

LAS MASAS DE LAS GALAXIAS ESPIRALES

L. Maupomé, P. Pişmiş and L. Aguilar

Instituto de Astronomía
Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

En un trabajo anterior hemos encontrado que las masas totales de las galaxias (principalmente espirales, basadas en valores publicados hasta 1975) disminuyen conforme sus tipos de Hubble varían de Sa, Sb, Sc, a Irregulares. Se había también señalado que las masas calculadas con observaciones de la línea de 21 cm de HI eran mayores que las obtenidas ópticamente.

Para investigar las causas de estas tendencias, hemos estimado las masas con las velocidades determinadas ópticamente pero usando una ley de rotación analítica como la de Brandt, que los radioastrónomos usan para determinaciones de masa con la línea de 21 cm. Con este procedimiento se espera incluir la masa total de una galaxia, más allá del último punto observado. Las masas resultaron, como se esperaba, mayores que en las determinaciones anteriores y la disminución de la masa total con el tipo de Hubble se confirma. Sin embargo persiste la discrepancia de valores de masas en los tipos tempranos (Sa, Sab); las radio-masas son menores que las masas ópticas. Por ahora no es clara la causa de esta diferencia.

ABSTRACT

In an earlier paper we have found that the total mass of galaxies –especially of the spirals– based on values published until 1975, decreased as the Hubble type varied from Sa through Sc and Irregulars. It was also pointed out that masses determined from the hydrogen 21-cm line were higher than the optically determined masses.

To investigate the cause of these tendencies we have estimated the masses using an analytic rotation curve of Brandt adjusted to the optical observations in order to include all the mass of a galaxy up to the last observed point. Although the masses computed in this manner were found to be larger, as expected, the decrease of mass with Hubble type found earlier is confirmed. However, there is a discrepancy in the earlier types (Sa, Sab) in that their radio-masses are smaller than the optically determined ones. At present the cause of this is not clear.

Key words: GALAXIES-INTERNAL MOTIONS – GALAXIES-MASS

I. INTRODUCCION

Los parámetros integrales iniciales de una galaxia indudablemente deben jugar un papel decisivo en el curso que tomará su evolución. De estos parámetros, la masa total, el momento angular total, y la energía total son los más relevantes. Se puede esperar que la configuración y la intensidad del campo magnético sean también importantes.

Es altamente probable que la masa actual de una galaxia sea la masa con la que inició su evolución. De aquí la importancia de las determinaciones de masas totales de las galaxias.

Estas consideraciones nos condujeron a analizar los datos de las masas de las galaxias existentes hasta 1975 (Pişmiş y Maupomé 1978). Encontramos entonces las siguientes características estadísticas:

1. La masa total promedio obtenida usando velocidades radiales determinadas ópticamente (masas ópticas) disminuye a lo largo de la secuencia de Hubble, desde las elípticas hasta las irregulares.

2. La masa total promedio de las galaxias barradas es

menor que la de las espirales normales del tipo correspondiente.

3. No se ha desarrollado la estructura espiral en galaxias con masas promedio menores que $10^{10} M_{\odot}$.

La gráfica en la Figura 1 resume estas conclusiones. Habíamos encontrado también que:

4. Las masas de las espirales obtenidas usando la cinemática de la línea de HI, λ 21-cm (radio-masas), resultaban ser mayores que las ópticas.

5. Las radio-masas de las galaxias irregulares (incluyendo las de tipo Magallanes) fueron comparables a sus masas ópticas. La Figura 2 ilustra los puntos 4 y 5.

Las masas ópticas utilizadas fueron las estimadas por Burbidge, Burbidge y Prendergast desde 1959 (Burbidge y Burbidge 1975) basándose en las curvas de rotación –prácticamente hasta el último punto observado de las galaxias. Se extienden desde el 40% hasta el 70% del radio de Holmberg (1958), mientras que las radio-masas, las llamadas “masas indicativas” pretenden dar la masa en toda la extensión de la galaxia. Para remediar esta falta de completez y uniformidad, que podrían ser las causas de la discrepancia entre las radio-masas y las

