

# Capítulo 8

## Estructura y Dinámica de las galaxias

### 8.1 Introducción

Después de que Kant hiciera su propuesta relativa a la naturaleza de la Vía Láctea como un gigantesco sistema de estrellas al que pertenecía el Sol, una extensión natural a su propuesta, y que atentaba contra el más arraigado antropocentrismo, proponía la existencia de sistemas similares a nuestra Galaxia, situados fuera de ella y que en este sentido representaban lo que él mismo llamó "Universos Isla". Estos "Universos" aislados del nuestro, estarían tan lejos (por lo menos a una distancia que superaba sus dimensiones, que deberían ser bastante grandes) y exhibirían la apariencia de gigantesca nubes, como las observadas por astrónomos de su época.

En el año de 1845 esta brillante intuición de Kant, fundamentada casi exclusivamente en argumentos filosóficos, empezó a adquirir tonos de realidad, cuando mediante el uso de su gigantesco telescopio (el mayor de su época) el tercer conde de Rose, William Parsons, percibió la existencia de una estructura regular, en espiral, en la nebulosa M51 (la número 51 en el catálogo de Messier, ver figura 8.1). La existencia de una tal estructura, no observada en otras nebulosas del catálogo de Messier, revelaba ya lo peculiar de su naturaleza y la existencia de una clara distinción con estas últimas. Esta idea se vería ratificada cuando otros observadores corroboraran la existencia de una estructura similar en otras nebulosas.

En el año de 1912 Vesto Slipher establece, por medidas espectroscópicas la existencia de movimientos organizados al interior de la nebulosa M51 que permiten deducir la existencia de una rotación de la materia que las constituye. Por la misma época se descubre la aparición en algunas de estas nebulosas de estrellas nuevas (novas y supernovas).

En el año de 1920 comienza en la comunidad científica un debate relativo a la naturaleza de estos cuerpos. A la cabeza de los bandos enfrentados se encuentran Harlow Shapley, quien soportaba la idea de que las nebulosas espirales y estructuras similares eran miembros de nuestra Galaxia y residían por tanto en su interior, y Heber Curtis quien sostenía que estos



Figura 8.1: Nebulosa en espiral M51 cuya regular estructura fue por primera descubierta por el tercer Conde de Rose.

cuerpos eran precisamente los "Universos Isla" de los que hablaba Kant, que guardaban similitudes con nuestra Galaxia y que obviamente se encontraban fuera de ella.

El principal argumento de Shapley que favorecía su posición lo proveía la observación de una nova en la nebulosa de Andromeda, M31. Shapley argumentaba que si dicha nebulosa era, como señalaba Curtis, un sistema de estrellas similar a la Vía Láctea, es decir otra galaxia, y sus dimensiones fueran similares a esta última (que según sus propios estimativos tenía un diámetro de 100 kpc), para explicar su tamaño aparente era necesario situarla a una distancia tan grande que la nova mencionada exhibiría un brillo muchísimo menor al observado. Curtis se defendía de este argumento, señalando que el tamaño de la Vía Láctea estimado por su contendor excedía con mucho el real, y que si se tomaba el valor obtenido por Kapteyn la discrepancia indicada por Shapley desaparecería.

Uno de los argumentos más inteligentes de Curtis residía en la explicación del origen de la denominada zona de evitación en la Vía Láctea. El trabajo de Shapley, basado en la distribución de cúmulos globulares, había mostrado que el centro de la Vía Láctea estaba lejos de la posición del Sol, pero los conteos de estrellas, como los hechos por Kapteyn, revelaban una cosa distinta. Correctamente se indicaba que la causa de esta discrepancia residía en la existencia de una zona de la Vía Láctea, precisamente en la dirección del centro galáctico en la cuál era imposible observar nada más allá de una distancia mínima. Por esta razón se la bautizó zona de evitación (zone of avoidance) y su existencia explicaba porque los conteos de estrellas situaban al Sol en el centro del sistema. Curtis, intrigado por la causa de este fenómeno, argumentó que la existencia de bandas oscuras en nebulosas espirales que se veían casi de canto, podría, si se asumía que ellas compartían la naturaleza de la Vía Láctea, explicar la existencia de la zona de evitación.

El debate fue salvado a favor de Curtis cuando en el año de 1923 Edwin Hubble obser-

vando fotografías sucesivas de la nebulosa de Andromeda, descubrió la existencia de una estrella variable del tipo Cefeida. Como ya lo hemos mencionado, la existencia de una estrecha relación entre el período y la luminosidad intrínseca de estas estrellas permite, una vez medido el primero estimar el segundo, que al ser comparado con el brillo aparente de la estrella provee información sobre su distancia. Hubble encontró que esta nebulosa se encontraba a 285 kpc (casi tres veces menos de su distancia real. Esto se debió principalmente a errores de calibración de la relación período-luminosidad), lo que la ubicaba fuera de nuestra Galaxia.

El descubrimiento de Hubble, significó un paso más hacia afuera, hacia la comprensión global del universo y echó definitivamente por tierra, siguiendo el ejemplo de Copernico, Newton y hasta Shapley, el arraigado y antiguo antropocentrismo.

Dedicaremos el presente capítulo a estudiar las propiedades de estos "Universos" isla, explicar su estructura y dinámica. La relevancia de un tal estudio se revela en el hecho de que son ellas, a gran escala, los ladrillos con los que esta hecho el Universo.

## 8.2 Clasificación Morfológica de las galaxias

Una vez fue reconocida la naturaleza extragaláctica de las galaxias, todos los esfuerzos se concentraron en describir cuáles eran sus propiedades físicas. El primer aporte importante en este sentido lo hizo el mismo Hubble quien después de examinar las imágenes de muchas de las galaxias observadas, notó la existencia de un conjunto de regularidades morfológicas que permitían la creación de un patrón de clasificación.

Todas las galaxias observadas podrían considerarse pertenecientes a 3 grupos principales : galaxias elípticas, galaxias espirales y galaxias irregulares.

Al primero de estos grupos pertenecían aquellas galaxias que exhibían una regular forma elíptica cuando eran proyectadas contra el plano del cielo. Al interior de este grupo aparecían diferencias obvias en lo elongadas (excéntricas) que resultaban ser unas y lo circulares de otras. Hubble introdujo así una subclasificación que tenía en cuenta esta clara diferenciación. si llamamos  $\alpha$  al semieje mayor de la elipse que envuelve la galaxia y  $\beta$  su semieje menor (ver figura 8.2), se llama elipticidad  $\epsilon$  al parámetro dado por,

$$\epsilon \equiv 1 - \frac{\beta}{\alpha}$$

Hubble observa que la elipticidad de la mayoría de todas las galaxias elípticas oscila entre 0 para las galaxias que son completamente circulares y 0,7 para las más elongadas. Introduce así un conjunto de 8 subclases con elipticidades distintas : E0, E1, E2, E3, E4, E5, E6 y E7. Donde el entero que acompaña la E no es otra cosa que  $10\epsilon$ .

Las galaxias espirales de la muestra de Hubble, gozaban también de diferencias apreciables. Los dos aspectos principales que diferenciaban una galaxia de este tipo de otra eran el grado de apertura de sus brazos (cuantificado por el denominado ángulo de apertura, *pith angle*, definido en la figura 8.3) y la luminosidad y extensión de su abultamiento central relativa a la luminosidad y extensión de su disco. Teniendo en cuenta estas diferencias

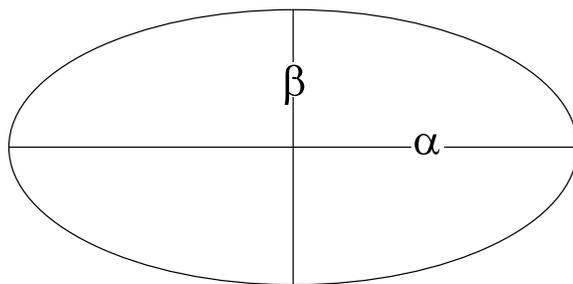


Figura 8.2: Definición de elipticidad.

