

Módulo VII



Unidad didáctica 2: Las galaxias



Galaxia espiral





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.1. Introducción

E.S.O.

Fuera de nuestra Galaxia observamos unos objetos aislados que presentan una gran variedad de formas, algunas muy llamativas. Son las galaxias. De gran tamaño, que puede duplicar el diámetro de nuestra, exhiben luminosidades muy elevadas que permiten identificarlas a grandes distancias facilitando la descripción del universo a gran escala y la elaboración de controles de las teorías cosmológicas.

La astrofísica extragaláctica comprende el estudio de la formación, estructura y evolución de los sistemas estelares externos a nuestra Galaxia, y de sus agrupaciones en cúmulos y supercúmulos. Las corrientes investigadoras actuales sitúan la formación de galaxias en el marco de la cosmología de los primeros instantes de la vida del Universo, en tanto que la estructura y evolución son objeto de la Astrofísica propiamente dicha.

La interacción entre la astrofísica extragaláctica y la Cosmología tiene lugar en un sentido que confiere a las galaxias y sus agrupaciones, un papel central en el conocimiento de la estructura y evolución del Universo a gran escala, de manera que el estudio de éste debe ir precedido por una discusión de las propiedades observadas de las galaxias.



U. 2. LAS GALAXIAS

2.2. Morfología

- [Elípticas](#)
- [Espirales](#)
- [Irregulares](#)
- [Lenticulares](#)

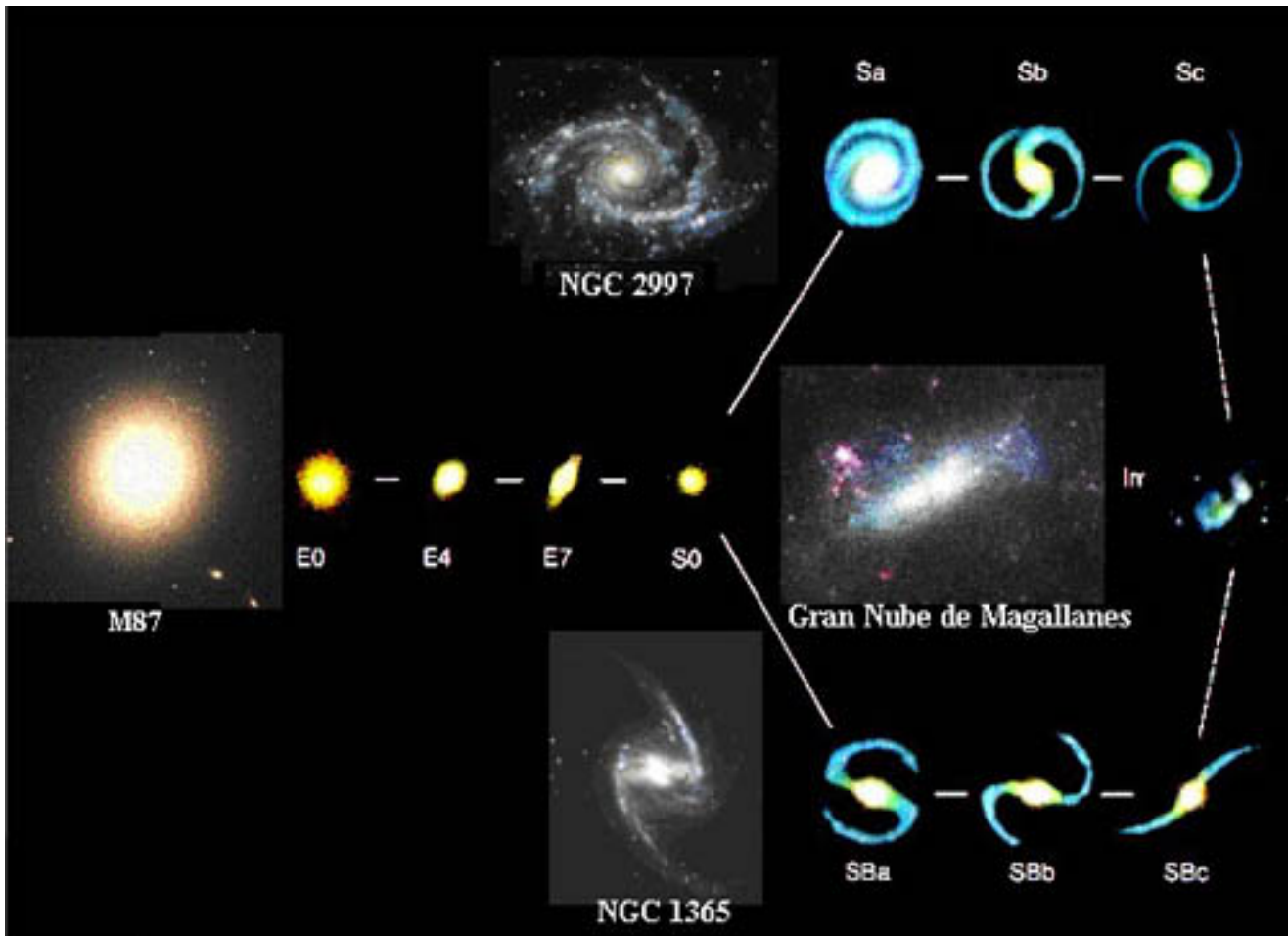


Figura 7-2- 1: Morfología de las galaxias.

La facilidad con que en muchos casos pueden distinguirse las formas de la galaxias, explica que los primeros estudios estuvieran dedicados a la descripción de sus estructuras y a la agrupación de las que presentaban formas comunes. Un método que es similar al empleado en el desarrollo de otras ciencias. Consiste en distribuir las de acuerdo con su apariencia en clases caracterizadas por una **galaxia** standard o prototipo. El paso siguiente es la búsqueda de un parámetro que varíe secuencialmente con las distintas clases. Si éste puede ser interpretado en un contexto físico o astrofísico, la clasificación morfológica deviene un instrumento susceptible de proporcionar información fundamental acerca de la formación de las galaxias y de su evolución. También sobre aspectos relevantes como la naturaleza de las galaxias, la influencia del medio circundante sobre ellas, el origen y los mecanismos responsables de las diferentes estructuras, los posibles factores que determinan las clases en el momento de la formación, etc.

La primera clasificación fue realizada por Hubble quien agrupó las galaxias en tres clases de acuerdo con su aspecto,

- Elípticas E
- Espirales S
- Irregulares I

Más tarde se descubrió una cuarta clase, las lenticulares SO, intermedia entre las elípticas y espirales (Fig. 7-2-1).

Elípticas



Figura 7-2-2: Galaxias elípticas

Las galaxias elípticas (Fig. 7-2-2)adoptan formas que van desde la esfera al elipsoide más o menos achatado y no muestran detalles estructurales. El **brillo** es más intenso en el centro y disminuye progresivamente hacia los bordes. Se designan con la letra E, seguida de un número, n, que representa la excentricidad

$$n = 10\left(1 - \frac{b}{a}\right)$$

siendo a y b los semiejes mayor y menor de la galaxia. Así E0 corresponde a las esferoidales y E7 a las que presentan el máximo achatamiento.

Las elípticas aparecen muy enrojecidas, presentando un movimiento de rotación muy pequeño. El polvo y el gas son escasos y parecen proceder de galaxias colisionantes, de donde son extraídos por un proceso de atracción gravitacional. Las observaciones en rayos X han facilitado la detección de una gran cantidad de gas caliente en ciertas elípticas, el cual cae hacia el centro aumentando su densidad y enfriándose y generando los llamados flujos de enfriamiento. Tiene un gran interés ya que son lugares de formación de estrellas ordinarias y también de estrellas marrones (**protoestrellas** de pequeño tamaño que abortan y no llegan a la fase de las estrellas ordinarias).

En 1984 se descubrieron alrededor de las galaxias elípticas estructuras en forma de conchas que contienen estrellas. Son muy finas y poco brillantes y aparecen en la observación como arcos de círculo alrededor de la galaxia. Un primer estudio estadístico reveló su existencia en un 20% de las galaxias elípticas aisladas. Sin embargo no aparecen en las que son miembros de agrupaciones, donde son probablemente destruidas por interacciones con otras galaxias. Un caso particularmente llamativo es la galaxia **NGC 3923** donde hay unas 26 conchas identificadas, la última de las cuales dista unos 120 kpc del centro. Estas estructuras evidencian mecanismos de interacción entre galaxias, de aquí su importancia. La elíptica colisiona con un pequeño compañero que describe alrededor de ella una órbita cuasi radial, el cual pierde su identidad dejando su **población estelar** en las conchas.

 Espirales





Figura 7-2-3: Galaxias espirales

Tienen un bulbo central del que arrancan unos brazos espirales (Fig. 7-2-3), que están contenidos en un disco, identificado fácilmente al observar la galaxia de canto. Están simbolizadas con la letra S seguida por una minúscula (a, b, c, d, m) que representa distintos estados. En la primera clasificación de Hubble el último estado era c, posteriormente con el incremento del censo de galaxias fue prolongado hasta d y m. De esta manera las espirales son agrupadas de acuerdo fundamentalmente con tres criterios:

- relación entre los tamaños del bulbo y el disco, disminuye de Sa a Sm
- apertura de los brazos espirales, mas abiertos en Sm que en Sa
- cantidad de gas y estrellas jóvenes, aumenta de Sa a Sm.

Las Sd y Sm representan una transición con las irregulares ya que los brazos espirales están muy mal definidos y son difusos. Un observador experimentado puede identificar con un pequeño margen de error unos estados intermedios denominados Sab, Sbc, etc. Nuestra Galaxia parece ser de tipo Sbc.

Irregulares

Un cierto número de las galaxias identificadas son amorfas, no presentan una simetría apreciable y carecen de bulbo o núcleo. Reciben por ello el nombre de irregulares y están caracterizadas con el símbolo Irr. Tienen una gran cantidad de gas y estrellas jóvenes y son las mas azules.

Lenticulares

Pueden considerarse, desde el punto de vista puramente morfológico, como una transición entre las elípticas y espirales. Presentan un plano ecuatorial o envoltura rodeando un bulbo brillante, como las espirales, pero carecen de brazos. Las SO pueden tener estructuras tales como lentes, anillos, franjas de polvo, barras, etc. y en general no son difíciles de clasificar con buen material observacional. Algunas de ellas contienen gas neutro e ionizado. Los estudios fotométricos del bulbo han favorecido su inclusión entre las E y S. Su origen es todavía objeto de controversia aun cuando las corrientes actuales consideran que podrían haber sido inicialmente espirales que habrían consumido su gas. Una fracción de las galaxias clasificadas como elípticas en los catálogos, pueden ser en realidad lenticulares que han sido observadas en la dirección del polo. Las SO completan la llamada secuencia de Hubble,

E - SO - S - Irr



Figura 7-2-4: Galaxias con barras

Las formas descritas anteriormente han sido ampliadas al progresar las técnicas de observación que han revelado la existencia de galaxias con barras, anillos y otras estructuras destacadas. Las primeras (Fig. 7-2-4) son una variedad de las espirales cuyos brazos surgen de los extremos de una barra, aparentemente muy luminosa, superpuesta al bulbo. Se designan como SB seguido del estado correspondiente a la espiral. Aparecen con la misma frecuencia que las espirales ordinarias, y el tamaño y [luminosidad](#) de la barra, aparentemente muy grandes, no superan el 15% del diámetro y brillo total de la galaxia. Las estrellas en la región de la barra muestran un movimiento no circular, con órbitas fuertemente excéntricas que son paralelas a la barra. Tampoco son circulares los movimientos del gas. Estas barras aparecen con más frecuencia en los primeros tipos de espirales. (SBa-SBc) que en los últimos (SBd-SBm).

