

Los límites del universo

Durante el siglo XIX se empezaron a construir grandes telescopios y con ello nació el interés en el estudio de las llamadas *nebulosas* que, como pronto se pudo observar, eran de diversos tipos. Algunas se veían claramente como nubes de gas alumbradas por la luz que emiten las estrellas desde su interior.

DEBORAH DULTZIN *

Nebulosas y galaxias en espiral

Nuestra galaxia es un sistema formado por unos cien mil millones de estrellas, una de las cuales es el Sol. Este gran sistema lo hemos bautizado con el nombre de Vía Láctea. Sin embargo, es más común asociar su nombre con la banda difusa y brillante en el cielo que marca el plano central de la galaxia.

Probablemente la nebulosa más conocida en su tipo es la nebulosa de Orión, que se puede ver con un telescopio pequeño en la estrella central de la "espada" del Gigante. Sin embargo, la naturaleza de otras nebulosas no ha sido tan evidente. Algunas, como las llamadas nebulosas espirales, tienen una estructura muy diferente a las grandes nubes de gas.

* Instituto de Astronomía, UNAM

Hoy en día, los astrónomos utilizan la palabra nebulosa para referirse a las nubes de gas en la Vía Láctea, y la palabra galaxia la refieren a los sistemas de billones de estrellas distribuidas —hasta donde podemos ver— por todo el universo. La Vía Láctea es una galaxia de grandes dimensiones cuyo disco mide 100 000 años luz¹ de diámetro y 1 500 años luz de grosor; el Sol se encuentra cerca de la mitad del disco, a unos 30 000 años luz del centro de la galaxia.

La galaxia de Andrómeda, parecida a la nuestra, es la galaxia espiral más cercana a nosotros y se encuentra a dos millones de años luz de distancia.

La determinación precisa de esta distancia se debe a uno de los más grandes astrónomos de este siglo, Edwin Hubble. En 1923, Hubble descubrió una estrella de tipo *variable Cefeida* en

¹Un año luz es la distancia que recorre la luz —cuya velocidad es de 300 000 kilómetros por segundo— en un año.



Andrómeda; el hecho de que el periodo de variabilidad de estas estrellas sea proporcional a su luminosidad, le permitió a Hubble encontrar la distancia y demostrar algo que había venido sosteniendo hacía tiempo: que, a diferencia de las grandes nubes de gas en nuestra galaxia iluminadas por estrellas, las nebulosas espirales eran galaxias como la Vía Láctea.