Hubble introduce 3 subclases a, b y c que representan distintas aperturas y dimensiones del abultamiento central. Las galaxias espirales del subtipo a (Sa) tiene brazos apretados (ángulo de apertura  $\sim 6\text{grados}$ ) y grandes abultamientos centrales ( $L_{abult}/L_{disco} \sim 0,3$ ). En el otro extremo las galaxias espirales del subtipo c (Sc) tienen brazos espirales muy abiertos (ángulo de apertura  $\sim 18\text{grados}$ ) y pequeños bulbos ( $L_{abult}/L_{disco} \sim 0,05$ ).

Algunas galaxias espirales pueden presentar una peculiar estructura en forma de barra que nace en su centro extendiéndose hacia afuera y de cuyos extremos nacen los brazos. A ellas se las denomina espirales barradas y representan una subclasificación de las galaxias espirales.

La secuencia completa de espirales normales y espirales barradas, desde brazos más apretados a brazos más abiertos en la clasificación de Hubble es finalmente, Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc y SBa, SBab, SBb, SBbc, SBc.

El último grupo de galaxias considerado por Hubble lo representan las denominadas galaxias irregulares. A él pertenecen todas las galaxias que no puedan ser clasificadas dentro de los grupos anteriores. Las galaxias prototipo de este grupo son las denominadas Nubes de Magallanes (ver figura 8.4). Se trata de un par de extensas nubes situadas muy cerca al polo sur celeste y que sófueron por primera vez observadas por un occidental durante el viaje de circunnavegación de la Tierra de Fernando de Magallanes. Son un par de galaxias muy cercanas (cerca de 70 kpc), que parecen estar unidas gravitacionalmente a la nuestra y ser de esta manera sus satélites, y que no presentan una estructura definida.

En el grupo de las galaxias irregulares, en la clasificación de Hubble, se reconoce a su vez la existencia de una subclasificación en los tipos I y II. Las galaxias Irregulares del tipo I (Irr I) son galaxias que a pesar de no tener una estructura espiral ni ser galaxias elípticas, la materia en ellas está parcialmente organizada. Por el contrario las galaxias irregulares del tipo II (Irr II) presentan estructuras completamente desorganizadas.

Un tipo de galaxias no considerado dentro del anterior esquema de tres grupos, lo constituyen las denominadas galaxias lenticulares, llamadas por Hubble galaxias S0, que presentan características similares a las galaxias elípticas (ausencia de gas interestelar, perfiles de brillo similares, etc.) pero que están, como las galaxias espirales, dotadas de un disco, aunque sin brazos espirales.

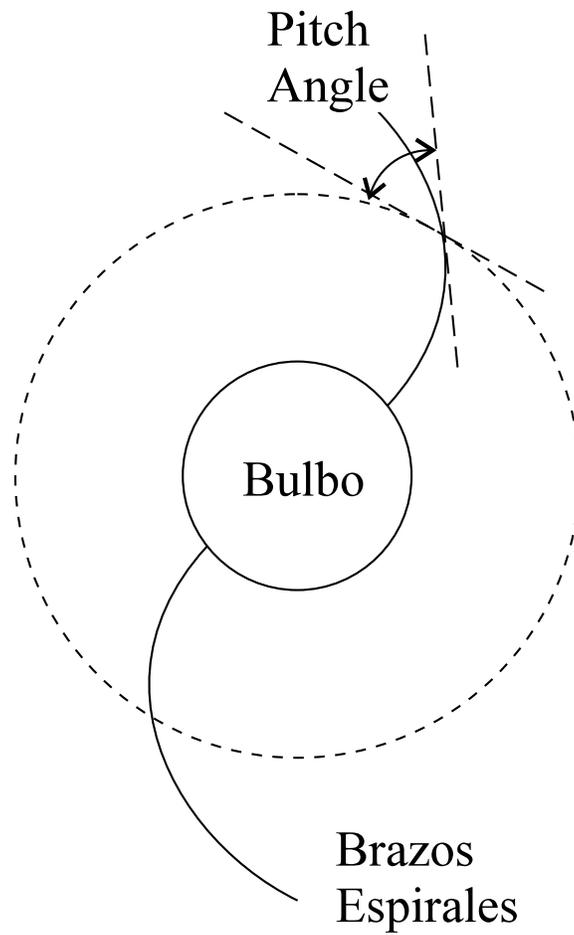


Figura 8.3: Definición del *Pitch Angle*.



Figura 8.4: La Gran Nube de Magallanes.

En ocasiones se organiza el esquema de clasificación de Hubble en un diagrama que por su estructura recibe el nombre "diagrama diapasón" (ver figura 8.5). La organización de las galaxias en el diagrama obedece a una idea errada en conexión con las relaciones evolutivas entre los tipos. Se creía que las galaxias inicialmente tenían una estructura elíptica, empezando por una forma esférica, y que con el tiempo evolucionaba hasta convertirse en una galaxia espiral (normal o barrada) para luego perecer como una galaxia irregular. Aunque esta idea está completamente revaluada y carece de ningún sustento teórico, todavía se conserva la costumbre de llamar a los tipos que se encuentran a la izquierda del diagrama tipos tempranos y a los que se encuentran a la derecha tipos tardíos. Las galaxias lenticulares en el marco de esa idea representarían estadios intermedios en la conversión de la galaxia de elíptica a espiral.

En la actualidad múltiples extensiones y modificaciones al esquema de clasificación morfológica de Hubble han sido hechos. Han sido por ejemplo introducidas subclases que tienen por ejemplo en cuenta las diferencias entre galaxias que siendo del mismo tipo de Hubble presentan luminosidades distintas. Se habla así de un conjunto de 5 subtipos representados por los números romanos del I al V, donde las galaxias del tipo I tienen brazos espirales bien definidos, mientras que las del tipo V tienen tenues brazos espirales. Introduciendo este sistema de clasificación por luminosidades, se dice que la galaxia de Andromeda es del tipo SbI-II (ver figura 8.6).

Gerard de Vaucoulers, ha hecho los más importantes modificaciones y adiciones al sistema de clasificación de Hubble. Sus modificaciones incluyen la eliminación de los tipos Irr I e Irr II, y la creación en su lugar de los tipos Sd y Sm (para las galaxias que pertenecían al tipo Irr I) e Im (para aquellas que pertenecían al tipo Irr II). Las galaxias verdaderamente irregulares o amorfas son clasificadas en el tipo Ir.

Con estas nuevas modificaciones las nubes mayor y menor de Magallanes pertenecen a los tipos, SBmIII y ImIV-V respectivamente.

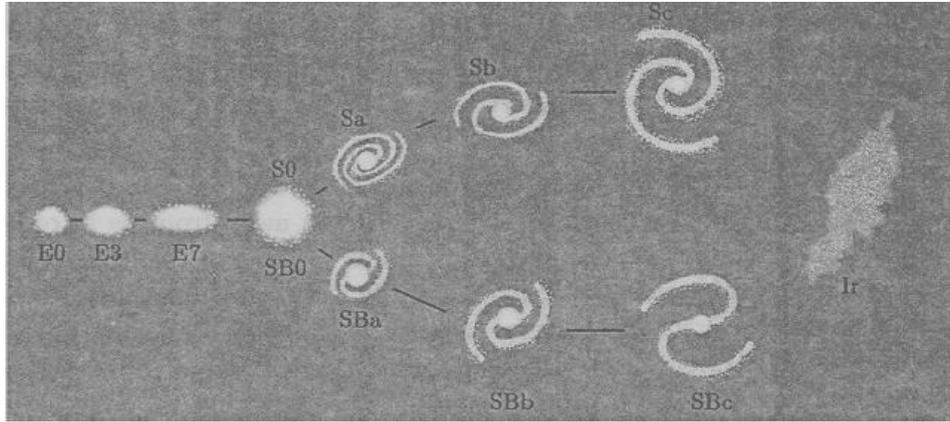


Figura 8.5: El diagrama *diapasón*.