Como ocurre en general en la naturaleza, la transición entre espirales barradas y ordinarias es difusa. Muchas galaxias combinan el aspecto de

ordinarias puras y barradas. Para distinguir estas formas, algunos autores utilizan el símbolo SA para las ordinarias y el SBA para los casos intermedios.

Las espirales barradas presentan una variedad caracterizada por la presencia de un anillo, que tiene como eje la barra, del que surgen tangencialmente los brazos espirales. Mantienen la clase y estado de las SB añadiendo para caracterizarlas una r entre paréntesis, por ejemplo, SBa(r), SBb(r), etc. En el caso de las transiciones entre las galaxias barradas con anillo y sin él, agregaríamos rs, SBa(rs).

La clasificación morfológica en si misma aporta una información útil. Revela diferencias importantes en los contenidos estelares y las estructuras dinámicas, de las distintas clases de galaxias. Sin embargo sólo la clasificación de las espirales es fundamental en el sentido señalado anteriormente ya que muchas de las propiedades determinantes en la clasificación, (contenido de gas, morfología de los brazos espirales, prominencia del bulbo, etc.) están conectadas con la evolución.

La clasificación morfológica en la práctica es difícil por varias razones. La primera y más importante es que no siempre la galaxia presenta la orientación más favorable respecto a la dirección de observación. Una gran inclinación impide reconocer las diferentes estructuras, brazos, anillos, barras. Sin embargo la observación con detectores [CCD](#) están proporcionando excelente imágenes para los estudios morfológicos y facilitando la aplicación de métodos de clasificación basados en criterios más objetivos.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.3. Velocidades

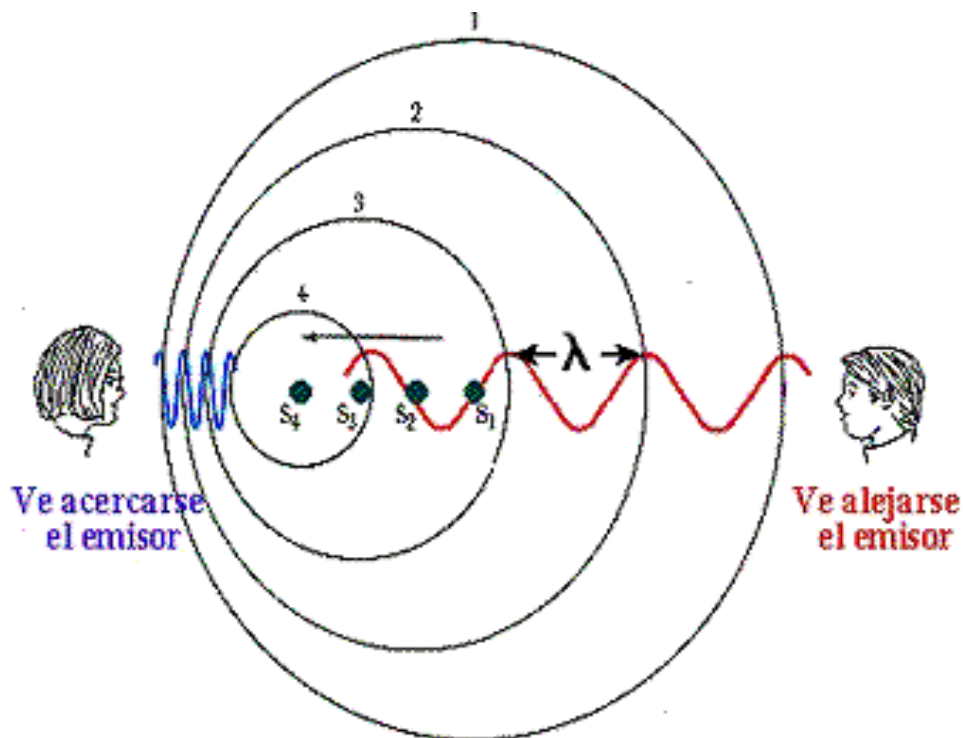


Figura 7-2-5: Efecto Doppler

Los métodos para determinar la velocidad de una galaxia están basados en el efecto Doppler, explicado anteriormente, que requiere la medida, $\Delta \lambda = \lambda$ (observada) - λ (laboratorio), del desplazamiento de las líneas espectrales,

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

donde c es la velocidad de la luz. Como el observador no está en reposo respecto a la fuente emisora sino en movimiento, es necesario introducir correcciones en la medida. Las principales son: movimiento de la Tierra alrededor del Sol, del Sol hacia el apex, movimientos internos del Grupo Local de galaxias, etc. Estas velocidades son positivas si la galaxia se aleja del observador y negativas en caso contrario. En el primer caso las líneas espectrales observadas están desplazadas hacia el lado rojo del espectro y en el segundo al azul. La aplicación de este método ha permitido conocer las velocidades de un gran número de galaxias, que son siempre positivas en las

mas lejanas. Esto es, a partir de una cierta distancia todas las galaxias están alejándose de nosotros. Esta recesión de las galaxias encierra claves de enorme importancia para comprender la formación, estructura y evolución del universo y será considerada con detalle más adelante. En [astrofísica](#) extragaláctica es frecuente expresar la velocidad mediante un parámetro z que recibe el nombre de desplazamiento hacia el rojo. Esta definido por la relación,

$$z = \frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Por ejemplo, una línea de hidrógeno $H\beta$ que aparece en el espectro de un laboratorio terrestre aproximadamente en 4860 \AA es observada en una galaxia con $z = 0.5$ en 7290 \AA





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.4. Distancias

- [Método de las Cefeidas](#)
- [Método de las Supernovas](#)
- [Ley de Hubble](#)

El procedimiento más directo y preciso, también el más tradicional, para medir distancias es la [paralaje](#) trigonométrica. A pesar del enorme progreso realizado y de las experiencias proyectadas, este método no es aplicable a la medida distancias de estrellas lejanas ni por supuesto de las galaxias. La determinación de las distancias extragalácticas es un proceso muy complejo, ya que es necesario profundizar en el cielo de forma progresiva. El método esta basado en la elaboración de unos indicadores de distancias de manera que los objetos más cercanos son utilizados para calibrar los más distantes. Estos indicadores son en su mayoría objetos cuyas propiedades permiten relacionar de la manera más rigurosa posible la [magnitud absoluta](#) con la distancia. Así restando a la [magnitud aparente](#), m_v , la absoluta, M_v , resulta un valor que es proporcional a la distancia.

No hay un indicador de distancia que pueda ser considerado perfecto. Cada candidato ha de ser sometido a test observacionales directos que permitan medir su sensibilidad a varios parámetros tales como la luminosidad de la galaxia, color, metalicidad, tipo Hubble, etc. En muchos casos no es posible llevar a cabo un control completo y además los errores de los indicadores cercanos se propagan a los más lejanos.

Método de las Cefeidas



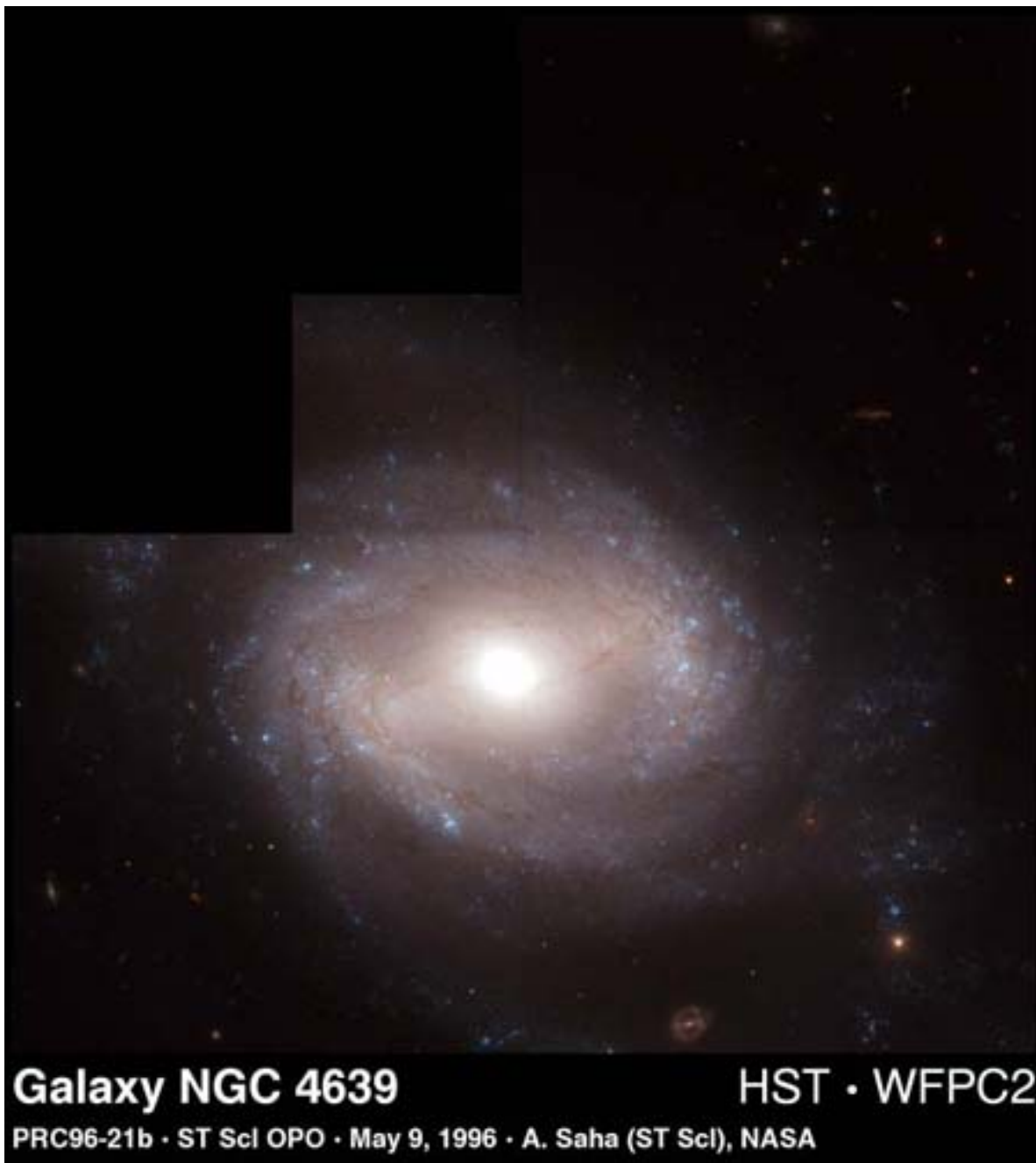


Figura 7-2-6: Método de las cefeidas

El progreso de las técnicas observacionales ha facilitado la identificación de cefeidas en galaxias situadas a distancias que pueden alcanzar los 15 Mpc (Fig. 7-2-6). Sin embargo su utilización presenta algunos problemas. Recordemos que el método para la determinación de distancias esta basado en la medida de la magnitud aparente, m_v , y el cálculo de la absoluta, M_v , a partir de una relación de la forma,

$$\langle M_v \rangle = \text{cte.} \log P + \text{cte.} \langle (B-V)_0 \rangle$$

donde el corchete representa los valores medios. Pues bien, el índice de color intrínseco $(B-V)_0$ depende de la abundancia metálica de manera que los coeficientes obtenidos en los procesos de calibración varían con la metalicidad, que no tiene porque ser la misma en todas las galaxias.

