

Materia oscura en galaxias espirales

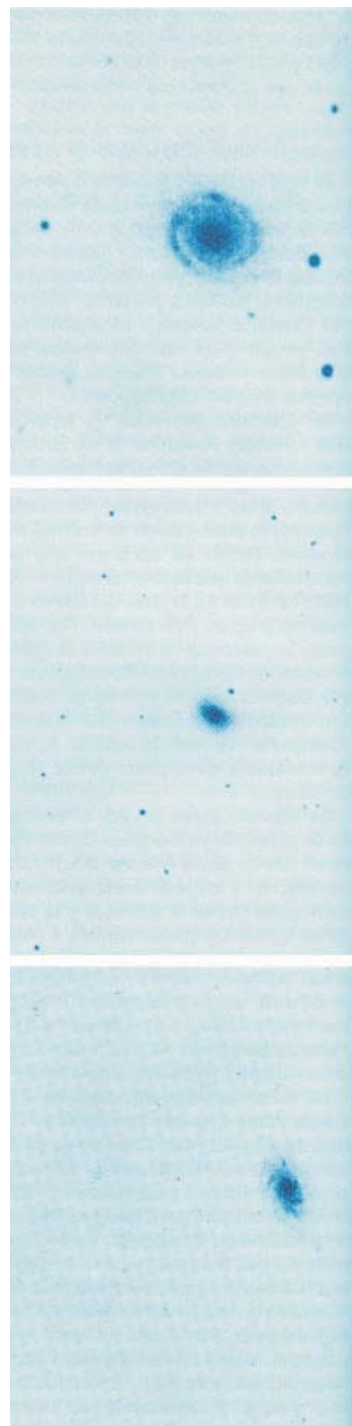
Según parece, gran parte de la materia de las galaxias espirales ni emite luz ni se concentra en las proximidades del núcleo de las mismas

Vera C. Rubin

Después de haber obtenido pruebas (en el decenio de 1920) de que el universo está en expansión, resulta razonable preguntarse: ¿Continuará expandiéndose indefinidamente, o existe en él suficiente masa para que la atracción mutua de sus componentes frene el ritmo de expansión y termine por detenerla? La mayoría de los cosmólogos están de acuerdo en dos puntos: el universo se inició en una gran explosión hace 10.000 ó 20.000 millones de años, a partir de un estado infinitamente pequeño y denso, y, desde entonces, se ha mantenido en ininterrumpida expansión. Se calcula que la densidad crítica de la materia necesaria para frenar la expansión y “cerrar” el universo es del orden de 5×10^{-30} gramos por centímetro cúbico, lo que viene a representar tres átomos de hidrógeno por metro cúbico. La cantidad de materia luminosa en forma de galaxias, sin embargo, se cifra en unos $7,5 \times 10^{-32}$ gramos por centímetro cúbico. Por tanto, para que se detuviera la expansión del universo la densidad de la materia invisible tendría que multiplicar, unas 70 veces, la densidad de materia luminosa.

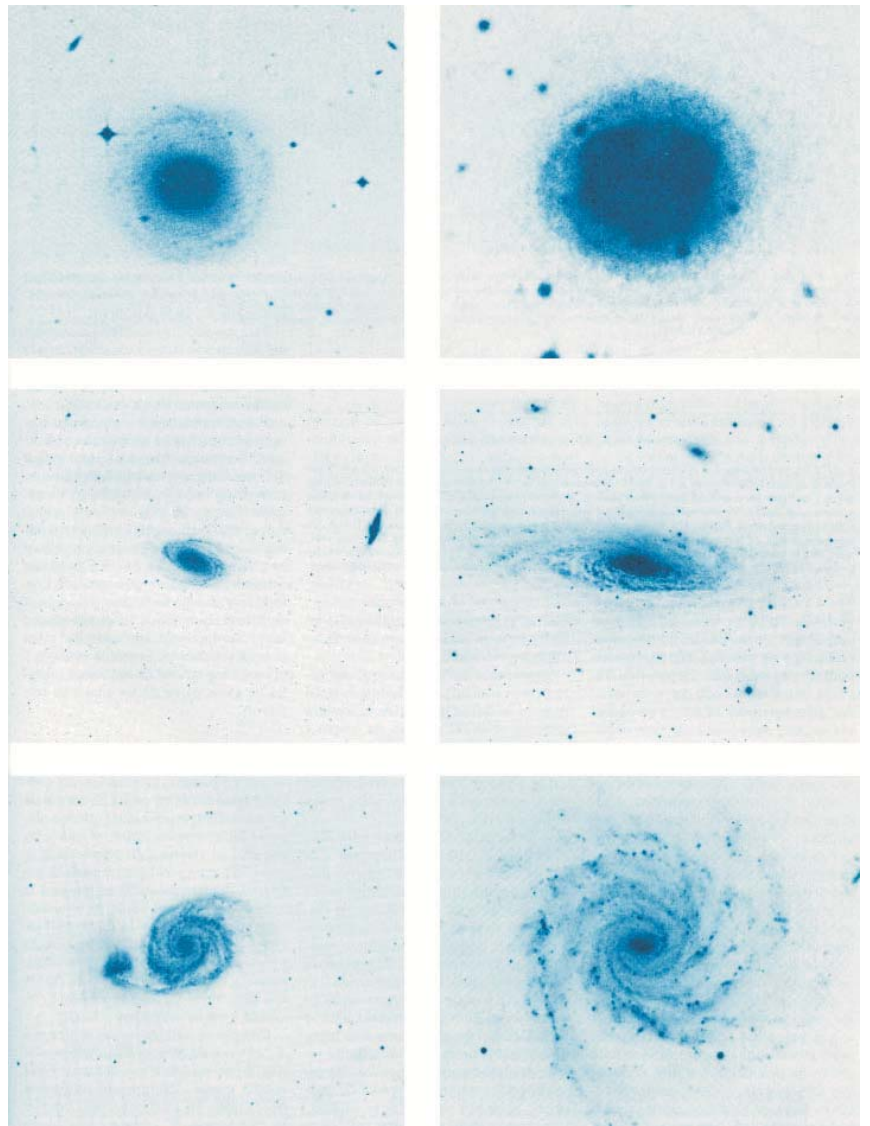
Teniendo en cuenta este factor, los astrónomos han tratado de determinar, a lo largo de los últimos cincuenta años, la masa de las galaxias que pueblan el universo hasta los límites de observación. Fundados en la luminosidad de las galaxias típicas, estiman que éstas tienen una masa que varía desde miles de millones hasta billones de veces la masa del Sol. La población estelar real de una galaxia es, por supuesto, muy variada. Hay estrellas 10.000 veces más luminosas que el Sol por unidad de masa; otras muestran sólo una pequeña fracción de la luminosidad de éste. Ante tamaña diversidad, valdría la pena saber si la distribución de luminosidad en las galaxias constituye un índice fidedigno de la distribución de masa en el universo.

La autora y sus colegas del Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie de Washington han tratado de responder a esas preguntas midiendo la velocidad de rotación de ciertas galaxias, escogidas a diversas distancias de sus centros de rotación. Desde hace tiempo se sabe que, fuera del núcleo brillante de una galaxia espiral típica, la luminosidad de ésta decrece rápidamente a medida que nos alejamos del centro. Fuera del núcleo, la velocidad de rotación debería decrecer inversamente a la raíz cuadrada de la distancia, de acuerdo con la ley de Kepler para la velocidad orbital de los cuerpos en el sistema solar. Pero no dice eso lo hallado: la velocidad de rotación de las galaxias espirales, en una muestra variada, permanece constante al aumentar la distancia al centro o bien aumenta ligeramente al alejarse del centro, dentro de lo que permiten las medidas. Este resultado, inesperado, indica que la disminución de masa luminosa con la distancia al centro queda compensada por un aumento de la masa no luminosa.



Nuestros resultados, junto con los de otros muchos investigadores que han abordado la cuestión de la masa desde puntos de vista diferentes, permiten afirmar con alguna garantía que la distribución de la luz no es un indicador válido de la distribución de la masa en las galaxias ni en el universo en cuanto tal. Una alta proporción de la masa del universo, que llega al 90 por ciento, no está radiando a longitud de onda alguna con intensidad suficiente para poderse detectar en la Tierra. En un comienzo, los astrónomos aludían a la componente no luminosa bajo el epígrafe de “ materia perdida”. Hoy se acepta que no se ha perdido: simplemente, no se ve. Esa materia oscura podría encontrarse en estrellas de extrema debilidad y poca masa, en grandes planetas como Júpiter o en agujeros negros, pequeños o de gran masa. Entre otros candidatos se encuentran los neutrinos (en el caso de que tuvieran masa, como sugieren trabajos recientes) y partículas hipotéticas tales como monopolos magnéticos o los gravitinos.

A principios de siglo, los astrónomos consideraban razonable suponer que la distribución de materia luminosa, dondequiera que se encontrase, coincidía con la distribución de masa. Hasta que Sinclair Smith y Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, descubrieron, hará unos 50 años, que en algunos grandes cúmulos de galaxias los individuos componentes se movían a una velocidad tal que su atracción gravitatoria mutua era insuficiente para evitar la desintegración del



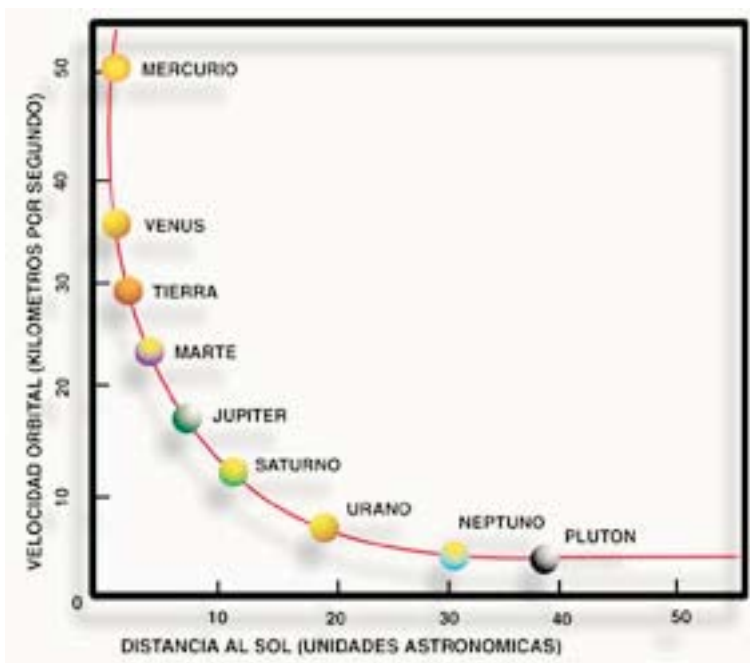
1. GALAXIAS ESPIRALES, cuya masa invisible ha sido investigada por la autora. Pertenecen a tres categorías principales: Sa, Sb y Sc. Dentro de cada clase, las galaxias varían enormemente en tamaño y luminosidad. Se reproducen aquí nueve ejemplos en imágenes negativas en las cuales 1, 2 centímetros representan 10 kiloparsec (32.600 años-luz). En la parte superior se recogen tres galaxias Sa, tres galaxias Sb en la fila central y, en la parte inferior, tres galaxias Sc. En la transición de la clase Sa a la clase Sc, el núcleo mengua con respecto al disco y la estructura espiral se hace más pronunciada.

cúmulo. Por consiguiente, o esos cúmulos se estaban disolviendo, o bien existe en ellos suficiente materia oscura para mantenerlos unidos. Los datos disponibles abonan una configuración estable de esos agregados galácticos.