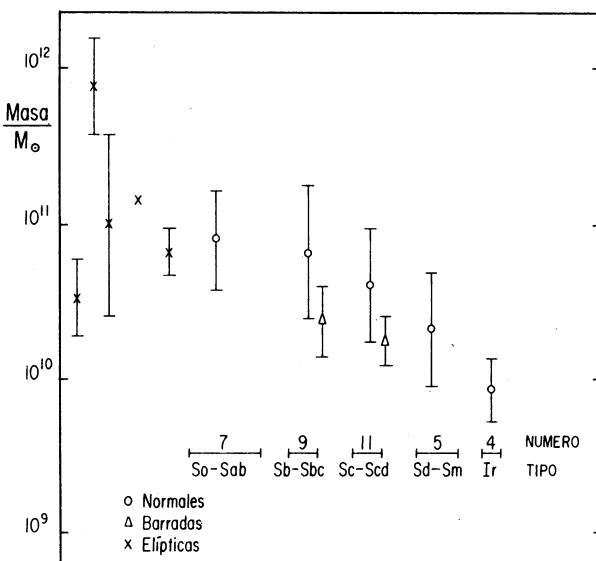


Fig. 1. Valores de las masas ópticas hasta 1975. La tendencia a disminuir el valor de la masa desde espirales tempranas hasta tardías se manifiesta claramente.

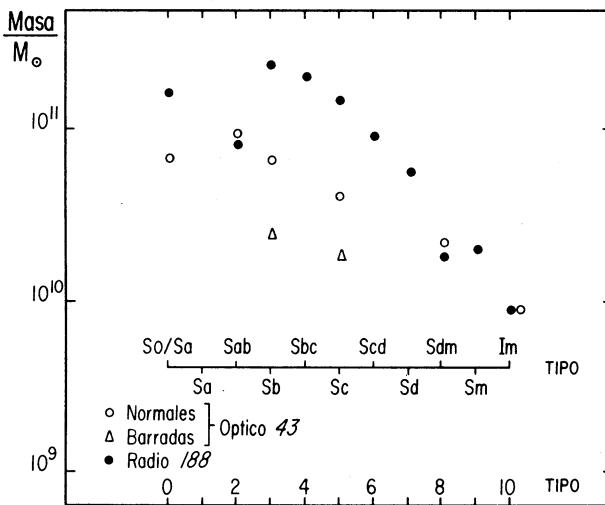


Fig. 2. Promedios de masas totales, ópticas y de radio con respecto al tipo morfológico desde S0/Sa hasta irregulares. Los valores obtenidos en radio son mayores que los ópticos en las espirales. En las irregulares son comparables las radio-masas y las masas ópticas. La tendencia de las espirales tempranas de tener menor masa de radio era ya aparente.

masas ópticas, nos propusimos estimar las masas de las galaxias a partir de sus curvas de rotación, de una manera semejante a las determinaciones de radio-masa, adoptando la curva de rotación analítica propuesta por Brandt (1960). De esta manera se incluye la masa total, más allá del último punto observado. Con la aplicación a

NGC 5055 Brandt y Belton (1962) han dado un valor que es el doble del obtenido por Burbidge *et al.* (1960) usando la misma curva de rotación. Recalculamos las masas con el modelo de Brandt para ver si se conservaban las relaciones masa contra tipo de Hubble encontradas anteriormente.

II. CALCULO DE LAS MASAS

La expresión de la curva analítica de rotación que hemos empleado para el cálculo de las masas totales tiene la forma

$$\Theta(\omega) = \frac{a \omega}{1 + b \omega^{3/2}}, \quad (1)$$

en donde Θ es la velocidad circular, ω la distancia del centro de la galaxia siendo a y b constantes (Brandt 1960). Con nuestro programa hemos calculado a guisa de prueba la masa de NGC 5055 (Sb) con los datos observacionales de Burbidge, Burbidge y Prendergast (1960). La masa encontrada es igual a la de Brandt y Belton (1962), que usaron también los mismos datos. La Figura 3 muestra la curva de rotación ajustada a las observaciones.