Supernovas

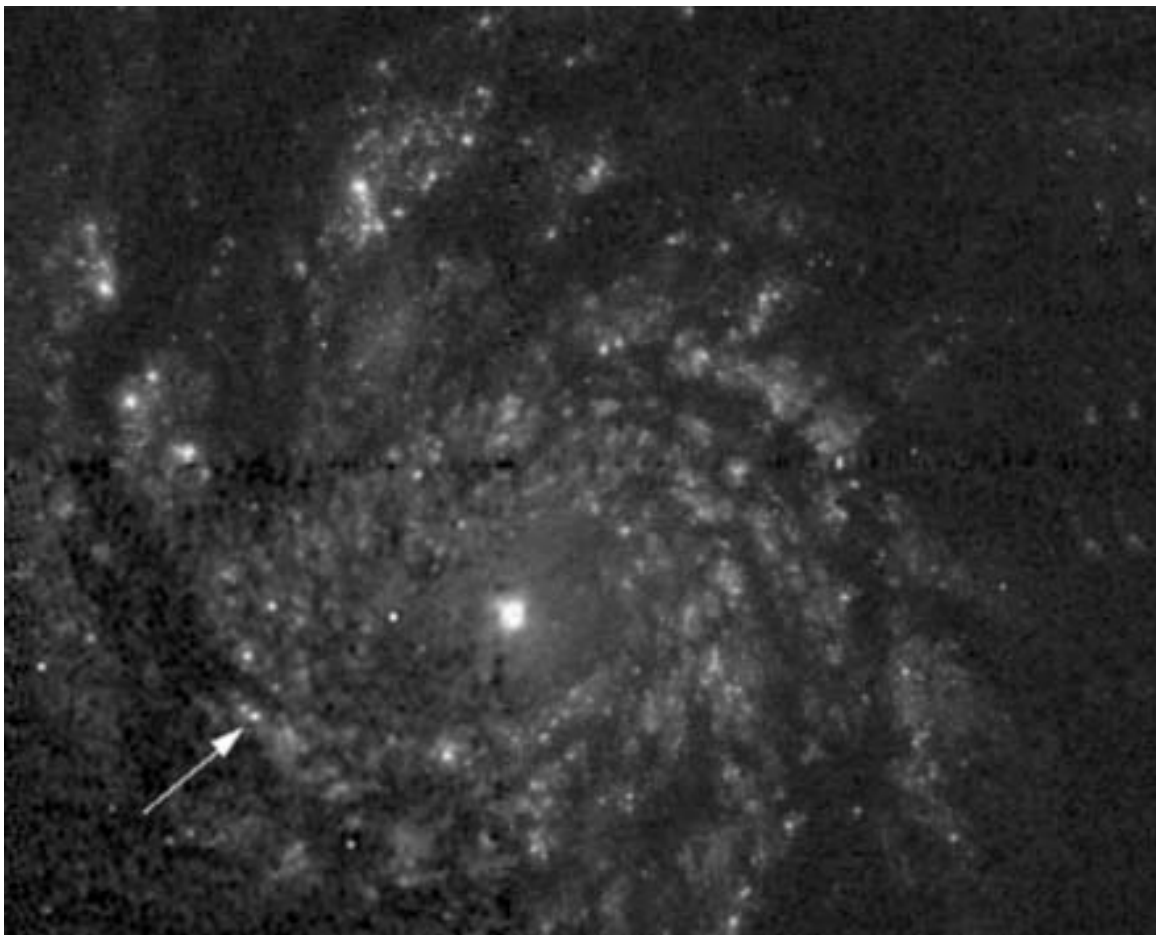


Figura 7-2-7: Supernovas

Las supernovas son extremadamente luminosas, $M \sim -19.5$ en el instante de la explosión, y ofrecen una ruta atractiva para la determinación de distancias extragalácticas (Fig. 7-2-7). Las más utilizadas son las de tipo Ia ya que sus luminosidades varían muy poco.

A los indicadores ya conocidos en la [astrofísica](#) estelar, como [Cefeidas](#), RR Lyrae, novas, supernovas, etc. hay que añadir otros más elaborados y complejos, como la relación de Tully-Fisher basada en la medida de la anchura de la línea de 21 cm observada en radio, o el método de Sunyaev-Zeldovich que requiere observaciones en el dominio de los rayos X.

Ley de Hubble

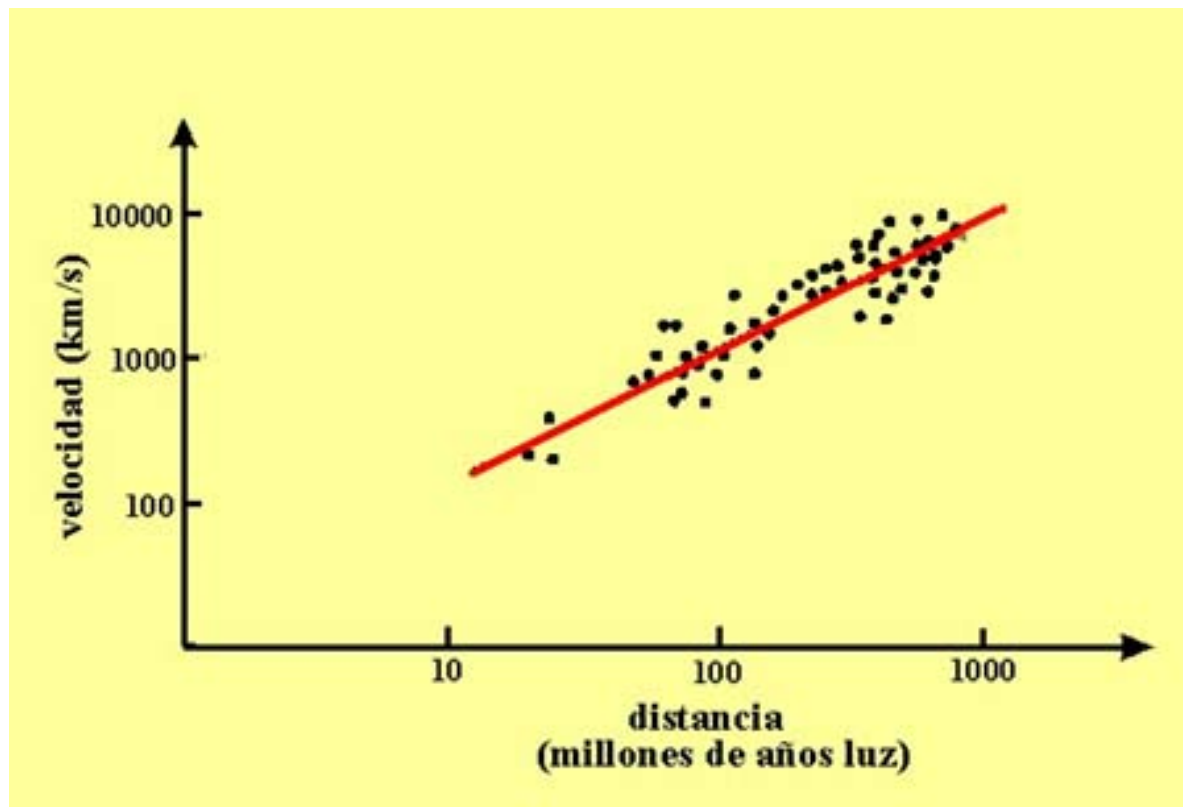


Figura 7-2-8: Ley de Hubble

La utilización de los métodos citados ha permitido la determinación de las distancias de un gran número de galaxias. Representando en un diagrama la velocidad frente a la distancia (Fig. 7-2-8) observamos que entre ambas existe una relación lineal que puede ser expresada mediante la ecuación,

$$v = c z = cte. \times d$$

que muestra que las galaxias están alejándose con una velocidad que es proporcional a la distancia d . La velocidad de la luz está representada por c y z es el [desplazamiento al rojo](#), que resulta de la aplicación de la fórmula de Doppler. Esta ley fue descubierta por Hubble y ha sido bautizada con su nombre. La constante, la pendiente de la recta, designada como H_0 , es de una enorme importancia ya que es proporcional a la edad del universo. Su determinación es uno de los grandes objetivos de la [cosmología](#) observacional. Para esta tarea es necesario observar un gran número de

galaxias, cubriendo un rango de distancias lo más amplio posible y buscando siempre la mayor la precisión en la medida de las velocidades y distancias.

Actualmente su valor está comprendido entre 60 y 70 km s⁻¹ Mpc⁻¹. La imprecisión de H₀ y la complejidad conceptual de la distancia - en el universo lejano son significativos los efectos de la geometría y dinámica del universo-, han favorecido la utilización general de z como indicativo de la distancia. Las galaxias cercanas tienen desplazamientos al rojo próximos a cero y las más distantes superan z=5.

Para el cálculo del desplazamiento al rojo de las galaxias muy lejanas, cuyas velocidades son muy elevadas, es necesario aplicar una expresión un poco más complicada, la correspondiente al efecto Doppler relativista,

$$1 + z = \sqrt{\frac{c + v}{c - v}}$$





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.5. Fotometría

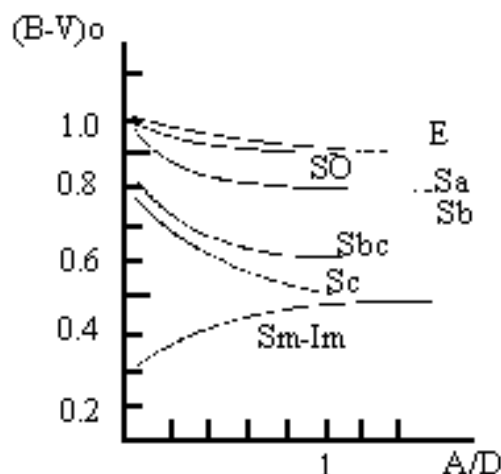


Figura 7-2-9: Fotometría

La magnitud de una galaxia proporciona datos de gran interés acerca de su estructura y principales propiedades. Sin embargo la indefinición de los bordes de la galaxia es una fuente de incertidumbre en la determinación de las magnitudes, también de sus dimensiones, y requiere la elaboración de unos criterios convenidos sobre lo que se entiende por magnitud y diámetro de una galaxia. Por ello su significado es algo diferente del que tienen en las estrellas, donde es posible estimar la totalidad de la luz emitida.

