

Evolución de sistemas galácticos

PARIS PISHMISH

La interpretación del título puede ser relativamente sencilla y directa en una ciencia como la astronomía. La astronomía, el estudio de los fenómenos celestes, ha mostrado a través de decenas de siglos, facetas muy diversas y provocativas. El cambio de las facetas, el cambio de nuestra concepción de los fenómenos cósmicos han ido evolucionando. Algunas teorías, en realidad muchas, no han podido sostenerse con el paso del tiempo y de nuevos descubrimientos. Sin embargo, demostrar que una teoría es falsa implica en sí un importante avance para la ciencia. Así lo ha dicho F. R. Moulton el prestigioso astrónomo de principios de este siglo.

Yo sigo señalando que la astronomía es una sola. Si bien en la práctica se habla y se trabaja en temas aparentemente variados, observaciones, teorías, análisis computacionales, etc., los resultados de todo esto convergen, y deben converger, en explicar de manera global, fenómenos en el cosmos. Muchos son los científicos que al final de sus vidas productivas anhelan encontrar una teoría unificada de la naturaleza del cosmos. En el presente las poderosas posibilidades tecnológicas muestran tan variados detalles, que es fácil olvidar la unidad de la naturaleza o bien olvidar la sana actitud de considerar que las diferentes manifestaciones observadas, son las piezas de un gran rompecabezas a armar.

Paris Pishmish Instituto de Astronomía, UNAM. Conferencia impartida dentro de la serie "Concepto de frontera", organizada por el Dr. Eli de Gortari, noviembre, 1989.



La selección de temas de frontera no deja de ser personal, ya sea por razones de afinidad, de conocimiento o de temas predilectos, para mencionar unos cuantos motivos.

Primer problema de frontera: el esquema de Hubble

A grandes rasgos hay dos corrientes de estudio en las inquietudes que ocupan hoy en día las actividades de la mayoría de los astrónomos. Estas son:

- a. Procesos de la formación de las estrellas, a partir de nubes gaseosas.
- b. Procesos de la formación de las galaxias, a partir de masas primigenias.

Principiaré presentando un *scenario*, un cuadro muy general de ese Universo, que hasta la fecha hemos podido conocer, aunque sea de manera muy incompleta. Sabemos que el Universo está lleno de masa y energía. Pero ni la masa en forma de estrellas, gas y polvo, ni la energía que les acompaña, están distribuidas uniformemente. Todo lo contrario; estas entidades se conglomeran en galaxias, unidades significativas en el cosmos. Las galaxias, a su vez, se aglomeran en cúmulos de galaxias. Ahora se tiene la certeza de que existen cúmulos de cúmulos de galaxias —supercúmulos—, en forma de filamentos (*strings*) y espacios vacíos

(voids) entre ellos. Son las galaxias de las que me ocuparé. La tabla 1 presenta un promedio de las propiedades sobresalientes del "universo" conocido hasta la fecha.

Las galaxias muestran diferentes tipos: clasificación

Hace ya dos siglos William Herschel y su hijo John, habían hecho un censo de los objetos nebulosos, observando todo el cielo, (William en Inglaterra y John también en Inglaterra y en África del Sur). A finales de la segunda década del presente siglo fue cuando se pudo tener la certeza de que la mayoría de estos objetos nebulosos, catalogados por los Herschel, eran sistemas estelares, islas "universo", vistas a través de la Vía Láctea, nuestra galaxia. Los objetos restantes pertenecían a nuestra galaxia y resultaron ser o cúmulos estelares o nebulosas gaseosas que emiten radiación, excitados por la presencia de estrellas calientes masivas; algunos de ellos son de "reflexión" (esparcimiento) de la luz de una estrella menos caliente.

La secuencia de Hubble

A principios de los años 20 E. Hubble, junto con sus colaboradores, habían acumulado un acervo de fotografías de galaxias tomadas con los más grandes telescopios de esa época, de 60 y 100 pulgadas de diámetro del Observatorio de Mt. Wilson, California. Pese a las variadas maneras en que se distribuye la luminosidad, o sea de sus formas, se notaba cierta similitud en sus grandes rasgos. Fue entonces cuando Hubble propuso su ya famosa clasificación de galaxias, la cual es una representación empírica; el esquema de Hubble es una especie de columna vertebral de la astrofísica, pero aún no ha sido interpretado! La figura 1 es la "horquilla de Hubble" en su forma original (*The Realm of the Nebulae*, 1936). En la parte izquierda la secuencia es única y contiene los sistemas estelares llamados galaxias elípticas, con distribución simétrica de brillo (y por lo tanto de masa) y con aplanamiento creciente al pasar de E0 a E7. La figura 2 representa una de ellas (E5); las estrellas de estos sistemas son intrínsecamente menos luminosas que las de las espirales y su contenido de material difuso —gas y

Tabla 1. Información sobre el universo en general

Distancia límite alcanzada a la fecha	5x10 ⁹ años luz
Distribución de masa	No homogénea unidad de masa una galaxia
Número aproximado de galaxias	= 5x10 ⁹
Una galaxia	
Masa promedio	10 ⁹ masas solares, 2x10 ³⁹ kilogramos
Diámetro	1.2x10 ⁵ años luz
Energía total radiada	5x10 ⁴² ergs ⁻¹
Edad del universo	2x10 ¹⁰ años
Edad de la tierra	4x10 ⁹ años

polvo— es insignificante. Sin embargo muy recientemente se observaron moléculas de monóxido de carbono, usando el telescopio de Pico Veleta (España) en ondas milimétricas (comunicación privada de M. Gordon). Las masas totales de las galaxias elípticas cubren un rango amplio. Entre ellas se encuentran las (válgase la expresión) más masivas. Se necesita determinar masas de un número mayor de galaxias tipo E.

A partir de SO, la secuencia se divide en dos: las espirales "normales" y las barradas, respectivamente. Es extraño que se haya seguido usando la designación "normal", cuando hoy se sabe que las de barra son tan numerosas como las galaxias normales, entre las dos la cifra alcanza el 65%. Las figuras 3 y 4 muestran dos galaxias normales y la figura 5 una de barra (NGC 1097). En las galaxias espirales el material difuso es de un 5% de la masa estelar, concentrado en el plano de simetría y está asociado a los brazos espirales.

Hubble advirtió claramente que la

secuencia que presentaba era tan solo empírica y no evolutiva. Pero ante una variación progresiva de características morfológicas de las galaxias, a lo largo de la secuencia, los astrónomos se vieron tentados de ver un sentido evolutivo en el esquema de Hubble. Algunos propusieron que las galaxias evolucionaban de las E's a las espirales; otros sugerían que la evolución era de las espirales hacia las E's. Ni lo uno ni lo otro es la verdad: las galaxias parecen tener la misma edad a pesar de las diferentes formas.

Por qué existen los diferentes tipos de galaxias; el papel de los parámetros globales

El que existan diferentes tipos de galaxias ha sido uno de los problemas fundamentales de la astronomía en todos los tiempos. Existen diversas teorías: algunos proponen que el ambiente donde se encuentran las galaxias, afecta el curso de la evolución; otros sugieren

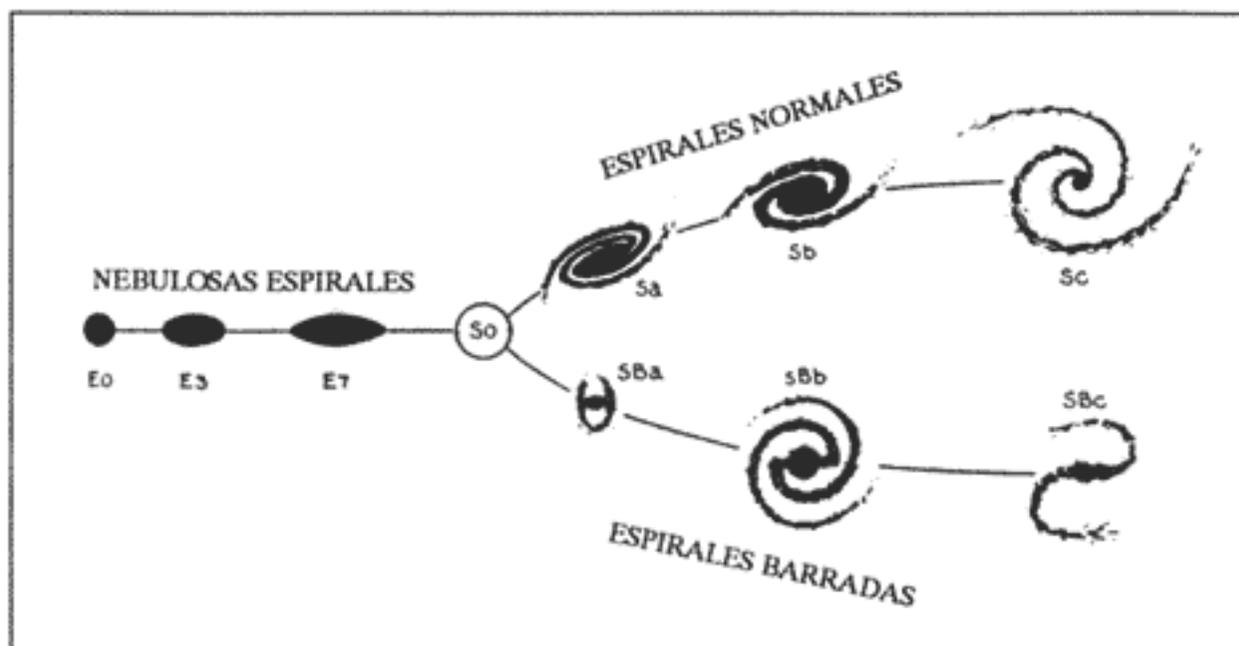


Figura 1. La clasificación de las galaxias. Horquilla de Hubble. (Edwin Hubble: *The Realm of the Nebulae*, 1936).