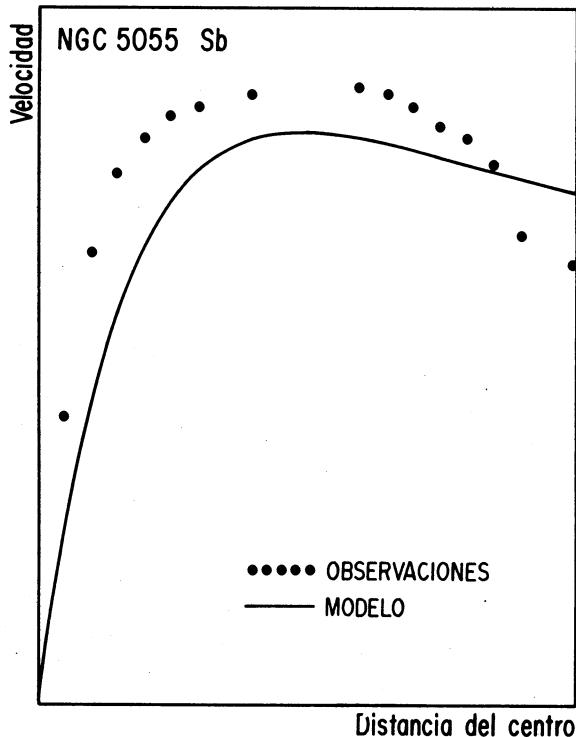


Fig. 3. Curva de rotación de NGC 5055. El ajuste del modelo de Brandt, ecuación (2), con $n = 3/2$ a los puntos observados ópticamente por Burbidge, Burbidge y Prendergast (1960) la reproduce adecuadamente.

El acuerdo entre las observaciones y la curva analítica no es siempre tan bueno como el de NGC 5055, pero resulta satisfactorio para las espirales normales. El desacuerdo es notable para las galaxias barradas. La Figura 4 muestra un caso extremo, la galaxia barrada

laciones en la curva de rotación. Los máximos corresponden generalmente a los brazos y los mínimos a los entre-brazos. La curva analítica pasa por el promedio de las ondulaciones, Figura 5. Si las ondas provienen de las diferentes velocidades debidas a los efectos de las

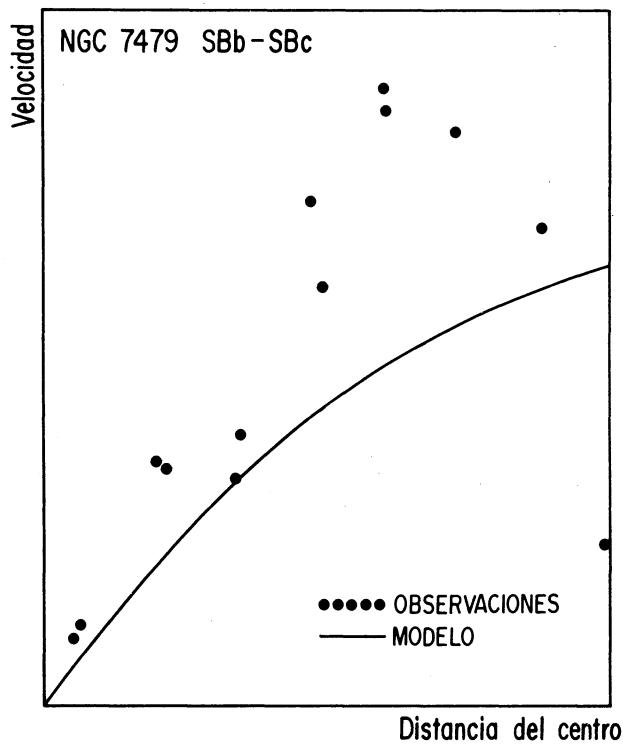


Fig. 4. Los puntos dados en NGC 7479, galaxia barrada típica SBB-SBC, dan una curva lineal desde $-52''$ hasta $+55''$. No hay ajuste alguno con la expresión analítica de Brandt. La curva teórica no describe a las galaxias barradas.

NGC 7479 (SBB-SBC). Hay una caída abrupta en la velocidad de rotación, sin embargo, la curva analítica sigue subiendo sin alcanzar un máximo. Con este procedimiento la masa de la barra sería 18 veces mayor que la obtenida por Burbidge y colaboradores. Incluyendo todos los puntos, la masa sería menor que la de la barra determinada por Burbidge *et al.* Entonces podemos afirmar que la curva analítica no es aplicable a las espirales barradas y que las masas calculadas por Burbidge, Burbidge y Prendergast son en general las de las barras y no las de las galaxias enteras. Por lo tanto la menor masa de las barradas señalada en el punto 2) en comparación con las espirales "normales" no puede confirmarse, pues aún no tenemos un modelo confiable para las barradas.