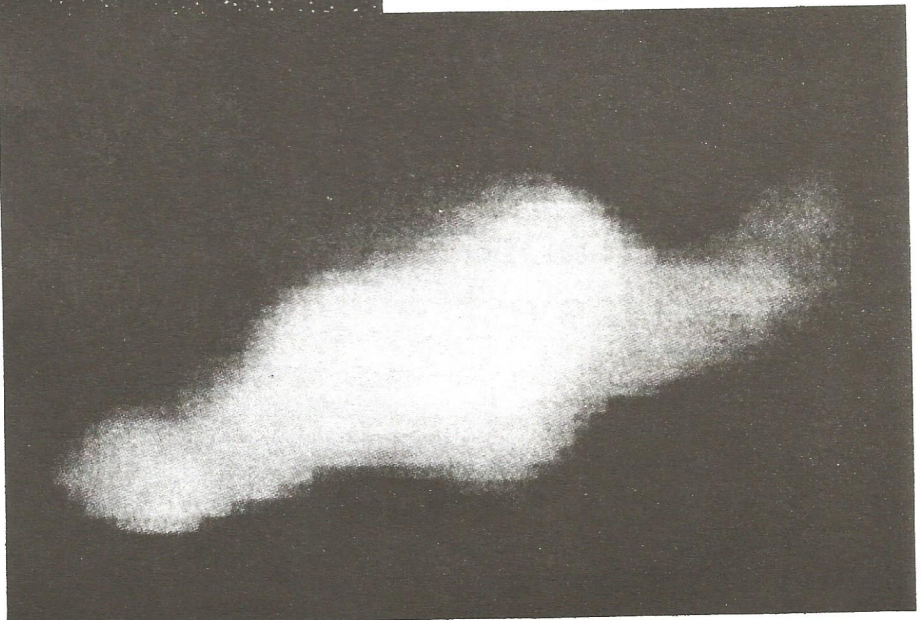
Galaxias, cúmulos y supercúmulos

Durante el primer tercio de este siglo, conforme los astrónomos comenzaron a estudiar las galaxias con mayor detalle, otros tipos de galaxias fueron descubiertos, además de las espirales. El mismo Hubble propuso un sistema de clasificación de las galaxias —según su forma— aún vigente en la actualidad.

Cercanas a la nuestra, hay galaxias de todos tipos; las 20 galaxias más próximas forman un grupo ligado gravitacionalmente llamado Grupo Local. En el Grupo Local hay dos grandes galaxias espirales: la Vía Láctea y Andrómeda.

Hay otras dos galaxias espirales: M33 y Maffei 1. Los miembros más pequeños del Grupo Local son los más numerosos: cuatro galaxias irregulares y 12 elípticas enanas. El grupo abarca una extensión en el espacio de aproximadamente tres millones de años luz de diámetro, con una masa total de quinientos mil millones de veces la masa del Sol, casi toda concentrada en Andrómeda y la Vía Láctea.

Por lo menos la mitad de las



En la foto superior se observa la galaxia de Andrómeda, nuestra vecina espiral más cercana. Se encuentra a una distancia de dos millones de años luz. En la imagen inferior, en cambio, se muestra la galaxia más distante que se conoce: 4C41.17, que está a 12 000 millones de años luz.

galaxias —y probablemente todas— se encuentran en agrupaciones (cúmulos) de algún tipo. Algunos de estos cúmulos son grupos pequeños y sueltos como el Grupo Local, en tanto que otros son mucho mayores y más compactos. De los cúmulos grandes el más cercano es el cúmulo de Virgo, que lleva el nombre de la constelación detrás de la cual se observa. Es importante no confundirlo con las estrellas que forman la constelación de Virgo, que se encuentran dentro de nuestra galaxia. El cúmulo de Virgo cuenta con más de mil galaxias y se

halla a una distancia de aproximadamente 60 millones de años luz. A esta distancia no es posible observar estrellas variables, así que la distancia se determina por la luminosidad aparente de estrellas y nubes de gas gigantes.

El cúmulo de Virgo es un ejemplo de cúmulo rico irregular; su estructura es muy compleja, con varias subcondensaciones de galaxias.

En una distancia de 70 millones de años luz hay varios miles de galaxias. Muchas de ellas están agrupadas en el cúmulo de Virgo y otros cúmulos más pequeños como el Grupo Local. Más allá de estos 70 millones de años luz, el número de galaxias disminuye drásticamente hasta llegar a una distancia mucho mayor. Muchos astrónomos piensan que este conjunto de cúmulos de galaxias forma un cúmulo de cúmulos o supercúmulo, el Supercúmulo Local, cuyo diámetro sería de unos 250 millones de años luz.

A pesar de que se observa esta tendencia a la jerarquía (grupos de estrellas que forman galaxias que, a su vez, forman grupos y cúmulos), los postulados fundamentales de la teoría cosmológica moderna son que el universo es ho-



Edwin P. Hubble abrió para nosotros las puertas del universo, a principios de este siglo.

mogéneo (visto a gran escala, la materia en el espacio se distribuye de manera uniforme) e isotrópico (a gran escala, el universo se ve igual en todas direcciones).