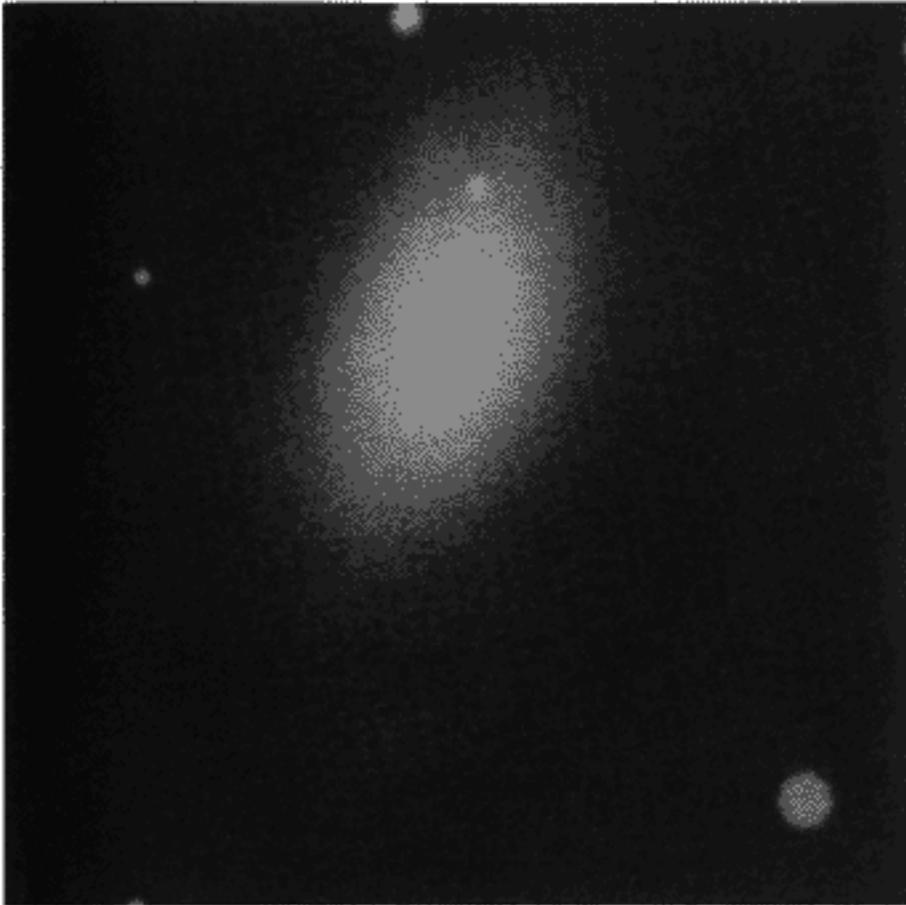


Figura 2. Una galaxia elíptica ES, NGC 4697. Una de las galaxias del cúmulo en Virgo. (Reproducida del *Hubble Atlas of Galaxies*).

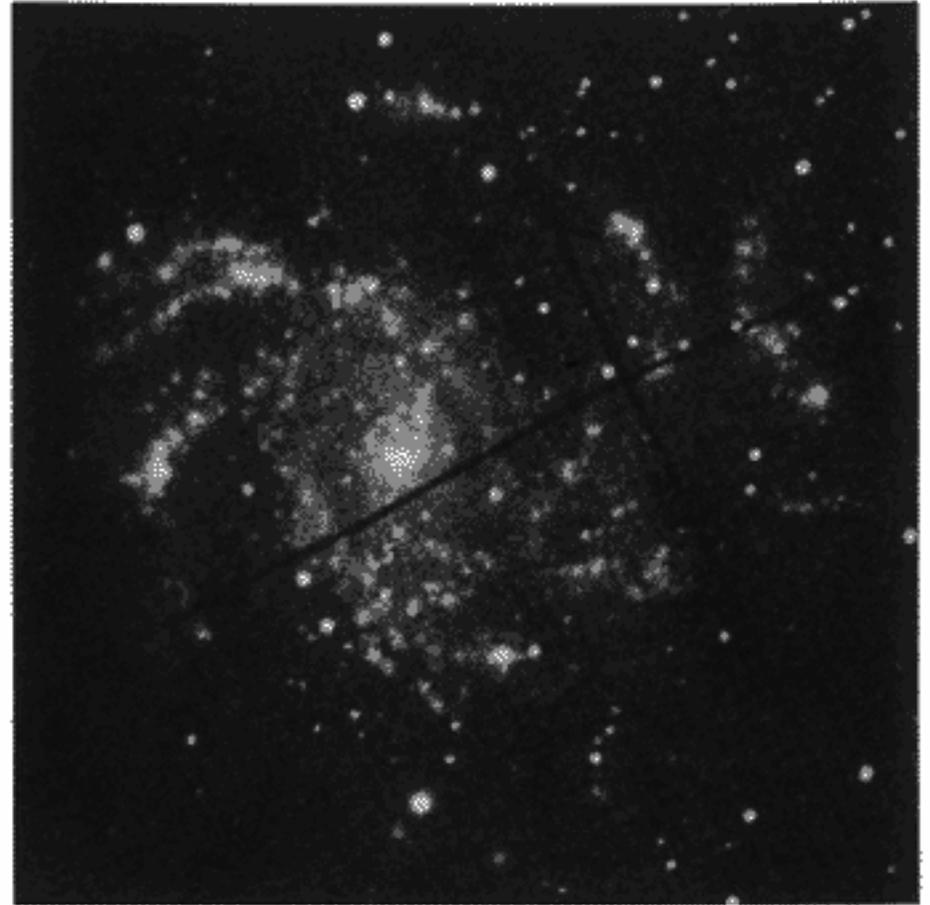


Figura 3. La galaxia espiral "normal" Sb, NGC 6946. Foto tomada con el telescopio de 2 metros en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California; las rayas oscuras son de una retícula del telescopio.



Figura 4. Una galaxia irregular. La nube grande de Magallanes. Un objeto visible del hemisferio sur.

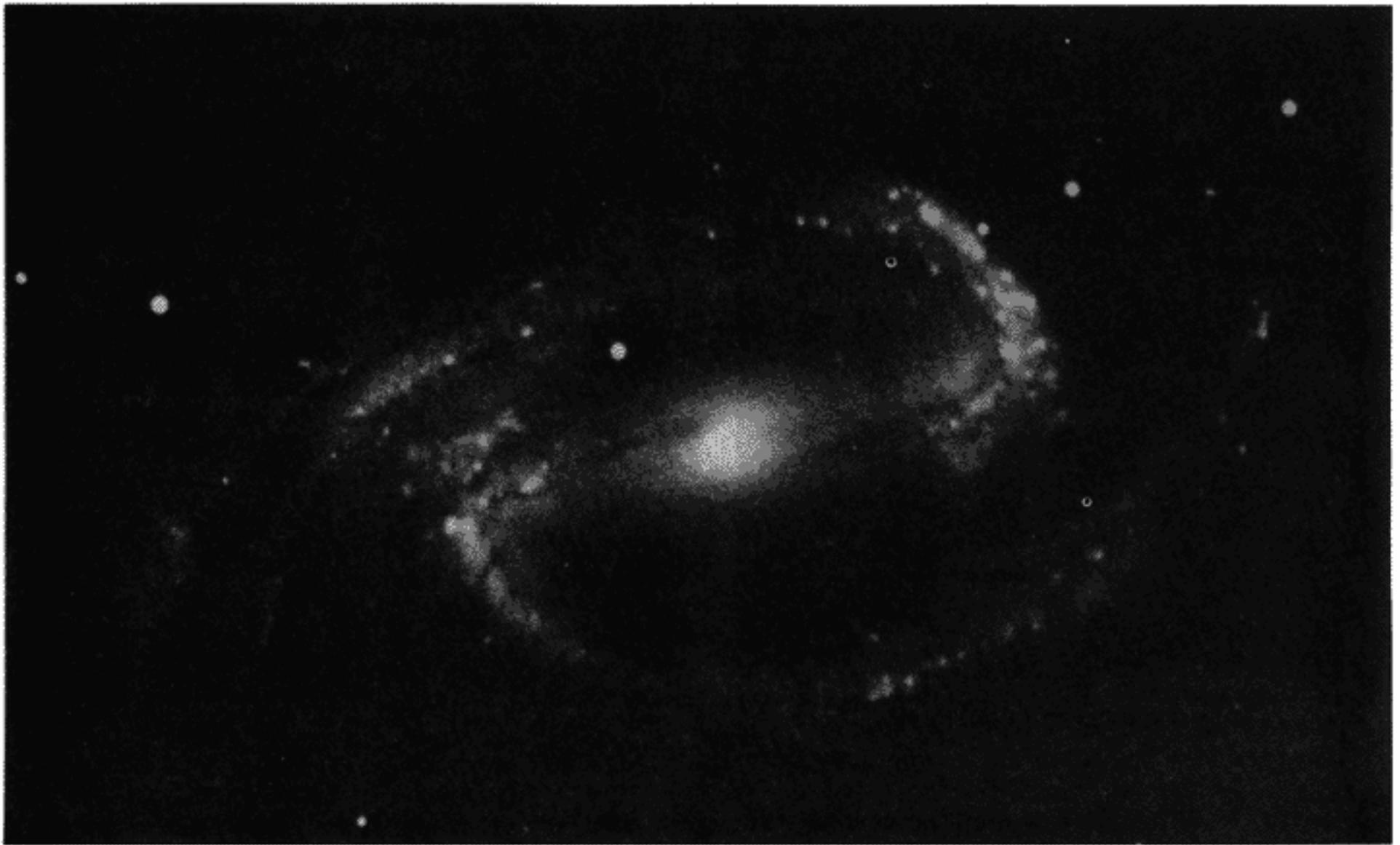


Figura 5. La galaxia espiral barrada (SBb) NGC 1300. (Reproducida del *Hubble Atlas of Galaxies*).

que el encuentro con otras galaxias puede afectar el curso evolutivo de una galaxia. Si bien los encuentros entre galaxias son probables, las formas tan simétricas que estas tienen no se pueden explicar como "accidentes" cósmicos.