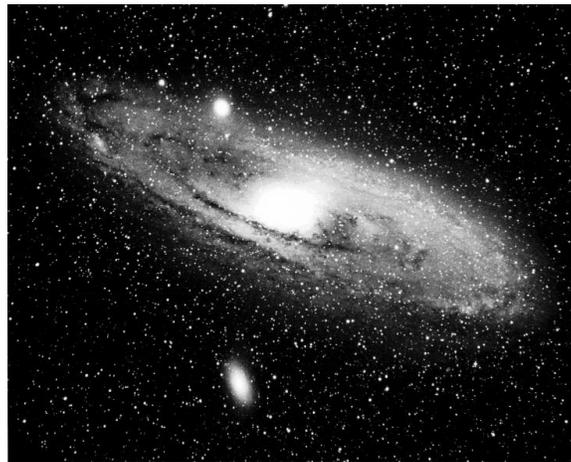


Figura 8.6: La vecina galaxia de Andrómeda.

Otros cambios han sido introducidos en el sistema de clasificación de las galaxias elípticas, que además de su elipticidad se distinguen por su luminosidad y masa en los tipos cD (Galaxias elípticas gigantes), nE (galaxias elípticas normales), dE (galaxias elípticas enanas), dSph (Galaxias esferoidales enanas) y BCD (galaxias enanas azules y compactas).

## 8.3 Galaxias espirales e irregulares

Entre las galaxias conocidas, el tipo que más llama la atención por su aparente belleza, lo representan las denominadas galaxias espirales. Con mucho la particular manera como se distribuye la materia en los discos de estas galaxias representa la más impresionante característica conocida entre estos objetos astrofísicos.

Pero las galaxias espirales parecen poseer una serie de propiedades sobresalientes, que, además de su belleza, las hace distintas entre las demás galaxias. Entre estas características resaltan la existencia de un organizado movimiento de traslación de la materia que constituye sus discos en torno al centro de la misma, y los altísimos niveles de gas y polvo ausentes casi completamente en otros tipos de galaxias.

Aunque el esquema de clasificación de Hubble parece arbitrario estudios detallados de las características de las galaxias espirales, parecen revelar que espirales de distinto tipo en dicho esquema poseen características también enteramente distintas.

Dedicaremos esta sección a estudiar en detalle las distintas características de las galaxias espirales, las que nos conduzcan finalmente al establecimiento de los hechos básicos relacionados con su estructura y dinámica.

### 8.3.1 Parámetros físicos de las galaxias espirales

Como lo expresábamos en los párrafos anteriores, el estudio de las propiedades de las galaxias espirales parecen revelar correlaciones entre el tipo asignado a ellas en el esquema de Hubble y el valor de ciertos parámetros físicos de interés. Este tipo de correlaciones es indicativo de que la diferencia aparente entre los distintos tipos de Hubble tiene implicadas también diferencias en aspectos como la cantidad de gas y polvo en la galaxia, la tasa de formación de estrellas y las características generales de su proceso evolutivo.

La primera de las propiedades de interés que muestra una clara dependencia con la clasificación de Hubble, es la que hemos llamado la razón masa-luminosidad para la Galaxia. En la sección 7.2, habíamos indicado que el valor de esta cantidad era indicativo del tipo promedio de estrella que aportaba masa y luz a la Galaxia. Razonamientos que involucraban el uso de la denominada relación masa-luminosidad, nos permitieron, para una estrella dada determinar cuál era su masa si se conocía su razón masa-luminosidad ; el resultado obtenido fue,

$$M = \Upsilon^{1/(1-\alpha)} M_{\odot}$$

Con  $\alpha > 1$ . Si conocemos la razón masa-luminosidad de una galaxia, la masa típica de las estrellas que la constituyen estará dada por la anterior expresión. Nótese que un valor mayor de  $\Upsilon$  implicará una masa típica de la estrella media mayor también.

La razón masa luminosidad en las galaxias espirales disminuye conforme nos movemos hacia tipos de Hubble más tardíos :  $6,2 \pm 0,6$  para Sa,  $4,5 \pm 0,4$  para Sb y  $2,6 \pm 0,2$  para Sc. Esto implica que las galaxias espirales del tipo Sc contienen estrellas que en promedio son más masivas que las que contienen los otros tipos de espirales. Sabemos sin embargo, que en las estrellas de la secuencia principal una mayor masa implica, además de una luminosidad superior, una temperatura efectiva también mayor. Este último parámetro a su vez está relacionado con el color de la estrella : estrellas calientes son azules y estrellas frías son rojas. Si las estrellas que aportan la mayor cantidad de luz a las galaxias del tipo Sc, son estrellas masivas es de esperarse entonces que sean también las galaxias espirales más azules. En efecto, un tal razonamiento se ve corroborado cuando se mide el índice de color  $B - V$ , para los distintos tipos de galaxias espirales : 0,75 para Sa, 0,64 para Sb, 0,52 para Sc.

El estudio de la evolución estelar nos mostró también, que las estrellas masivas, luminosas y azules tienen vidas típicas bastante cortas (del orden de decenas de millones de años). De modo que su presencia en una galaxia es indicativo de que en ella el proceso de formación estelar es bastante activo. Pero una tal característica exige además la presencia de una cantidad mayor de gas y polvo a partir del cual puedan formarse estrellas nuevas al interior de la galaxia. El estudio de la fracción de masa en la forma de gas en galaxias espirales ratifica lo que hasta ahora hemos dicho : 4% para Sa ( $\langle M_{gas}/M_{total} \rangle = 0,04$ ), 8% para Sb y 16% para Sc.

El contenido de materia interestelar de las galaxias espirales puede considerarse formado por tres componentes principales : hidrógeno molecular (en nubes densas moleculares), hidrógeno atómico y polvo. La cantidad de materia interestelar en cada una de estas formas depende también del tipo de Hubble al que pertenece la galaxia. Así por ejemplo la razón entre la masa debida al hidrógeno molecular y al hidrógeno atómico ( $\langle M_{H_2}/M_{HI} \rangle$ ) es para los distintos tipos de Hubble,  $2,2 \pm 0,6$  para Sab,  $1,8 \pm 0,3$  para Sb,  $0,73 \pm 0,13$  para Sc y  $0,29 \pm 0,07$  para Sd. Esto parece indicar que las galaxias de tipos espirales más tempranos son más centralmente condensadas que las de tipos tardíos, hecho que favorece la reunión de grandes cantidades de gas y facilita la formación de moléculas.

La cantidad de polvo en la galaxia se mide mediante la determinación de la luminosidad de la misma en el lejano infrarrojo (FIR). El polvo interestelar absorbe la energía proveniente de las estrellas en la forma de radiación ultravioleta y la convierte en radiación infrarroja. Las observaciones del satélite IRAS (Infrared Astronomical Satellite), han establecido que la luminosidad de las galaxias espirales en el infrarrojo lejano es mayor, en relación a la luminosidad de las mismas en la banda azul, en tanto más tardío es el tipo al que ellas pertenecen. Esto es otro indicativo de la mayor disponibilidad de material en el medio interestelar en las galaxias de tipo tardío para formar estrellas.