Mencionaremos algunas propiedades de las curvas de rotación de las galaxias "normales" que pueden alterar el acuerdo entre curvas observadas y analíticas.

1. Un buen número de espirales muestran ondu-

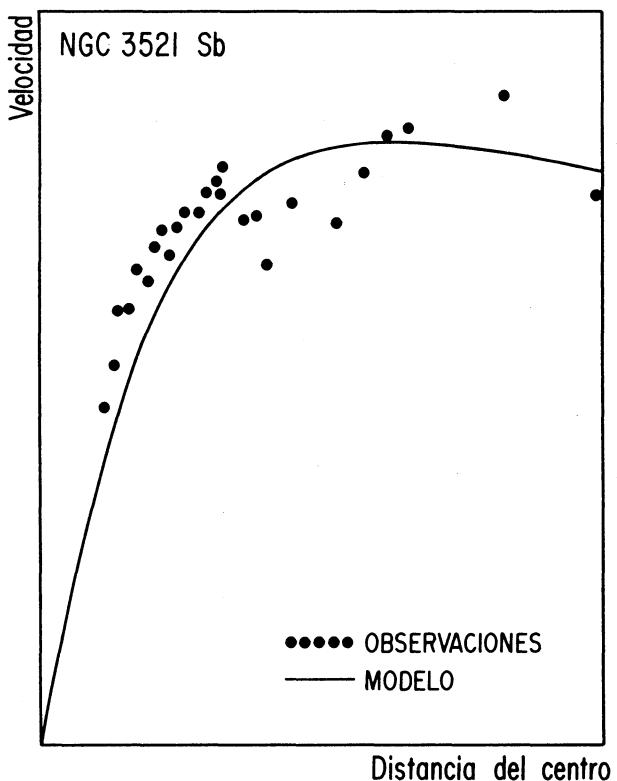


Fig. 5. La dispersión de velocidades no afecta la forma de la curva teórica. En la galaxia NGC 3521 se observan ondas que pueden corresponder a las diferentes velocidades de los componentes cinemáticos de los brazos espirales y de las regiones entre-brazos.

poblaciones en las dos regiones, como lo ha propuesto Pişmiş (1965, 1966, 1974) la curva de rotación que debe emplearse en la obtención de masa sería la envolvente superior de la curva ondulada. Pero si las ondas reflejan la existencia de ondas de densidad —interpretación alterna—que causan movimientos de deslizamiento a lo largo de los brazos espirales, la curva a utilizar sería la envolvente interior.

2. El máximo de la curva de rotación es extendido. En los últimos años las observaciones tanto ópticas como de radio con mejor resolución y de mayor sensibilidad han mostrado que la curva de rotación no baja después de alcanzar un máximo, sino que sigue (aún teniendo ondas) con velocidad comparable en promedio hasta las distancias alcanzadas por las observaciones. Las masas estimadas con tales curvas son claramente mayores (Rubin *et al.* 1978).

TABLA 1
GALAXIAS USADAS PARA LA DETERMINACION DE MASAS

NGC	Tipo	MASAS ($10^{10} M_{\odot}$)		% diámetro de Vaucouleurs ^c	$\frac{M_{\text{Brandt}}}{M_{\text{Burbidge}}}$
		Burbidge <i>et al.</i> ^a	Brandt ^b		
157	Sc	6	31.8	65.5	5.3
253	Sc	5	21.5	49.6	4.3
1084	Sc	1.6	4.5	69	2.8
2146	Sbc	1.8	3.4	22.2	1.9
3556	Sc	1.1	3.8	60.5	3.5
5194	Sc	5	5.8	79.6	1.2
5248	Sc	2.9	5.2	55.5	1.8
6503	Sc	0.13	0.58	38	4.5
972	Sb	0.9	3.6	34.6	4
1808	Sb	2.7	4.7	54.3	1.7
2903	Sbc	4.9	21.3	41.6	4.4
3521	Sb	8.1	16.9	67	2.1
4258	Sb	8.2	17.2	46.3	2.1
5005	Sb	6.9	14.5	59.2	2.1
5055	Sb	7.6	16.6	58.1	2.2
7331	Sb	8	14.9	49.9	1.9
1832 ^d	Sb	3.5	11.9	60.4	3.4
681	Sa	1.9	7.2	59.6	3.8
3623	Sa	14	38.5	51.3	2.7

a. Datos tomados de cada publicación; ver referencias de cada uno en Burbidge y Burbidge (1975).

b. Cálculo de las masas con el modelo de Brandt (1960). El ajuste se hizo con todos los puntos de las curvas de rotación observadas (^a) y se utilizó $n = 3/2$ en todos los casos.

c. de Vaucouleurs y de Vaucouleurs (1964).

d. Burbidge y Burbidge (1968).