Las observaciones pioneras de Smith y Zwicky reunieron, pues, las primeras indicaciones de que tales cúmulos alojan materia luminosa y no luminosa.

Siguieron otros trabajos que apoyaban dicha conclusión. Estudios de la dinámica de distintas galaxias, la nuestra incluida, de pares de ellas, de grupos y cúmulos galácticos apuntan hacia una componente de masa, aunque inobservable, ubicua. Detectan la presencia de masa o luminosa a través, sólo, de sus efectos gravitatorios.

A lo largo de los últimos años, W. Kent Ford, Jr., Norbert Thonnard, David Burstein y la autora se han empeñado en desentrañar la distribución de masa del universo investigando la distribución de materia en el interior



2. **LEY DE KEPLER** para la velocidad orbital de los planetas en el sistema solar, en el que más del 99 por ciento de la masa total reside en el Sol. Dicha ley proporciona la curva representada. La velocidad orbital decrece en razón inversa de la raíz cuadrada de r , la distancia media del planeta al Sol. La distancia aparece aquí medida en unidades astronómicas; una unidad astronómica (U.A.) es la distancia media entre la Tierra y el Sol, Plutón, a 39,5 U.A., está 100 veces más lejos del Sol que Mercurio, a 0,39 U.A.. La velocidad orbital de Mercurio es de 47,9 kilómetros por segundo; la velocidad orbital de Plutón será, pues, de una décima parte, o 4,7 kilómetros por segundo (.). Para la autora las velocidades

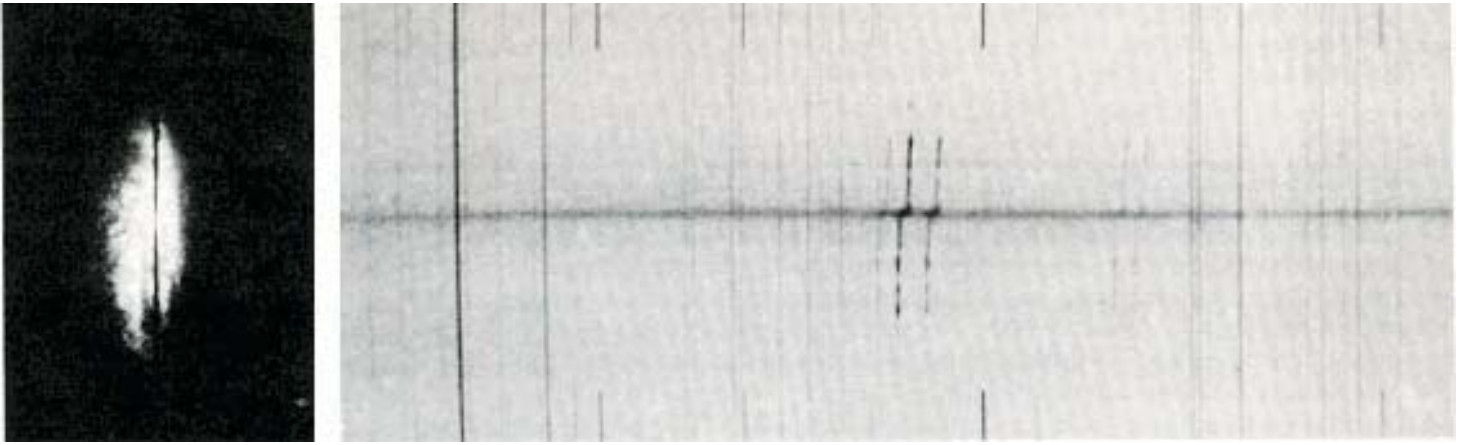
de las galaxias cuya estructura fuera similar a la de la nuestra: la clase general de galaxias espirales. Hemos adoptado este enfoque porque las galaxias espirales tienen una geometría favorable para la identificación de masa, tanto si es luminosa como si no lo es, y los grandes telescopios modernos, equipados con espectrógrafos con intensificador de imágenes, permiten completar la exploración de una galaxia con unas tres horas de exposición. Antes de relatar nuevas observaciones, conviene describir cómo responden los objetos celestes a las fuerzas gravitatorias que actúan sobre ellos y de qué modo su respuesta nos desvela la distribución de materia en gran escala. Hacia finales del siglo XVII, Robert Hooke sospechó que los planetas estaban sometidos a una fuerza gravitatoria por parte del Sol, cuya intensidad decrecía inversamente con el cuadrado de la distancia. Isaac Newton advirtió entonces que todos los pares de objetos del universo ejercían una atracción gravitatoria mutua, proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. Dicho de otra manera, si la distancia entre los objetos se multiplica por dos, por ejemplo, su atracción mutua queda dividida por cuatro.

Para los planetas en órbita alrededor del Sol, lo que viene a significar toda la masa del sistema solar, la disminución de la atracción gravitatoria con la distancia se acompaña, exactamente, de una disminución de la velocidad necesaria para mantener el planeta en su órbita. Por tanto, Mercurio, que está 0,39 unidades astronómicas del Sol (esto es, 0,39 veces la distancia media entre la Tierra y el Sol), tiene una velocidad orbital de unos 47,9 kilómetros por segundo. Plutón, 100 veces más lejos a una distancia media de 39,5 unidades astronómicas, posee una velocidad orbital que es sólo la décima parte de la de Mercurio, o sea, 4,7 kilómetros por segundo. Las galaxias espirales giran porque retienen el momento cinético y el momento orbital de las bolsas iniciales de gas a partir de las cuales se formaron.

En una galaxia espiral, el gas, polvo y estrellas del disco galáctico (junto con los planetas asociados y sus satélites) están todos en órbita alrededor de un centro común. Al igual que los planetas en el sistema solar, el gas y las estrellas se mueven en respuesta a la atracción gravitatoria combinada de todas las demás masas. Si se imagina la galaxia como un esferoide, la atracción gravitatoria debida a la masa M_0 yacente en el centro, y un objeto de masa m , en una órbita ecuatorial a una distancia r del centro, viene dada por la ley de Newton donde es la velocidad orbital.

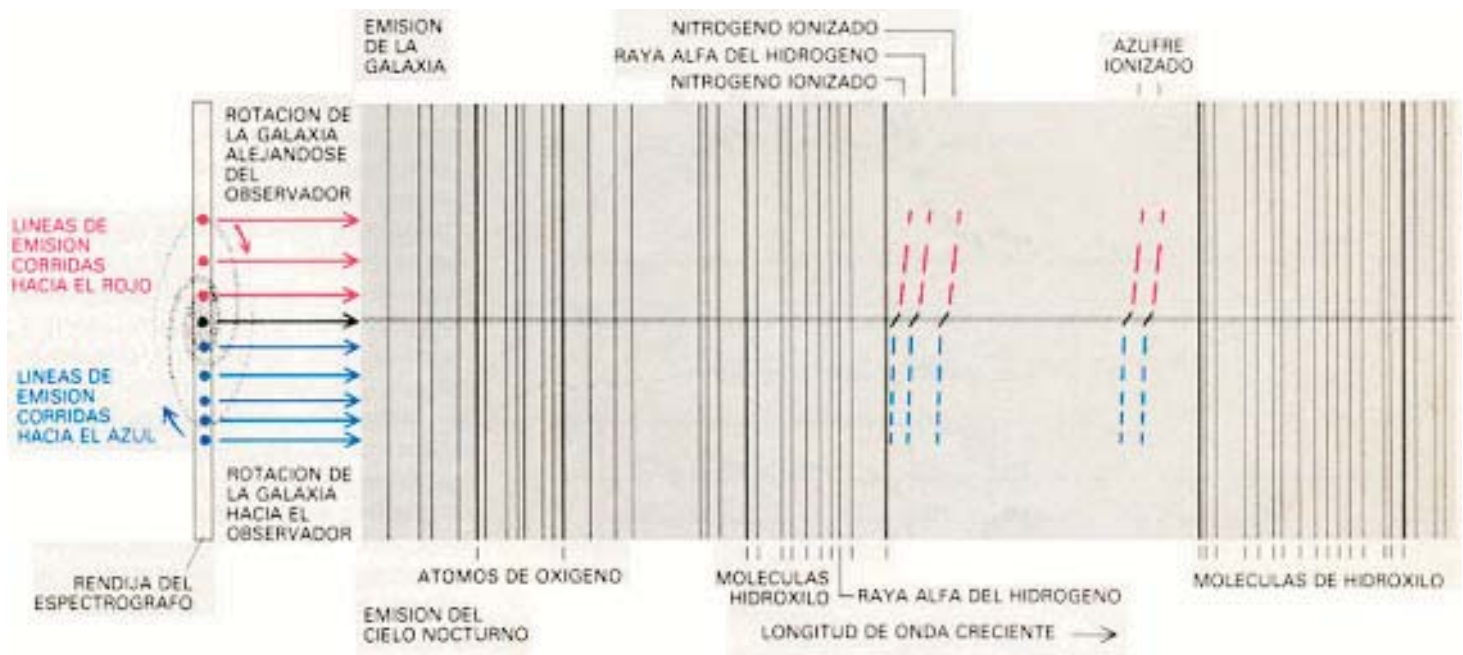
Cuando en esta ecuación se despeja, el valor de m se elimina y la velocidad de un cuerpo a una distancia r del centro queda determinada solamente por la masa M , situada hacia el interior de su posición. Si, como pasa en el sistema solar, la masa está en la proximidad del centro, entonces las velocidades a distancia r del centro decrecen en la relación de $1/r^2$. Este decrecimiento de la velocidad orbital se llama kepleriano en honor de Johannes Kepler, que fue el primero en formular las leyes del movimiento planetario.

En toda galaxia, el brillo presenta un agudo máximo cerca del centro y disminuye rápidamente con la



3. ESPECTRO DE LA GALAXIA ESPIRAL NGC 7541 registrado con el telescopio de cuatro metros del Observatorio Nacional de Kilt Peak por la autora y W. Kent Ford. Jr. NGC 7541 es una galaxia espiral del tipo Sc que dista 60 megaparsec. (Un megaparsec vale 3,26 millones de años-luz). El tiempo de exposición fue de 114 minutos. La galaxia se ve a la izquierda tal como aparece en un monitor de televisión en la sala de mandos del observatorio. La línea oscura que atraviesa la galaxia muestra la orientación de la rendija del espectroscopio. Se examina aquí la luz procedente de todo el disco.