Como característica también distintiva de las galaxias espirales, se encuentra la existencia

de a veces marcados gradientes de color sobre su superficie : generalmente los abultamientos centrales aparecen más "rojos" que el disco mismo. La existencia de estos gradientes se debe a diferencias entre la metalicidad de distintas regiones de la galaxia así como también en el ritmo de formación estelar, este último conectado con diferencias en el contenido de gas y polvo en los distintos subsistemas de la misma. La envoltura de estrellas con una metalicidad mayor, contiene una mayor cantidad relativa de electrones producidos por la ionización de los relativamente abundantes elementos pesados presentes en ella ; este incremento en la cantidad de electrones puede inducir un incremento en la concentración de iones  $H^-$  lo que a su vez induce una mayor opacidad de la materia. La materia muy opaca absorbe más eficientemente la radiación procedente del interior calentándose por encima de lo que lo haría materia menos opaca. Para manetener el equilibrio hidrostático la estrella se expande y su superficie se enfría, respecto a las estrellas de más baja metalicidad. Estrellas con un mayor contenido de elementos pesados serán por el anterior argumento más rojas. Este análisis sumado con la observación de abultamientos centrales más rojos, implica por tanto que esta región de las galaxias espirales contiene una mayor cantidad de elementos pesados que la que tiene el disco.

Este efecto se ve reforzado por el hecho de que la materia que potencialmente puede formar estrellas nuevas (luminosas y azules) está concentrada principalmente en los discos de las galaxias espirales. Los subsistemas esferoidales de estas galaxias (el halo y el abultamiento central) están casi exentos de materia interestelar y por esta razón allí no tiene lugar un proceso activo de formación estelar.

Otro parámetro que se encuentra en profunda conexión con el tipo de Hubble al que pertenece una galaxia espiral es el número de cúmulos globulares a ella ligados. El número de cúmulos globulares parece ser mayor en las galaxias espirales de tipos más tempranos y se incrementa, para un mismo tipo con la luminosidad de la galaxia.

Generalmente se introduce, para cuantificar la cantidad relativa de cúmulos globulares, una cantidad conocida como la Frecuencia Específica y denotada por  $S_N$ , que se define como,

$$S_N = N \frac{L_{15}}{L_V}$$

donde  $L_{15}$  es la luminosidad de un cuerpo con magnitud absoluta visual  $M_V = -15$ . El factor  $\frac{L_{15}}{L_V}$  es simplemente un factor de normalización .  $S_N$  tiene un valor de  $0,5 \pm 0,2$  para galaxias espirales de los tipo Sc y más tardíos, y se incrementa hasta un valor de  $1,2 \pm 0,2$  para los tipos Sa y Sb. Estas observaciones parecen indicar que las galaxias espirales de tipos tempranos tienen la capacidad de formar más eficientemente cúmulos globulares. Esto ofrece algunas pistas relativas al proceso de evolución de este tipo de galaxias.

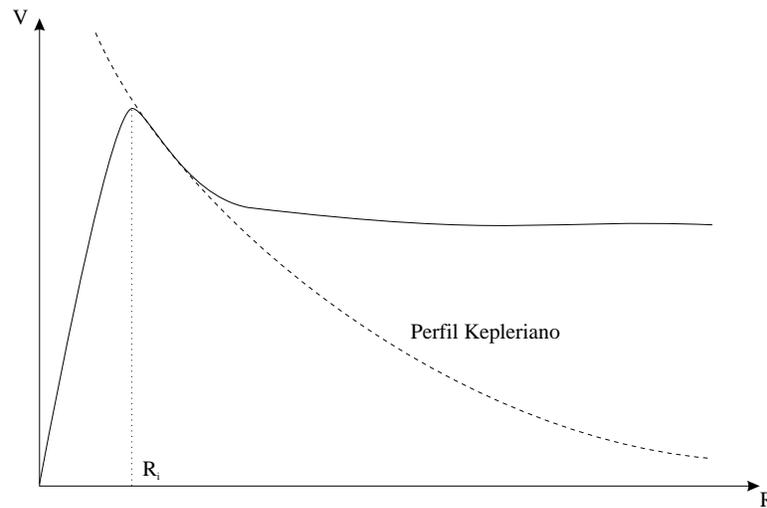


Figura 8.7: Características generales de la curva de rotación de las galaxias espirales.

### 8.3.2 La curva de rotación de las galaxias espirales

Como se había mencionado al principio, a diferencia de otros tipos de galaxias, la materia en galaxias espirales exhibe ordenados movimientos de traslación en torno al centro de las mismas, es decir presentan un movimiento global de rotación. La observación y medida de la rotación de las galaxias espirales permite hacerse a una idea muy precisa de la dinámica de estos complejísimos sistemas estelares. Su observación nos ha revelado además la existencia de materia que aunque invisible a nuestros instrumentos tiene capacidad de ejercer un poderoso efecto gravitacional sobre la restante materia luminosa de la galaxia. Además, la existencia de una correlación entre la magnitud de la rotación galáctica y la luminosidad intrínseca de la misma se nos revela como un poderoso método para la determinación de las distancias que nos separan de ellas.

La curva de rotación de las galaxias espirales ( $V$  vs.  $R$ ) se obtiene por la observación del desplazamiento doppler de las líneas de emisión (generalmente la línea de los 21 cm emitida por el hidrógeno neutro que se encuentra distribuido aproximadamente por todo el disco de la galaxia) a distintas distancias respecto a su centro. Las características generales de las curvas típicas obtenidas para las galaxias espirales se presentan en la figura 8.7. En ellas se reconocen una serie de regularidades: la velocidad de rotación se incrementa monótona y linealmente en la parte interior de la galaxia (generalmente en el interior del abultamiento central,  $R < R_i$ ), alcanza un máximo ( $V_{max}$  en  $R = R_i$ ) y luego decrece rápidamente para más tarde ( $R > R_c$ ) mantenerse constante hasta regiones muy alejadas del centro de la galaxia. La dependencia de la velocidad de rotación, en las tres distintas regiones mencionadas, son un indicativo directo de la distribución de masa en la galaxia.

Un sencillo análisis dinámico nos mostrará las consecuencias del distinto comportamiento rotacional de las galaxias espirales a distintos radios sobre la distribución de masa en las mismas.

$$R < R_i$$

En esta región la velocidad de rotación tiene una dependencia lineal con la distancia al centro galáctico,

$$V = \alpha R$$

si consideramos órbitas circulares la segunda ley de Newton se expresa en la forma,

$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM_R}{r^2}$$

donde  $M_R$  es la masa contenida en la esfera imaginaria de radio  $R$ . Si por simplicidad consideramos la materia de la galaxia distribuida en forma esférica, la conservación de la masa se escribe como,

$$\frac{dM_R}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (8.1)$$

Sustituyendo aquí  $M_R$  como es dado por la segunda ley de Newton, encontramos finalmente,

$$\rho = \frac{3\alpha^2}{4\pi G}$$

Es decir en la región interior de las galaxias espirales (donde  $V$  crece linealmente con la distancia al centro galáctico) la materia se distribuye en forma homogénea.

$$R_i < R < R_c$$

En esta región la dependencia de la velocidad de rotación con la distancia al centro de la galaxia es del tipo kepleriano,

$$V \propto R^{-1/2}$$

la segunda ley de Newton en este caso, implica que,

$$M_R = \frac{\alpha^2}{G}$$

Es decir, la masa "que" siente la materia en esta región, es constante sin importar la distancia al centro galáctico y al alejarse de él no aparece ninguna contribución nueva a esta cantidad. Esto implica que la densidad de materia allí es aproximadamente nula. Esta región de la galaxia se puede considerar casi completamente vacía respecto a las más densas regiones interiores.

$$R > R_c$$

La constancia de la velocidad de rotación en esta región de la galaxia ( $V = V_o$ ), implica por la segunda ley de Newton,

$$M_R = \frac{V_o^2 R}{G}$$

es decir la masa contenida empieza a incrementarse conforme nos alejamos a distancias mayores del centro de la galaxia. A distancias tan grandes, a las que ya no son observables cantidades considerables materia luminosa, ¿ qué materia puede producir el aporte necesario para el incremento observado en la masa contenida ?. Este hallazgo ha inducido a pensar a los astrofísicos en la existencia de inmensas cantidades de una peculiar forma de materia carente de propiedades emisivas pero que podría sumar una buena fracción, más del 80% ,de la masa total de la galaxia. La composición de esta materia es aun tema de debate, pero algunos candidatos parecen estar recibiendo la mayor de las atenciones. Uno de ellos lo constituyen los denominados MACHOs ( Massive Compact Halo Object), objetos astrofísicos formados por materia convencional (materia bariónica) pero en formas relativamente exóticas como la de agujeros negros, enanas marrones o enanas rojas, los cuales carecen casi por completo de cualquier propiedad emisiva por la que pudieran ser detectados. Otros candidatos más exóticos lo constituyen por ejemplo neutrinos con masa o las denominadas WIMPs (Weak Interacting Massive Particle), aún más difíciles de detectar pero que podrían dar cuenta de la masa gravitante no luminosa de la mayoría de las galaxias espirales.