Existe un catálogo de cúmulos ricos de galaxias —recopilado por George Abell— que contiene casi tres mil cúmulos. Los más lejanos se encuentran a distancias de unos cuatro mil millones de años luz. El volumen total del espacio que ocupan es de 500 millones de millones de veces el que ocupa nuestra galaxia; ¡recordemos que hace apenas algo más de medio siglo se pensaba que nuestra galaxia era todo el universo!

Diciendo adiós a las estrellas

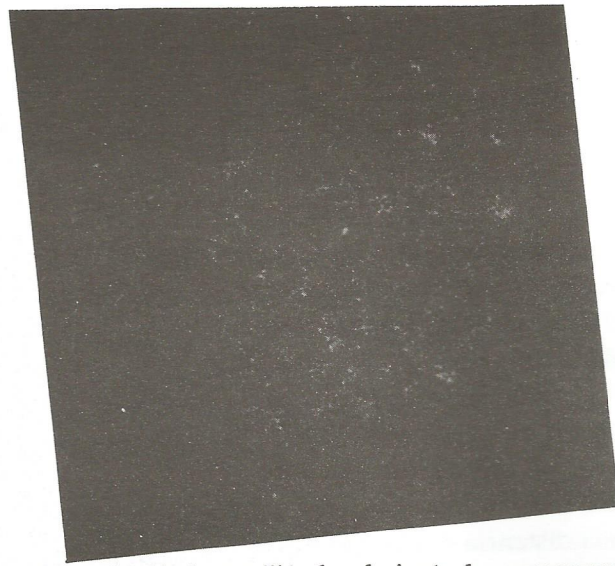
Conforme penetramos más y más lejos en las profundidades del espacio intergaláctico, la luz proveniente de las galaxias de los cúmulos distantes se observa cada vez más roja, indicando que éstos se mueven alejándose de nuestra galaxia. El enrojecimiento de la luz debido al alejamiento entre la fuente luminosa y el observador se conoce como *efecto Doppler*, y se debe al cambio de longitud de onda observada. El hecho de que todos los cúmulos se alejen de nuestra galaxia no significa que ésta sea el centro de dicho movimiento; lo que sucede es que los cúmulos se alejan todos unos de otros como resultado de la expansión del universo. La expansión cósmica es una propiedad del universo predicha por las ecuaciones de la relatividad general de Einstein, y que fue confirmada observacionalmente por Hubble y Humason alrededor del año 1930. Hubble encontró que la velocidad con que se aleja un cúmulo (o una galaxia de éste) y su distancia están correlacionadas: mientras más lejos se encuentra el cúmulo, mayor es su velocidad de recesión y, por tanto, mayor será el corrimiento al rojo de la luz de sus galaxias. Esta correlación se conoce como Ley de Hubble. Para medir la distancia a una galaxia en un cúmulo distante se puede medir su corrimiento al rojo y la ley de Hubble nos dará la distancia.

Los objetos más lejanos en el universo que se conocen son los *cuasares* (ver ICyT vol. 11, 150, pág. 44, de marzo de 1989)². Su nombre es un apócope en inglés de "fuentes de radio cuasi estelares". Estos objetos fueron descubiertos a principios de los sesenta y, hasta hoy, su naturaleza sigue siendo misteriosa. Su luminosidad es descomunal, mayor que la de las más enormes galaxias, aunque se ven como pequeñas estrellitas azules.

La distribución de energía radiante de los cuasares en nada se parece a la de las estrellas.

El de mayor corrimiento conocido hasta el momento de escribir estas líneas, el cuasar Q0051-279, se aleja de nosotros a una velocidad muy cercana a la de la luz. ¿Cómo interpretar todo esto? La manera inmediata es suponer que los cuasares, al igual que las galaxias, se alejan de nosotros debido a la expansión del universo. Como hemos visto, según la Ley de Hubble, cuanto mayor sea la velocidad de recepción de un objeto, a mayor distancia se encontrará de nosotros. Si aplicamos esta ley a los cuasares encontramos que son los objetos más distantes de nosotros conocidos en el universo; 3C-273, el cuasar más cercano, se encuentra a 3 mil millones de años luz; la luz que vemos en este momento salió del cuasar cuando aún no existía la vida en la Tierra. Un cuasar que se aleja de nosotros con una velocidad cercana a la de la luz, como Q0051-279, se encuentra en los confines del universo observable.