La **fotometría** fotoeléctrica, profusamente utilizada para la determinación de las magnitudes estelares, es de escasa aplicación en las galaxias en razón de la técnica utilizada y la información obtenida, que tiene un interés muy limitado. Básicamente proporciona magnitudes y colores a través de aperturas concéntricas del diafragma. Si son pequeñas sólo recogen la luz del núcleo pero al aumentarlas progresivamente entra una fracción cada vez mayor de la radiación emitida por las regiones periféricas. Observamos entonces que los colores son cada vez más azules en todos los tipos de galaxias, excepto en las irregulares. Este fenómeno es muy apreciable en las espirales y muy poco en las elípticas, donde a partir de un cierto valor de la apertura, el color permanece prácticamente constante (Fig. 7-2-9).

La interpretación de los resultados anteriores revela que las regiones extranucleares de las elípticas contienen estrellas del mismo **tipo espectral**. En las lenticulares y espirales, los colores de las componentes nuclear y del disco son muy diferentes y varían con el estado. En ellas, el núcleo es más rojo que el disco y por tanto su **población estelar** está constituida por estrellas

más frías. Las irregulares muestran un comportamiento diferente, son más azules en el centro, estrellas más jóvenes y calientes, que en el borde.

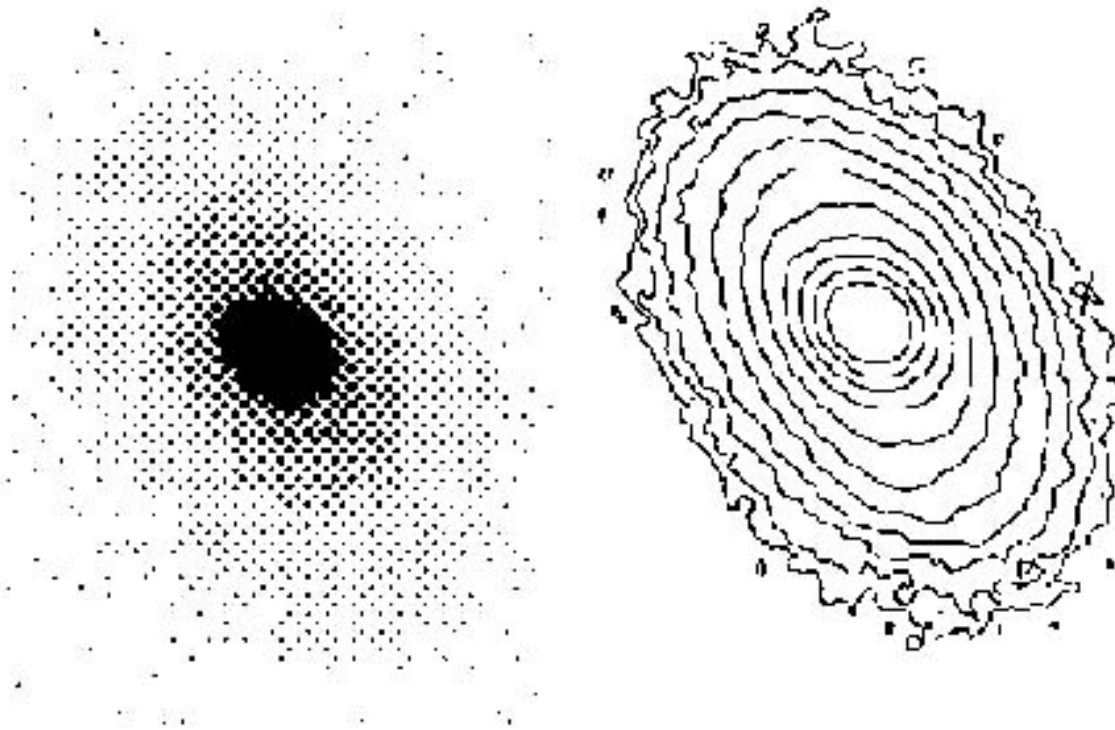


Figura 7-2-10: Isofotas

A diferencia de las estrellas, las galaxias son objetos extensos y esta propiedad facilita un análisis fotométrico más detallado, utilizando para ello imágenes adquiridas con placa fotográfica o detectores **CCD**. Es posible de esta manera establecer la variación de la **luminosidad** a lo largo del diámetro de la galaxia y construir isofotas, que son curvas que unen los puntos de igual luminosidad (Fig. 7-2-10). La isofota más alejada, la que encierra la mayor cantidad de radiación emitida, será la más representativa de la magnitud total. Para que los valores obtenidos sean independientes de las propiedades de las galaxias y de las técnicas de observación, las magnitudes se refieren siempre a una isofota concreta adoptada por convenio.

La obtención de la luminosidad debe estar precedida, como ocurre en las estrellas, por la observación de la **magnitud aparente** y su posterior corrección de las distintas perturbaciones que enmascaran el valor real. Uno de ellos está causado por la emisión del fondo del cielo, que se superpone a la propia de la galaxia. Son también importantes las extinciones de la luz producidas por los medios interestelares del objeto estudiado y de nuestra propia Galaxia. En una galaxia espiral vista de cara la **extinción** interna es prácticamente nula y pero será máxima si aparece de canto, a causa del mayor contenido de polvo del disco. Para un tipo dado de galaxia espiral, la extinción dependerá de la inclinación del disco, respecto a la dirección de observación.

Cuando la luz sale de la galaxia ha de recorrer un largo camino a través del **medio intergaláctico**. Pero al contrario de lo que sucede en el **medio interestelar**, la luz no experimenta una extinción apreciable ya que la materia intergaláctica es extremadamente tenue. Otros efectos a tener en cuenta son

causados por el desplazamiento al rojo de la luz.

Si m_λ (obs) es la magnitud aparente observada corregida ya del fondo de cielo, A_λ y A_λ (i) son respectivamente las extinciones producidas al atravesar la luz nuestra propia Galaxia y el medio interestelar de la galaxia observada y K_λ engloba los efectos producidos por el desplazamiento al rojo, la magnitud corregida que interviene en el cálculo de la absoluta será,

$$m_\lambda \text{ (corregida)} = m_\lambda \text{ (obs)} - A_\lambda - A_\lambda \text{ (i)} - K_\lambda;$$





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.10. Supercúmulos y espacios vacíos

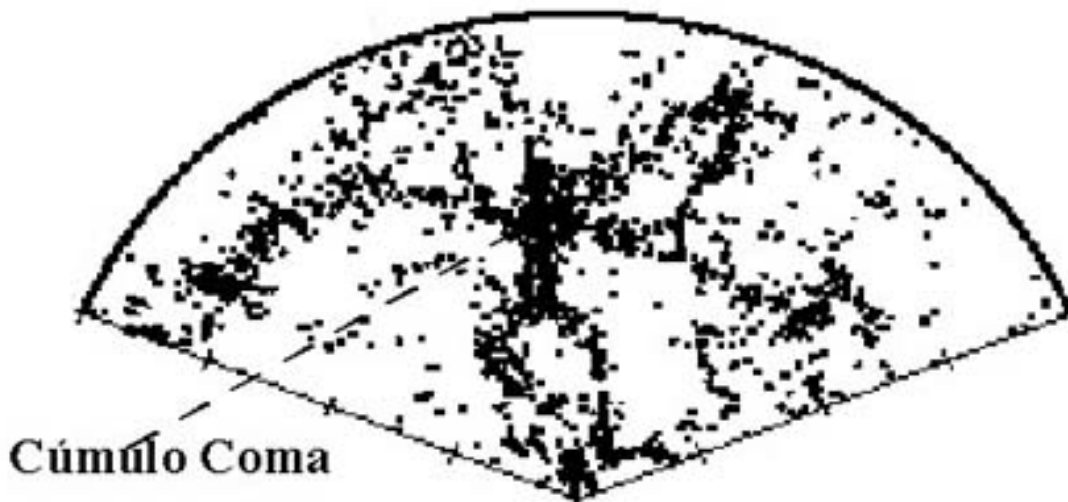


Figura 7-2-15: Supercúmulos

Las regiones más externas de los cúmulos son difusas y extensas conectando con objetos situados a grandes distancias. Se forman así unas superestructuras, llamadas supercúmulos, cuyas dimensiones pueden alcanzar los 100 o 150 Mpc. El Grupo Local está en el borde de uno de ellos, que tiene como estructura más destacada el cúmulo de Virgo. Su intensa atracción gravitacional sobre los pequeños cúmulos de su entorno provoca un fenómeno denominado caída virgocéntrica, que en el caso del Grupo Local alcanza un valor de 450 km s^{-1} .

Los filamentos que configuran los grandes supercúmulos encierran en ocasiones zonas donde la densidad de [galaxias](#) es extremadamente pequeña en relación con el medio circundante. Reciben el nombre de espacios vacíos y tienen dimensiones típicas de 50 Mpc (Fig. 7-2-15). Uno de los mayores conocidos es la Gran Muralla, que ocupa 86×240 Mpc.

Los supercúmulos y los espacios vacíos se acostumbran a estudiar conjuntamente ya que ambos son identificados a partir de una base común y es muy probable que compartan un mismo origen y representen dos efectos complementarios de un proceso físico evolutivo.







U. 2. LAS GALAXIAS

■ Cuestiones y problemas para autoevaluación

- [Cuestiones](#)
- [Problemas](#)

■ Cuestiones

1. Qué propiedades de las galaxias normales varían a lo largo de la secuencia de Hubble.
2. ¿La clasificación en elípticas, lenticulares, espirales e irregulares tiene relación con la edad de las galaxias?
3. Cómo se mide la velocidad de las galaxias.
- 4.Cuál es indicador de distancia utilizado más frecuentemente en las galaxias espirales cercanas.
5. Por qué las supernovas son unos buenos indicadores de distancias de las galaxias lejanas.
6. Cómo se determina la constante de Hubble.
7. A qué se denomina diámetro de una galaxia.
8. Principales diferencias entre los cúmulos de galaxias y los cúmulos galácticos.
9. Por qué hay galaxias que tienen desplazamientos al azul.
10. Qué procesos explican la existencia de galaxias elípticas gigantes en las regiones más densas de los cúmulos de galaxias.

■ Problemas

1. En una galaxia se observa la línea espectral $H\beta$ (λ 4861 Å) a la longitud de onda λ 4880.4 Å. Determinar su desplazamiento al rojo y velocidad. Si la constante de Hubble es $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, calcular la distancia en Mpc.

2. Una galaxia tiene un diámetro aparente de $2' 3''.8$ y su desplazamiento al rojo es de 0.0125. Determinar su masa expresándola en masas solares.



SOLUCIONES





U. 2. LAS GALAXIAS

■ Proyectos o actividades de observación

1. Observación de galaxias en el cúmulo de Virgo, con el Observatorio Astronómico Virtual. Estudio descriptivo y clasificación morfológica de las galaxias identificadas. La descripción completa de esta práctica así como los procesos necesarios para su realización están explicados con detalle en el Apéndice. Por favor, antes de acceder al Observatorio, consulte el manual de instrucciones.

2. Observar en otoño con un [telescopio](#) de 20 cm (real) las siguientes galaxias. Efectuar su clasificación en elípticas, espirales y espirales barradas. Indicar en que constelación se observan y, cuando sea posible, la orientación del plano principal de la galaxia respecto a la dirección de observación. Identificar sus diferentes estructuras.