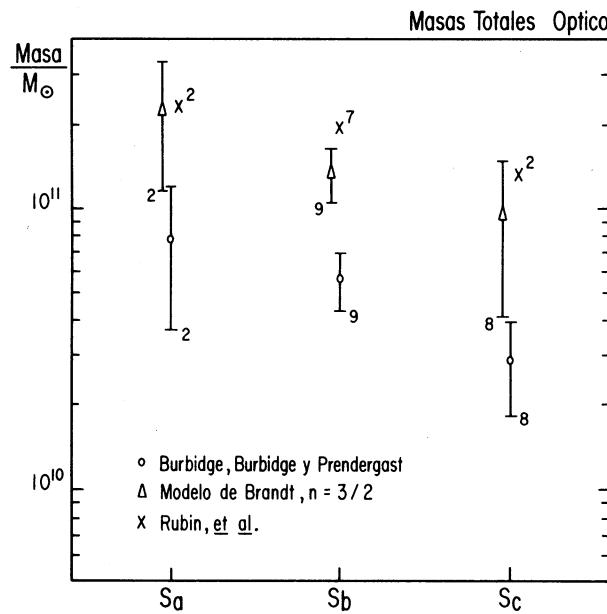


Fig. 6. Las masas calculadas con el modelo teórico (Brandt 1960) son mayores que las obtenidas con el método que ajusta polinomios a los puntos observados (Burbidge, Burbidge y Prendergast). No hay concordancia en los valores a pesar de que las observaciones son las mismas. Las masas obtenidas también en óptico a partir de curvas de rotación extendidas (Rubin *et al.* 1978) son aún mayores que las de Brändt. La tendencia óptica permanece; mayores masas en espirales tempranas que en tardías.

Hemos calculado las masas con el modelo de Brandt y con las observaciones de Burbidge *et al.* (1975) para asegurar la uniformidad de los datos. La Tabla 1 da la lista de las galaxias recalcadas en este trabajo. La Figura 6 muestra los promedios de las masas así calculadas en función del tipo de Hubble. En la misma gráfica aparecen también las masas obtenidas con las curvas de rotación extendidas de Rubin *et al.* (1978). Es claro que la disminución monótona de los logaritmos de las masas se conserva.

En las Figuras 7 y 8 se muestra la relación masa-tipo de Hubble con radio-masas obtenidas de HI por diferentes autores, añadiéndole las 40 galaxias de tipo temprano (S0/a-Sab) de radio de Bottinelli *et al.* (1980) y en la Figura 9, los promedios de las radio-masas así como las masas ópticas calculadas con el modelo de Brandt a partir de las curvas de rotación publicadas por Burbidge, Burbidge y Prendergast.

De estas gráficas se concluye que:

1. En las espirales Sb y Sc las radio-masas son mayores que las masas ópticas 1.62 y 1.25 veces respectivamente.

2. En las espirales Sa, por el contrario, las radio-masas, son 1.25 veces menores que las masas ópticas.

No está claro en este momento si la discrepancia está causada por los modelos adoptados o bien es físicamente significativa, en cuyo caso podría buscarse la causa en una distribución diferente del hidrógeno neutro en las