Ya que en la ciencia nada se toma como dogma de fe, durante varios años muchos grupos de astrónomos cuestionaron la interpretación cosmológica del corrimiento al rojo y estudiaron diversas alternativas. La evidencia acumulada hasta ahora, sin embargo, ha lleva-



Mapa de la distribución de un millón de galaxias (cada una es un punto). En el centro está el Polo Norte Galáctico, y el círculo representa el Ecuador Galáctico (estos términos se refieren al sistema de coordenadas galácticas con respecto de nuestra galaxia). En la parte oscura no hay datos. Este mapa fue hecho por Seldner, Siebers, Groth y Peebles, del Observatorio de Lick.

do a la gran mayoría de los astrónomos a concluir que los cuasares son, efectivamente, los objetos más distantes en el universo. Cuando la luz de los más lejanos de estos objetos inició su viaje hacia la Tierra, la edad del universo era una cuarta parte de lo que es hoy en día (se calcula que la edad actual es de quince mil millones de años), de manera que gracias al estudio de los cuasares podemos obtener información sobre el pasado del universo.

Veamos ahora dos argumentos a favor de la lejanía de los cuasares antes de valorar la información que nos pueden dar sobre el pasado del universo. En primer lugar, está la confirmación observacional de que la Ley de Hubble sigue siendo válida a grandes distancias. Con técnicas de detección cada día más sofisticadas se descubren galaxias más y más lejanas. En la última asamblea general de la Unión Astronómica Internacional, en Baltimore (1988), se anunció el descubrimiento de la más distante de las galaxias conocida hasta ahora, llamada 4C41.17. Esta galaxia se encuentra, como los cuasares, en los confines del universo observable y, junto con otras galaxias descubiertas recientemente a grandes distancias, representa una especie de "eslabón perdido" entre las galaxias relativamente cercanas y los cuasares (que se cree son núcleos de protogalaxias o galaxias en etapas de formación).

El segundo argumento viene del efecto llamado lente gravitacional. En 1936 Albert Einstein predijo que si una galaxia muy distante se

²Ver también *Cuasares en los confines del universo*, No. 53 de la serie la Ciencia desde México, Ed. Fondo de Cultura Económica, SEP, CONACYT, 1988.

ve exactamente detrás de otra galaxia muy masiva más cercana, la luz de la galaxia distante "doblará" su trayectoria y será reenfocada por la galaxia cercana que actuará como una lente gravitacional. Si las dos galaxias están perfectamente alineadas respecto del observador, la galaxia-lente producirá una imagen ilusoria de la galaxia distante, semejante a un anillo. En 1986 R. Lynds y V. Petrosian descubrieron dos gigantescos arcos luminosos alrededor de cúmulos de galaxias distantes que se interpretan como imágenes producidas de esta manera. Una lente gravitacional no actúa de manera idéntica a una lente óptica. Las lentes gravitacionales doblan la radiación de todas las longitudes por igual.

¿Son los cuasares los objetos más distantes?

En 1988 Jacqueline Hewitt descubrió, usando un gran arreglo de radiotelescopios llamado VLA³, un anillo en radiofrecuencias que se interpreta como la imagen gravitacional de una radiogalaxia (ver *ICyT* vol. 11, 150, de marzo, 1989).

Si el objeto muy distante y la galaxia-lente no están perfectamente alineados, la imagen,

en lugar de ser un anillo, será una imagen doble o múltiple. De hecho, el primer caso de lente gravitacional fue descubierto en 1979 a partir de la imagen doble del cuasar 0957+561.