A mi juicio hay fuertes indicios de que el curso de la evolución de un objeto autogravitante, como lo es una galaxia, depende en gran medida de sus propiedades físicas iniciales. He propuesto, y defendido, la idea —ahora compartida por otros astrónomos— de que son los parámetros primigenios globales, cuando menos 2 o tal vez 3, con los que empieza su vida una galaxia, los que forjan su "destino". Extendiéndome un poco más diré que: un parámetro global muy importante, es la masa total de la gran nube primordial galáctica, más otro parámetro independiente, que puede ser el momento angular total y su distribución. Los campos magnéticos han sido también importantes en las primeras etapas gaseosas, antes de la formación de la componente estelar de una galaxia. En principio, si conocemos el estado dinámico del sistema estelar, por ejemplo, si la galaxia está en estado estacionario,

es posible deducir los parámetros restantes de la galaxia como son: su curva de rotación, la variación de la dispersión de velocidades y otros. Aún estamos lejos de dar cauce cuantitativo a estas proposiciones.

Es altamente probable que la masa total primordial de una galaxia, haya permanecido constante (o casi constante), a lo largo de su evolución. De aquí proviene la importancia de estimar la masa total de una galaxia. Tal estimación se basa en consideraciones dinámicas y es más confiable para las espirales llamadas normales que para las de barra. En todo caso, se supone que las galaxias están en estado estacionario, y que, en las espirales, la fuerza gravitacional interior a un punto es igual a la fuerza centrífuga, debido a la rotación alrededor del centro de la galaxia. Los datos que se han obtenido por observación o son velocidades radiales medidas con líneas espectrales ópticas, en general de emisión, o bien de radio ondas con la línea $\lambda = 21$ cm. del hidrógeno neutro. De esta manera se han determinado las masas de unos centenares de galaxias espirales.

Mencionaré más tarde que las masas

estimadas dan apoyo a la hipótesis de que la masa es uno de los parámetros globales que determina la suerte de una galaxia. En efecto, hemos encontrado que al pasar de los tipos morfológicos Sa a Sb, Sc e irregulares, la masa total de la galaxia disminuye paulatinamente, haciendo evidente que la masa total es un dato determinante para distinguir los diferentes tipos. (Véase figura 6 Pishmish y Maupomé 1978). Señalaremos que las edades de las espirales (que han proporcionado este resultado), son comparables entre sí, indicando con ello que las diferentes formas no se deben a la evolución. Sin embargo se ve en la gráfica anterior, que la dispersión de los valores que dan como promedio la masa representativa de los diferentes tipos Hubble, es grande. Esto indica que la masa no es la única que determina el tipo, sino que existe otro parámetro independiente, primigenio, aún no precisado.

La energía rotacional de una galaxia puede ser otro parámetro primigenio. Cabe mencionar que se ha encontrado una relación estadística entre el momento angular por unidad de masa y la masa total de los objetos celestes, como lo son los cúmulos estelares, galaxias y

cúmulos de galaxias (Brosche 1973; Carrasco *et al.*, 1982). A mayor masa total mayor es el momento angular por unidad de masa. En cuanto a campos magnéticos es preciso aclarar que no los conocemos satisfactoriamente aún. La fuerza es del orden de 10^5 gauss como máximo. Las fuerzas magnéticas iniciales deben haber sufrido serias alteraciones, en especial durante la formación de las estrellas dentro de la nube galáctica.

Resumiendo podemos afirmar que la secuencia de Hubble, empírica por excelencia, no se ha podido interpretar hasta la fecha y que constituye un *problema de frontera*.

Deseo ahora abarcar otro problema respecto de un tema reciente y *de frontera en todos aspectos*: el de la actividad en los núcleos de las galaxias. A mi modo de ver este último problema apunta la posibilidad de explicar la incógnita perenne: la de la evolución de las galaxias y, por ende, la explicación de la horquilla de Hubble.

Un segundo problema de frontera; actividad de los núcleos galácticos

Creemos que las galaxias cercanas que observamos en el presente, han alcanzado un estado estacionario. Los movimientos de sus estrellas y nubes interestelares, son de rotación en torno a su eje de simetría, con cierta dispersión alrededor de la velocidad promedio de rotación. En el estado estacionario no deben existir movimientos radiales del centro hacia afuera (o hacia dentro). Pero actualmente se sabe que existen expulsiones de los núcleos de algunas galaxias y este fenómeno será el tema principal del resto de este artículo.

Algunos indicios de la actividad en los núcleos aparecieron a principios de los 40. Carl Seyfert (1943) en el Observatorio de Mt. Wilson, seleccionó y observó galaxias espirales con núcleos muy brillantes. Las líneas espectrales de los núcleos de unas siete galaxias, resultaron ser mucho más anchas que en galaxias en general. Seyfert interpretó sus datos correctamente, como evidencia de la expulsión de gases ionizados del núcleo galáctico, la expulsión teniendo velocidades entre 1 000 y 10 000 kilómetros por segundo. Este tipo de galaxias se catalogó bajo el nombre de Seyfert 1 y Seyfert 2.

Tuvo que transcurrir más de una dé-

cada antes de que se prestara atención a este problema, quizá por falta de medios instrumentales adecuados. A principios de los 60, con el uso del novedoso (y primer) intensificador de imágenes, construido por el electrónico francés A. Lallemand, M. Walker pudo analizar con más detalle los espectros de los núcleos de algunas galaxias, incluyendo las Seyferts. Encontró evidencia de que el material que el núcleo eyecta está en forma de nubes, 3 ó 4 por núcleo. En los años siguientes se han encontrado y analizado otras galaxias Seyfert, confirmando así el modelo de expulsión de nubes discretas de los núcleos activos.

La era de los cuasares

El descubrimiento de los cuasares dio gran impulso al estudio de fenómenos no-estacionarios en el cosmos. Los cuasares son objetos cuasi estelares (en

esencia son galaxias) lejanos; algunos de ellos de los confines del universo conocido. Se caracterizan por la exuberante energía radiada que es de 100 ó 1000 veces la que emite una galaxia promedio (del esquema de Hubble). Es importante señalar que al borde del universo alcanzado por los astrónomos, una galaxia (o cuasar), se ve como era hace $5-6 \times 10^9$ años atrás, o sea, en su "juventud".

Núcleos activos de las galaxias: AGN

En la última década y media, se han registrado grandes avances en el estudio de los núcleos galácticos activos, a los que se designa con la sigla AGN: (active galactic nuclei), principalmente por medio de radio-ondas aunado a algunos medios ópticos convencionales. Bajo AGN se suele agrupar los cuasares, las radio ga-

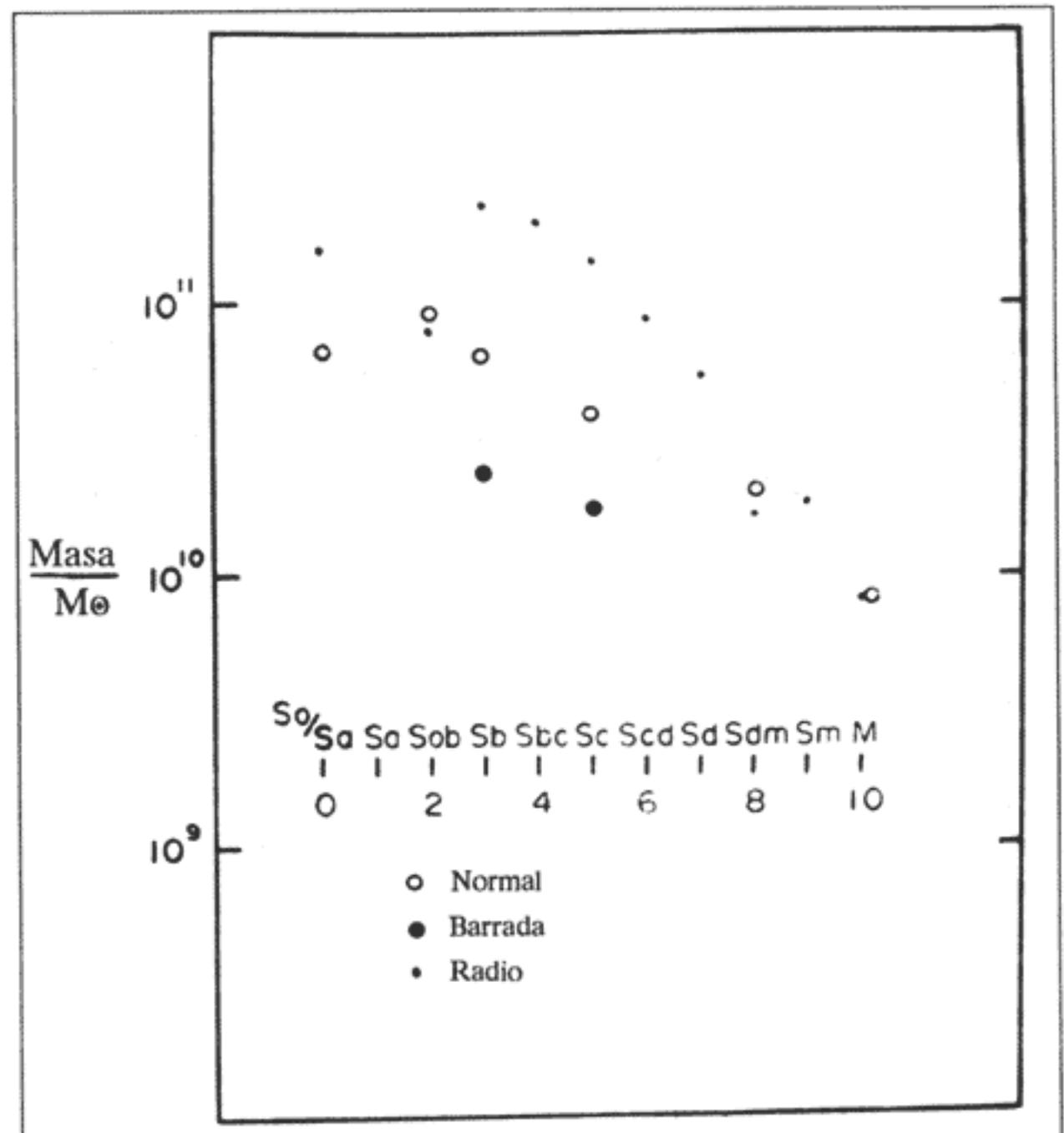


Figura 6. La gráfica muestra la variación de la masa promedio de las galaxias con el tipo Hubble. La masa total disminuye al recorrer la Sa hasta Sc e irregulares (Pishmish y Maupomé, 1978).

laxias, objetos BL Lac y galaxias Seyfert 1 y 2. Esta es una secuencia de energía o potencia total. Los más energéticos y altamente activos, son los cuasares (objetos cuasi estelares y compactos). A partir de los cuasares la energía total de la secuencia de las AGN, disminuye hasta llegar a los Seyfert 2.