Coordenadas

NGC 224	$\alpha = 00^{\text{h}} 42.7^{\text{m}} ; \delta = 41^{\circ} 16'$
NGC 224	$\alpha = 00^{\text{h}} 42.7^{\text{m}} ; \delta = 40^{\circ} 52'$
NGC 205	$\alpha = 00^{\text{h}} 40.3^{\text{m}} ; \delta = 40^{\circ} 41'$
NGC 598	$\alpha = 01^{\text{h}} 33.9^{\text{m}} ; \delta = 30^{\circ} 39'$
NGC 891	$\alpha = 02^{\text{h}} 22.4^{\text{m}} ; \delta = 42^{\circ} 21'$
NGC 6946	$\alpha = 20^{\text{h}} 35.0^{\text{m}} ; \delta = 60^{\circ} 08'$
NGC 7332	$\alpha = 22^{\text{h}} 37.1^{\text{m}} ; \delta = 34^{\circ} 26'$





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.9. Cúmulos de galaxias

Las agrupaciones de galaxias reciben el nombre de cúmulos de galaxias. Son muy frecuentes y variadas, por el aspecto global que presentan, el número de sus miembros y los tipos morfológicos predominantes.

Nuestra Galaxia y las [galaxias](#) más próximas como la Pequeña y Gran Nube de Magallanes, Andrómeda, M32 y aproximadamente otras treinta más, forman el Grupo Local de Galaxias que están listadas en la tabla 1. La más distante es Pegaso, situada a 1800 kpc. Cabe la posibilidad de que haya uno o dos miembros que todavía no han sido identificados, bien por ser muy débiles o estar ocultos por estructuras de nuestra propia Galaxia. Las velocidades de las galaxias del Grupo Local no siguen la ley general observada en las galaxias lejanas. Hay incluso unas 17 que están acercándose a nosotros, entre ellas Andrómeda, que lo hace a un millón de kilómetros por hora aproximadamente. La causa predominante de estos movimientos es la rotación alrededor del centro del Grupo que está gobernada por la gravitación.

La galaxia más cercana es la Gran Nube de Magallanes, 49 kpc, fue descubierta por el explorador Fernando de Magallanes y es observable únicamente desde el Hemisferio Sur. Tiene un diámetro, 6 kpc, que al dividirlo por la distancia proporciona el diámetro aparente, un parámetro muy utilizado en [astrofísica](#) que se mide en radianes o grados. Como ocurre en todas las galaxias el diámetro aparente es mucho mayor que el de las estrellas, por ello vemos las primeras como fuentes luminosas extensas donde podemos distinguir formas y estructuras diversas. La Gran Nube de Magallanes es irregular y contiene abundante gas y estrellas que son las principales responsables de la luminosidad observada, de modo similar a lo que ocurre en nuestra Galaxia. La siguiente galaxia por su distancia, 58 kpc, es la Pequeña Nube de Magallanes. Su diámetro es de 4.6 kpc y es también irregular y de propiedades similares a la Gran Nube.

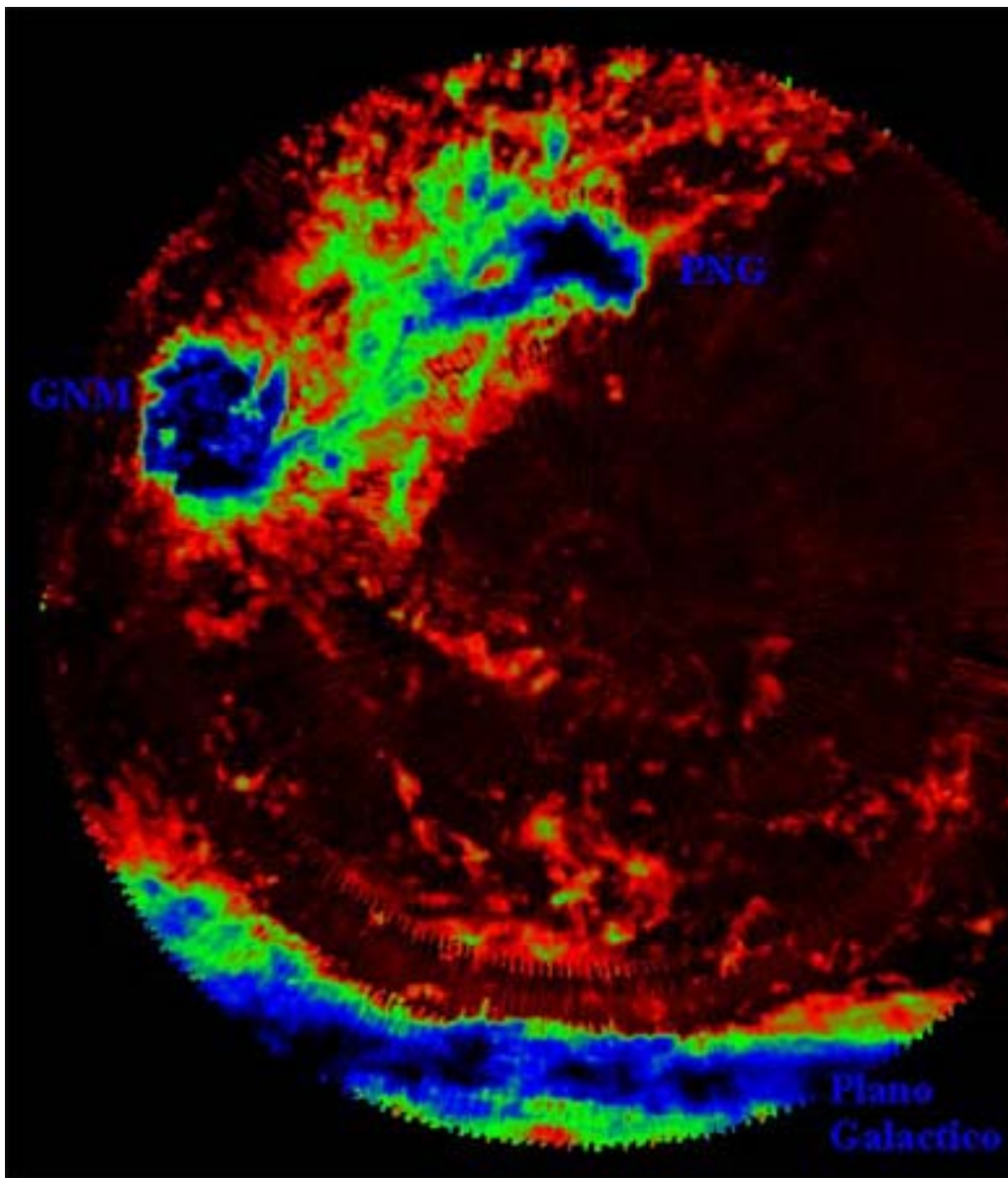


Figura 7-2- 13: Corriente de Magallanes

La proximidad de la Gran Nube de Magallanes a nuestra Galaxia suscitó la idea de que ambas podían estar relacionadas físicamente. El descubrimiento de un filamento gaseoso, que enlaza las dos a la manera de un puente, confirmó la predicción inicial y permitió trazar con detalle el camino que sigue el material de la Gran Nube hasta caer en la Galaxia. La figura 7-2-13 muestra esta corriente de Magallanes y también la existencia de un flujo de gas entre las dos Nubes. Estas estructuras evidencian procesos de interacción y colisión entre galaxias muy frecuentes en el universo y son responsables de fenómenos muy importantes, ya que concentran materia en regiones gigantescas donde provocan una formación estelar excepcionalmente intensa.



Figura 7-2-14: Galaxia de Andr6meda

Las galaxias m1s grandes y brillantes de nuestras vecindades son por este orden Andr6meda (M31) que tiene una forma espiral similar a la nuestra (Fig. 7-2-14). Est1 a poco m1s de 725 kpc y su di1metro es de 61 kpc. A 795 kpc encontramos otra espiral, M33, con 14 kpc de di1metro. La siguiente es M32 que tiene forma de elipse y est1 a la misma distancia que M31 pero su tama1o es m1s peque1o, 1500 pc.

El c6mulo de galaxias m1s cercano, a unos 15 Mpc, es Virgo, en el que est1n bien representados todos los tipos morfol6gicos. Entre los m1s grandes podemos citar el c6mulo Coma situado a una distancia de unos 200 Mpc. Su forma es esf6rica con un di1metro de 5 Mpc y una masa mil billones de veces m1s grande que la del Sol.

De manera similar a otros c6mulos de su mismo tipo, Coma tiene una densidad de galaxias muy alta en el centro que favorece la colisi6n de galaxias, produciendo un verdadero [canibalismo gal1ctico](#) mediante el cual una galaxia incrementa su masa y [luminosidad](#) capturando a otras de menor tama1o. La galaxia depredadora, mediante atracci6n o marea, succiona

primero el gas y las regiones externas de la más débil. A continuación, si la distancia es suficientemente próxima, repite el proceso con las estrellas, que acaban siendo incorporadas a su propia [población estelar](#). Este fenómeno tiene lugar de manera suave, sin los efectos catastróficos que tendrían las muy improbables colisiones estelares, que provocarían la liberación de enormes cantidades de energía. El resultado final es la generación en el centro del cúmulo de galaxias elípticas gigantes, cuya gran luminosidad facilita su observación a grandes distancias, y justifican la escasa representación de espirales y sobre todo irregulares.

La masa de los cúmulos puede ser calculada sumando las masas de las galaxias miembros o bien aplicando el teorema del virial, en un proceso similar al seguido en el caso de las galaxias elípticas. En el primer caso resulta la masa de la materia luminosa y en el segundo la dinámica. Los resultados muestran diferencias importantes en el sentido de que la segunda es mayor que la primera lo que indica la existencia de [materia oscura](#).



[ÍNDICE](#)[ACTIVIDADES](#)

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

Cuestiones y problemas para autoevaluación

- [Cuestiones](#)
- [Problemas](#)

Cuestiones



1. Cuáles son las características de las estrellas de la Población I y de la Población II.
2. ¿Qué es el halo galáctico?
3. ¿Por qué la descripción en radio de la Galaxia es más completa que la descripción en el óptico?
4. Cómo se distribuyen los cúmulos globulares y galácticos en la Galaxia.
5. ¿Por qué es importante la línea de 21 cm para determinar la masa y la estructura de la Galaxia?
6. Qué forma tiene nuestra Galaxia y qué es su curva de rotación.
7. Cómo es la rotación de la Galaxia y la rotación de los brazos espirales.
8. ¿A qué se debe la estructura espiral de la Galaxia?
9. ¿Qué implica que la curva de rotación de nuestra Galaxia sea plana?
10. ¿Cómo se relaciona el contenido metálico de una estrella con su edad?
11. ¿Cómo y por qué se mueven las estrellas durante la noche y de qué manera interviene la latitud?

Problemas



1. Calcular la masa total que tendría la Galaxia dentro de un radio de 20 kpc si la velocidad de rotación lineal a esa distancia es 240 km/s

2.- Calcular cuanto tiempo tarda el Sol en dar una vuelta alrededor del centro de la Galaxia. ¿Cuántas vueltas ha dado a lo largo de su vida?



SOLUCIONES





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

Soluciones

- [Cuestiones](#)
- [Problemas](#)

Cuestiones

3. Cómo se mide la velocidad de las galaxias.

Utilizando la relación Doppler.

4. Cuál es indicador de distancia utilizado más frecuentemente en las galaxias espirales cercanas.

Las Cefeidas.

