo compatibles con las fluctuaciones observadas del fondo de radiación cósmica.

Existen, dentro de los modelos que incluyen materia oscura, dos familias de teorías, dependiendo de que las partículas que integran esta componente, sean o no relativistas en el momento en que se produce el desacoplamiento entre la materia y la radiación. Se habla de materia oscura fría o *Cold Dark Matter* (CDM) en el caso de partículas no relativistas (por ejemplo fotinos) y de materia oscura caliente o *Hot Dark Matter* (HDM) para partículas relativistas (por ejemplo neutrinos). Las dos teorías contemplan de modo bien diferente el proceso de formación de galaxias. Así, de acuerdo con el

<sup>11</sup>Normalmente si se supone que las fluctuaciones del fluido cósmico son adiabáticas, las inhomogeneidades se producirán simultáneamente en el gas de bariones y de fotones, esto es, a toda fluctuación de densidad corresponderá otra en la temperatura de radiación del cuerpo negro.

<sup>12</sup>La necesidad imperiosa de materia oscura se hace sentir no sólo en el campo de la cosmología sino que concierne otros campos de la astrofísica. Así, las curvas de rotación de las galaxias espirales permanecen todavía planas en regiones que van más allá del disco óptico de las mismas, lo que sólo puede explicarse con la existencia de materia no detectada más que por sus efectos gravitatorios y de ahí su nombre de "materia oscura". De la misma forma, la dinámica observable en algunos cúmulos de galaxias requiere la presencia de materia "invisible".

<sup>13</sup>Los modelos cosmológicos más aceptados prevén que la expansión del universo se parará asintóticamente o incluso comenzará una etapa de contracción posterior. Para hacer posible este cierre del ciclo, se precisa una densidad media mínima de materia.

modelo CDM, después de la recombinación, las masas de gas que se convierten en gravitacionalmente inestables son del orden de  $\sim 10^6 M_{\odot}$ , lo que corresponde al contenido típico de un cúmulo de estrellas. En este caso, por colapso el protocúmulo da lugar al cúmulo al fragmentarse selectivamente aquél para formar estrellas. Después y por interacción gravitacional, se forman galaxias, y del mismo modo cúmulos y supercúmulos de éstas. Esta teoría es conocida por el apelativo de teoría *Bottom Up*, debido al orden jerárquico ("de abajo a arriba") con el que aparecen sucesivamente las estructuras del universo observable. Por el contrario, en el modelo HDM, la masa que se convierte en "eficazmente" inestable es ahora del orden de  $\sim 10^{13} M_{\odot}$ , lo que corresponde al contenido de masa de un cúmulo de galaxias (éstas acabarían formándose por fragmentación de la nube). Por razones obvias, este modelo se conoce como teoría *Top Down*.

No es en modo alguno nuestro objetivo exponer aquí el detalle de las ventajas e inconvenientes de cada uno de los modelos. Sólo cabe decir que ninguno de ellos es universalmente aceptado ni da cuenta de todas las observaciones (independientemente de los problemas teóricos que dejan sin resolver).

## Dónde y cómo buscar protogalaxias

Los primeros objetos que los astrónomos asociaron con galaxias primigenias fueron los cuásares. Aunque inicialmente fue en el dominio radio en el que se descubrieron, poco a poco se hallaron contrapartidas ópticas a las fuentes radio que ayudaron a aclarar su verdadera naturaleza. Los cuásares (QSO o *quasi stellar objects*) son objetos de apariencia estelar (compactos), localizados entre  $z \sim 0,1 - 3$ , presentan líneas de emisión anchas desplazadas considerablemente hacia el rojo y tienen una luminosidad absoluta espectacular. Las dos últimas características definitorias se "apoyan" entre sí: En efecto, el elevado redshift observado en las líneas, nos hace situar a estos objetos a grandes distancias, en la medida en que interpretemos el desplazamiento como de origen cosmológico, es decir, si suponemos que los cuásares obedecen a la ley de expansión universal de Hubble. Al encontrarse a grandes distancias, las luminosidades aparentes observadas (tanto en radio como en el óptico) se traducen en luminosidades absolutas muy grandes. Así, a modo de ejemplo, citaremos el caso del cuásar 3C273 para el que se estima una luminosidad intrínseca de

$\sim 10^{14} L_{\odot}$ <sup>14</sup>.