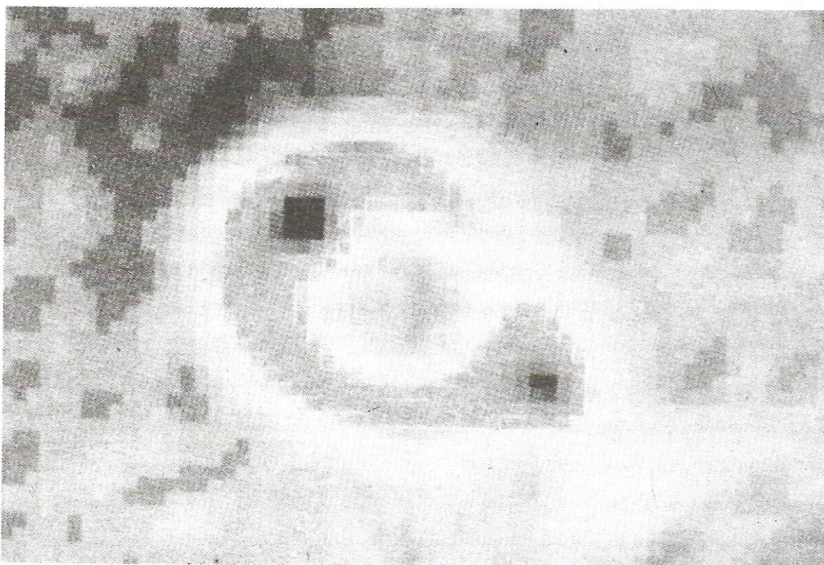
Las imágenes de cuasares producidas por ilusiones o espejismos gravitacionales demuestran que los cuasares son objetos distantes, al menos más distantes que las galaxias-lente.

Las lentes gravitacionales proveen, además, una manera de estimar la cantidad de materia oscura de las galaxias. En una galaxia-lente la materia no luminosa (y consecuentemente invisible) influirá, sin embargo, en la desviación de los rayos de luz provenientes de objetos distantes de manera que a mayor masa habrá mayor desviación. Los estudios realizados hasta ahora indican que la masa de las galaxias (incluida la masa no luminosa) no es suficiente para detener (y eventualmente revertir) la expansión del universo. Sin embargo, las teorías modernas derivadas de teorías de norma (o de la Gran Unificación de Fuerzas) predicen la existencia de otro tipo de materia oscura.

Regresemos ahora a la información que nos pueden dar los cuasares sobre la evolución del universo.

Un primer tipo de estudio estadístico llevado a cabo fue el de ver qué tipos de corrimiento al rojo tienen los cuasares. Lo primero que re-

sulta evidente es que no existen cuasares cercanos. Todas las estadísticas demuestran que las tres cuartas partes de los cuasares tienen corrimientos al rojo entre 1.8 y 2.4 (en promedio de $z=2$). Y hasta hace unos cuantos años no se había detectado ningún cuasar con un corrimiento mayor de $z=3$. Surgía la pregunta fundamental: ¿Hay algún límite superior real al valor posible de Z , o se trata de un



"Espejismo gravitacional" de una radiogalaxia. El objeto MG1131+0456 se conoce como el anillo de Einstein. La reproducida es una imagen digitalizada a partir de ondas de radio.

³Del inglés: *very large array*.

límite artificial impuesto por las técnicas de detección?