Cuando se estudian comparativamente las propiedades de la curva de rotación de galaxias espirales de distinto tipo de Hubble y distinta luminosidad una regularidad sale a la luz. La velocidad máxima de rotación depende directamente de estos dos últimos parámetros, siendo mayor, para galaxias de la misma luminosidad, en las espirales de tipos tardíos, y, dentro del mismo tipo, para aquellas que tienen la mayor luminosidad. En la figura 8.8 se representan un conjunto de curvas de rotación de galaxias con distintas luminosidades para cada uno de los tipos de Hubble. En ellas se hace clara la relación señalada. Si se representa en una gráfica la magnitud absoluta de una galaxia espiral contra su velocidad máxima de rotación el resultado es como se muestra en la figura. Nótese que los puntos en esta última gráfica se ajustan a un conjunto de 3 rectas (una por cada tipo de espiral) con ecuaciones,

$$M_B = -9,95 \log_{10} V_{max} + 3,15 \quad (\text{Sa})$$

$$M_B = -10,2 \log_{10} V_{max} + 2,71 \quad (\text{Sa})$$

$$M_B = -11,0 \log_{10} V_{max} + 3,31 \quad (\text{Sa})$$

A esta relación entre la velocidad máxima de rotación de las galaxias espirales y su magnitud absoluta se la conoce como relación de Tully-Fisher. La importancia de un tal hallazgo, se nos revela en el hecho de que esta última relación puede ser utilizada como

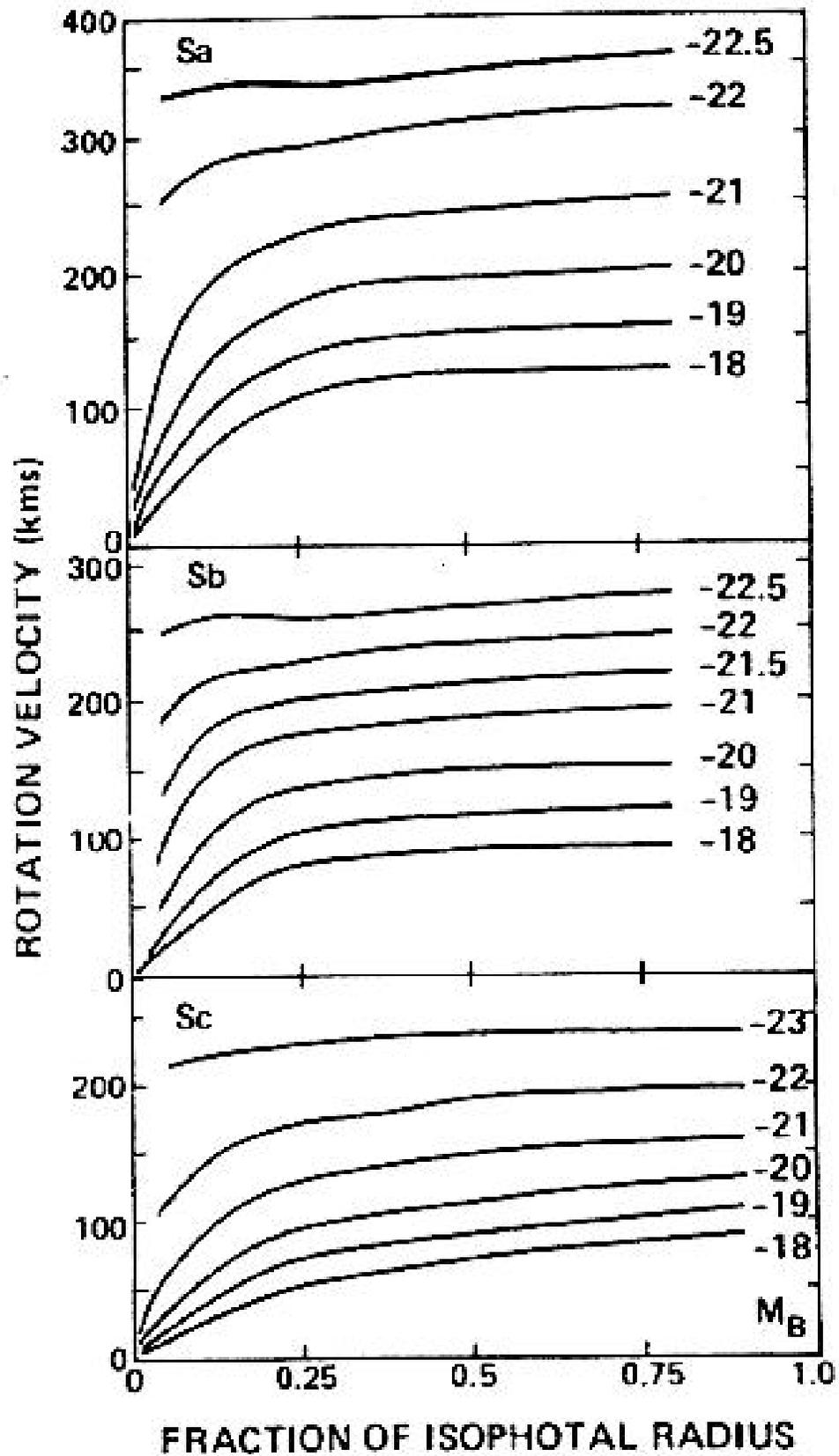


Figura 8.8: Las curvas de rotaciones de diversas galaxias espirales, que reflejan la existencia de la relación de Tully-Fisher.

un método para la determinación de distancias extragalácticas : por medios espectrales puede obtenerse la curva de rotación de una galaxia espiral en un cúmulo de galaxias cuya distancia es desconocida ; de esta puede ser deducida la velocidad máxima de rotación ; el reconocimiento del tipo de Hubble de la galaxia y la utilización de la relación de Tully-Fisher correspondiente puede proveernos finalmente el valor de su magnitud absoluta que al ser comparada con la magnitud aparente de la galaxia nos da el módulo de su distancia y con ella la distancia a la que se encuentra el cúmulo de galaxias estudiado.

### 8.3.3 La estructura espiral

Uno de los aspectos más sobresalientes de las galaxias que ahora nos ocupan, es el de la existencia en sus discos de lo que conocemos como brazos espirales.

Los brazos espirales no son otra cosa que regiones del disco de estas galaxias en las que se acumulan la gran mayoría de estrellas masivas y luminosas de la galaxia misma así como una buena parte de las nubes más densas que la componen. El espacio entre los brazos no se encuentra completamente vacío, allí es posible encontrar estrellas mucho menos luminosas y nubes difusas. La presencia de estrellas masivas y luminosas en el lugar de los brazos (así como una gran concentración de nubes densas) es indicativo que ellas corresponden a activas regiones de formación estelar.