Núcleos levemente activos MAGN

He señalado anteriormente (Pishmish 1986), que la actividad puede darse, aunque con energía relativamente más leve, en galaxias aparentemente más normales que los Seyferts, y que el estudio de las manifestaciones en los núcleos galácticos debe extenderse hasta los núcleos más débiles como el de M31, la nebulosa de Andrómeda o de nuestra Galaxia. Había sugerido entonces la sigla MAGN para cubrir las galaxias cuyo grado de actividad no calificaba para ser incluida entre los AGN. Un ejemplo de MAGN es NGC4736, cuyo núcleo muestra una espiral cerrada, producto de emanación bipolar de gas de su núcleo en rotación, como hemos demostrado (Pishmish y Moreno, 1984).

Los MAGN están en nuestras cercanías y ofrecen la ventaja de poderlas estudiar en detalle, tanto su morfología

como su cinemática. Un modelo propuesto para explicar las observaciones de las MAGN, puede extrapolarse para servir en la confección de modelos más realistas, aplicables a los AGN, las cuales por ser lejanas no pueden ser observadas detalladamente. Estoy suponiendo implícitamente, que el mecanismo de la actividad es universal y que la diferencia entre AGN y MAGN, se debe solamente a los parámetros globales intrínsecos, siendo la energía de los núcleos lo más importante (Pishmish, 1987). Actualmente muchos investigadores tienden a prestar atención también a las galaxias con leve actividad, reconociendo el papel que puedan jugar en descifrar los AGN (Davies, 1989).

El resto de mi artículo versará sobre AGN y los enigmas que presentan, causando así verdaderos retos a enfrentar. La actividad en el núcleo de las galaxias no solo es un tema de fronteras, sino que, a través del estudio de esta actividad, puede resolverse el *problema de frontera* que es la *horquilla de Hubble*.

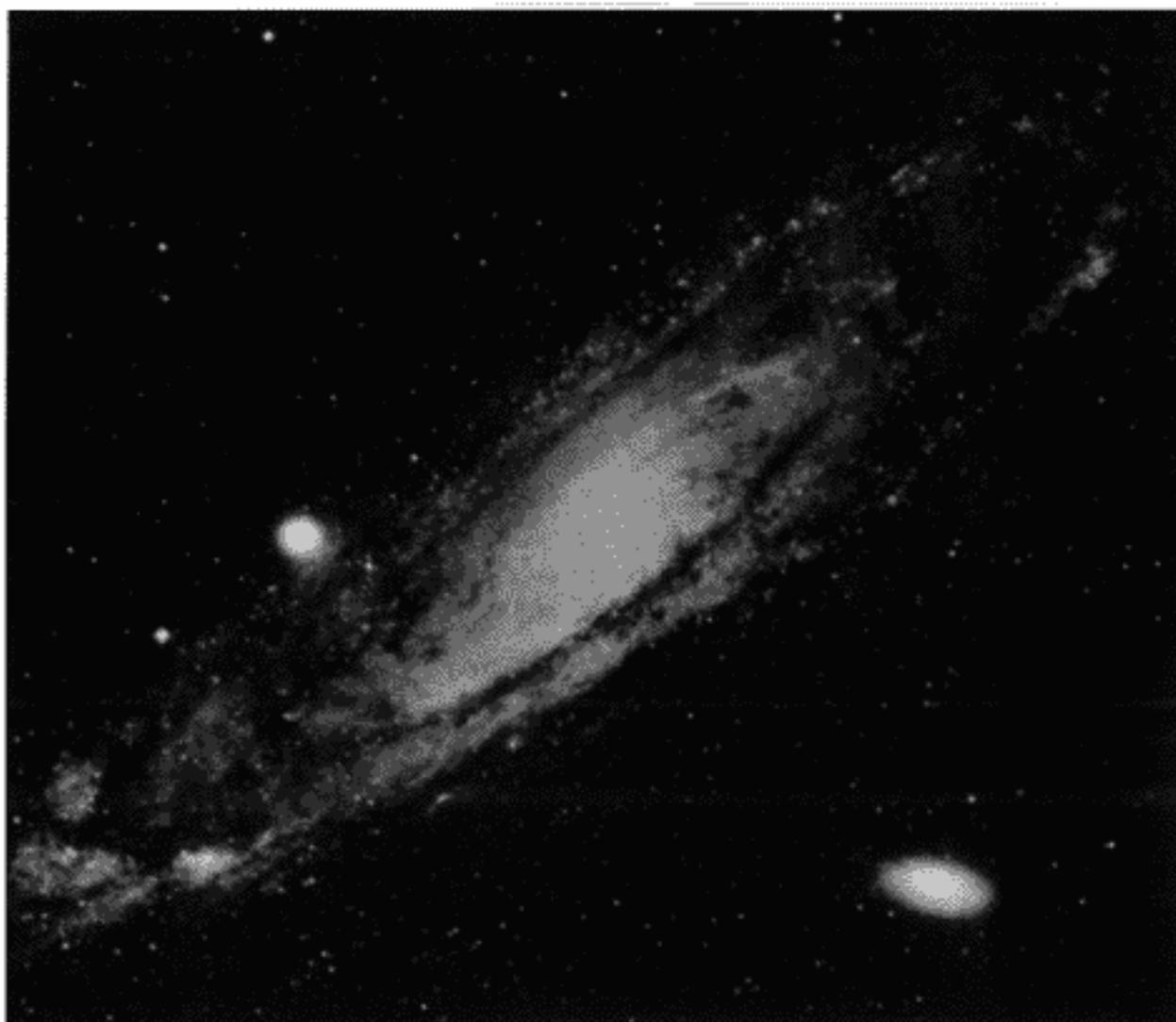
Estructura en los núcleos galácticos: espirales cerradas

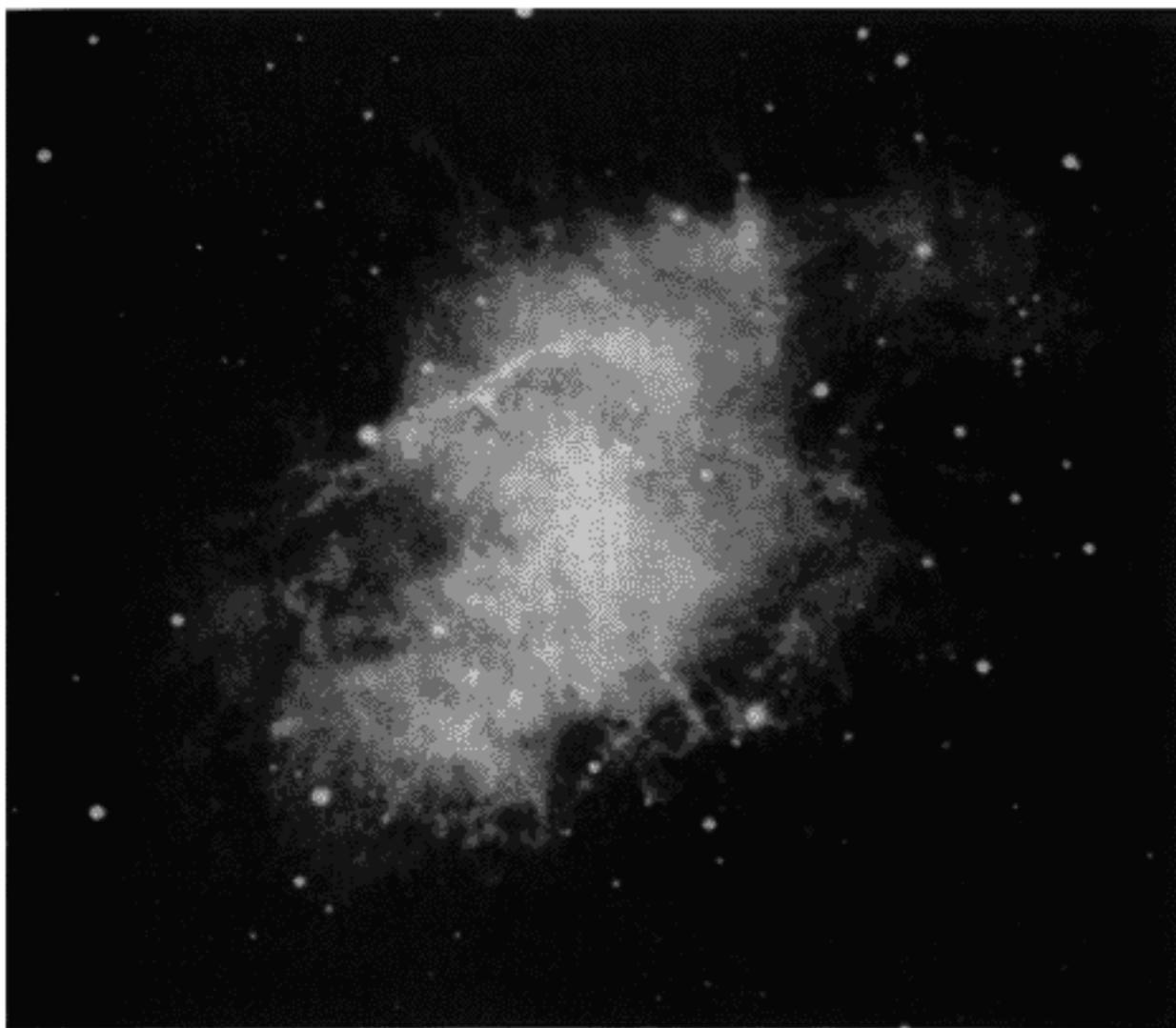
En algunas galaxias, la mayoría barradas, el núcleo contiene una espiral ce-

rrada que les da la apariencia de un "anillo". Tal espiral cerrada nuclear, está delineada, en muchos casos, por nebulosas de emisión como "nudos". Estos brazos espirales y los nudos, muestran la expansión del núcleo al mismo tiempo que rotan. Hemos demostrado que tales espirales se forman con el material eyectado de dos regiones simétricas en el ecuador de un núcleo en rotación. La bi-polaridad de la eyección, hemos supuesto, se debe a un campo magnético. Lo que se observa después de un tiempo, aproximadamente 10^7 años, es el lugar geométrico del material eyectado. La aplicación al caso concreto a la galaxia NGC 4736, ha mostrado acuerdo notable, tanto en la morfología, como en lo cinemático (Pishmish y Moreno 1984).