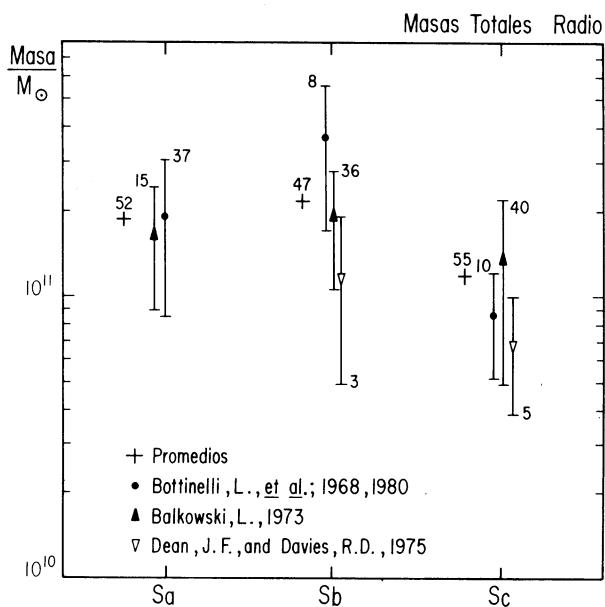


Fig. 7. Valores de las radio-masas obtenidas por diversos autores. La muestra de espirales Sa es comparable ya a las de Sb y Sc.

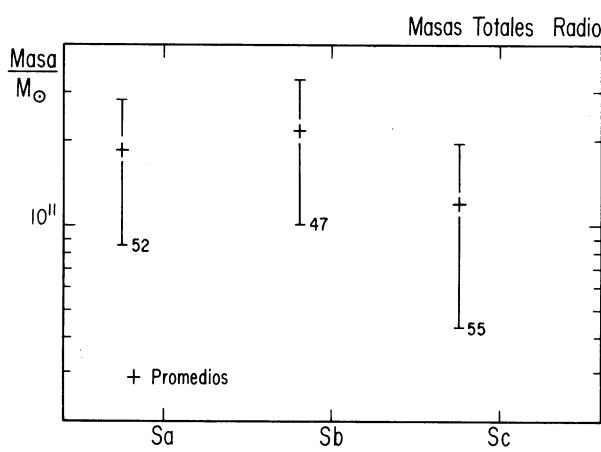


Fig. 8. Valores promedio de las radio masas. La tendencia es manifiesta: las espirales tempranas Sa tienen menor masa que las Sb. Desde Sb hasta Sc disminuyen al igual que las masas ópticas.

galaxias tempranas versus las tardías. En todo caso hemos recopilado información de la masa del HI existente en la literatura y la hemos graficado en la Figura 10. Se nota un leve aumento de la masa del hidrógeno neutro de SO a Sc, pero no hemos tomado en consideración la distribución de hidrógeno neutro en la galaxia y su concentración en el centro. Es posible que en las espirales tempranas esta concentración del hidrógeno en el centro sea alta y por lo tanto las observaciones no alcanzan la máxima velocidad de rotación, lo cual puede causar una determinación baja de las radio-masas.

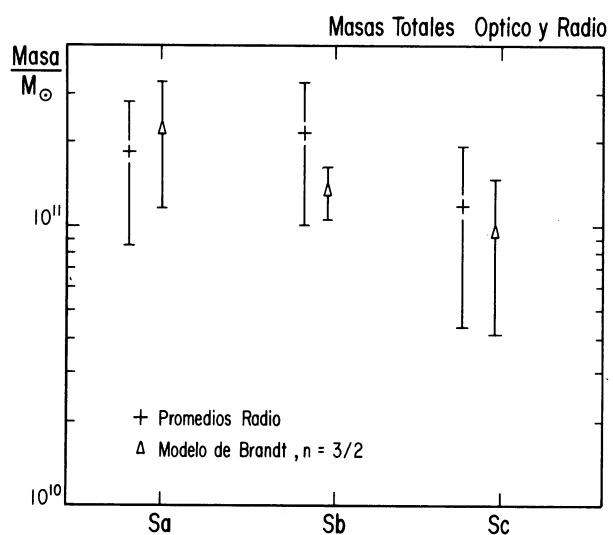


Fig. 9. Comparación de los valores de las masas promedio totales de radio y de las masas ópticas obtenidas con el modelo de Brandt. Las galaxias tempranas no siguen las mismas tendencias; son menores en radio que las Sb y sus masas de radio son menores que las ópticas.