Observando un gran conjunto de galaxias se puede reconocer la existencia de por lo menos tres tipos bien diferenciados de estructuras espirales : las denominadas espirales de gran diseño, las espirales de brazos múltiples y las espirales de brazos fragmentados. Las espirales de gran diseño están constituidas regularmente por dos brazos espirales simétricos muy bien definidos. Las espirales de brazos múltiples presentan un conjunto de más de dos brazos espirales sin una simetría perfecta. Las espirales de brazos fragmentados, están formadas por la colección de trozos de una gran cantidad de brazos espirales sin ninguna conexión. Aproximadamente un 60

La relación entre el sentido de rotación de las galaxias espirales y la manera como se envuelven sus brazos permite diferenciar dos tipos adicionales de estructuras: las que aquí denominaremos estructuras envolventes (*trailing structure*<sup>1</sup>) y estructuras retrógradas (*leading structure*). En el primer caso la rotación se produce en el mismo sentido en el que se envuelven los brazos (ver figura 8.9). Aunque parece la más natural de las configuraciones, dado que se tiende a creer que los brazos espirales son producidos por la rotación diferencial de la materia en el disco de la galaxia, de lo que hablaremos a continuación, la estructura más común entre las galaxias espirales es la estructura retrógrada en la que la rotación de la materia en el disco de la galaxia se realiza en dirección contraria a la dirección en la que se envuelven los brazos.

¿cuál es el origen de los brazos espirales?, ¿qué procesos físicos o aspectos de la dinámica galáctica inducen una tal aglomeración de estrellas en tan peculiares y regulares zonas del

---

<sup>1</sup>Es difícil encontrar un equivalente en castellano de esta expresión. Por esta razón el autor ha optado por introducir una denominación adecuada en nuestro idioma, sin que esto signifique un cambio considerable en la idea básica transmitida

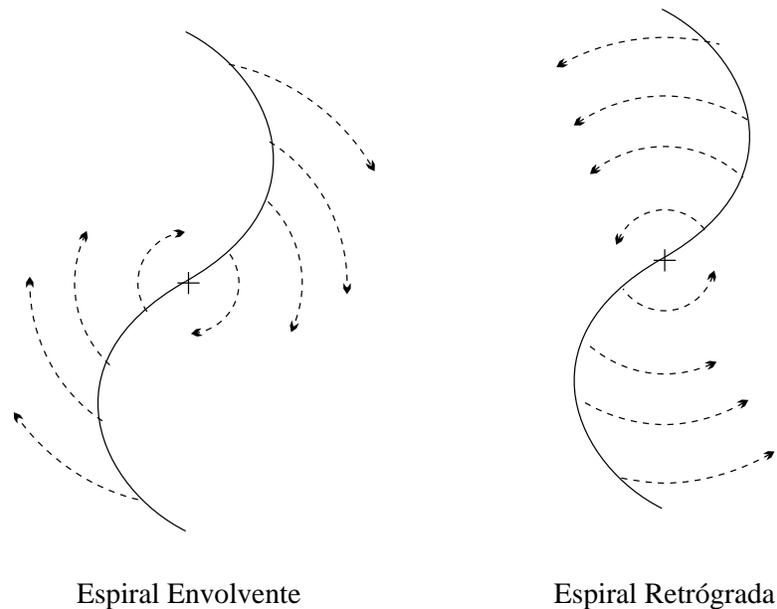


Figura 8.9: Tipos de estructuras espirales en función de la relación entre la dirección de los brazos y el sentido de rotación del disco.

disco galáctico ?.

El más natural de los modelos utilizados para explicar la existencia de los brazos espirales aduce como razón fundamental la existencia de una rotación diferencial de la materia en el disco de la Galaxia.

Consideremos inicialmente, como lo muestra la figura 8.10, un conjunto de estrellas alineadas sobre un diámetro de una galaxia espiral. Si dejamos que transcurra algún tiempo, pequeño comparado con el período de revolución de la más interior de las estrellas, la distinta velocidad de rotación que ellas exhiben, hará que las más exteriores se retarden respecto a las interiores. El efecto de un tal retrasamiento se reflejará como una torsión de la estructura lineal de estrellas, que tiene exactamente la apariencia de un brazo en espiral. Si dejamos sin embargo que pase un tiempo grande comparado con el período de revolución de las estrellas más interiores, descubriremos que lo que en un principio se había constituido claramente como un brazo en espiral ha desaparecido por efecto de un gran retraso de las estrellas que se mueven en las órbitas más exteriores respecto a las interiores : la estructura espiral formada a través de este mecanismo tiene una vida limitada. Un cálculo preciso del proceso descrito demuestra que la escala típica de tiempo en la cuál una galaxia espiral real, formada de este modo, perdería su estructura en un lapso de tiempo muchísimo menor que la duración de su vida. Sin embargo las evidencias observacionales nos revelan que la estructura espiral de las galaxias de este tipo tiene vida media comparable a la vida total de la galaxia. A este problema, que impide explicar la

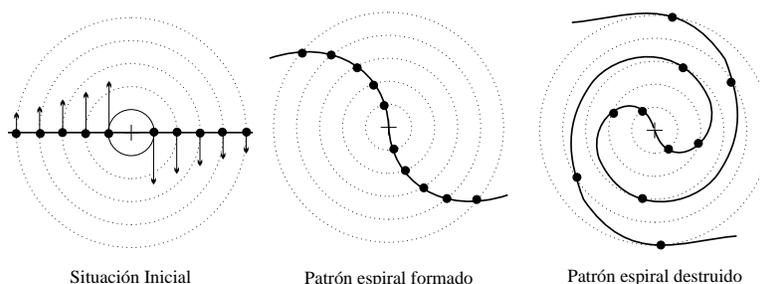


Figura 8.10: El problema del enrollamiento de los brazos espirales.

formación de brazos espirales por efecto de la rotación diferencial de la materia en el disco de estas galaxias, se lo conoce como el problema del enrollamiento (*winding problem*).

A mediados de la década de 1960 apareció en el medio teórico el que es considerado hoy uno de los mejores modelos para explicar la aparición de brazos espirales en los discos galácticos. El modelo propuesto por C.C. Lin y Frank Shu, explica la aparición de estas peculiares estructuras, por efecto del movimiento en el medio interestelar de una onda acústica de particulares características. Esta onda, conocida como una onda de densidad, tiene, de entrada, una forma espiral y se mueve como un todo rotando a una rapidez angular característica. En términos de la rotación de la onda de densidad se puede dividir el disco de la galaxia en dos distintas regiones. A una distancia definida del centro, la velocidad angular de rotación de los cuerpos en el disco es la misma que la correspondiente a la onda de densidad, allí la materia se encuentra en reposo respecto a un sistema unido al patrón formado por la onda. A esta distancia se la conoce como radio de corrotación. A distancias menores al radio de corrotación, la rapidez de la materia en el disco es mayor a la correspondiente a la onda : la materia en estas regiones va a el encuentro de la onda superándola. La materia más allá del radio de corrotación por el contrario enfrenta, por su menor rapidez de traslación respecto a la onda, el paso de la misma. En ambas regiones, el paso de la onda o el movimiento de la materia adelantándola, induce en el medio una concentración de materia inducida por la presencia de la misma. El tenue medio interestelar que se concentra forma nubes densas, donde las condiciones para la formación de estrellas nuevas se ven favorecidas. El encuentro del medio con la onda de densidad tiene pues como efecto principal la aparición de una nueva generación de estrellas. Entre ellas una pequeña fracción del total estará en la forma de estrellas masivas, luminosas y azules, que comenzarán a ionizar el medio interestelar circundante, formando las regiones HII características de los brazos de las galaxias espirales. Las estrellas recién nacidas continuarán su movimiento en torno al centro galáctico. Las más masivas y azules culminarán sus cortas vidas antes de abandonar el brazo en el que se han formado, esta da a estas estructuras el compacto aspecto que ellos presentan cuando se las examina en la luz emitida en la banda azul del espectro visible. Las menos masivas y luminosas con emisiones principalmente en el rojo, y con vidas típicas que superan con mucho el