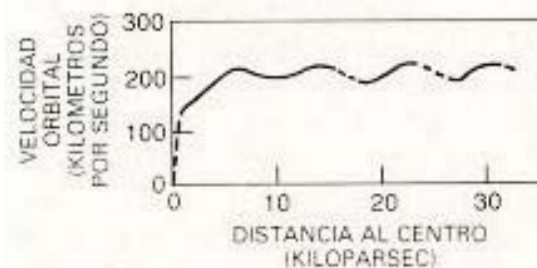
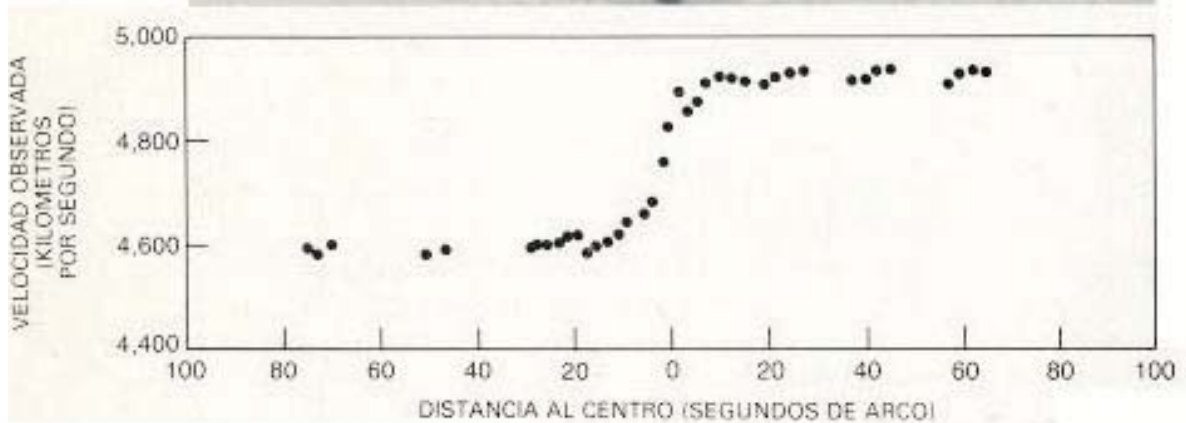
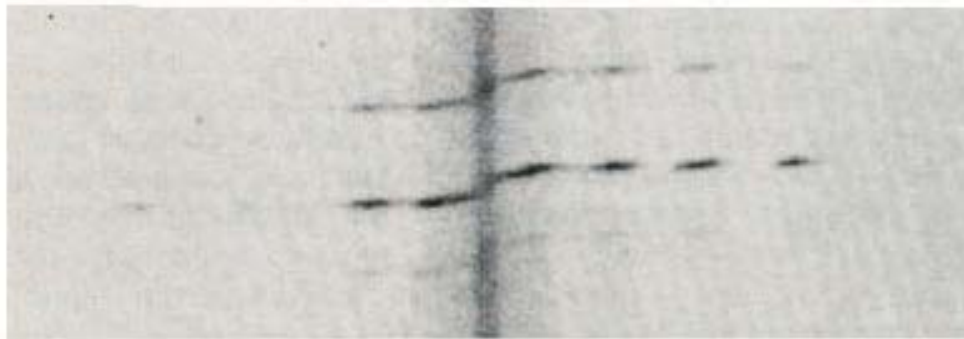
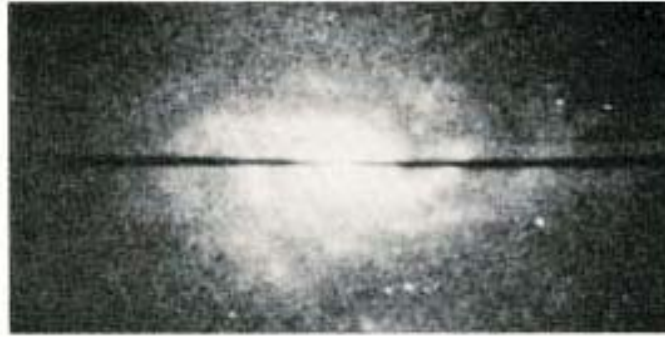
distancia. Durante mucho tiempo, los astrónomos supusieron que la masa decrecía también rápidamente con la distancia, de acuerdo con la distribución de luminosidad. Se esperaba, en consecuencia, que las estrellas situadas a distancias progresivas del centro tuvieran velocidades orbitales keplerianas decrecientes. No se habían hecho apenas observaciones de velocidad en las débiles regiones exteriores de las galaxias que pudieran confirmar o



4. LINEAS DE EMISION, en el espectrograma de NGC 7541, procedentes de dos fuentes: la luz nocturna y los átomos de las nubes de gas que rodean a las estrellas brillantes en la galaxia (véase la figura precedente). La mayoría de las líneas del cielo nocturno, que se extienden a lo largo de toda la anchura del espectrograma, proceden de moléculas de hidroxilo (OH) de la atmósfera terrestre. La rotación de NGC 7541 corre la posición de las líneas de emisión procedentes del disco de la galaxia, bien hacia una longitud de onda más corta (más azul) o bien hacia una longitud de onda mayor (más roja), según la rotación esté arrastrando las estrellas y el gas hacia el observador o alejándolas del mismo. La propia galaxia se está alejando del observador en virtud de la expansión general del universo; por consiguiente, la línea alfa del hidrógeno procedente del gas en la galaxia estará corrida hacia el rojo con respecto a la posición de la misma línea en la luz nocturna. El corrimiento es una medida de la velocidad de alejamiento de la galaxia. La inclinación de las líneas de emisión galácticas muestra que la velocidad orbital de las estrellas y del gas del disco galáctico crece con la distancia desde el centro de la galaxia.

refutar esta suposición, hasta épocas recientes.

A pesar de la extrema diversidad de formas de las galaxias espirales, los astrónomos han logrado agruparlas en tres clases, siguiendo un esquema propuesto hace unos 60 años por Edwin P. Hubble. Las designadas Sa



5. MEDIDA DE LA ROTACION DE NGC 2998, una galaxia Sc a una distancia de 96 megaparsec en la constelación de la Osa Mayor, para lo que se comienza con el registro de un espectrograma. La fotografía superior muestra la galaxia y la rendija del espectrógrafo superpuesta, tal como aparecen en un monitor de televisión en el telescopio de cuatro metros de Kilt Peak. Abajo está la región alfa de hidrógeno del espectrograma que resultó tras 200 minutos de exposición. Los puntos transcritos en la gráfica representan las velocidades a o largo del disco galáctico, tal como se miden a partir de la línea alfa del hidrógeno. La galaxia se está alejando a 4800 kilómetros por segundo; el lado izquierdo de la galaxia se está acercando y el derecho, alejando. El último paso es la construcción de una curva de rotación suavizando las velocidades de ambos.

se distinguen por su gran protuberancia central, rodeada de brazos lisos estrechamente arrollados, donde los “nudos”, o regiones brillantes, difícilmente pueden resolverse. Las galaxias Sb tienen una protuberancia central menos pronunciada y brazos más abiertos, con nudos más pronunciados. Las Sc, por último, se caracterizan por un núcleo central pequeño y brazos bien separados moteados de segmentos luminosos brillantes y definidos. El paso del tipo Sa al tipo Sc corresponde a un alisamiento de la protuberancia central y un aumento de la prominencia del disco que gira a su alrededor. La hipótesis de que el disco gira se apoya en sencillos razonamientos dinámicos.

Dentro de cada clase existen variaciones sistemáticas en tamaño y luminosidad. Así, las galaxias Sc varían desde objetos pequeños de poca masa y baja luminosidad hasta galaxias de masa y luminosidad enormes. Para ser completo, por tanto, el estudio de la dinámica de las galaxias debería incluir no sólo objetos con variación de tipos morfológicos, sino también objetos con variación de luminosidades.

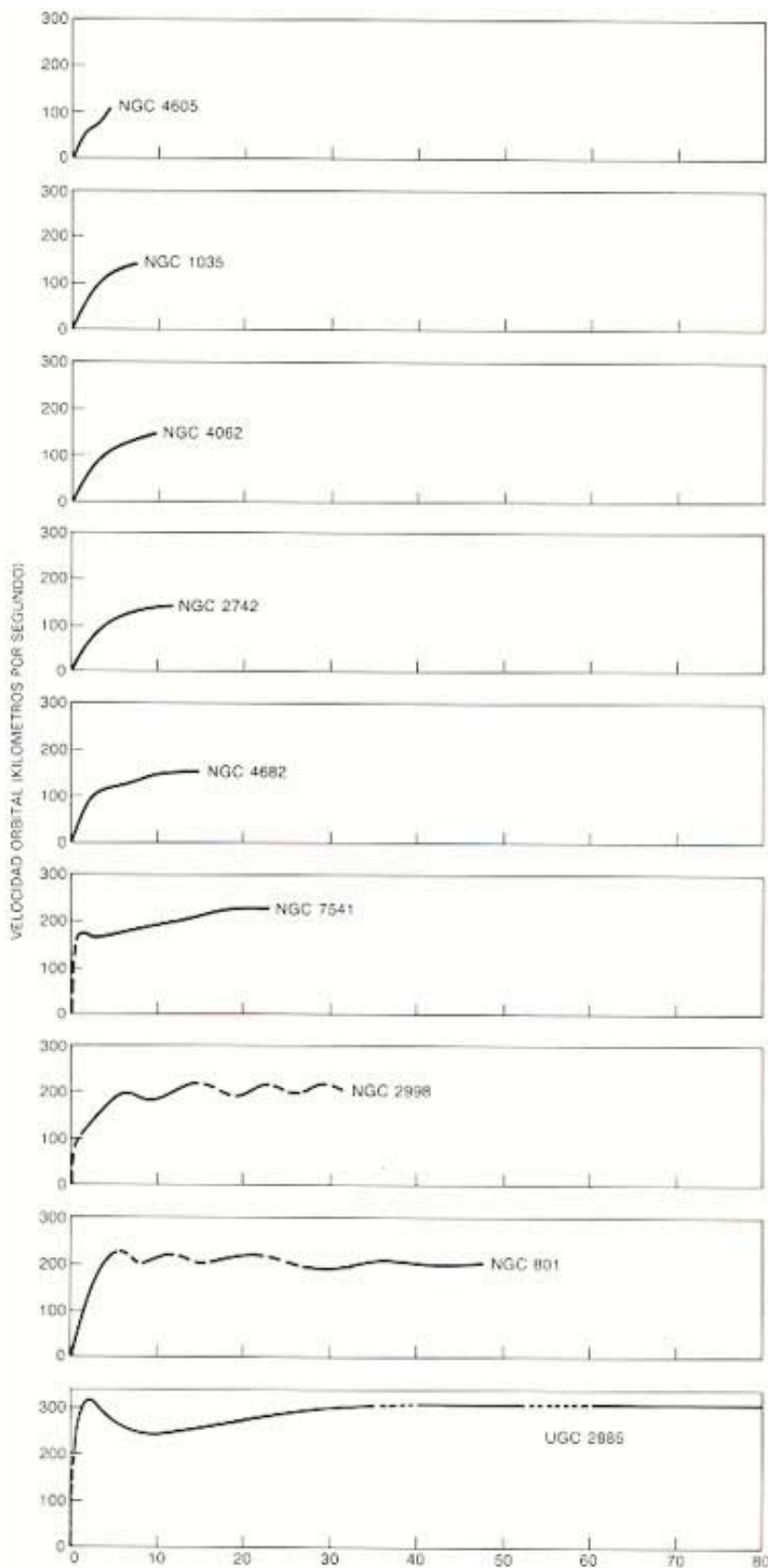
Solamente en el caso de las estrellas más cercanas de nuestra galaxia podemos detectar el movimiento observando la posición cambiante de la estrella frente al fondo de estrellas más distantes y galaxias de la esfera celeste. En la propia galaxia de Andrómeda, la de tipo espiral más cercana a la nuestra, una estrella dotada de una velocidad de 200 kilómetros por segundo (velocidad comparable a la del Sol) tardaría 20.000 años en recorrer un segundo de arco en el cielo. Se trata de la menor separación angular que se pueda detectar ópticamente desde la Tierra.