Podemos afirmar que la existencia de una espiral cerrada, en el núcleo de una galaxia, con velocidad de expansión, aunque (de otra forma normal) da evidencia de una actividad pasada (o presente). En este caso la eyección es observada directamente. En otros casos, como hemos mencionado antes en relación con las galaxias Seyfert, la actividad se deduce del ancho de las líneas espectrales. La estructura nuclear es demasiado pequeña para que se puedan observar las nubes individuales.

Vale la pena abundar en el episodio del descubrimiento de estos objetos enigmáticos. Años atrás se habían detectado imágenes ópticas intensas, de apariencia estelar, con la leve sospecha que no eran perfectamente estelares. Por otro lado un censo del cielo con radio ondas, había mostrado fuentes intensas de radiación. ¿A qué objetos ópticos correspondían estas radiofuentes? Se encontró que un buen porcentaje de ellas correspondían a objetos cuasi estelares (CUASARES). Pero no se conocía la distancia de ellos y, por ende, su luminosidad intrínseca era desconocida. El espectro obtenido no se parecía a algún patrón espectral conocido. Fue una sensación muy especial cuando el misterio se aclaró, gracias a la genial idea de dos astrónomos del Tecnológico de California: M. Schmidt y J. Greenstein. Ellos demostraron que el desplazamiento al rojo de la región del espectro en el ultravioleta, no observable por la presencia de la atmósfera terrestre, ahora sí se observaba, debido al gran desplazamiento hacia el rojo





que los trajo a la región visible; es decir que los cuasares eran como galaxias y se encontraban a grandes distancias, más allá de las galaxias comunes y corrientes. También se observó que los brillos absolutos de los cuasares eran 100 y 1000 veces mayores que cualquier galaxia conocida, y que eran sumamente compactas. Los más energéticos AGNs son también los más compactos.

Los cuasares se están estudiando intensamente desde 1963, en cuanto a sus espectros, su luminosidad integrada, distancias, colores, variabilidad, etc. Algunos radian en radio ondas, pero hay los que son "quietos" en radio. Los cuasares están en la "cabeza" de las AGN. Las propiedades salientes de las AGN pueden resumirse como sigue:

A medida que disminuye la energía del núcleo a lo largo de la secuencia, disminuye la concentración luminosa de la AGN y empiezan a aparecer las regiones circundantes del núcleo, así en los Seyferts la galaxia en su totalidad no difiere de una galaxia normal. A guisa de ejemplo mencionaremos que los núcleos de Seyfert 1 son más pequeños y compactos, en comparación con los de Seyfert 2 (Brecher 1977). Sería deseable poder comprobar estos resultados estadísticos con más amplios

datos en toda la secuencia de los AGN (véase Pishmish 1987). Una tendencia semejante se advierte también en la secuencia de las espirales, en la horquilla de Hubble. El tamaño del bulbo decrece al recorrer de las Sa hasta las Sc e irregulares; de hecho esta propiedad es un criterio adicional de la clasificación de las espirales.

Estructura del núcleo de los AGN

En general los núcleos contienen nubes discretas. En los Seyfert esta propiedad es bien conocida, como lo hemos mencionado antes. En una galaxia MAGN, NGC 4736 o en NGC 4314 (barrada), las nubes se observan como "manchas calientes" (hot spots), llamados así por su alto contraste de brillo, en comparación de su entorno. En los casos observados con precisión, las manchas calientes (condensaciones) muestran velocidad de alejamiento del centro, al mismo tiempo que rotan alrededor del centro de la galaxia. Debido a que los movimientos radiales no están permitidos en el estado estacionario de una galaxia, los movimientos hacia fuera (o hacia dentro) dan la evidencia de actividad en el núcleo. En este caso la actividad en el núcleo se detecta cinemáti-

camente, mientras que en los núcleos más compactos y pequeños, esta actividad se deduce por el ancho de las líneas espectrales en cuestión (y unas pocas en absorción).

En los núcleos muy energéticos, como en los cuasares, se han observado nubecitas como puntos brillantes en el radio continuo, gracias a una hazaña más de la tecnología y a la colaboración internacional. En la última década los grandes radiotelescopios en diferentes continentes como América, Europa y a veces hasta Australia, observan objetos AGN, en el continuo del radio-espectro, casi simultáneamente. Una técnica de computación sofisticada proporcionando datos interferométricos. La resolución (es decir el poder de separación de dos puntos cercanos) con estas bases intercontinentales, se llega a alcanzar en milisegundos de arco, casi mil veces más que la resolución alcanzada ópticamente. Este proceso lleva la sigla VLBI (very long baseline interferometry). La sede donde se procesan los datos acumulados es el Instituto de Radioastronomía Max Planck, en Bonn, Alemania.

Velocidad en los núcleos activos ¿Superlumínicas?

Ahora bien, con el VLBI se ha encontrado una treintena de núcleos activos de gran energía, que muestran 2 o más puntos radio luminosos. La sorpresa radicó en descubrir que, en el lapso de unos pocos años, la separación (proyectada naturalmente) de estas manchas aumentaba sensiblemente. Este fenómeno lo habían sugerido algunos científicos del Tecnológico de California, Marshall Cohen en especial, (en los primeros años de los 70), pero no se les creyó hasta que se comprobó el fenómeno definitivamente, gracias a observaciones más precisas. La figura 7 es un ejemplo de tal fenómeno.

Dada la gran distancia de estos AGN's (la distancia determinada por el corrimiento al rojo de sus líneas espectrales ópticas), la velocidad de separación de los "puntos calientes" resulta ser 2, 3 o más veces la velocidad de la luz. Físicamente se sabe que no puede existir velocidad de ninguna índole más grande que la de la luz (según la teoría de la relatividad). El gran reto ha sido poder interpretar estas velocidades "superlumínicas". Parece ser que la misma

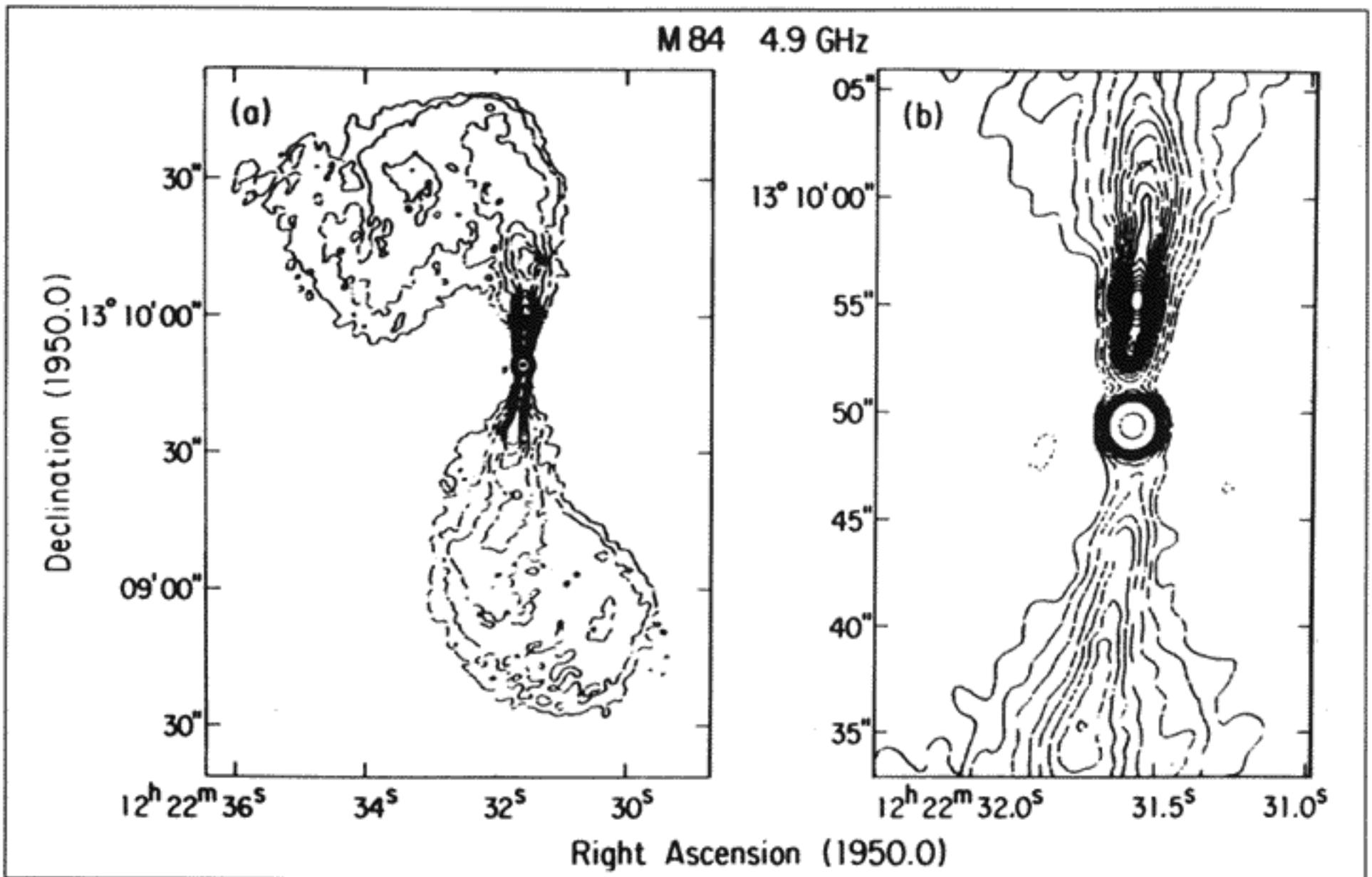


Figura 7a. Contornos en diferentes intensidades de radiación de 4.9 GHz alrededor de la galaxia Messier S4. La actividad se ve como un jet en ambos lados del núcleo seguido de dos lóbulos extendidos. 7b. Amplificación de la parte central de la Figura 7a.

teoría de la relatividad explica este enigma como una ilusión (favoritismo Doppler). Mencionaremos más tarde, una vez más, los efectos del favoritismo Doppler.