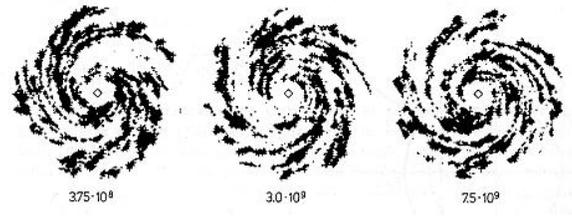


Figura 8.11: El resultado de una simulación en la que se muestra el efecto que tiene la propagación de una onda de densidad sobre el medio presente en el disco de una galaxia y que induce la formación de nuevas estrellas.

tiempo que invierten en completar una vuelta en torno al centro galáctico, abandonan el brazo en el que originalmente se forman y pueden en repetidas ocasiones encontrar otros brazos. Las estrellas de este tipo pueden pasar más de la mitad de su vida en el interior de un brazo espiral, el tiempo restante lo pasan en el espacio entre brazos. Por esta razón cuando se examina la emisión de la galaxia en la banda roja del espectro visible, aunque de nuevo se hacen visibles los brazos su grosor se hace mayor.

Simulaciones informáticas completas muestran que la formación de brazos espirales por efecto de la propagación en el disco de galaxias de ondas de densidad es un proceso eficiente y que conduce a estructuras como las finalmente observadas (ver figura 8.11).

Aunque algunos cabos quedan sueltos en el modelo de la onda de densidad (cuestiones como la de qué produce la onda de densidad misma, cuál es su estabilidad) este se presenta como el más efectivo medio para explicar la formación de estructuras espirales de gran diseño y de brazos múltiples.

El origen de la estructura de espirales de brazos fragmentados parece responder a un mecanismo enteramente distinto. Uno de los más publicitados modelos que resuelven el problema está asociado al denominado proceso de formación estelar estocástica autopropagante (Stochastic, self-propagating star formation, SSPSF).

En el modelo se parte de un disco homogéneo de materia interestelar y estrellas. La muerte de las estrellas más masivas acaece violentamente en la forma de una explosión de supernova, que produce una onda de choque en el medio y que puede inducir la formación de estrellas nuevas en el vecindario de la estrella progenitora. En estas regiones otras estrellas nacen y mueren también en la forma de supernovas que inducen también la formación de otras estrellas, se crean regiones localizadas del disco de la galaxia, que por efecto de la rotación diferencial de la misma adoptan la forma típica de un trozo de espiral. De esta manera, muchas regiones de formación estelar inducida por la explosión de supernovas vecinas, creadas constantemente en el disco de la galaxia y deformadas por efecto de la rotación diferencial de la galaxia misma, crean el efecto de una espiral cuyos brazos han sido fragmentados.

Parámetro	S0	cD	E
$M_B$	-17 a -22	-22 a -25	-15 a -23
$M(M_\odot)$	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{13} - 10^{14}$	$10^8 - 10^{13}$
Diámetro (Kpc)	10 a 100	300 a 1000	1 a 200
$\langle M/L_B \rangle$	10	> 100	10 a 100
$\langle S_N \rangle$	5	15	5

Tabla 8.1: Características de los distintos tipos de galaxias elípticas (1).

Parámetro	dE	dSph	BCD
$M_B$	-13 a -19	-8 a -15	-14 a -17
$M(M_\odot)$	$10^7 - 10^9$	$10^7 - 10^8$	$10^9$
Diámetro (Kpc)	1 a 10	0.1 a 0.5	< 3
$\langle M/L_B \rangle$	10	5 a 100	0.1 a 10
$\langle S_N \rangle$	5	-	-

Tabla 8.2: Características de los distintos tipos de galaxias elípticas (2).

## 8.4 Galaxias Elípticas

Aunque con una estructura en apariencia mucho más simple que la exhibida por las galaxias espirales, las galaxias elípticas son el tipo de galaxias que exhibe una más compleja y oscura dinámica. Entre ellas se encuentran las más abundantes, luminosas y masivas galaxias del universo.

Contrario a lo que vimos en la sección anterior, la clasificación morfológica de Hubble no permite establecer correlaciones como las estudiadas, entre el tipo asignado en este esquema a una galaxia elíptica y las más importantes propiedades de este tipo de galaxias. Una más adecuada clasificación morfológica, que tiene en cuenta además las diferencias entre las características físicas de distintas galaxias elípticas es aquella que considera la existencia de 5 tipos principales : cD (elípticas supergigantes), gE (elípticas gigantes), E (elípticas de luminosidad intermedia), cE (elípticas compactas), dE (elípticas enanas), dSph (elípticas enanas esferoidales), BCD (elípticas azules enanas).

Las diferencias existentes entre cada uno de los tipos mencionado radican en su luminosidad, tamaño, masa, contenido de cúmulos globulares. Sus características generales se resumen en las tablas 8.1 y 8.2.

Las galaxias elípticas supergigantes (cD) son inmensos sistemas comunes en las regiones centrales de los cúmulos de galaxias muy densos. Se caracterizan por tener regiones centrales muy brillantes y envolturas tenues. Una galaxia de este tipo puede contar con decenas de miles de cúmulos globulares y un altísimo contenido de materia oscura, lo que

se refleja en los inmensos valores de la razón masa-luminosidad que las caracteriza (del orden de  $100 M_{\odot}/L_{\odot}$ ).

Las galaxias elípticas normales, que pertenecen a los tipos gE, E y cE, son cuerpos centralmente concentrados con luminosidades y masas intermedias. La razón masa-luminosidad, es menor que la que presentan las galaxias supergigantes, pero mayor que la de cualquier galaxia espiral. Las galaxias lenticulares (de los tipos de Hubble S0 y SB0), son clasificadas a menudo como galaxias elípticas de luminosidad intermedia, E.

Las galaxias elípticas enanas (dE) son objetos fundamentalmente distintos de las galaxias elípticas normales. Representan galaxias de masa y dimensiones pequeñas. Una de sus más peculiares características la constituye una metalicidad levemente menor que la que exhiben las galaxias elípticas normales, lo que en última está conectado con diferencias en sus procesos evolutivos.

Las galaxias elípticas esferoidales enanas, son galaxias enanas con una bajísima luminosidad y un brillo superficial muy bajo. Se las ha detectado sólo en la vecindad de la Vía Láctea.

Finalmente las galaxias enanas azules, son objetos inusualmente azules, con índices de color  $\langle B - V \rangle$  que oscilan entre 0 y 0,3, el correspondiente a estrellas de la secuencia principal del tipo espectral A, lo que indica la existencia en estas galaxias de vigorosos procesos de formación estelar.

El brillo superficial (medido en  $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ ) de la mayoría de las galaxias elípticas sigue el denominado perfil de de Vaucoulers, también llamada la ley  $r^{1/4}$ ,

$$\mu(r) = \mu_o + 8,3268 \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{1/4} - 1 \right]$$

dónde  $\mu_o$  es el brillo superficial medido en el centro de la galaxia y  $r_e$  es el denominado radio efectivo, definido como aquel dentro del cual es emitida la mitad de la luz total producida por la galaxia. La constante 8,3268 ha sido determinada observacionalmente mediante el estudio de muchas galaxias elípticas que obedecen el perfil y de los abultamientos de las galaxias espirales que parecen también satisfacer la ley descrita.

Frecuentemente se piensa que las galaxias elípticas son pobres en gas y polvo. Esto se explica aduciendo un mayor ritmo de formación estelar en las fases tempranas de la evolución de la Galaxia o pérdida del material por efecto de su interacción con el gas en el cúmulo de galaxias al que pertenecen. Esta creencia se ha visto particularmente desvirtuada por recientes observaciones que demuestran que aunque en menor cuantía que en el caso de las "empolvadas" galaxias espirales, las galaxias elípticas normales podrían contener ingentes cantidades de gas y polvo.