Para estudiar los movimientos de las galaxias se recurre a un método diferente, basado en el corrimiento Doppler.

Los corrimientos Doppler son cambios en la frecuencia de las ondas que proceden de una misma fuente, causados por el movimiento de acercamiento de ésta hacia el observador o de alejamiento del mismo. Cuando se registra el espectro del núcleo brillante de una galaxia espiral, la líneas de absorción originadas por las estrellas constituyentes aparecen corridas hacia las longitudes de ondas mayores (rojo) del espectro, comparadas con las mismas líneas de un espectro obtenido en un laboratorio de la Tierra. Tales corrimientos hacia el rojo en los espectros de todas las galaxias, salvo las más cercanas, muy pocas, fueron observados por primera vez hacia 1915 por V. M. Slipher, del Observatorio Lowell; proporcionan una indicación de que el universo está en expansión: aleja, de la nuestra, a casi todas las demás galaxias y las separa, cada vez más, una de otras. Como resultado del trabajo de Smith y Zwicky, se sabe que en las parejas, grupos y cúmulos de galaxias, el campo gravitatorio local sobrepasa a la expansión general, lo que implica que estas densas aglomeraciones de materia permanezcan unidas. Aunque las distancias entre los cúmulos de galaxias están creciendo, las distancias entre las galaxias dentro del cúmulo permanecen poco menos que invariables. Slipher observó también que los espectros de las distintas galaxias ofrecían información adicional sobre los movimientos de las estrellas y del gas dentro de la galaxia.

Si el disco de una galaxia espiral está orientado de tal manera que el plano se halle fuertemente inclinado con respecto a la visual desde la Tierra, la rotación de la galaxia arrastrará las estrellas y el gas de un lado del disco hacia nuestra galaxia y alejará de ella a las que descansen en el otro lado. Las líneas espectrales de la materia que se acerca se correrán, por tanto, hacia el azul, es decir, aumentarán de frecuencia, mientras que las de la materia que se aleja correrán hacia el rojo, esto es, hacia frecuencias más bajas. La medida sobre una línea espectral en cualquier punto nos revelará, pues la distancia angular del núcleo galáctico al punto y la velocidad a lo largo de la visual en esa distancia.

No es fácil hacer medidas espectroscópicas de las velocidades de la distintas estrellas, débiles incluso en galaxias bastante cercanas a la nuestra. En el trabajo que realizamos, no observamos, pues, estrellas, sino la luz de las nubes de gas, rico en hidrógeno y helio, que rodean a ciertas estrellas calientes. Los espectros de tales nubes están formados por brillantes líneas de emisión, que se producen cuando, en un átomo excitado, un electrón cae de un nivel más alto de energía a otro inferior. Además de las líneas de emisión del hidrógeno y el helio, suele haber brillantes líneas de átomos de nitrógeno y azufre que han perdido un electrón. Estas líneas se llaman prohibidas porque se originan en átomos en el vacío, casi total, del espacio; en los laboratorios terrestres, tales átomos ionizados una sola vez se desexcitan rápidamente en choques con otros átomos antes de que se

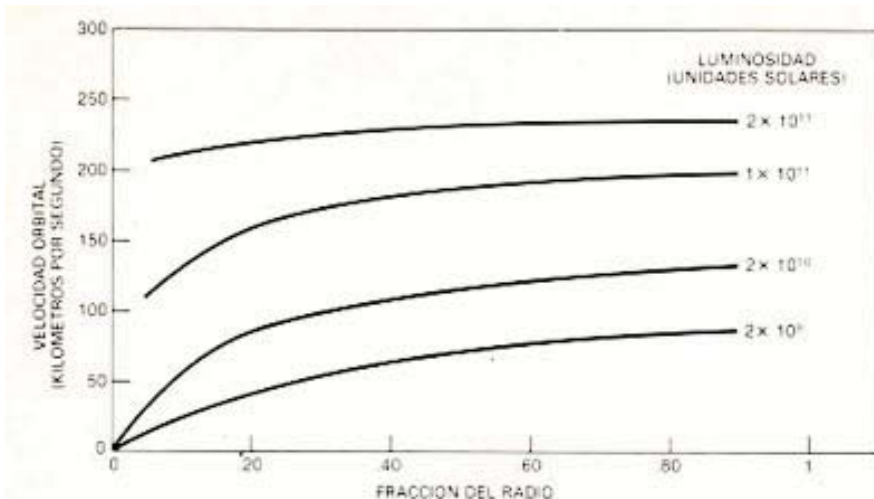


6. CURVAS de rotación mostrando las velocidades orbitales de nueve galaxias. Sc desde el centro. Las galaxias aumentan de luminosidad de arriba abajo. Con luminosidad creciente, las galaxias son mayores, más alta su velocidad orbital y más acusados los gradientes de velocidad en la vecindad del centro.

produzca la transición prohibida.

Hasta hace poco no se podían obtener espectros ópticos de alta resolución de las débiles regiones externas de las galaxias. Nuestro programa de observaciones se desarrolló merced a la disponibilidad de grandes telescopios ópticos, de espectrógrafos de rendija larga y alta resolución y de equipos electrónicos eficaces de construcción de imágenes. Seis años atrás, la autora y sus colaboradores se aprestaron a medir las velocidades de rotación a través de todo el disco luminoso de ciertas galaxias espirales adecuadamente inclinadas. Nos proponíamos estudiar la dinámica interna y la distribución de masa, en distintas galaxias, en función de la morfología de las mismas. Hemos observado ya 60 galaxias espirales, 20 de cada uno de los tipos principales Sa, Sb y Sc. Hemos elegido ejemplos que pertenecieran a una clase bien definida, se hallaran bien inclinadas respecto al plano del cielo (dando una componente grande de la velocidad orbital según la visual), tuvieran un diámetro angular no mayor que la rendija del espectrógrafo y abarcaran un amplio dominio de luminosidades dentro de cada tipo.

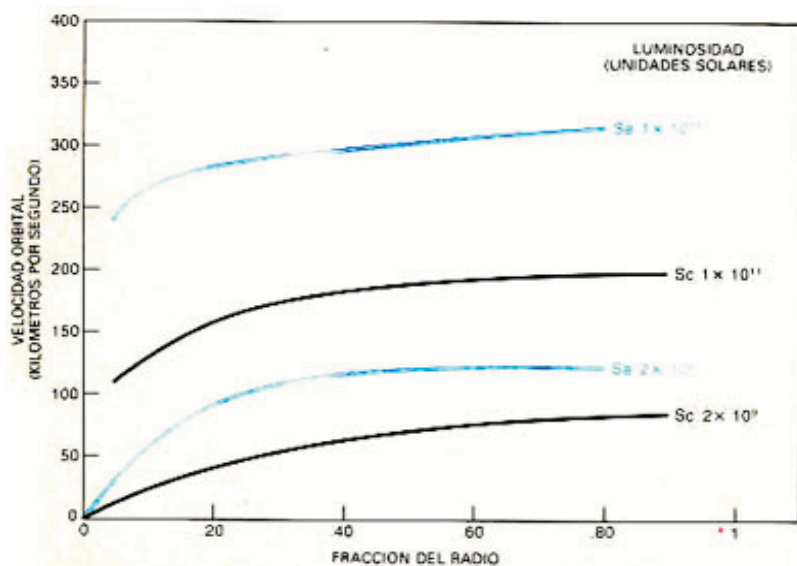
La mayoría de los espectros se han obtenido con dos telescopios de cuatro metros, el del Observatorio Nacional de Kitt Peak en Arizona y el del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo en Chile. Se registraron también algunos espectros con el telescopio de 2,5 metros de Las Campanas, en Chile. Una vez los fotones procedentes de la fuente galáctica atraviesan la rendija del espectrógrafo y se dispersan por una red de difracción, se hacen converger sobre un tubo intensificador de imágenes "Carnegie" (RCA C33063), donde se multiplican por un factor de 10 o más antes de que la emulsión fotográfica los registre. Las exposiciones de dos a tres horas se registran en placas Kodak IIIa-J, cuya sensibilidad, semejante a la del tubo de construcción de imágenes, se ha incrementado mucho manteniéndola previamente en un horno a 65 grados Celsius durante dos horas en un gas especial para "formarla" (nitrógeno con una proporción de 2 por ciento de hidrógeno) y



7. VELOCIDADES ORBITALES de galaxias Sc de luminosidad cambiante, representadas en función del radio óptimamente visible de la galaxia. Las luminosidades, en unidades solares, difieren en dos órdenes de magnitud. A cada distancia radial, las velocidades orbitales aumentan con la luminosidad.

espectrógrafo alineada con el eje menor del disco galáctico. Las velocidades orbitales son ahora perpendiculares a la visual: no aparecen, pues, corrimientos Doppler. La ausencia de los corrimientos de las líneas cuando la rendija del espectrógrafo está a lo largo del eje menor confirma que los movimientos que estamos estudiando son realmente orbitales.

A fin de disponer de una escala de referencia con respecto a la cual medir el corrimiento de las líneas de emisión en los espectros galácticos, los astrónomos acostumbraban a registrar líneas de neón procedentes de una lámpara a lo largo de los bordes del espectro. Nosotros hemos prescindido de este método. Medimos directamente los corrimientos con respecto a las líneas inalteradas emitidas por las moléculas hidroxilo (OH) atmosféricas que aparecen en cada placa. Muchos astrónomos han adoptado complicados dispositivos de barrido de placas para medir las posiciones de las líneas, en particular para señales débiles. Pero nosotros seguimos midiendo la posición de las líneas de emisión con ayuda de un microscopio cuya platina se puede mover en dos direcciones; ello nos permite medir posiciones en cada coordenada con la exactitud de un micrómetro.



8. COMPARACIÓN DE LAS GALAXIAS Sa y Sc. El cotejo revela que, para igual luminosidad, las velocidades orbitales son apreciablemente más altas en las galaxias Sa que en las Sc en cada distancia radial. Eso significa que las galaxias Sa alojan mayor masa por unidad de luminosidad que las Sc.

preexponiéndola a destellos de luz. Sin el tubo intensificador de imágenes y los métodos de aumento de sensibilidad de las placas, hubieran resultado unos tiempos de exposición prohibitivamente grandes: de 20 a 60 horas.