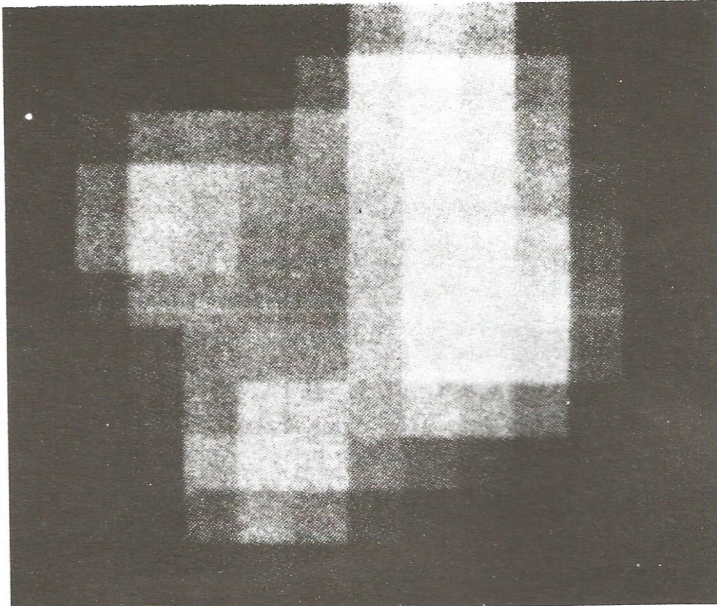
Las implicaciones de la existencia de dicho límite real son muy importantes; implica, por ejemplo, que al menos para un tipo de objeto astronómico estamos alcanzando el límite del universo observable. Asimismo que, en lo que se refiere a estos objetos, podemos presenciar el ciclo completo de su evolución, desde que nacieron hasta que se apagaron (o, cuando menos, hasta que se transformaron en algún otro objeto).

Los cuasares y los límites del universo

El resultado de estas investigaciones fue que, estadísticamente hablando, la densidad espacial de cuasares, con un corrimiento mayor de 3.5, es, por lo menos, tres veces menor que la de cuasares con un corrimiento de 3. Este límite no excluye la posibilidad de que existan unos cuantos cuasares con corrimientos mayores. Sin embargo, es evidente que estamos ante un límite real.

Una evidencia adicional que apoya esta conclusión es el hecho de que los radiastrónomos no han encontrado tampoco cuasares más distantes, a pesar de que usan métodos de detección diferentes de los ópticos. Ni aun con los satélites infrarrojos, o de rayos X, se han podido detectar cuasares más lejanos. El lanzamiento del telescopio espacial *Edwin Hubble*, nombrado así en honor al científico, será de gran importancia para este tipo de investigaciones.

Una interpretación sencilla de los datos sobre corrimiento indica que todos los cuasares se formaron hace aproximadamente trece mil millones de años, lo cual, desde luego, marca un suceso muy importante en la evolución del universo, sobre todo si tenemos en cuenta la idea de que los cuasares son los precursores evolutivos de las galaxias. La distancia prome-



La imagen cuádruple de H1413+117 es una ilusión gravitacional producida por una galaxia-lente situada entre el cuasar y nosotros. La separación entre las cuatro imágenes es de un segundo arco aproximadamente.

dio entre los cuasares con corrimientos alrededor de $z=2$ es de aproximadamente 400 millones de años luz. Para cuasares con corrimientos mayores la separación promedio se mide en miles de millones de años luz. Estos datos conforman la evidencia observacional más sólida a favor de la suposición básica que se hace en cosmología: que el universo, a gran escala, es uniforme.

Por ahora no es posible determinar con precisión la composición química de los cuasares, pero del estudio de sus espectros⁴ podemos obtener información muy valiosa acerca del gas intergaláctico y de las galaxias más lejanas, ya que este gas, que está entre los cuasares y nosotros, absorbe de manera selectiva la luz de los cuasares dejando así su "firma" en el espectro de éstos.

Existen muchos otros experimentos cósmicos que es imposible reseñar en este espacio. Sólo quisiera agregar que, aunque el astrónomo tiene una actitud pasiva frente a su objeto de estudio —es decir, sólo puede observar el cielo—, hoy día el estudio del universo como un todo ha dejado de ser una disciplina especulativa, dado que la astronomía brinda una forma de confirmar o rechazar ciertas hipótesis y/o predicciones de las teorías, aunque no siempre de manera categórica.

⁴El espectro de una fuente luminosa se obtiene al hacer pasar la luz por un prisma o rejilla de difracción.