5. Por qué las supernovas son unos buenos indicadores de distancias de las galaxias lejanas.

Son muy luminosas y se observan a grandes distancias.

Problemas

1. En una galaxia se observa la línea espectral $H\beta$ (λ 4861 Å) a la longitud de onda λ 4880.4 Å. Determinar su desplazamiento al rojo y velocidad. Si la constante de Hubble es $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, calcular la distancia en Mpc.

$$d = 16 \text{ Mpc}$$







ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.6. Contenido estelar

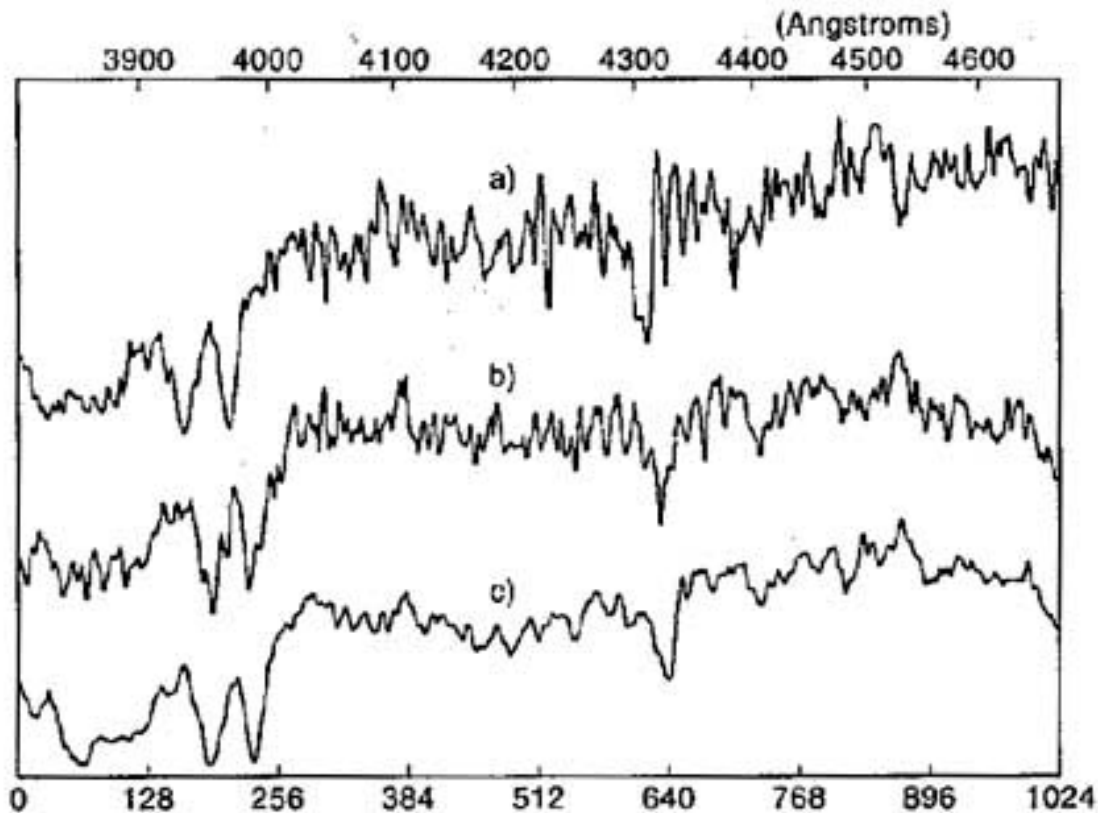


Figura 7-2-11: Espectro de absorción

Las observaciones fotométricas muestran que la luz emitida por las **galaxias** esta originada fundamentalmente por su **población estelar**. La situación ideal sería aquella que permitiera la observación individualizada de las estrellas y el estudio directo de sus propiedades. Pero este objetivo sólo es posible alcanzarlo de modo parcial en las galaxias más próximas. Para las restantes, hemos de contentarnos con la observación de la luz integrada, que resulta de la superposición de la radiación que emiten las estrellas.

El **espectro de absorción** constituye un excelente indicador que permite, mediante su modelización obtener el censo estelar. Sin embargo su simple inspección revela que las estrellas gigantes de tipo K0 (Fig. 7-2-11) dominan la luz de las elípticas y a medida que avanza la secuencia de Hubble, la población estelar responsable de la luz es cada vez más caliente, de tipos G0 en las Sc y A en las irregulares. Para una galaxia determinada, las clases espectrales estelares son diferentes en las regiones ultravioleta e infrarroja.



[ÍNDICE](#)[AUTOEVALUACIÓN](#)[ACTIVIDADES](#)

U. 2. LAS GALAXIAS

2.7. Dimensiones

Durante muchos años los diámetros de las galaxias se medían visualmente en las imágenes recogidas en placas fotográficas. Los resultados tenían errores difíciles de evaluar. En principio sólo podemos medir lo que vemos y las regiones luminosas son una fracción, en algunos casos pequeña, de la [galaxia](#) real, cuyos límites son difusos, indefinidos e inobservables. El procesado de la emulsión fotográfica y la valoración de los tiempos de exposición constituyen una fuente de errores, a los que hay que añadir los inherentes a la utilización del ojo como instrumento de medida. Hay que agregar además que el diámetro de la imagen depende de su inclinación respecto a la dirección de observación y también de la [extinción](#), que disminuye el [brillo](#) superficial.

Todo ello ha llevado a la necesidad de definir un parámetro que pueda ser utilizado como un indicador objetivo y reproducible del diámetro de una galaxia. Actualmente se define como radio de la galaxia el de una isofota de 25 magnitudes por segundo de arco al cuadrado que comprende entre el 70 y el 90% de la [luminosidad](#) emitida por las galaxias normales.

Estos diámetros fotométricos no son absolutos, sino que dependen de la isofota. Pueden ser distintos en dos galaxias de las mismas dimensiones pero con densidades de luminosidad diferentes. Los diámetros lineales, en cuyo cálculo interviene la distancia, están mayoritariamente comprendidos entre 0.1 y 50 kpc.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 2. LAS GALAXIAS

2.8. Masas

- [Curvas de rotación](#)
- [Dispersión de velocidades](#)
- [Galaxias binarias](#)

La masa de una galaxia es un parámetro cuyo conocimiento es indispensable para la elaboración de modelos dinámicos, está relacionada con propiedades fundamentales y aporta información de interés cosmológico. Puede ser determinada a partir de los siguientes métodos:

- Curvas de rotación (disco de las espirales)
- Dispersión de velocidades (elípticas y bulbos de las espirales)
- Galaxias binarias.

Curvas de rotación

Las [galaxias](#) espirales contienen una fracción de su masa en forma de gas interestelar que puede estar bajo la forma de gas caliente contenido en [nebulosas](#) de emisión (regiones HII) o frío, localizado en las zonas externas de la galaxia. En el primer caso puede ser observado en el rango óptico y en el segundo en radiofrecuencias. La energía cinética de este material, y también de las estrellas, es principalmente rotacional . En la vecindad solar la velocidad está comprendida entre los 200 y 300 km s⁻¹. Puede haber movimientos aleatorios no circulares, pero son pequeños y raramente superan los 20 km s⁻¹.

Consideramos, de modo simplificado una [región HII](#) situada a una distancia R del centro, que tiene una velocidad V(R). Si F es el potencial gravitacional resulta,

$$\frac{V(R)^2}{R} = \frac{\partial \Phi}{\partial R}$$

En el caso más simple, con un potencial newtoniano,

$$M = \frac{V^2 R}{G} = 2 \times 10^{10} \left(\frac{V}{250} \right)^2 \left(\frac{R}{10} \right)$$

V en km s^{-1} , R en kpc y M en masas solares. Es necesario observar a la mayor distancia posible del centro, con el fin de que la materia contenida dentro de R represente la totalidad de la galaxia. Como no existe gas caliente, regiones HII, a distancias suficientemente grandes del centro, es necesario observar también gas frío, que emite en radiofrecuencias donde es muy intensa la línea de hidrógeno de 21 cm.

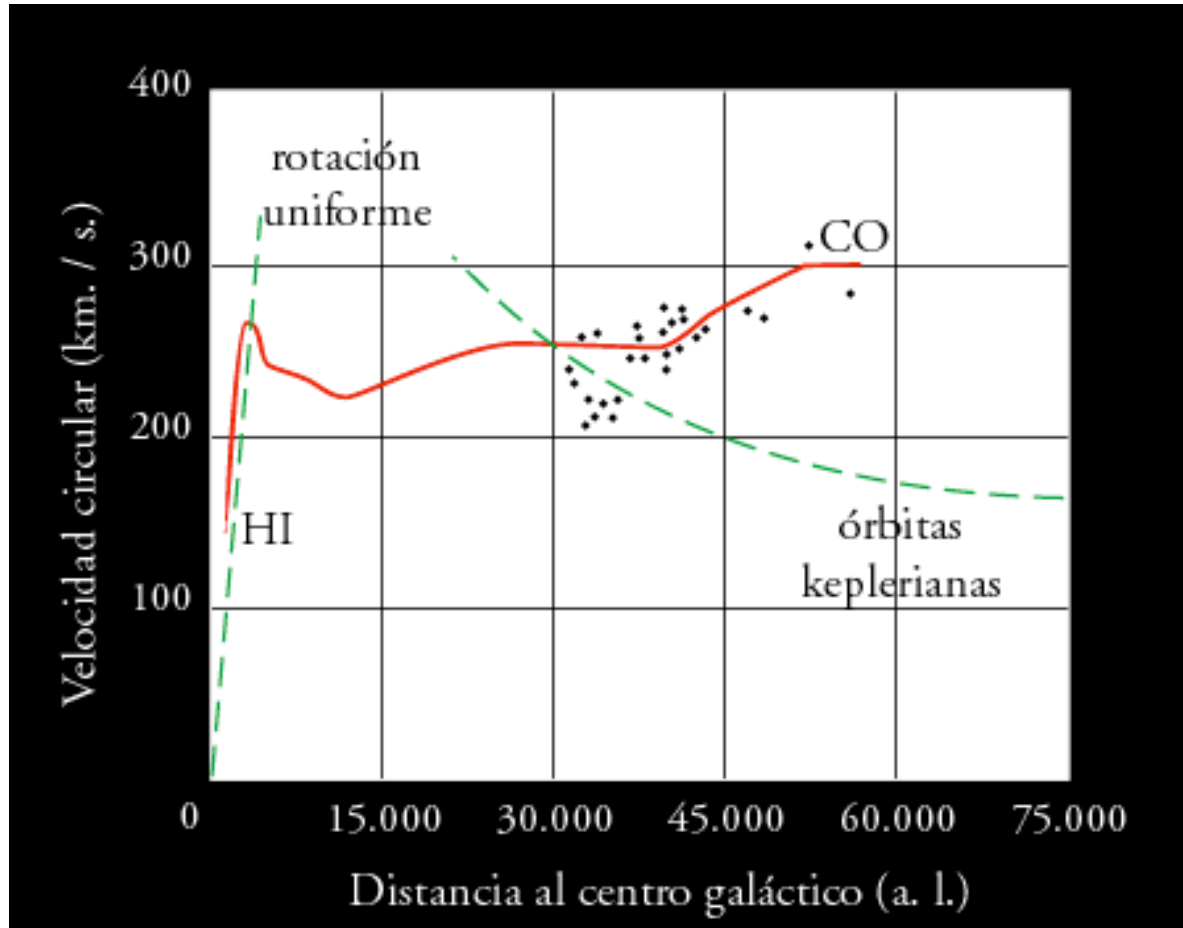


Figura 7-2-12: Curva de rotación

Al representar la velocidad de rotación, V , en función de R resulta la llamada curva de rotación (Fig. 7-2-12), obtenida a partir de observaciones ópticas y radioastronómicas. Modelando la curva de rotación resulta una expresión de gran utilidad entre la masa, el valor máximo de la velocidad, V_{max} , y la distancia al centro correspondiente, R_{max} ,

$$M = \frac{3}{2G} R_{\text{max}} V_{\text{max}}^2$$

que es muy útil, ya que la anchura de la línea de 21 cm es proporcional a $2V_{\text{max}}$. Particularmente interesante es la relación entre V_{max} y la [luminosidad](#) de una galaxia, dada por

$$L = \text{const. } V_{\text{max}}^4$$

que constituye la base del método de Tully-Fisher para la determinación de distancias extragalácticas.