Habitualmente se suelen realizar dos tomas de cada galaxia. En una de las exposiciones, se determina que la rendija del espectrógrafo coincida con el eje mayor (largo) de la galaxia; cada punto del espectro proviene de una región única del disco galáctico. Los corrimientos Doppler (debidos a la velocidad) de las líneas de emisión se dejan ver fácilmente en la imagen revelada. Se hace una segunda toma con la rendija del

En nuestro trabajo, definimos el radio nominal de una galaxia como la distancia a la que el brillo superficial de la galaxia se ha reducido hasta el umbral de detectabilidad en las placas tomadas con el telescopio Schmidt de 122 centímetros de Monte Palomar, valor igual a la magnitud vigésimoquinta por segundo cuadrado de arco. Para establecer la distancia a los objetos examinados, y su tamaño real consiguiente, hemos adoptado un valor para la constante de Hubble (que especifica la velocidad de expansión del universo) de 50 kilómetros por segundo por megaparsec. (Un megaparsec vale 3,26 millones de años-luz.)

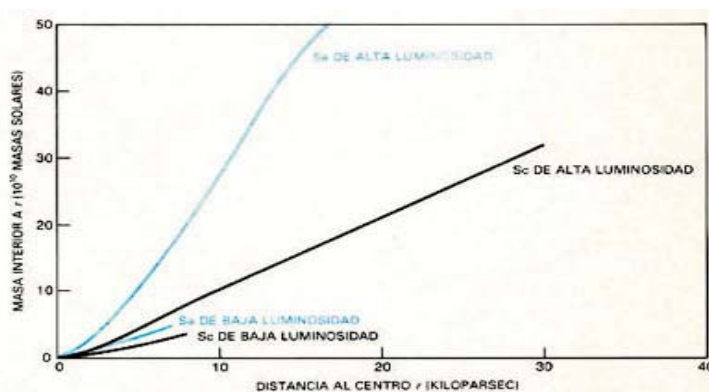
De las velocidades medidas a partir de las líneas de emisión más intensas,

calculamos una curva suavizada de rotación promediando las velocidades de acercamiento y de alejamiento de los dos lados del disco galáctico. Aunque cada galaxia presenta características distintivas en su rotación, aparecen tendencias sistemáticas dignas de destacarse. Con luminosidad creciente, las galaxias son mayores, mayores también sus velocidades orbitales y, más acusado, el gradiente de velocidad a través del abombamiento del núcleo. Además, cada clase de galaxia presenta propiedades rotacionales características. Así, las más luminosas de entre las galaxias Sa, en el punto medio de su radio, sobrepasan en más del 50 por ciento la velocidad de giro de las galaxias Sc de igual luminosidad. Entre las galaxias Sc, las más luminosas giran a velocidad doble, a distancia radial comparable, que las galaxias Sc cuya luminosidad es de la centésima parte.

De nuestras observaciones se desprende una conclusión tajante: las curvas de rotación son aplanadas o crecientes hasta los límites visibles de la galaxia. No hay regiones extensas donde la velocidad decrezca con la distancia al centro, como cabría esperar si las masas se concentraran en la parte central. La conclusión es inmediata: a diferencia de la luminosidad, la masa no está concentrada cerca

del centro de las galaxias espirales. La distribución de la luz en una galaxia no constituye, pues, ninguna indicación de la distribución de masa.

En razón de su velocidad de rotación, las masas de las galaxias objeto de nuestro estudio varían desde 6×10^9 hasta 2×10^{12} veces la solar dentro de sus radios ópticos. No podemos todavía especificar la masa total de ninguna galaxia porque no vemos el "borde" de la masa. Ahora bien, la masa en el interior de cualquier distancia



10. COMPARACIÓN DE LA MASA INTERIOR PARA GALAXIAS de alta y baja luminosidad. Se desprende que la masa crece en forma aproximadamente lineal con la distancia al centro y no de señales de tender a un límite hacia el borde de la galaxia óptimamente visible. A cada distancia radial, las galaxias Sa presentan mayor masa y, por tanto, mayor densidad que las galaxias Sc de igual luminosidad.

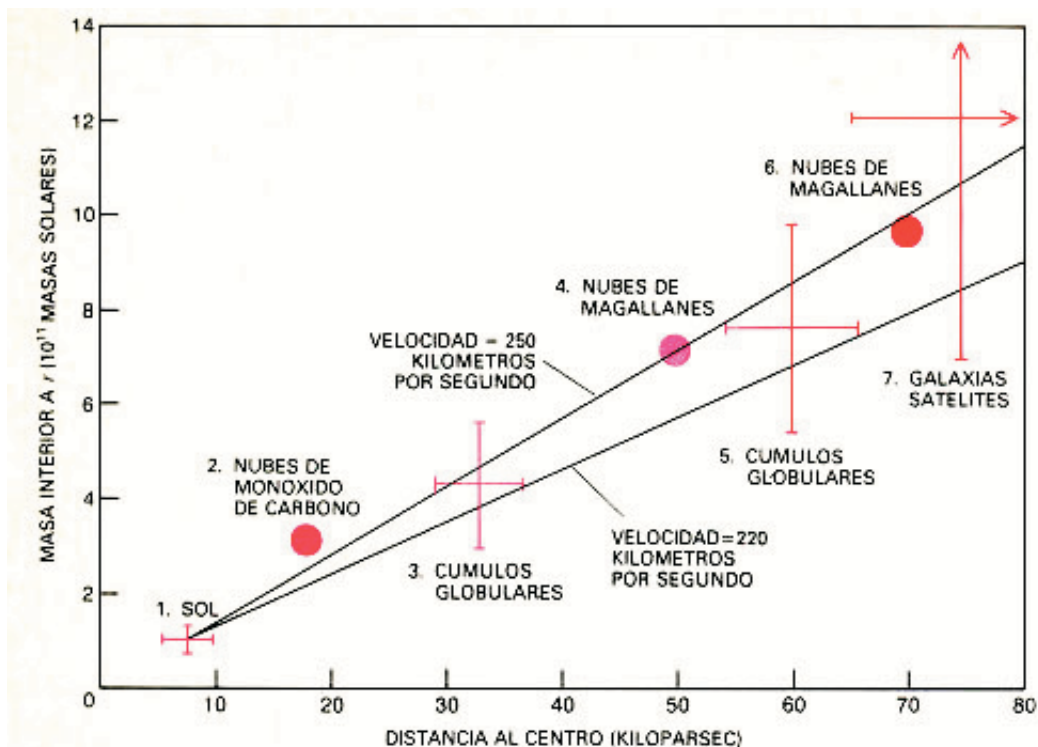
$$\frac{GmM_i}{r^2} = \frac{mV_i^2}{r} \rightarrow M_i = \frac{rV_i^2}{G}$$

FUERZA GRAVITATORIA = FUERZA CENTRÍFUGA

NGC 1035			NGC 2998	
RADIO (KILOPARSECI)	VELOCIDAD V (KILOMETROS POR SEGUNDO)	MASA INTERIOR M_i (10 ¹¹ MASAS SOLARES)	VELOCIDAD V (KILOMETROS POR SEGUNDO)	MASA INTERIOR M_i (10 ¹¹ MASAS SOLARES)
5	39	018	87	088
1	65	098	102	24
2	91	39	126	74
3	107	80	142	1.4
5	123	1.8	162	3.9
8	135	3.4	204	7.7
20			214	21
30			214	32

9. MASA CONTENIDA dentro de una distancia radial dada, deducible a partir de la equivalencia de la fuerza gravitatoria y la fuerza centrífuga a distancia r del centro de la galaxia. En las ecuaciones, G simboliza la constante de gravitación universal; m , la masa a la distancia r ; M_i , la masa en el interior de r y V_i es la velocidad orbital de la masa m . La masa contenida dentro de r crece linealmente con la distancia. La tabla de la masa dentro de r para dos galaxias Sc: NGC 1035, de baja luminosidad y NGC 2998, de alta luminosidad. A cada distancia del centro galáctico, la galaxia más luminosa se caracteriza por mayor velocidad orbital y, por tanto, debe comprender una masa mucho

radial crece linealmente con la distancia: contrariamente a lo que cabría esperar, no tiende a un valor límite en el borde del disco visible. El aumento lineal de la masa con el radio significa que cada capa sucesiva de materia de la galaxia debe contener tanta masa como cualquier otra capa del mismo espesor. Ocurre que el volumen de esas capas sucesivas aumenta con el cuadrado del radio; por tanto, la densidad de la materia en las capas sucesivas decrecerá en razón del inverso del cuadrado del radio a fin de que el producto de la densidad por el volumen permanezca constante.



11. A TRAVES DEL ESTUDIO DE NUESTRA PROPIA GALAXIA se calcula la masa dentro de r medida en kiloparsec desde el centro galáctico. Las distancias se deducen de las velocidades orbitales y distancias medias de distintos objetos. El valor adoptado para la velocidad orbital del Sol a ocho kiloparsec de distancia es de 220 kilómetros por segundo. El segundo punto se obtiene de la velocidad media de las nubes de monóxido de carbono a una distancia media de 18 kiloparsec, medida por Leo Blitz, de la Universidad de Maryland en College Park. El tercer y quinto puntos se deducen de la velocidad de cúmulos globulares de estrellas en el "halo" de nuestra galaxia a dos distancias medias distintas del núcleo. Las velocidades de los cúmulos más próximos fueron analizadas por Carlos Frenk, a la sazón en la Universidad de Cambridge, y Simon White, de la Universidad de California en Berkeley. De las velocidades de cúmulos más distantes se ocuparon F. D. A. Hartwick, de la Universidad de Victoria, y Wallace L. W. Sargent, del Instituto de Tecnología de California. El cuarto punto fue obtenido a partir de las velocidades de las Nubes de Magallanes, las galaxias más próximas a la nuestra, estimadas por Tadayuki Murai y Mitsuaki Fujimoto, de la Universidad de Nagoya. El sexto punto representa estimas independientes de la distancia y velocidades de las Nubes de Magallanes. Hechas por D. N. C. Lin, del Observatorio Lick, y Donald Lynden-Bell, de la Universidad de Cambridge. El punto final se basa en las velocidades de galaxias satélites más remotas, estimadas por Jaan Einasto y sus colegas de la Academia de Ciencias de Estonia. La longitud de las líneas verticales indica el dominio de valores para órbitas de diferentes geometrías. Las mediciones sugieren que las velocidades de rotación en nuestra galaxia están comprendidas entre 220 y 250 kilómetros por segundo y se mantienen constantes hasta aproximadamente 80 kiloparsec, unas 10 veces la distancia del Sol al centro galáctico. La masa que se halla en el interior de los 80 kiloparsec vuelve a ser unas 10 veces la masa encerrada en la distancia radial del Sol, 10^{12} masas solares

El modelo teórico que menos perturba las ideas aceptadas sobre las galaxias explica las curvas de rotación observadas suponiendo que cada galaxia espiral está inmersa en un "halo" esférico de materia que se extiende mucho más allá del límite visible del disco galáctico. La atracción gravitatoria de esta masa invisible impide que las velocidades orbitales de las galaxias decrezcan con la distancia al centro galáctico. Es decepcionante que las observaciones apenas aporten información de la distribución de la materia oscura invisible. Se puede afirmar, sin embargo, que la materia oscura no forma parte del fondo general de densidad de materia del universo, sino que se concentra, de un modo notable, alrededor de las galaxias. Esto resulta evidente, ya que la densidad de la materia no luminosa decrece, aunque lentamente, con la distancia desde el centro galáctico, y la densidad, incluso a grandes distancias radiales, está entre 100 y 1000 veces la densidad media del universo.