No es fácil encontrar procesos físicos capaces de generar tan ingentes cantidades de energía. Estas dificultades llevaron a algunos teóricos a pensar que los cuásares no se hallan tan lejos como su redshift pudiera hacerlos pensar. La interpretación alternativa consistía en negar el origen cosmológico del desplazamiento espectral observado, que no puede así traducirse simplemente en distancias de acuerdo con la ley de Hubble. Siguiendo esta argumentación, el desplazamiento podría ser de origen gravitacional: tratándose de objetos masivos, los fotones emitidos sufrirían un desplazamiento hacia el rojo en la dirección de observación. Se invocaron otros posibles mecanismos: movimientos propios de los cuásares o incluso procesos físicos desconocidos. No obstante, de todas las posibles interpretaciones, la más plausible hasta el momento es la del origen cosmológico del redshift. En ese marco, se piensa que los cuásares son los núcleos activos de las primeras galaxias ya formadas. De hecho, numerosas observaciones han demostrado que para redshifts bajos ( $z \sim 0,1 - 0,5$ ), los cuásares se encuentran efectivamente en el centro de galaxias comunes. El estudio de dichas galaxias ha permitido concluir que pueden ser tanto espirales como elípticas.

Los cuásares son probablemente un eslabón más en la cadena que describe el nacimiento y formación de las galaxias. Si describimos el universo observable según un modelo con varias capas concéntricas simplificado, se tendría: una primera capa interna formada por galaxias próximas "normales", una segunda por galaxias "ultraluminosas" y galaxias "anormales" con núcleos activos (galaxias tipo Seyfert), una tercera donde situaríamos los cuásares y finalmente una última capa que albergaría las protogalaxias. Esta estructura en capas revela una secuencia paralela en el tiempo, donde el último eslabón (en este caso, los objetos más jóvenes) serían las protogalaxias.

Los modelos numéricos que simulan la formación de protogalaxias hasta su primer brote de formación estelar, indican que deben buscarse posibles candidatos de estos objetos  $10^8 - 10^9$  años después de la explosión inicial. Ello corresponde a valores de redshift que oscilan entre  $z \sim 3 - 25$ . Este es un intervalo de redshifts tan amplio que hace muy difícil, por extremadamente laboriosa, la identificación de protogalaxias.

En primer término cabe preguntarse qué debe entenderse por protogalaxia. Esta pregunta es crucial, pues de la respuesta (que aún hoy re-

<sup>14</sup>La luminosidad del Sol,  $L_{\odot}$ , se utiliza como unidad "natural", para indicar la potencia emitida en forma de fotones por un astro, siendo  $1 L_{\odot} \simeq 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$



sulta controvertida) va a depender en qué longitudes de onda se realice su búsqueda. Normalmente se admite que una protogalaxia es una nube de gas neutro (atómico y/o molecular) en proceso de colapso gravitacional lo suficientemente avanzado como para que haya tenido lugar ya un primer brote de formación estelar masiva (brote que se supone puede ser muy violento por la gran cantidad de material disponible para formar estrellas).

Los primeros intentos de búsqueda sistemática de protogalaxias se centraron en las líneas de emisión Lyman alpha ( $\text{Ly}\alpha$ ), que tradicionalmente se asocian con procesos de formación estelar masiva<sup>15</sup>. Recientemente se ha publicado un resultado negativo (por la ausencia de detección) de búsqueda de protogalaxias, en un intervalo de redshift  $\delta z \sim 2,2 - 3,3$  y usando como trazador esta línea. Los autores de esta exploración avanzan diferentes posibles explicaciones a esta ausencia aparente de objetos. En primer lugar la emisión  $\text{Ly}\alpha$  podría verse muy afectada por extinción, debida a las ingentes cantidades de gas neutro, y presumiblemente de polvo, asociado al gas, que se suponen presentes en una protogalaxia. Sin embargo otros autores piensan que la cantidad de polvo asociado al gas neutro puede ser muy baja, habida cuenta que éste ha sido poco enriquecido por procesos de formación estelar, aún incipientes en esa época<sup>16</sup>. Por otra parte, los primeros brotes de formación estelar masiva pueden ser tan violentos como breves: el llamado *flash*  $\text{Ly}\alpha$  puede durar tan poco tiempo que la probabilidad de observarlo resulta a fin de cuentas escasa. Así, aunque los brotes sean muy espectaculares, algunos autores han estimado recientemente que el intervalo de redshifts en que pueden ser observados se reduce a una capa de espesor  $\delta z \sim 0,01$ . El problema ahora es encontrar en torno a qué valor de redshift debemos buscarlos.

Aún en el supuesto de que la emisión  $\text{Ly}\alpha$  nos sea ocultada por la extinción del polvo, la detección de protogalaxias puede intentarse en otras longitudes de onda: la emisión radio del hidrógeno neutro, del gas molecular (a través de las líneas de emisión de la molécula de monóxido de carbono, CO) o la emisión infrarroja del polvo.