El régimen plano de la curva de rotación a grandes distancias es un resultado de carácter general e implica que la masa crece linealmente con el radio, ya que la velocidad es constante. Por otro lado la [fotometría](#) superficial muestra que la luminosidad disminuye con R hasta un punto en que se confunde con el fondo de cielo. Esto implica que la relación masa luminosidad crece con la distancia. Por tanto existe una fracción de la materia de la galaxia, que puede ser muy grande, que no es luminosa y puede estar almacenada en el [halo](#).

La naturaleza y propiedades de esta materia oscura son objeto de una importante controversia. Si es de naturaleza bariónica, materia ordinaria, los responsables serían básicamente objetos colapsados, [protoestrellas](#) abortadas antes del inicio de las reacciones nucleares del interior (estrellas marrones), etc. Los contribuyentes no bariónicos serían partículas masivas que interactúan débilmente y cuya identidad es desconocida (son candidatos los neutralinos, axiones etc.). Sin embargo su existencia está predicha por los modelos de [nucleosíntesis](#) primordial y apoyada en la interpretación de la radiación de fondo en microondas.

Las masas de las galaxias espirales están mayoritariamente comprendidas entre los 6×10^9 y $2 \times 10^{12} M_{\odot}$.

■ [Dispersión de velocidades](#)

Las estrellas se mueven en las galaxias en órbitas determinadas por la distribución de masas. Aun cuando las colisiones son posibles, su frecuencia es muy baja en relación con la vida media de la galaxia. Podemos considerar ésta como un sistema en equilibrio y aplicar el teorema del Virial,

$$2T + W = 0$$

donde T es la energía cinética,

$$T = \frac{1}{2} M v^2$$

y W es la energía gravitacional,

$$W = - \frac{GM^2}{R}$$

Las estrellas de las galaxias elípticas tienen órbitas altamente excéntricas, por ello sus movimientos proyectados sobre el cielo aparecen como oscilaciones alrededor del centro, y pueden ser representados por una distribución de velocidades caracterizada por una dispersión σ , de tal forma que

$$\langle v^2 \rangle = \sigma^2$$

sustituyendo,

$$\frac{1}{2}M\sigma^2 = \frac{GM^2}{R}$$

$$M = \frac{R\sigma^2}{G}$$

Desde el punto de vista práctico el principal problema es la medida de σ . El espectro de una galaxia elíptica es similar al de una estrella de su mismo **tipo espectral** (K0 III, en el rango λ 3800-4500). La diferencia principal es que las líneas del espectro de la galaxia son más anchas. El ensanchamiento está directamente relacionado con la dispersión de velocidades. Para determinar σ se obtienen con los mismos instrumentos, **telescopio** y **espectrógrafo**, y la misma resolución, los espectros de la galaxia problema y el de una estrella normal K0 III. Aplicando sobre el espectro de la estrella K0 III un algoritmo que contiene σ como parámetro variable, se calculan diferentes espectros ensanchados. El valor buscado de σ será aquel que haga coincidir el espectro teórico con el observado de la galaxia.

El método permite estimar aceptablemente la masa de una galaxia o el bulbo de una elíptica. Su aplicación rigurosa requiere introducir la energía cinética de rotación del sistema, que sabemos pequeña, la morfología de la galaxia y una distribución gravitacional más compleja que la newtoniana.

Aplicando el método de la dispersión de velocidades resultan para las galaxias elípticas unas masas predominantemente comprendidas entre 3.6×10^{10} y $3.5 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Galaxias binarias

En principio el método para determinar las masas de pares de galaxias es el utilizado en los sistemas binarios estelares. Pero en la práctica sólo es posible medir las velocidades radiales, V_r , y la separación aparente proyectada, a , de las dos galaxias. Generalmente, dos galaxias ligadas físicamente están separadas menos de 0.2 Mpc. Asumiendo una velocidad relativa de 200 km s^{-1} y una separación media de 0.15 Mpc, el periodo orbital sería de 5×10^9 años, del orden de la edad del Sol, que hace imposible la determinación rigurosa de los parámetros de la órbita.

Si M_1 y M_2 son las masas de las galaxias del sistema, V es la velocidad relativa verdadera de las dos galaxias y a_0 su separación aparente, proyectada en la dirección de observación, promediando los restantes parámetros orbitales resulta,

$$M_1 + M_2 = 0.29 \frac{\Delta v^2}{G} a_0$$

esta expresión proporciona valores medios que son útiles para el estudio de muestras de galaxias. Su aplicación a pares concretos puede servir para

contrastar las masas de los miembros obtenidas por algunos de los procedimientos explicados anteriormente.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.7. El centro galáctico

El conocimiento del centro de la Galaxia se basa en observaciones radio e infrarrojas. En la región óptica el centro está bloqueado por las nubes oscuras del brazo espiral de Sagitario aproximadamente a 2 kpc de nosotros. El centro de nuestra Galaxia es interesante estudiarlo porque puede ser una versión a pequeña escala de los núcleos activos mucho más violentos de algunas galaxias externas. Ya que las galaxias activas contienen un [agujero negro](#) supermasivo de $10^7 M_{\odot}$ (Ver: [cuasares](#) y otras galaxias activas) puede ser que también haya un gran agujero negro en el centro galáctico.

Al acercarse al centro galáctico la densidad estelar continua aumentando hasta un pico central (en el núcleo galáctico hay una densidad estelar de unas 50 000 estrellas por [parsec](#) cúbico, un millón de veces mayor que en la vecindad solar). En contraste, el gas galáctico tiene un agujero central de radio unos 3 kpc. Según algunos modelos el bulbo central de la Galaxia tiene forma de barra, cuyo efecto es canalizar el gas dentro del núcleo galáctico dejando una zona libre de gas a un radio mayor.

Dentro del agujero central hay un disco de gas nuclear denso, su radio es de 1.5 kpc en hidrógeno neutro, pero la mayor parte de su masa es molecular y concentrada dentro de 300 pc del núcleo. La masa molecular de gas es del orden de $10^8 M_{\odot}$, o el 5% de la masa molecular total de la Galaxia, estas nubes moleculares están probablemente confinadas por la presión del gas de los alrededores que es muy caliente, $T = 10^8$ K. Este gas caliente puede expandirse verticalmente formando un viento galáctico, el gas perdido por el viento o por formación estelar es repuesto por gas que cae de las partes más exteriores o de radio mayor.

Los 10 pc centrales corresponden a la fuente de radio continuo Sgr A y a un cúmulo estelar denso que se observa en infrarrojo. Hay también gas molecular con movimientos complejos y signos de formación estelar activa. Dentro de Sgr A hay una fuente de radio continuo puntual única conocida como Sgr A*, su posición dentro de 1" coincide con el centro del cúmulo de estrellas que es mucho más denso que cualquier otro observado en el [disco galáctico](#). Sí el centro galáctico contiene un agujero negro Sgr A* es el candidato.

La [luminosidad](#) del centro galáctico puede deberse al cúmulo de estrellas central, aunque no se excluye la posibilidad de la existencia de un gran agujero negro. La distribución de masa central se puede estimar modelando los movimientos observados de las estrellas y el gas, el mejor ajuste con las observaciones se obtiene con los modelos que tienen una distribución de

masa extensa, junto con una masa puntual de unos pocos $10^6 M_{\odot}$. El tamaño de Sgr A* es menos de 10 ua, la explicación más plausible para esta estructura compacta es que Sgr A* es un agujero negro de unos pocos millones de masas solares.





U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

Proyectos o actividades de observación

1. El cúmulo globular M15 es uno de los más brillantes. Se sospecha que pudiera tener un agujero negro en el centro. Realizar primero su identificación a simple vista en la constelación de Pegasus. A continuación utilizando un [telescopio](#) (real) de 20 cm observar las estrellas miembros. Establecer la variación de la densidad superficial de estrellas con la distancia aparente al centro del cúmulo.

Coordenadas: $\alpha = 21^{\text{h}} 30^{\text{m}}$; $\delta = 12^{\circ} 10'$





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LÁCTEA

1.1. Introducción

E.S.O.

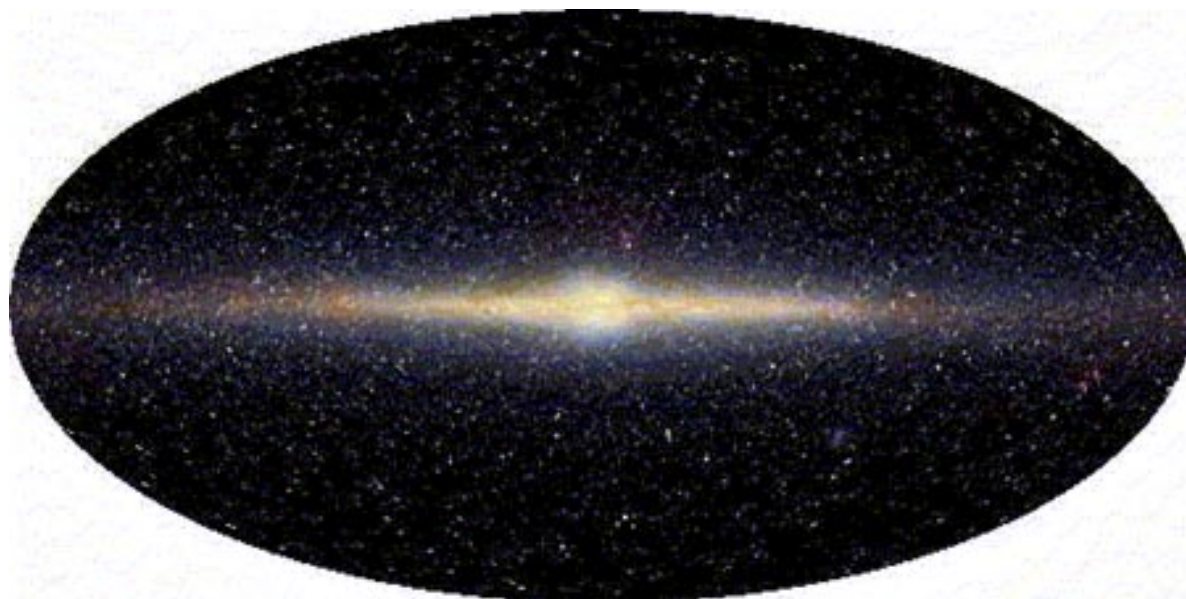


Figura 7-1-1: Galaxia similar a la Vía Láctea

Todas las estrellas que son visibles durante la noche pertenecen a nuestra Galaxia y hemos oído decir muchas veces que son tantas que no pueden contarse. De hecho en una noche clara, muy clara, a simple vista solo podemos discernir unas doscientas y la [Vía Láctea](#) (o camino de Santiago), que aparece como un trazo continuo en el cielo. Pero con con la ayuda de unos prismáticos podemos ver un millón de estrellas más débiles, grandes nubes de gas de forma variada y la Vía Láctea como una banda constituida por una miriada de estrellas débiles que están aparentemente muy próximas y que muestran una variación continua de tonos. Todos estos objetos forman parte de nuestra Galaxia que recibe también el nombre de Vía Láctea. Como estamos en su interior no podemos conocer su aspecto. Esta información la adquirimos estudiando sus diferentes estructuras y relacionando los resultados con otras [galaxias](#) similares a la nuestra. Es el caso de la figura 7-1-1, que muestra un bulbo central rodeado de un disco más plano. Si nuestro Sol perteneciera a ella, estaría situado en el disco a unos dos tercios del centro y la Tierra próxima al Sol, sería indistinguible