Aunque hay otros modelos que tratan de dar cuenta de las altas velocidades orbitales, todos ellos son menos satisfactorios que el de un halo único de materia oscura. Si toda

la materia oscura necesaria se confinara en un disco, éste se convertiría, rápidamente, en inestable y se agruparía en forma de una barra. El descubrimiento de la necesidad de los halos para estabilizar un disco se lo debemos a Jeremiah P. Ostriker y P. J. E. Peebles, de la Universidad de Princeton.

Los efectos dinámicos observados se reproducen en modelos de galaxias espirales que sitúan la masa en un núcleo, un abombamiento circundante, un disco y un halo. Entre esos esquemas teóricos recordemos los propuestos por John N. Bahcall y Raymond M. Sonnerup, del Instituto de Estudios Superiores de la Universidad

de Princeton, Maarten Schidt, de Cal Tech, y S. Casertano, de la Scuola Normale Superiore de Pisa. Pero quizás el enfoque mas radical para explicar las altas velocidades rotacionales observadas sea el expuesto, independientemente, por Joel E. Tohline, de la Universidad del Estado de Luisiana, y M. Milgrom y J. Bekenstein, del Instituto Weizmann de Ciencia. A grandes distancias, razonan, la teoría newtoniana de la gravitación debe modificarse y permitir que las velocidades de rotación de las galaxias permanezcan altas a tales distancias del núcleo galáctico, incluso en ausencia de materia invisible.

Las radioondas de 21 centímetros emitidas por el hidrógeno neutro (no ionizado) en el disco galáctico suministran nuevas pruebas de las altas velocidades de rotación de la materia de las galaxias espirales. Los primitivos estudios de la radiación de 21 centímetros en unas pocas galaxias espirales, realizados por Morton S. Roberts, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, demostraron que las velocidades de rotación del hidrógeno eran altas. Con radiotelescopios múltiples, en particular el conjunto de Westerbork en Holanda y la Gran Distribución en Socorro, Nuevo México, se iguala en incluso se supera el poder de resolución de los telescopios ópticos, con lo que se facilita la investigación de la distribución del hidrógeno en galaxias semejantes a las observadas por nosotros. Albert Bosma, de la Universidad de Leiden, ha mostrado, para una amplia variedad de tipos de galaxias, que las velocidades orbitales del hidrógeno neutro continúan siendo grandes a distancias del centro galáctico considerables.

Los diámetros aparentes de las galaxias suelen ser similares, se midan a través de observaciones ópticas o radioastronómicas. Ahora bien, para un pequeño conjunto de galaxias, el hidrógeno se extiende varias veces más allá del centro que las estrellas luminosas. Para tales objetos, se puede determinar el potencial gravitatorio allende la galaxia ópticamente visible. En varios casos, el hidrógeno no se mantiene en un plano, sino que se retuerce cerca del borde del disco visible. No es seguro, pues, que las velocidades del gas que se han medido a las mayores distancias del centro sean verdaderas velocidades orbitales circulares o que se trate de un movimiento más complicado.

Renzo Sancisi, de la Universidad de Groningen, que ha estudiado tales galaxias retorcidas, sugiere que las velocidades orbitales pueden estar decreciendo más allá de los límites de la galaxia visible. Las velocidades, no obstante, parecen decrecer muy lentamente, quizás en unos 20 kilómetros por segundo, o un 10 por ciento, y mantenerse luego constantes en ese valor a mayores distancias. Se están continuando las radioobservaciones, que deberán rendir importantes informaciones con respecto a las regiones exteriores extremas de las galaxias. Quienes se ocupan de las galaxias tienen la suerte de poder examinar las propiedades de ejemplares que se encuentran muy alejadas y después regresar a aquella donde viven y plantearse si presentan las mismas propiedades que las primeras. No hace tanto tiempo que los astrónomos creían que el Sol, situado a unos ocho kiloparsec del centro de nuestra galaxia, estaba cerca del borde de ésta, y que la propia galaxia era de tamaño moderado. En la actualidad, todos los indicios son de que nuestra galaxia trasciende, en mucho, la posición del Sol y de que su masa continúa creciendo.

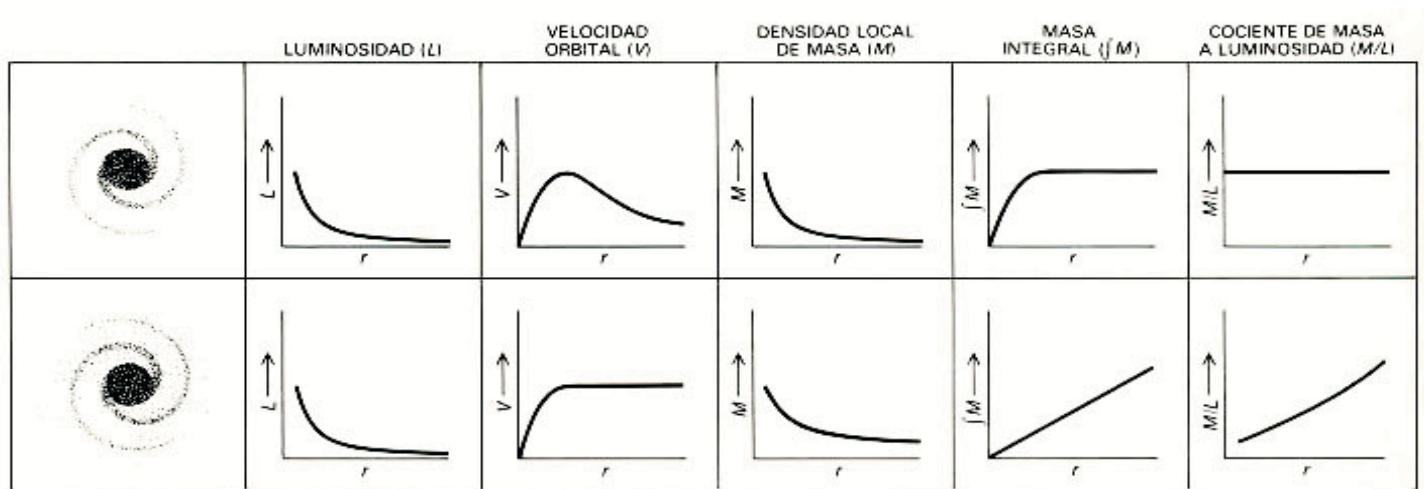
La velocidad del Sol en su órbita alrededor del centro de la galaxia se calcula en 220 kilómetros por segundo, según James E. Jan y Gillian R. Knapp, de Princeton, y Scott D. Tremaine, del Instituto de Tecnología de Massachussets. Otras estimas llegan hasta 260 kilómetros por segundo. En el caso del valor más bajo, la cantidad de masa entre el Sol y el centro de la galaxia es de unas 10^{11} masas solares. Suponiendo que más allá de la distancia del Sol al centro galáctico aún queda una cantidad sustancial de masa, la galáctica hasta 100 kiloparsec puede alcanzar las 10^{12} masas solares, lo que situaría a la nuestra en la misma categoría que las mayores galaxias de su tipo.

Hace 30 años, Jan H. Oort, del Observatorio de Leiden, demostró que la masa observable de las estrellas y gas del disco galáctico en la vecindad del Sol era casi la mitad de la que se necesita para explicar la atracción gravitatoria del disco sobre las estrellas que se encuentren muy alejadas de su plano central. Este estudio ofreció la primera prueba de que nuestra galaxia alojaba también materia no luminosa.

Las velocidades orbitales de los objetos en el plano de la galaxia a bastante distancia del Sol suministran pruebas más recientes. Las medidas son difíciles, pero en algunos casos especiales se han obtenido las velocidades. Por

ejemplo, Leo Blitz, de la Universidad de Maryland en College Park, ha determinado las velocidades de nubes de monóxido de carbono a distancias de casi 16 kiloparsec del centro galáctico. Estas velocidades, juntamente con las velocidades de nubes de hidrógeno determinadas por Blitz y Shrinivas Kulkarni y Carl E. Heiles, de la Universidad de California en Berkeley, proporcionan una curva de rotación que continúa creciendo, al aumentar la distancia al centro galáctico.

Para deducir la masa a distancias todavía mayores F. D. A. Hartwick, de la Universidad de Victoria, Wallace L. W. Sargent, del Cal tech. Carlos Renk, de la Universidad de Cambridge, y Simon White, de la de California en Berkeley, han medido las velocidades de cúmulos globulares de estrellas en el halo de nuestra galaxia, con una muestra de cúmulos a 30 kiloparsec del centro y otra a 60 kiloparsec. Muestra su trabajo que la masa continúa creciendo en forma aproximadamente lineal hasta la distancia media de los cúmulos. Con trabajo e imaginación, se obtienen valores del potencial gravitatorio a mayores distancias todavía. Nuestra galaxia no está sola en el espacio intergaláctico: se acompaña de una cohorte de galaxias satélite menores. Las órbitas de las dos satélites más próximas, las Nubes Grande y Pequeña de Magallanes, a distancia algo menor de 60 kiloparsec del centro de nuestra galaxia, son altamente inciertas. Lo que no ha sido obstáculo para que Tadayuki Murai y Mitsuaki Fujimoto, de la Universidad de Nagoya. D. N. C. Lin. del Observatorio Lick, y Donald Linden-Bell, de la Universidad de Cambridge, diseñaran modelos de órbitas. A partir de dichos modelos deducen valores de la masa que concuerdan con los proporcionados por los cúmulos globulares. Para distancias todavía mayores, Jaan Einasto y sus colegas de la Academia de Ciencias de la República Socialista de Estonia se han apoyado en una combinación de cúmulos globulares enormemente distantes y galaxias satélite, para así deducir la masa a distancias más allá de 80 kiloparsec. Cuando se combinan los resultados de tales análisis, se revela una galaxia donde las velocidades orbitales quedan en el dominio de 220 a 250 kilómetros por segundo hasta aproximadamente 10 veces la distancia del Sol al centro galáctico. Tal distribución de masas es obligada si nuestra galaxia ha de parecerse a todas las demás espirales que mis colaboradores y yo hemos estudiado; por decirlo con un símil, trasladaría al Sol desde una posición relativamente rural a otra mucho más urbana.



12. DISCREPANCIA entre galaxias hipotéticas y reales. Se manifiesta en todas sus propiedades, salvo en la luminosidad. La galaxia espiral real típica de la parte inferior tiene un halo no luminoso de gran masa. La galaxia hipotética superior carece de halo. Su brillo superficial decrece rápidamente y las velocidades orbitales fuera del núcleo disminuyen en forma kepleriana, la densidad de masa local decrece paralelamente a la luminosidad, la masa integral alcanza un valor límite y la relación de masa a luminosidad se mantiene constante con distancia radial creciente. Tales eran las propiedades que se esperaba encontrar. En una galaxia real, la presencia de un halo no luminoso cambia todo, excepto su apariencia óptica. Las velocidades orbitales se mantienen altas, la densidad local de masa decrece, aunque poco a poco, la masa integral crece linealmente con el radio y la relación de masa a luminosidad aumenta a medida que el halo de la galaxia aporta una mayor contribución a la masa y el disco luminoso cae por debajo del umbral de detección.