Uno de los más intrigantes aspectos que rodea el estudio de las galaxias elípticas lo constituye el origen de su forma.

Una primera tentativa para explicar la peculiar forma de estos sistemas estelares puede ser el considerar el efecto que tiene sobre un sistema inicialmente esférico de materia, la rotación global del sistema. La aparición de efectos centrífugos sobre el sistema en rotación lo obligaría a adoptar una forma elipsoidal con un eje preferido (2 ejes iguales

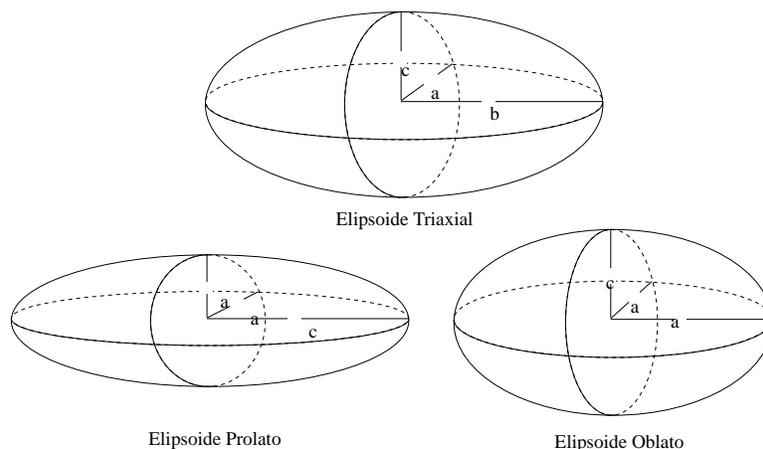


Figura 8.12: Tipos de elipsoide.

entre sí y uno distinto, ver figura 8.12) : un elipsoide oblato en el que eje preferido tiene una longitud menor a la de los otros dos ejes o un elipsoide prolato, en el que el eje preferido es mayor que los ejes iguales. En ambos casos la dirección del eje preferido del elipsoide coincidiría con la del eje de rotación de la galaxia como un todo.

Las observaciones demuestran sin embargo que la mayoría de las galaxias elípticas se ajustan con buena precisión a elipsoides triaxiales carentes de cualquier eje preferido, de modo que no puede ser la rotación de la galaxia la que que determinan su forma.

Una nueva explicación ve la luz. El distinto diámetro característico de las galaxias elípticas en distintas direcciones (su elipticidad) puede también ser explicada por la existencia de anisotropías en la distribución de velocidades de las estrellas en las tres direcciones que definen sus ejes : una preferencia a tener componentes de la velocidad mayores en una dirección haría que las estrellas se alejen del centro de la galaxia a distancias mayores en esa dirección y el resultado sería el de alargar al sistema en la dirección indicada.

A las galaxias que adoptan su forma por efecto de la rotación de las estrellas que las constituye se las denomina galaxias soportadas por la rotación. Por el contrario se las llama galaxias elípticas soportadas por la presión a aquellas que deben su forma a la isotropía en la distribución de velocidades.

Mediante observaciones del movimiento aparente de las estrellas de una galaxia elíptica es posible establecer si su forma ha sido producida por la rotación o por la presión de las estrellas en su seno. En una galaxia que deba su forma a la rotación, y que sea por tanto un elipsoide oblato, la relación entre la velocidad de rotación de la galaxia,  $V_{rot}$ , y la dispersión de velocidades radiales de sus estrellas,  $\sigma$ , estará relacionada con su elipticidad aparente por la expresión,

$$\left(\frac{V_{rot}}{\sigma}\right)_{iso} \approx \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)^{1/2}$$

Se puede mostrar que para que una galaxia elíptica sea rotacionalmente sostenida, debe cumplirse que,

$$\left(\frac{V_{rot}}{\sigma}\right)_{obs} > 0,7 \left(\frac{V_{rot}}{\sigma}\right)_{iso}$$

Las observaciones muestran que las galaxias elípticas normales brillantes y en general las galaxias enanas son soportadas por la presión. Sólo las galaxias elípticas más brillantes ( $-18 > M_B > -20,5$ ), así como también los abultamientos de la mayoría de las galaxias espirales, cuya distribución de brillo superficial se muestra en extremo similar a la que exhiben las galaxias elípticas, podrían ser rotacionalmente sostenidas.

## 8.5 Ejercicios

8.1 NGC2639 es una galaxia espiral Sa con una velocidad máxima de rotación de 324 km/s y una magnitud aparente B = 12,22 mag.

- Utilizando la relación de Tully-Fisher estimar la magnitud absoluta de la galaxia en la banda B.
- Determinar la distancia a la que se encuentra la galaxia.
- Sabiendo que, el radio 25 ( $R_{25}$ , el radio de la isofota correspondiente a un brillo superficial de 25 mag arcsec<sup>-2</sup>) de una galaxia espiral se relaciona, por un resultado empírico, con la magnitud absoluta de la misma así,

$$\log_{10}(R_{25}/1\text{Kpc}) = -0,249M_B - 4,00$$

Determinar  $R_{25}$  para la galaxia problema.

- suponiendo que la materia que está en  $R_{25}$  se mueve en órbitas circulares, con una velocidad tangencial constante igual a  $V_{max}$  determinar la masa interior a  $R_{25}$ .
- Hallar la razón masa-luminosidad para esta galaxia y estimar a partir de ella la masa típica de las estrellas que la constituyen.

# Bibliografía

- [1] Binney, James, Tremaine, Scott, *Galactic Dynamics*, Princeton University Press, Princeton, 1987
- [2] Bowers, R. & Deeming, T. , *Astrophysics II. Interstellar Matter and Galaxies*, Jones and Bartlett Publisher, Boston, 1984
- [3] Kippenhahn, Rudolf, *Luz del Confín del Universo*, Salvat, Barcelona, 1987
- [4] Ostlie, D.A., and Carrol, B.W., *An Introduction to Modern Astrophysics*, Addison-Wesley, 1996
- [5] Scheffer, H. & Elsasser, H. , *Physics of the Galaxy and Interstellar Matter*, Springer-Verlag, Berlín, 1982



# Apéndice A

En las tablas A.1 y A.2 se presenta una lista de algunas constantes astronómicas y físicas de interés.

Nombre	Símbolo	Valor
Constante Gravitacional	G	$6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
Velocidad de la luz	c	$3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Constante de Planck	h	$6,63 \times 10^{-34} \text{ j s}$
Constante de Boltzmann	k	$1,38 \times 10^{-23} \text{ j K}^{-1}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Masa del hidrógeno	$m_H$	$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Masa del electrón	$m_e$	$9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Carga elemental	e	$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Unidad de masa atómica	u.m.a.	$1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Perm. eléctrica del vacío	$\epsilon_o$	$8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
Número de Avogadro	$N_A$	$6,02 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$
Constante de Rydberg	$R_H$	$1,10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

Tabla A.1: Cosntantes Físicas.

Nombre	Símbolo	Valor
Masa solar	$M_{\odot}$	$1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Luminosidad solar	$L_{\odot}$	$3,83 \times 10^{26} \text{ j s}^{-1}$
Radio Solar	$R_{\odot}$	$6,96 \times 10^8 \text{ m}$
Temp. efectiva solar	$T_{eff\odot}$	5770 K
Masa terrestre	$M_T$	$5,96 \times 10^{24} \text{ kg}$
Radio terrestre	$R_T$	$6,38 \times 10^6 \text{ m}$
Año luz	<i>a.l.</i>	$9,46 \times 10^{15} \text{ m}$
Parsec	<i>pc</i>	3.2616 a.l.
Unidad Astronómica	U.A.	$1,496 \times 10^{11} \text{ m}$

Tabla A.2: Constantes Astronómicas.