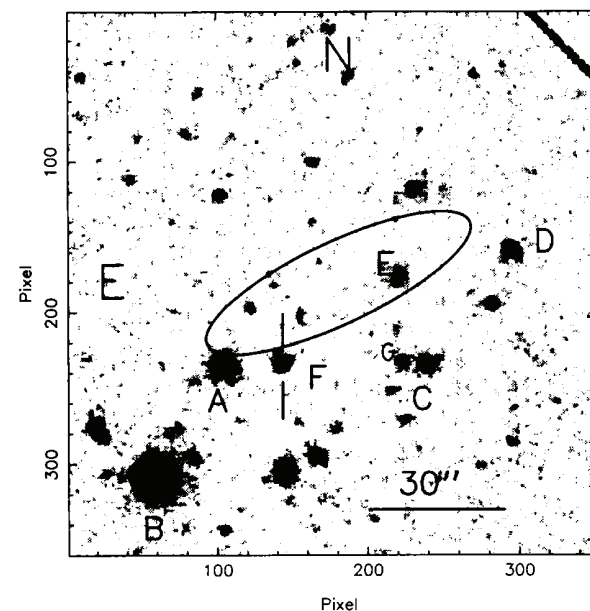


Figura 2: La figura recoge la imagen CCD en la banda  $r$  (6550 Å), centrada en torno a la posición que fue observada por IRAS. La elipse define la incertidumbre de localización de la fuente, propia del telescopio del satélite. De todas las posibles fuentes, enumeradas como A, B, C, D, E, F y G, que aparecen en la imagen óptica, es la fuente F la que parece responsable de la emisión infrarroja, de acuerdo con la identificación de su espectro óptico. El resto de fuentes son de naturaleza estelar.

<sup>15</sup>Las transiciones involucradas en las líneas de la serie de Lyman, son las que llevan de cualquier nivel superior al  $n=1$  a éste, en el átomo de hidrógeno.

<sup>16</sup>Existen, no obstante, evidencias observacionales de formación estelar a redshifts muy altos ( $z \sim 4$ ): entre otras, la presencia de líneas de metales, tanto en cúasares como en el medio intergaláctico. Esto revela un enriquecimiento del medio en elementos pesados que sólo ha podido producirse por formación estelar.

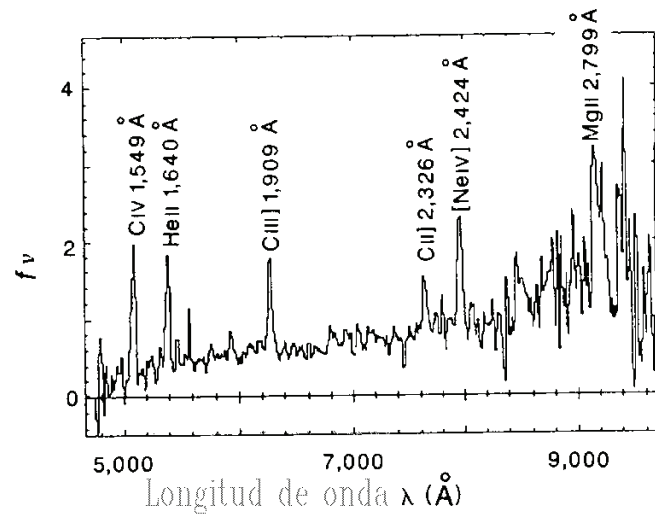


Figura 3: Este es el espectro óptico que permitió calcular el redshift de la fuente IRAS F10214+4724. La escala de longitudes de onda se ha corregido del desplazamiento al rojo cosmológico.

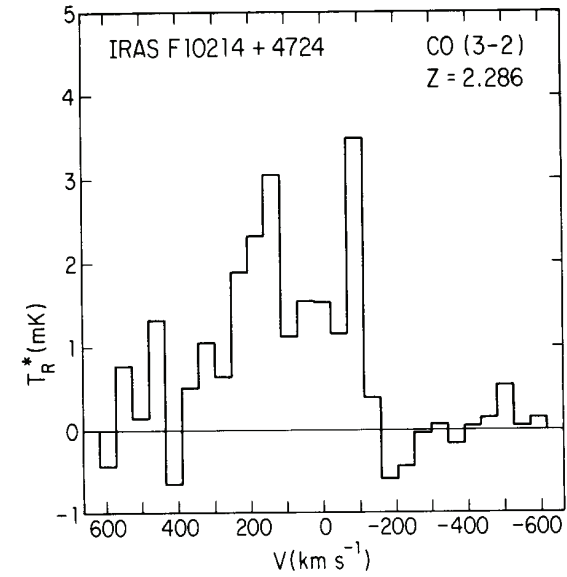


Figura 4: Espectro de emisión en la transición rotacional J=3-2 de la molécula CO en la fuente IRAS10214+4724 obtenido en el telescopio de 30m de IRAM-Granada. La intensidad integrada de la línea ha servido para calcular la cantidad de gas molecular presente en la protogalaxia, resultando ser superior en dos o tres órdenes de magnitud a los de una galaxia espiral normal.