La conclusión general a que nos llevan estos resultados es que, al explorar el disco de una galaxia espiral desde el centro hacia fuera, la masa total de materia luminosa y materia oscura decrece poco a poco, y la luminosidad (medida en la región azul del espectro) lo hace rápidamente. De ello resulta que la relación de la densidad de masa local a la densidad local de luminosidad (azul), que puede expresarse por conveniencia como el valor de la relación M/L, aumenta constantemente con la distancia al centro galáctico. En la región central, una masa bastante pequeña produce una luminosidad grande; a distancias notables, una gran cantidad de masa produce pequeña luminosidad. Si no hubiera materia visible agrupada alrededor de las galaxias, la distribución de masa seguiría la de luminosidad y la relación M/L sería aproximadamente constante en el disco desde su centro hasta su borde.

Si la masa y la luminosidad se miden en unidades de masa y luminosidad solares, la relación M/L del Sol vale 1/1. En tales unidades (omitiendo el denominador, que es igual a 1), el valor medido de la relación M/L cerca del núcleo de una galaxia espiral tiene valores semejantes al del Sol, de 1 o tal vez hasta 2 y 3. Hacia el borde del disco visible, a medida que la luminosidad decrece, el valor M/L sube hasta 10 o 20. Más allá del disco visible, donde la luminosidad cae hasta cero y la masa permanece alta. El valor medio de la relación M/L se eleva hasta las centenas.

En cualquier intento por identificar los componentes del halo invisible, habrá que preguntarse qué objetos celestes poseen un valor elevado de la relación M/L. Las estrellas de tipo solar quedan descartadas. Las estrellas jóvenes y calientes que delinean los brazos espirales de una galaxia aparecen con menos probabilidades aún: sus valores M/L se hallan en torno a 10^{-4} . En el otro extremo se encuentran las viejas estrellas enanas rojas que pueblan el núcleo central y las regiones de una galaxia inmediatamente fuera del mismo: poseen una masa escasa y una baja luminosidad azul. Sus valores M/L, de alrededor de 20, están todavía lejos de los que se necesitan para el halo. Además, un halo que estuviera constituido por estrellas rojas de muy escasa masa revelaría su presencia radiando fuertemente en la región infrarroja del espectro. Han fracasado todos los intentos de detección del halo mediante su radiación visible, infrarroja, de radio o de rayos X.

¿Qué candidatos posibles quedan? Las estrellas normales radian energía generada mediante procesos termonucleares, que convierten hidrógeno y helio en el elemento más pesado. Tales procesos nucleares sólo se desencadenan en cuerpos cuya masa alcanza un valor suficiente para que su energía gravitatoria eleve la temperatura en el núcleo de la estrella hasta varios millones de grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto). La masa mínima necesaria es unas 0.085 veces la solar. El tamaño de Júpiter, el mayor planeta del sistema solar, apenas llega a la centésima parte de esa cifra. Aunque cabe pensar en un halo de cuerpos semejantes a planetas, tal vez protoestrellas que no llegaron a transformarse en estrellas, resulta bastante improbable. En suma el único requisito para el halo es la presencia de materia en cualquier forma fría y oscura que cumpla la condición M/L, desde los neutrinos hasta los agujeros negros.

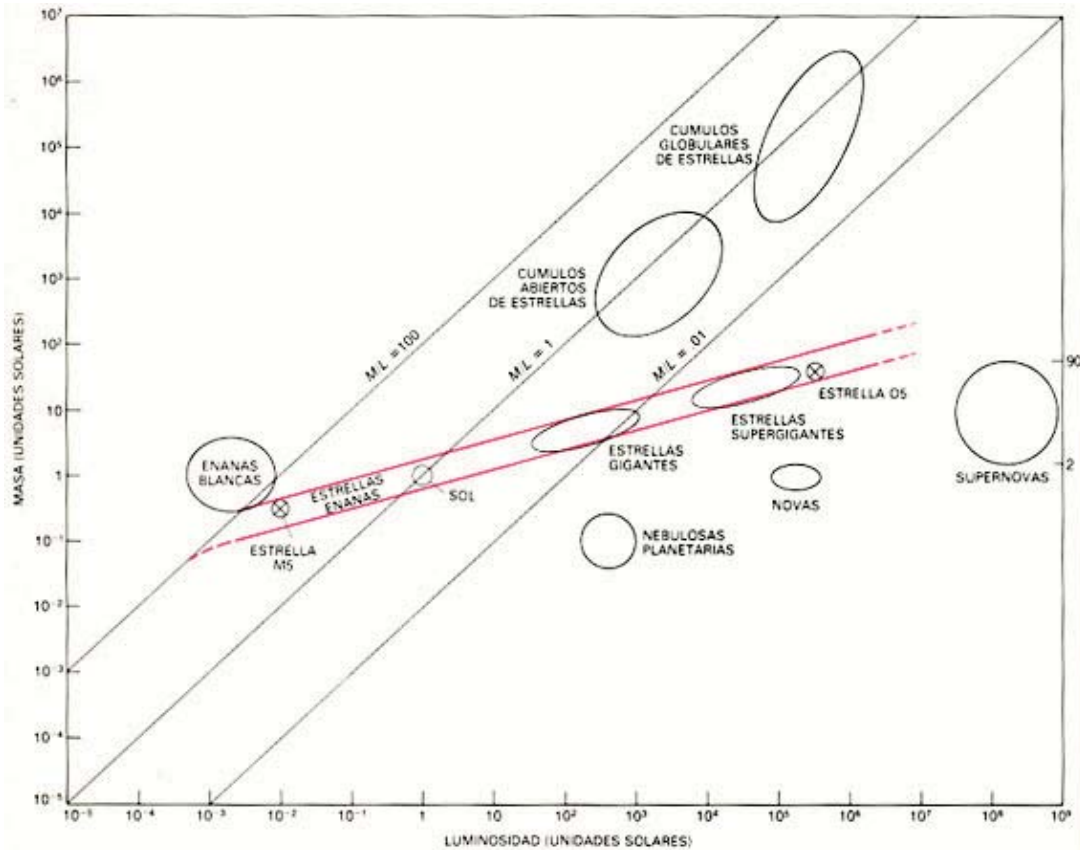
Hasta ahora se han descrito las propiedades rotacionales de galaxias espirales normales bastante aisladas. Existen indicaciones de observación adicionales a favor de grandes valores de cociente M/L a grandes distancias del núcleo en otras galaxias. En ocasiones, la Naturaleza ofrece inesperadas oportunidades de penetrar en sus secretos. Recientemente, Francois Schweizer, de la Institución Carnegie, Bradley C. Whitmore, de la Universidad del estado de Arizona y la autora quedaron fascinados por la débil galaxia "anónima" AO-136-0801, miembro de una clase fusiforme con anillos polares. Se llama anónima porque no figura en ninguno de los catálogos galácticos corrientes; su designación numérica corresponde a su posición en el firmamento.

Nuestras observaciones de la distribución de luz a través del huso muestran que es un disco de estrellas de baja luminosidad que se nos ofrece casi de perfil, con poco gas y polvo, si es que lo tiene, y carente de estructura espiral. Tales galaxias se clasifican como SO y representan una proporción apreciable de todas las galaxias de disco. Mediante nuestros métodos usuales, hemos determinado las propiedades rotacionales del disco midiendo el corrimiento Doppler de las líneas de absorción de sus estrellas componentes. A pequeña distancia del centro del objeto, a lo largo del eje mayor del huso, las velocidades de rotación alcanzan 145 kilómetros por segundo, valor que se corresponde con las velocidades medidas en las galaxias de baja luminosidad del tipo Sa.

A lo largo del eje menor, las velocidades orbitales no presentan componentes según la visual, lo que confirma que estamos observando un disco de estrellas en rotación.

El rasgo, infrecuente, de AO 136-0801 es su gran anillo, que también se ve de canto; rodea al delgado eje del huso y pasa casi sobre el centro de rotación del disco (véase la fig. 14). El anillo está formado por gas, polvo y jóvenes estrellas luminosas. El gas se revela por su espectro de líneas de emisión, el polvo por sus efectos absorbentes donde pasa por delante del huso, y la componente estelar por su aspecto nudoso y azulado en las fotografías. El diámetro máximo del anillo es varias veces superior al eje mayor del huso. En consecuencia, los movimientos de los objetos contenidos en el anillo ofrecen una oportunidad única explorar el campo gravitatorio perpendicular al disco galáctico hasta distancias superiores al radio visible de este último.