A medida que aumenta la resolución espacial alcanzable, se revelan más y más pequeñas estructuras, nubecitas de plasma en los núcleos activos con dimensión del orden de un año luz. Aquí surgen algunas dudas: ¿continuará la disminución de los detalles observados en los núcleos activos? ¿Un aumento de la resolución requiere una mayor distancia (línea de base) entre los radiotelescopios? ¿La interferometría con base tierra satélite, será lo que se requiera para este problema? ¡No creo que las sorpresas cósmicas estén agotadas!

Otra pregunta interesante aún no atacada: ¿las nubecitas nucleares están arregladas simétricamente, como en el caso de las manchas calientes de una galaxia semejante a NGC 4736? (Véase figura 8). En esta última, las nubecitas más grandes que las de AGN delínean una espiral doble simétrica cerrada,

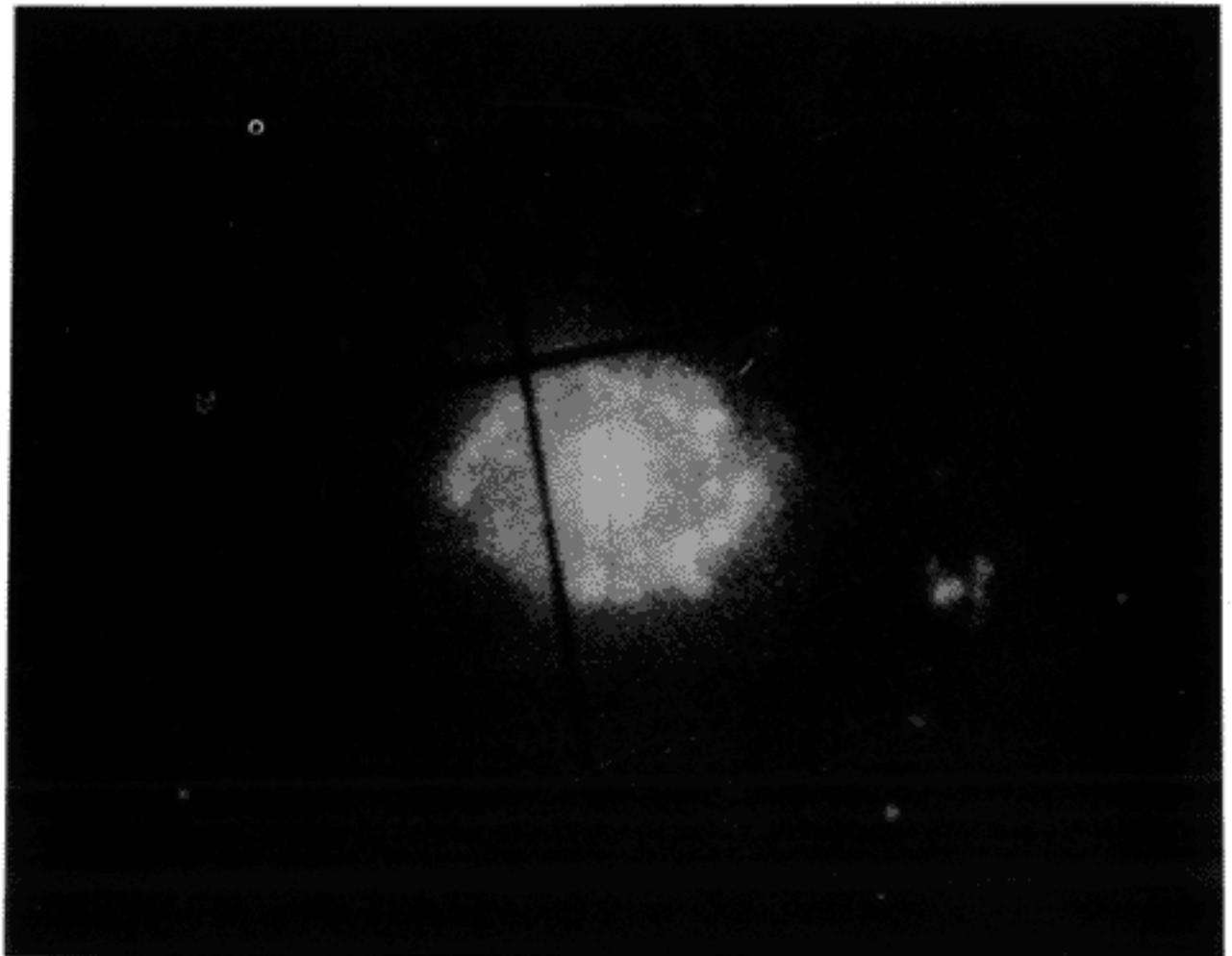


Figura 8. La "espiral" nuclear brillante de la galaxia Sb NGC 4736. Foto tomada con el telescopio de 2 metros en San Pedro Mártir. B.C.N. La luminosidad de la galaxia exterior a la espiral central disminuye bruscamente tal que en la foto los brazos externos no aparecen grabados.

dándole el aspecto de un "anillo". Sería interesante saber si la simetría mencionada tiene alguna correlación con otros parámetros físicos del núcleo, como por ejemplo la energía contenida en ellos.

Radio galaxias y lóbulos

A principios de los sesenta se comprobó que las radio galaxias mostraban una estructura de dos lóbulos, simétricamente dispuestos alrededor del centro de la galaxia total, extendiéndose a grandes distancias. NGC 5128, una radio-galaxia (también galaxia óptica), que es una de las más cercanas AGN, mostraba dos lóbulos simétricos que se extendían a mega años luz. Aunque no se han observado velocidades en el material de los lóbulos, es de esperar, y así se supone, que estas estructuras están formadas por gas emanado de la galaxia, en especial por el bulbo de estas galaxias.

Energía total radiada (luminosidad) de los diferentes tipos de AGN

Una estadística de objetos activos catalogados por Verón y Verón-Cetty, muestra que la secuencia de los objetos activos, es también una de las energías promedio radiadas por las diferentes clases de galaxias activas (Ana María Cervantes, *Tesis de Licenciatura* 1989). Esta afirmación se basa en los valores dados en la tabla 2.

Tabla 2. Detección de objetos para cada tipo a distancias mayores que las indicadas

56.0	MEGAPARSEC	III
86.5	"	LINER
411.6	"	SEYFERT 1
444.4	"	SEYFERT 2
625.9	"	B L LACERTA
791.6	"	CUASARES
1 Mpc = 10 ⁶ pc = 3.26 x 10 ⁶ años luz		



Fenómeno de los jets

De nuevo en radio-ondas se han encontrado estructuras intensas y altamente colimadas, llamadas chorros (jets), partiendo de núcleos energéticos de galaxias. Los jets atraviesan por en medio de los lóbulos menos intensos. Se cree que los jets suministran energía a los lóbulos. La bi-simetría de los jets, así como en la mayoría de los lóbulos, es de alto grado. La gran extensión de los jets astrofísicos se observan en cuasares o radiogalaxias, asociados a sus núcleos de alta energía. En general, el núcleo de donde parte el chorro, se cree, es un objeto muy denso, colapsado, o un hoyo negro que seguramente está rotando. La linealidad de los jets, si estos tienen masa suficiente para ser sujeta a la gravedad del núcleo, implica que la orientación está a lo largo del eje de rotación. Los alabeos pequeños pueden deberse al medio ambiente, a la interacción con el material intergaláctico no homogéneo o bien pueden ser el resultado de una pequeña desviación de la orientación del jet, del eje de rotación del sistema. Dos ejemplares

de jets astrofísicos aparecen en la figura 9.

Los jets más energéticos se observan en cuasares y en galaxias elípticas gigantes, con gran concentración central. En elípticas menos masivas, los jets son poco energéticos. En los Seyferts y en MAGN's, la radioestructura es semejante a los lóbulos, pero menos extensas y de menor intensidad. A menudo se observan tres acumulaciones de radio-continuo, una en el núcleo y dos a ambos lados del núcleo, simétricamente dispuestos. Será interesante determinar la existencia de los jets como función de los parámetros de la galaxia, por ejemplo, la masa total o la concentración de ésta.