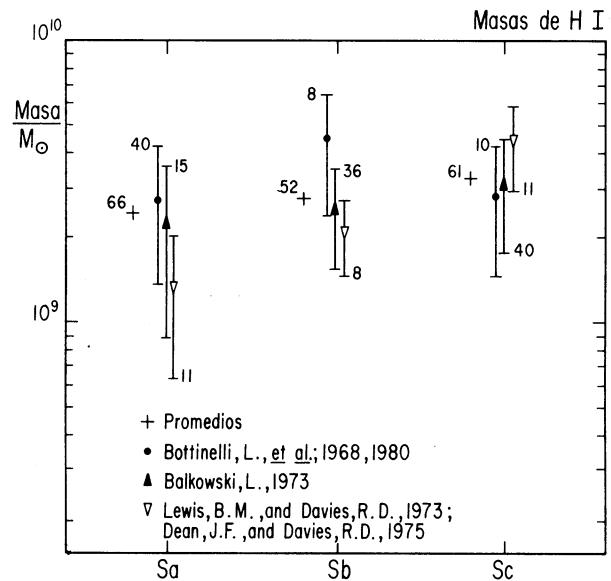


Fig. 10. La masa total de hidrógeno neutro aumenta levemente al pasar desde galaxias tempranas hasta tardías. Las galaxias Sa tienen menor contenido de hidrógeno neutro.

III. BREVES COMENTARIOS SOBRE LOS MODELOS

Las masas ópticas están estimadas en general de dos maneras distintas:

- a) Con un modelo de distribución de densidad, por ejemplo con cáscaras esféricoidales confocales de densidad

constante, donde esta densidad varía con el eje mayor del esferoide (véase Burbidge *et al.* 1959).

b) Suponiendo una curva analítica y ajustando los parámetros de esta curva con la curva de rotación observada o bien solamente considerando los valores Θ máxima y la correspondiente ω máxima (distancia al centro) (Brandt 1960; Lohmann 1954).

Si la calidad y número de observaciones lo permiten, estos modelos son aplicables a los datos de radio (Roberts 1969).

La curva de rotación analítica en su forma general es:

$$\Theta(\omega) = \frac{a\omega}{(1 + b\omega^n)^{3/2n}} \quad (2)$$

Esta fórmula se ha obtenido con la suposición de que una galaxia como la nuestra está en estado estacionario y la distribución de velocidades es elipsoidal, Chandrasekhar (1942); con $n = 3$ se obtiene el modelo empírico de Bottlinger (Bottlinger 1933; Lohmann 1954); con $n = 3/2$ se obtiene el modelo propuesto por Brandt (1960) ecuación (1) que hemos usado en este trabajo. Hay que señalar que $n = 3$ da menor masa total para la misma curva de rotación que $n = 3/2$.

Las masas indicativas se han calculado con los perfiles totales de HI de una galaxia y usando modelos aproximados: desde masa puntual hasta el modelo analítico de la curva de rotación, con suposiciones variadas sobre el valor de $\omega_{\text{máx}}$ que corresponde a $\Theta_{\text{máx}}$. (Bottinelli *et al.* 1969; Balkowsky 1973; Lewis y Davies 1973; Dean y Davies 1975). Las "masas indicativas" son menos confiables que las determinadas con los procedimientos a) y b) pero son estadísticamente significativas.

En una futura comunicación discutiremos y compararemos entre sí en detalle los diferentes métodos y los modelos usados en la determinación de masas de galaxias espirales.

IV. CONCLUSIONES

Hemos efectuado la redeterminación de las masas de la mayoría de las galaxias tratadas anteriormente con una curva de rotación analítica; los resultados son los siguientes:

1. La masa óptica así obtenida es más grande que las de Burbidge, Burbidge y Prendergast, pero se confirma la disminución de la masa óptica global de una espiral de la clase de Hubble Sa hasta Sc.

2. La determinación de la masa óptica de una espiral barrada usando una ley analítica de rotación no es confiable. La menor masa con respecto a su correspondiente clase en las galaxias normales queda sin confirmar.

3. Las radio-masas (indicativas) muestran la tendencia a disminuir de Sb a Sc al igual que las masas ópticas. Sin embargo en (Sa, Sab) la tendencia se invierte y las masas ópticas resultan más grandes que las radio-masas. La causa de este fenómeno no está clara.

En todo caso, para aclarar esta situación es recomendable observar las mismas galaxias en óptico y en radio, a mayor distancia del centro, con mayor resolución y calcular las masas de la misma manera, a partir de curvas de rotación tal y como se hace en el óptico.