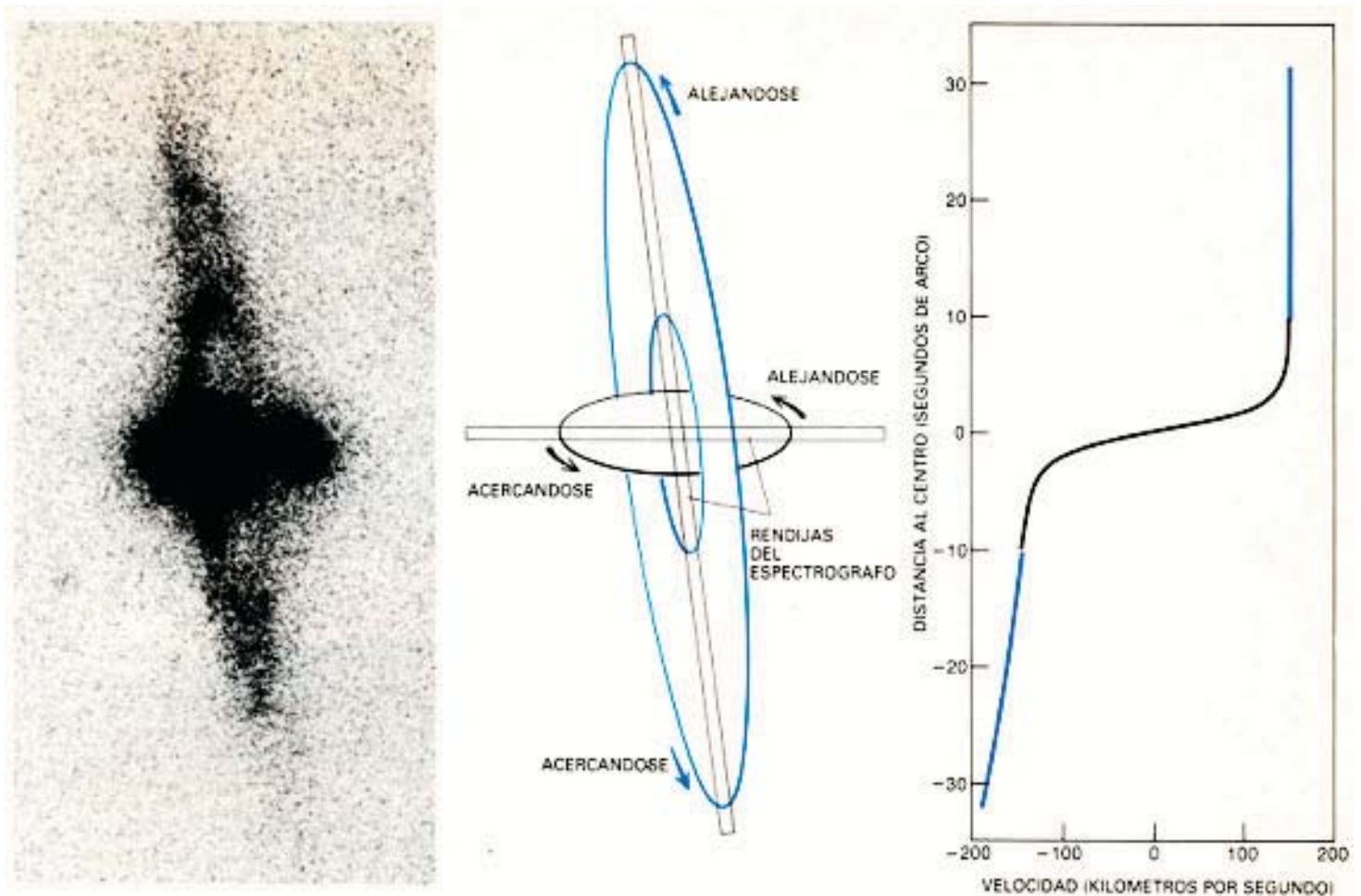
Nuestras observaciones espectrográficas confirman que el anillo gira en torno a un eje perpendicular al plano de rotación del disco. Parece improbable que esta configuración dinámica se haya producido en la evolución normal de un disco galáctico aislado; la configuración debe resultar de algún suceso, un encuentro con otra galaxia o con un disco de gas, por ejemplo. Midiendo el corrimiento de las líneas de emisión, hallamos que la velocidad de rotación del anillo es de 170 kilómetros por segundo y que la curva de velocidad es plana o ligeramente creciente hacia fuera hasta una distancia de casi tres veces el radio del disco interior. Si las curvas de velocidad del disco y del anillo se representan en la misma gráfica de la velocidad en función de la distancia, se ve que ambas presentan valores casi idénticos a la misma distancia del centro de la galaxia. La alta velocidad de rotación del anillo constituye una clara señal de la existencia de un halo de gran masa que se extiende al menos tres veces más allá del radio visible del disco. La forma del halo debe acercarse más a la esférica que a la fiscal. Los cálculos muestran que si el halo fuese tan plano como el disco, las velocidades por encima del plano del disco serían de un 20 a un 40 por ciento menores que las del disco.



13. COMPARACIÓN de la masa y la luminosidad para componentes típicos de una galaxia espiral (la nuestra, por ejemplo). Se toman por unidad la masa y la luminosidad solares. En unidades solares, el valor de la relación de masa a luminosidad, M/L , decrece para estrellas normales desde 30 para estrellas enanas antiguas y frías (tipo M5) hasta 10^{-4} para estrellas jóvenes y calientes (tipo O5). Sólo las enanas blancas, desísimas, tienen una relación de masa a luminosidad superior a 100. Se necesita otra clase de objetos para poblar el halo de una galaxia, donde la relación M/L se eleva a varios centenares.

Hemos estado describiendo las determinaciones de masa hechas a partir de medidas de la velocidad de objetos de prueba en órbita, objetos que se encuentran en el disco central de una galaxia y objetos en órbita polar de una galaxia poco corriente. Otros casos especiales pueden arrojar luz sobre la cantidad de materia oscura del universo. Las galaxias existen, frecuentemente, en parejas. En tales casos, una galaxia viene a ser un objeto de prueba en órbita alrededor del otro. El análisis de tal sistema es complicado, porque se desconoce tanto la orientación de la órbita en el espacio como la posición de la galaxia en la órbita. Se puede, sin embargo, recurrir a las propiedades observadas en una muestra grande de galaxias dobles (la diferencia entre las velocidades de las dos galaxias, su separación angular y su luminosidad) para deducir, mediante argumentos estadísticos, la distribución probable de elementos orbitales y las relaciones M/L apropiadas para las galaxias.

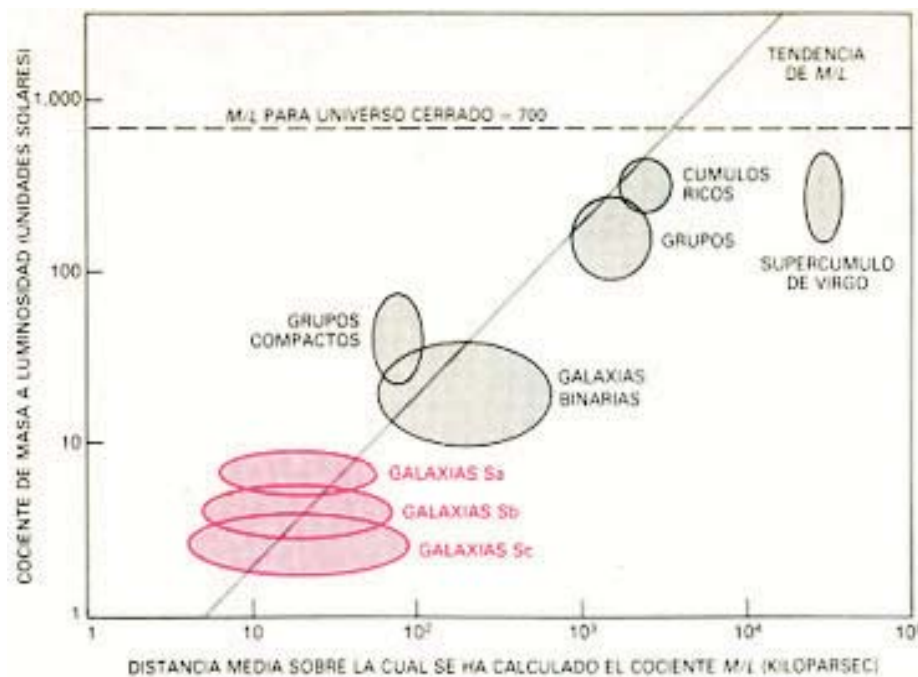
Análisis independientes realizados por Edwin L. Turner, de Princeton, Steven D. Peterson, que trabaja en la Universidad Cornell, Linda Y. Schweizer, de la Institución Carnegie. E. I. D. Karachentsev, del Observatorio Astrofísico Especial en la Unión Soviética, dan valores medios de M/L que varían entre 25 y 100. Estos valores



14. **DISCO ENCERRADO EN UN ANILLO** que aparece en la galaxia "anónima" AO 136-0801, llamada así porque no la registran los catálogos. (Las cifras dan su posición en ascensión recta y declinación.) La región central ovalada es un disco giratorio de estrellas visto casi de canto. Las estrellas y gas contenidos en ese delgado anillo giran también, pero en un plano casi perpendicular al fiscal. (La configuración evoca algún suceso: un encuentro con otra galaxia o un disco de gas.) Las direcciones de rotación se indican en el diagrama del centro, que muestra cómo se orientaron las rendijas del espectroscopio para medir velocidades orbitales en el disco y en el anillo. Los dos grupos de medidas de velocidad se han representado a la derecha. A 10 segundos de arco desde el centro, las velocidades en el disco (negro) y en el anillo (color) vienen a coincidir. Sin embargo, las velocidades del anillo se pueden medir hasta distancias de casi tres veces el radio óptico del disco y permanecen prácticamente constantes. La masa sigue creciendo linealmente hasta distancias mucho mayores que el radio del disco, y los objetos situados en éste responden a un potencial gravitatorio que no se debe a un disco sino a un esferoide.

de M/L son un promedio a lo largo de una distancia igual a la separación de las galaxias en cada pareja, distancia generalmente igual a varios diámetros galácticos, o del orden de 100 kiloparsec. Resultado que corrobora el punto de vista según el cual los halos de materia oscura con valores grandes de M/L trascienden, en notable cuantía, los límites ópticos de las galaxias.

Podemos ahora volver a nuestra pregunta original: ¿Contiene el universo suficiente materia invisible para elevar la densidad media a 5×10^{-30} gramos por centímetro cúbico, valor necesario para cerrar el universo y detener su expansión? Como hemos visto, tal densidad se alcanzaría si la densidad de la materia no luminosa fuera unas 70 veces mayor que la de la materia luminosa. Desde otro punto de vista, la condición que se necesitaría para cerrar el universo se expresa a través de la relación de masa total a luminosidad. Ese valor es aproximadamente 700, si tomamos el valor unidad para el Sol.



15. COCIENTES DE MASA A LUMINOSIDAD representados para agregaciones de materia en escalas de crecimiento progresivo. La gráfica se basa en otra ideada por Herbert J. Rood, de Princeton. El valor de M/L de una densidad de materia suficiente para detener la expansión del universo es de alrededor de 700. Para las galaxias, los valores están por debajo de 10. El valor aumenta con el tamaño del agregado.

¿Hay alguna prueba de que se pueda alcanzar un valor de 700 para M/L? Promediada sobre los discos visibles de las galaxias espirales, la relación de masa total (luminosa y no luminosa) a luminosidad se cifra en torno a 5. Para las galaxias SO y galaxias elípticas espirales, el valor de M/L es más alto, del orden de 10. Para las galaxias dobles y los pequeños grupos de galaxias, la razón M/L crece hasta 50 o 100. Los análisis del movimiento de las galaxias en grandes cúmulos indican valores de M/L de varios centenares. Este aumento del valor medio de M/L con a mayor distancia del centro del sistema fue subrayado, hace ya diez años, por Einasto. Ants Kaasik y Enn Saar, de la Academia de Ciencias de la República Socialista Soviética de Estonia, y también por Amos Yahil, de la Universidad estatal de Nueva Cork en Stony Brook. No hay pruebas de la

existencia de valores de M/L superiores al crítico de 700 necesario para cerrar el universo. El más alto de los valores deducidos se acerca, sin embargo, tentadoramente. Algunos físicos consideran significativo el hecho de que los valores deducidos parezcan converger hacia el crítico, en vez de ser varios órdenes de magnitud más altos o más bajos.

Las investigaciones donde se involucran gigantescas distancias y enormes escalas de tiempo han ido tropezando con nuevas dificultades al comprobarse que la distribución de luz no es una guía fidedigna de la distribución de masa en el universo. Una fracción desconocida de la masa en una galaxia espiral se esconde en un constituyente no luminoso, y lo mismo pasa con una fracción desconocida de la masa en los cúmulos de galaxias. No se puede afirmar todavía si las regiones de universo desprovistas de galaxias son meros vacíos de luz o carecen también de masa. Si quieren responder a ese dilema, los astrónomos tendrán que ingeniárselas para idear nuevas técnicas de observación y los físicos habrán de determinar las propiedades de exóticas formas de la materia. Sólo entonces podremos establecer la naturaleza de la ubicua materia oscura, determinar las dimensiones completas y la masa de las galaxias y dilucidar el destino del universo.