A la fecha se han detectado alrededor de 200 objetos con jets. Los lóbulos son casi siempre dobles, pero no así los jets. Hay los que son dobles y los que no lo son. Suponiendo que la emanación del plasma que forma el jet es igualmente intensa en ambos lados del núcleo, la pregunta será entonces: ¿por qué se observa solo uno de ellos? Puede ser también que la emanación no tiene simetría y que sólo sale el plasma

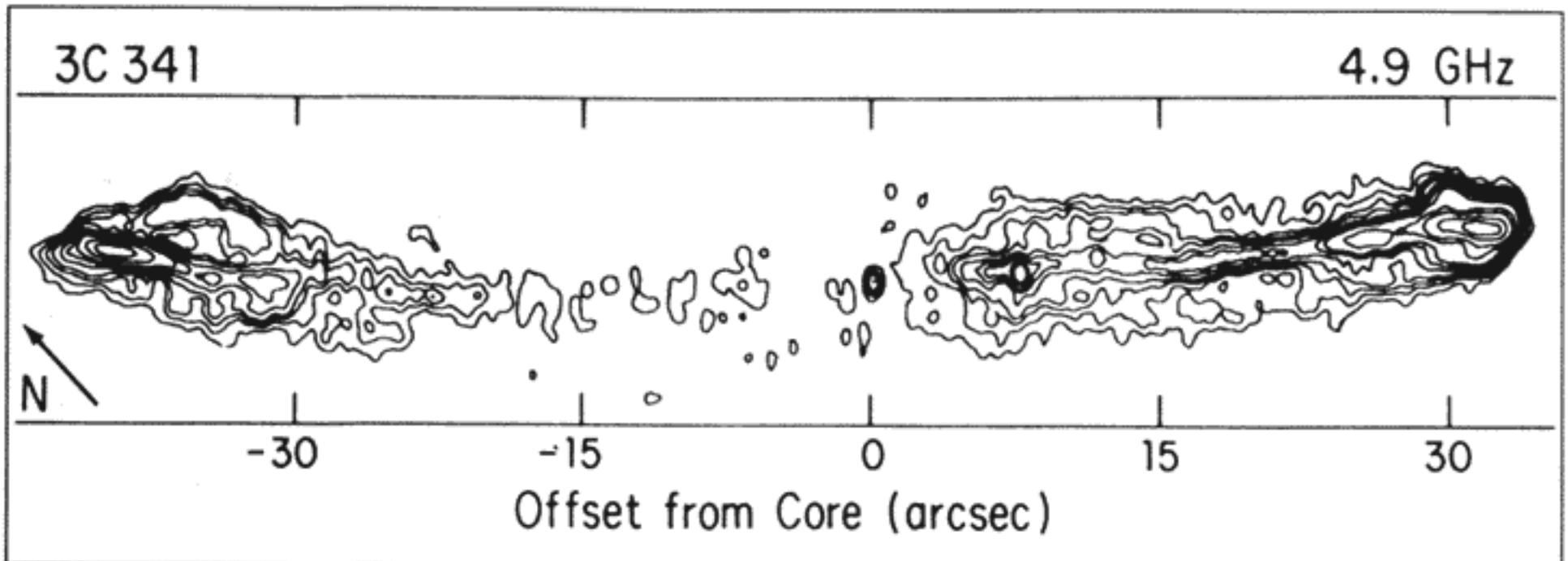


Figura 9. Los dos jets en cada lado del núcleo de la galaxia activa 3c 341. (El número 341 del tercer catálogo de la sección de radioastronomía de la Universidad de Cambridge, Inglaterra). (Bridle and Perley, 1984).

de un lado. Pero si no es así, existe una interpretación a la ausencia del otro lado, como un efecto relativista, si la velocidad de eyección es relativista y la dirección está cerca de la línea de vista del observador, (favoritismo Doppler). Esta situación causa que la radiación del lado que se acerca al observador aparezca 5 000 ó 6 000 más intensa que el opuesto, por lo tanto este último no será detectable. Es necesario tener una muestra más amplia de jets, con diferentes energías, para resolver satisfactoriamente algunos fenómenos, entre otros, la duplicidad o no de los jets. La velocidad del plasma de los jets no se ha medido, pues no muestra (al límite de detección instrumental) ninguna línea espectral para determinar directamente el efecto Doppler. Sin embargo cabe señalar que el movimiento superlumínico de algunos núcleos activos, parece indicar que estos puntos en movimiento pueden marcar el principio de un chorro.

La figura 10 da evidencia del movimiento superlumínico de las manchas en el núcleo de un cuasar.

Campos magnéticos

Se han observado campos magnéticos asociados a los jets. La orientación es el dato que se puede obtener con más seguridad, no lo es así, la fuerza del campo. La polarización del continuo del radio, muestra que en los objetos de alta energía las líneas de campo son paralelas y, más adelante, más lejos del núcleo, pueden ser perpendiculares al

jet. En casos menos energéticos el campo es perpendicular al jet. ¿Cuál es el papel de los campos magnéticos en el origen de la estabilidad y confinamiento del plasma en el jet?, no está claro aún. Es evidente que el campo magnético es importante en el origen y evolución de la actividad galáctica; el complejo problema del "dinamo hidromagnético", postulado recientemente, necesita mucha mayor atención, tanto teórica como observacional. Un grupo soviético especializado en la teoría y los radio astrónomos de VLBI, MERLIN y otros en lo observacional, pueden encontrar en un futuro próximo, la respuesta que requerimos.

No hay un consenso respecto al origen de los campos magnéticos en las galaxias. El origen del campo puede ser primordial pero de muy leve fuerza, o sea 10^{-12} Gauss, y ampliarse en el curso de la evolución de una galaxia. Un grupo numeroso de astrónomos, aboga por los cambios producidos en el proceso de la eyección del plasma por las supernovas o bien por la emanación del plasma de las estrellas, llevando consigo líneas de fuerza magnéticas. Tanto las eyecciones de las supernovas, como las de las estrellas, producirían campos magnéticos caóticos. El origen por supernovas y estrellas, tiene que pasar una prueba: ¿Por qué los campos magnéticos tienen bipolaridad (en los jets)? ¿Cómo se transforman los campos caóticos en confinamientos tan estrechos en los jets observados? Esas preguntas no parecen tener respuesta, hasta la fecha.

De nuevo los parámetros primigenios globales

Habíamos mencionado al principio de este artículo, que los diferentes tipos de las galaxias que constituyen el esquema de Hubble, se debían esencialmente a los diferentes parámetros globales con las que inicia su vida una galaxia (la masa total, por ejemplo). Si bien la evolución dinámica debe jugar un papel en este problema, las galaxias en la clasificación de Hubble no cubren un lapso suficientemente largo, como para que se note una diferencia evolutiva. Por esta razón hemos atribuido las diferentes formas galácticas esencialmente a los parámetros globales primigenios.

Perspectivas para elucidar la evolución de las galaxias

Creemos que las galaxias evolucionan de diferente manera dependiendo de sus propiedades iniciales; ahora bien, las galaxias con núcleos activos, pueden ser observadas, ya sean las cercanas o las que están en los confines del Universo (los cuasares). Esto equivale a decir que estamos observando galaxias en el intervalo de tiempo más largo posible. Los cuasares, radio-galaxias con jets enormes, son los más lejanos. La estructura y otras propiedades que se observan nos llegan en un lapso de 5×10^9 años. Es decir que nosotros vemos estos objetos no como están ahora, sino como estuvieron en su niñez o juventud. 5×10^9 años es un lapso considerable para que varíen las galaxias diná-

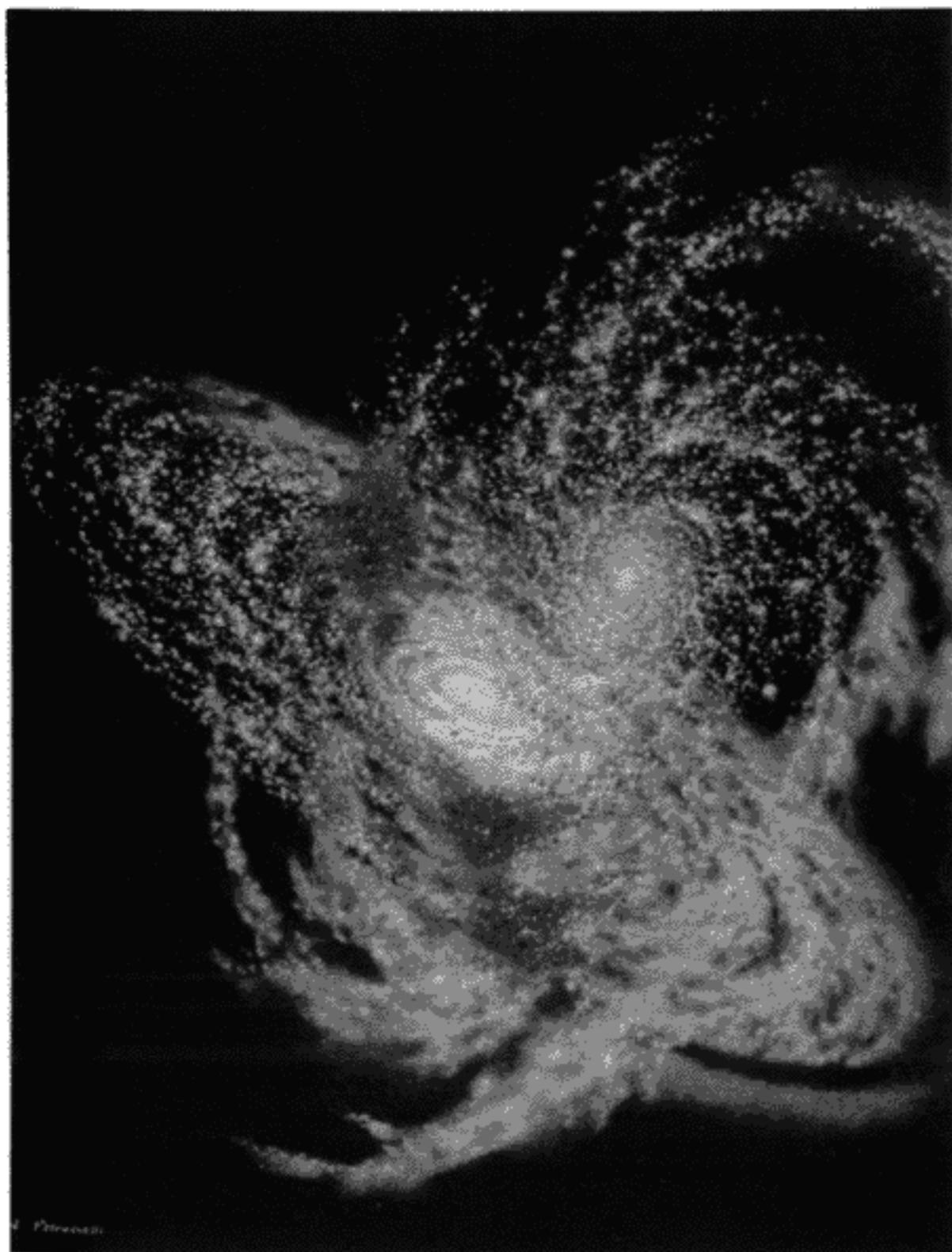
micamente. Estudiando los objetos activos a diferentes distancias, o sea a partir de 5×10^9 años luz de distancia, hasta lo cercano, podremos presenciar el cambio que sufren estos objetos durante un lapso de 5 mil millones de años. Es concebible que con el estudio en galaxias a diferentes distancias, y por lo tanto de edades decrecientes, se descifrará el efecto de evolución. Una vez eliminado el efecto de la evolución, el resto será entonces atribuible a los parámetros globales iniciales de las galaxias activas. Dicho de otro modo, se debe deconvolucionar los efectos de evolución y los de los parámetros físicos inherentes. Si se lograra tal deconvolución, podremos tener más certidumbre del papel que juegan los parámetros iniciales en el desarrollo de

estos sistemas y así poder explicar la secuencia de Hubble, el enigma que ha permanecido como problema de frontera en las últimas siete décadas.