El caso más espectacular, que supone la primera identificación "clara" de una protogalaxia, es el del objeto IRAS F10214+4724, descubierto en Junio de 1991 dentro de la exploración del satélite IRAS<sup>17</sup>. La figura 3 muestra el espectro de la fuente en la ventana de longitudes de onda 5000–9500 Å, donde la escala se ha referido al observador en reposo, es decir, corregida del desplazamiento hacia el rojo. La identificación de varias líneas de emisión ha permitido asignar a esta fuente un redshift de  $z = 2,286$ . Las líneas presentes pertenecen a elementos ionizados y a estados muy excitados de los mismos. Cabe reseñar que la emisión Ly $\alpha$ , aunque se detecta, es sorprendentemente débil (esto daría razón a los que piensan que la emisión de esta línea se ve muy afectada por extinción en las protogalaxias). Sin embargo, sí se detecta, y con un flujo espectacular ( $L_{IR} \sim 3 \cdot 10^{14} L_{\odot}$ ), la emisión infrarroja lejana correspondiente a la reemisión por el polvo de la radiación óptica absorbida. Lo primero y primordial es discutir cuál es la fuente de calentamiento del polvo en la protogalaxia descubierta. Los autores de esta detección favorecen el modelo del brote de formación estelar masiva, en el que las estrellas se hallan embebidas en una nube de gas neutro y polvo. La magnitud de la extinción del polvo parece en este caso extrema dado que la luminosidad infrarroja supone el  $\sim 99\%$  de la luminosidad total del objeto. Este modelo se ha visto respaldado por la detección de la emisión de importantes cantidades de gas molecular, a través de la transición J=3–2 de la molécula CO (ver figura 4). Más allá del hecho de la detección, de por sí muy importante, lo que resulta aún más revelador para los autores, es que el flujo CO y el flujo infrarrojo aparecen en la misma banda de correlación definida por el conjunto de galaxias próximas que albergan en su interior procesos de formación estelar masiva. En tal caso, el origen de la emisión infrarroja en las galaxias espirales próximas y en esta protogalaxia sería el mismo: los procesos de formación estelar.

La cantidad de gas molecular, calculada de acuerdo con las observaciones CO, es de  $\sim 2 \cdot 10^{13} M_{\odot}$ . Ello supone un contenido al menos  $10^2$ – $10^3$  veces superior al de una galaxia espiral estándar donde, con el transcurso del tiempo, la mayor parte de la masa ya ha pasado a formar parte de estrellas. Del mismo modo, la masa de polvo asociada al gas es extremadamente elevada ( $\sim 1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  frente a  $\sim 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$  en nuestra Galaxia). Estos datos sugieren el siguiente modelo cualitativo: durante la fase inicial de colapso de la protogalaxia, ésta se condensa fragmentándose en complejos de nubes de gas neutro (atómico y molecular). Estos complejos de nubes,

<sup>17</sup>IRAS=Infrared Astronomical Satellite; como su propio nombre indica es un satélite que exploró el universo en el infrarrojo a 12, 25, 60 y 100 micras de longitud de onda.

ayudados por el movimiento a gran escala del colapso, al que se añadirán los inducidos por la interacción gravitatoria entre los complejos, experimentan colisiones que desencadenan un primer brote de formación estelar masivo (antes de que acabe el colapso). La primera generación de estrellas incorporará elementos pesados al medio interestelar, haciendo posible la formación de polvo, que a su vez actúa favoreciendo el nacimiento de otras estrellas. Durante el tiempo de colapso de la protogalaxia, se formarán varias generaciones de estrellas (el detalle de la proporción exacta de gas que se transforma en estrellas durante esta primera etapa, presumiblemente determinará que se forme uno u otro tipo de galaxia, dentro de la secuencia de Hubble)

De los progresos en el estudio observacional de posibles candidatos a protogalaxias (y aquí la observación de una muestra lo suficientemente amplia como para ser estadísticamente significativa es tan importante como el estudio en profundidad de candidatos ya detectados), depende la comprensión de los procesos físicos que acompañan la formación de las galaxias, así como el perfeccionamiento de los modelos teóricos existentes.

- [1] "Los tres primeros minutos del Universo", *Steven Weinberg, Alianza ed.*
- [2] "Corazones solitarios del Cosmos", *Dennis Oberbye, ed. Planeta*
- [3] "Los orígenes del universo", *Malcolm Longair, Alianza ed.*
- [4] "Las distancias cósmicas y los cuásares", *Halton Arp, Tusquets ed.*