Aunque hay incertidumbres tanto en la selección de un modelo de la distribución de masa como en las observaciones, parece ser que las masas ópticas de las espirales "normales" son confiables en orden de magnitud.

En conclusión, se puede afirmar sin embargo, que la correlación del tipo morfológico con la masa sugiere, fuertemente, que la masa inicial total de una galaxia es un parámetro importante en determinar la morfología de las galaxias espirales.

Contribución núm. 18 del Instituto de Astronomía, UNAM.

REFERENCIAS

- Balkowski, L. 1973, *Astr. and Ap.*, 29, 43.
- Bottinelli, L., Gouguenheim, L., Heidmann, J. y Heidmann, N. 1968, *Ann. d'Ap.*, 31, 205.
- Bottinelli, L., Gouguenheim, L. y Paturel, G. 1980, *Astr. and Ap.*, 88, 32.
- Bottlinger, K.F. 1933, *Veröff. Sternw. Babelsberg*, 10, H. 2.
- Brandt, J.C. 1960, *Ap. J.*, 131, 293.
- Brandt, J.C. y Belton, M.J.S. 1962, *Ap. J.*, 136, 352.
- Burbidge, E.M., Burbidge, G.R., y Prendergast, K.H. 1959, *Ap. J.*, 130, 739.
- Burbidge, E.M., Burbidge, G.R., y Prendergast, K.H. 1960, *Ap. J.*, 131, 282.
- Burbidge, E.M. y Burbidge, G.R. 1968, *Ap. J.*, 154, 857.
- Burbidge, E.M. y Burbidge, G.R. 1975, en *Galaxies and the Universe, Stars and Stellar Systems*, IX, eds. A. Sandage, M. Sandage y J. Kristian (Chicago: The University of Chicago Press), p. 81.
- Chandrasekhar, S. 1942, *Principles of Stellar Dynamics*, (Chicago: The University of Chicago Press).
- Dean, J.F. y Davies, R.D. 1975, *M.N.R.A.S.*, 170, 503.
- Lewis, B.M. y Davies, R.D. 1973, *M.N.R.A.S.*, 165, 213.
- Lohmann, W. 1954, *Z. Astroph.*, 35, 159.
- Pişmiş, P. 1965, Bol. *Obs. Tonantzintla y Tacubaya*, 4, 8.
- Pişmiş, P. 1966, en *Non Stable Phenomena in Galaxies, IAU Symposium No. 29* (Yerevan: The Publishing House of the Academy of Sciences of Armenian SSR), p. 429.
- Pişmiş, P. 1974, en *Galaxies and Relativistic Astrophysics, Proceedings First European Astr. Meeting*, eds. B. Barbanis and J.D. Hadjidemetriou (Berlin: Springer), p. 133.
- Pişmiş, P. y Maupomé, L. 1978, *Rev. Mexicana Astron. Astrof.*, 2, 319.
- Roberts, M.S. 1969, *A.J.*, 74, 859.
- Rubin, V.C., Ford W.K. Jr., y Thonnard, N. 1978, *Ap. J.*, 225, L107.
- Vaucoleurs, G. de, y Vaucoleurs, A. de 1964, *Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Austin: University of Texas).

DISCUSION

Serrano: Ya que hay una relación Z vs. M_{tot} y que M_{tot} varía con tipo morfológico, ¿no debiera haber una relación entre metalicidad media de galaxias espirales y su tipo morfológico?

Maupomé: Posiblemente sí puede existir la relación que menciona. Pero parece ser que la relación entre el tipo morfológico y la masa es una relación fuerte, pues a pesar de las individualidades de las galaxias del mismo tipo, persiste la correlación mencionada.

Anónimo: ¿Cómo se comparan las masas determinadas por estudios dinámico de galaxias dobles con los valores ópticos y de radio que Uds. presentan?

Maupomé: En el pasado, investigaciones hechas principalmente por T.L. Page sobre las galaxias dobles han proporcionado masas más grandes que las galaxias aisladas. Las nuevas determinaciones de las masas de galaxias dobles han disminuido la discrepancia mencionada arriba.

Luis Aguilar: Astronomy Department, University of California, Berkeley, CA 94720, EUA.

Jucrecia Maupomé y Paris Pişmiş: Instituto de Astronomía, UNAM, Apartado Postal 70-264, 04510 México, D.F., México.