Variabilidad de los núcleos activos

Se han observado otras muchas propiedades claves, no mencionadas en las páginas anteriores, como lo es la variabilidad de la radiación de los núcleos activos, donde se han detectado tanto rayos X como rayos γ . Estos fenómenos se están estudiando intensamente. Eventualmente el estudio combinado de todas estas manifestaciones, podrá indicar el camino que conducirá a descifrar el fenómeno global de la actividad de los núcleos.

Se ha detectado el periodo repre-



NUESTRA PROPIA AGENDA SOBRE DESARROLLO Y MEDIO AMBIENTE

INFORME DE LA COMISIÓN DE DESARROLLO Y MEDIO AMBIENTE DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

- *Una visión múltiple del tema
- *Una visión política y técnica que parte de la región.
- *Una contribución al debate Mundial sobre esta problemática.



pnud

representativo de la variabilidad en un gran número de AGN's, del orden de semanas, lo que da información sobre el tamaño de los núcleos. La causa todavía se discute sin que se haya llegado a un acuerdo razonable. El tiempo característico de la variación aumenta con la longitud de onda. Es pequeño en rayos X y crece hacia la longitud de onda grande, como son las de radio, e indican la dimensión variable de la región.

Yo creo que en la próxima década, podremos encontrar, o cuando menos obtener una pista, en la solución del problema de poder separar el efecto de la evolución, del efecto de los parámetros primigenios, en los objetos activos. Es también concebible que la actividad de un núcleo galáctico ocurra en la etapa definida en la vida de una galaxia. El hecho de que el 15% de los objetos conocidos muestren actividad en el núcleo, puede implicar que si la vida de una galaxia es 10^{10} años, la fase activa del núcleo puede durar cuando mucho 10^9 años. También es posible que una galaxia muestre, varias veces, brotes cortos de actividad en su vida. Pero aún no se conoce la fuente que suministra la energía perdida por el núcleo activo.

Epílogo

El tema de la actividad en las galaxias está en gran ebullición. La acumulación de datos observacionales en toda la gama del espectro electromagnético, es formidable. Todo esto produce una especie de confusión, lo que hace más compleja la interpretación teórica. El científico debe saber discernir cuáles son los procesos claves y básicos, en medio de una multitud de detalles aparentes, que forman una especie de bruma. El investigador también debe poder penetrar más allá de esta bruma y localizar los parámetros esenciales básicos que decidan la suerte de los sistemas galácticos.

No es posible hablar de la actividad en las galaxias sin evocar los hoyos negros. Estos son atractivos por su naturaleza extraña y por ser una especie de talismán para resolver problemas, difíciles de descifrar de otro modo. Se cree que en los núcleos galácticos, justo en el centro, existe un cuerpo pequeño en dimensiones y sumamente masivo y denso —un hoyo negro— siendo esta

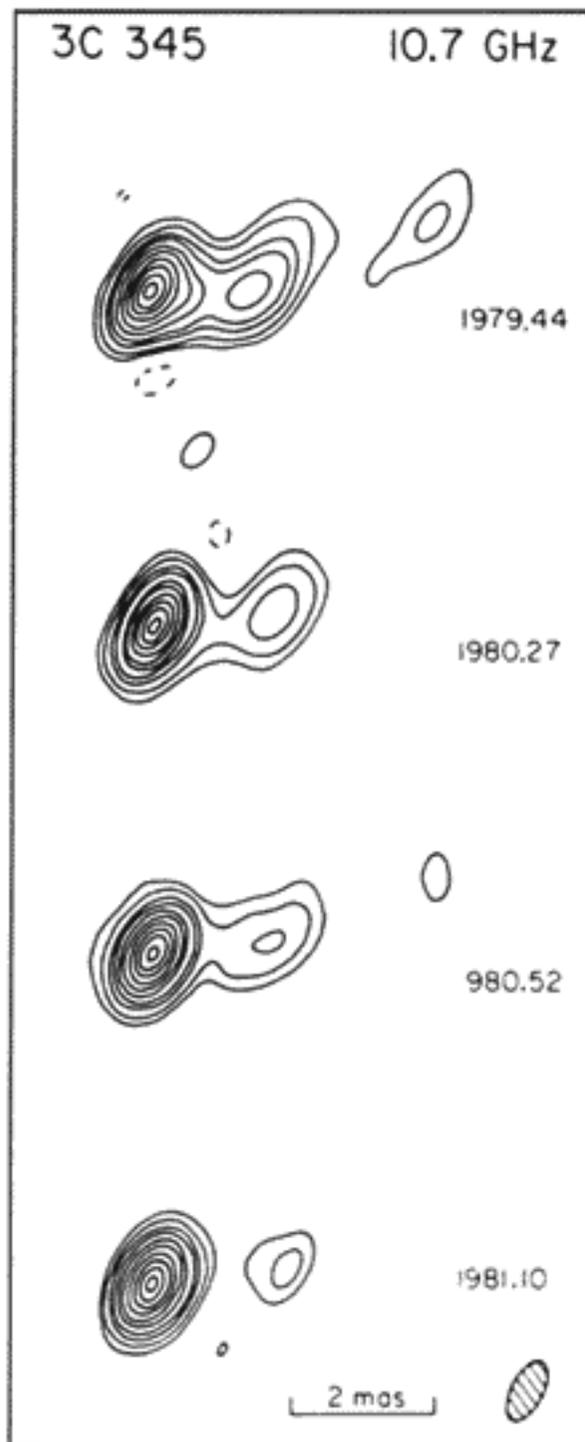


Figura 10. Las isofotas de dos manchas en el núcleo del cuasar en el continuo de radio ondas. Nótese la variación de la separación de estas manchas en un lapso corto de 2 años. La velocidad de separación es más grande que la de la luz (superanímica). (Begelman *et al.* 1984).

densidad el límite de la densidad máxima posible. Las galaxias más activas (o cuasares), tienen en el núcleo un hoyo negro muy masivo. Se postula que existe en el núcleo de nuestra Galaxia un hoyo negro, aunque sea un "mini hoyo". Alrededor del hoyo negro puede formarse un disco de acreción, con la materia que cae al centro, materia supuestamente liberada por estrellas evolucionadas o supernovas. Se supone que este hoyo tiene un campo dipolar magnético, perpendicular al disco de acreción y que los jets emanan del hoyo negro en dirección a los polos del campo magnético. Todo esto es aún hipotético. Esperemos que las observa-

ciones, aunadas a la teoría, diluciden el enigma de los núcleos galácticos.

Resumiendo, nos interesa señalar, una vez más, que hay indicios fuertes en cuanto a que la intensidad de las manifestaciones de actividad en las galaxias (o cuasares), es mayor en los objetos más lejanos y llega a su máximo, en los objetos que están en los confines del universo conocido hasta la fecha. Parece haber una correlación entre la potencia energética de la actividad y la distancia del objeto. Si ésta se confirma, podremos presenciar la evolución de las galaxias, cuando menos desde su infancia hasta el presente, pues a las más lejanas (distancia 5×10^9 años luz), estamos viéndolas en su infancia; de hecho sus propiedades son las que tenían cuando la radiación recibida ahora en la tierra partió de la galaxia, hace 5×10^9 años, o sea cuando el objeto era joven, en su adolescencia o su infancia.

Teniendo tan extenso lapso a nuestra disposición, podremos descifrar la evolución de las galaxias y llegar a separar del efecto observado la contribución de la evolución en el tiempo y, por ende (esto es mi convicción), podremos descifrar también el esquema de Hubble, esquema que ha intrigado a los astrónomos desde hace casi 70 años y que aún es un problema de frontera. ♦

Referencias

- Begelman, M. C. Blandford, R. D., and Rees, M. J. 1984 *Reviews of Modern Physics* 56, 255.
- Brecher, K. 1977. *Frontiers of Astrophysics*, 10, p. 438.
- Bridle, A. M. and Perley, R. A. 1984. *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 22, 319.
- Brosche, P. 1973. *Astron. and Astrophys.* 13: 293.
- Carrasco, L., Roth, M. and Serrano, A. 1982. *Astron. and Astrophys.* 106, 89.
- Davies, R. 1989. Presentado en la XI Reunión Astronómica Europea celebrada en Tenerife, Islas Canarias.
- Pishmish, P. y Maupomé, L. 1978. *Revista Mexicana de Astron. y Astrof.* 4, 319.
- Pishmish, P., 1986. En: *Structure and Evolution of Active Galactic Nuclei*. Ed. Giurcin, *et al.* p. 679

Fotografías

A meeting with the Universe. NASA. *El Universo, Time Life.* *The Atlas of Scientific Discovery.* Paris Pishmish.