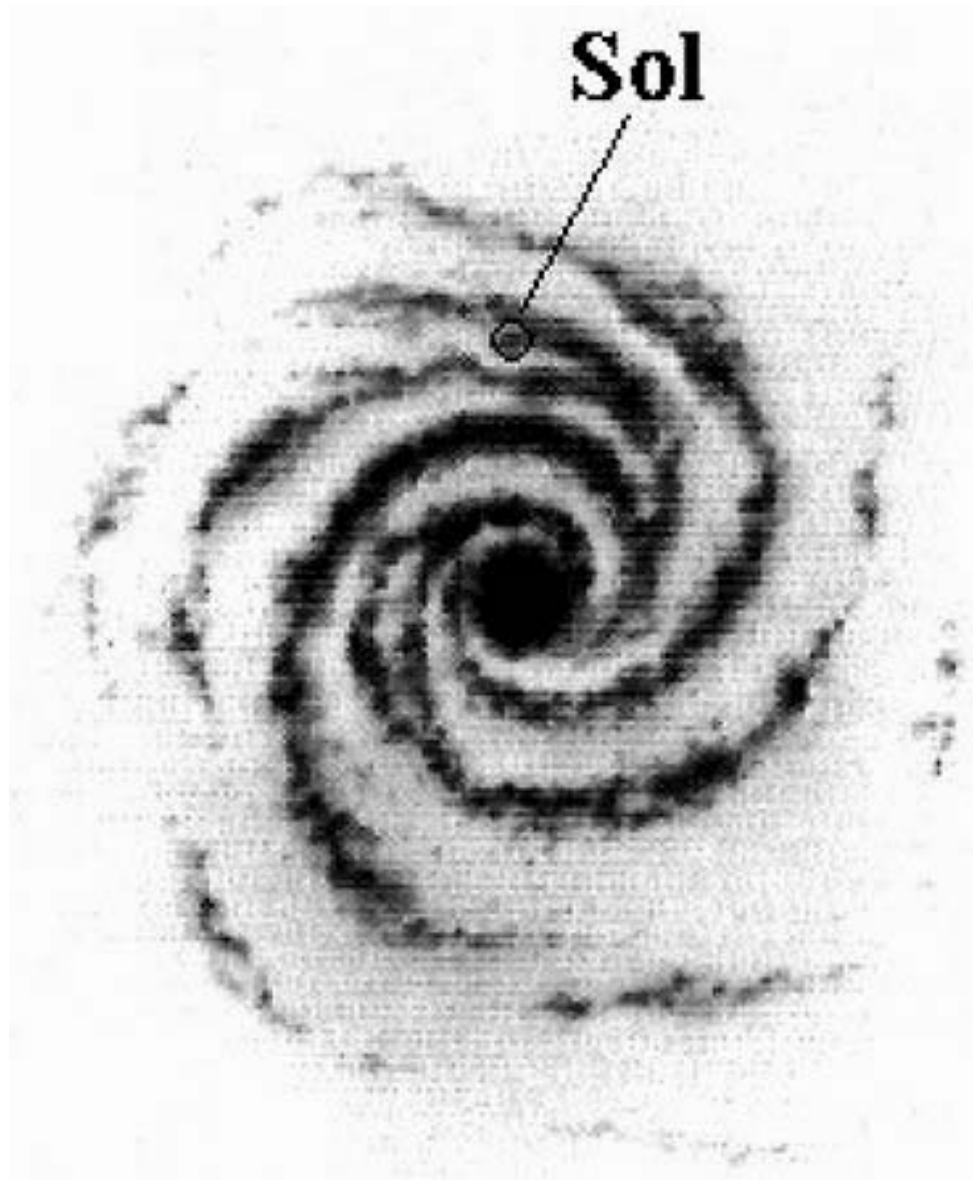


Figura 7-1-2: Galaxia similar a la Via Láctea y posición del Sol.

Vista de frente nuestra Galaxia es similar a la de la Figura 7-1-2, un bulbo central que parece una masa circular rodeado de un disco que no es uniforme sino que tiene unas zonas más intensas los cuatro brazos espirales, simétricos dos a dos, que arrancan del centro del bulbo. El Sol se encuentra justamente en el borde interno de uno de estos brazos.

Con la descripción anterior, podemos comprender fácilmente la apariencia de nuestra [Galaxia](#) vista desde la Tierra; en la dirección del disco podemos ver una espesa aglomeración de estrellas. Esta es la Via Láctea, con una delgada línea de polvo que parece dividirla en dos partes casi iguales. En la dirección del centro del bulbo, la Via Láctea parece ensancharse. En otras direcciones vemos las estrellas vecinas más brillantes, distribuidas por todo el cielo.







ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

Soluciones

- [Cuestiones](#)
- [Problemas](#)

Cuestiones

2. ¿Qué es el halo galáctico?

La región más externa, y menos densa, de nuestra Galaxia.

3. ¿Por qué la descripción en radio de la Galaxia es más completa que la descripción en el óptico?

Las radioondas no sufren extinción estelar y las estructuras emisora se pueden observar a mayor distancia.

4. Cómo se distribuyen los cúmulos globulares y galácticos en la Galaxia.

Globulares en el halo y galácticos en el disco de la Galaxia.

Problemas

1. Calcular la masa total que tendría la Galaxia dentro de un radio de 20 kpc si la velocidad de rotación lineal a esa distancia es 240 km/s

$$M = 2.6 \times 10^{15} M_{\odot}$$





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.6. Esquema teórico de la estructura espiral

- [Teoría de las Ondas de densidad](#)

Como hemos dicho anteriormente los brazos espirales están formados por nubes interestelares, estrellas jóvenes O y B, cúmulos abiertos y [nebulosas](#) de emisión. La conclusión obvia es que los brazos de espiral son las partes del [disco galáctico](#) donde la formación estelar tiene lugar. Un problema importante es entender como la estructura espiral persiste durante largos periodos de tiempo, ya que si la duración fuese corta las galaxias espirales serían raras en el Universo, hecho que es contrario a las observaciones, los 2/3 de las [galaxias](#) observadas son espirales. Sabemos que el disco tiene rotación diferencial, las partes internas del disco galáctico rotan más rápidamente que las partes externas, esto hace imposible que cualquier estructura a gran escala ligada a la materia del disco sobreviva mucho tiempo.

Sabemos que el Sol a unos 8 kpc del centro tarda unos 225 millones de años en recorrer su órbita galáctica alrededor del centro. Como tiene unos 4500 millones de años, el sistema solar ha dado unas 20 vueltas alrededor del centro desde que se formó. Sin embargo, en el mismo tiempo, las estrellas más próximas al centro han dado muchas más vueltas y las estrellas del borde del disco han dado menos vueltas. El resultado es que una estructura espiral constituida por el mismo grupo de estrellas y gas necesariamente se disiparía y desaparecería en unos pocos cientos de millones de años. Así los brazos de espiral no pueden ser simplemente regiones densas de formación estelar orbitando junto con el resto del disco galáctico. Esto es, los brazos espirales no pueden participar de la rotación diferencial.

[Teoría de las Ondas de densidad](#)



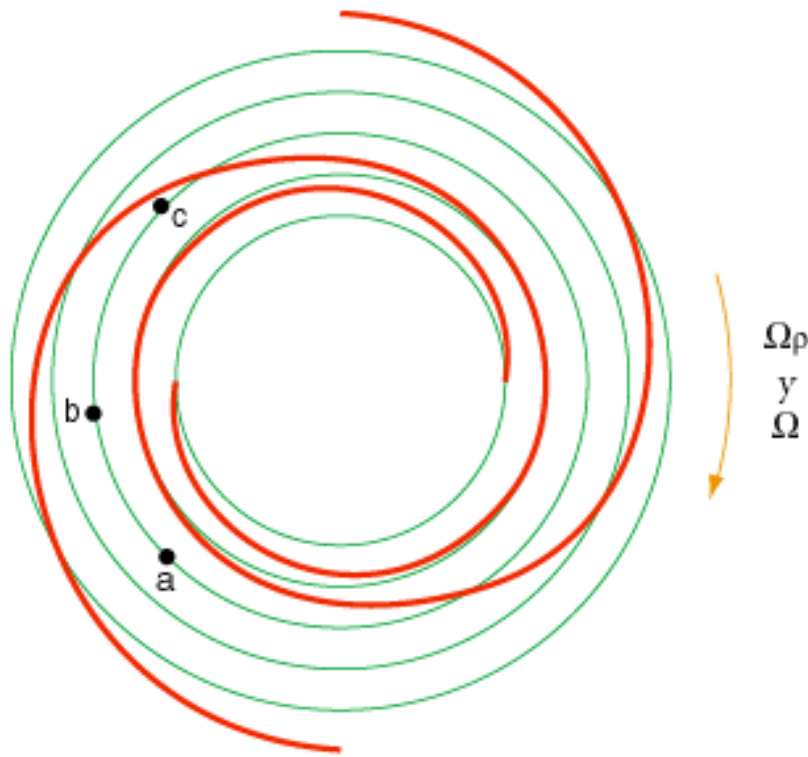


Figura 7-1-9: El disco galáctico en rotación. Las estrellas, el gas y el polvo se mueven en órbitas circulares con su velocidad local de rotación, Ω , mientras que la trayectoria espiral gira rígidamente con velocidad angular Ω_p . El resultado es una rotación rígida superpuesta a un disco con rotación diferencial.

Lin y Shu en 1963 han desarrollado una teoría que trata de explicar como se pueden mantener los brazos espirales, es la llamada teoría de *ondas de densidad*. En este modelo los brazos de espiral se consideran áreas de mayor densidad en el disco galáctico a través de las cuales las estrellas, el gas y el polvo se mueven. Los brazos de espiral son pues ondas de densidad que recorren una trayectoria rotando rígidamente en un disco con rotación diferencial. La base física del modelo de ondas de densidad se ilustra por la respuesta del gas, polvo y estrellas a un campo gravitacional rígido en forma espiral, superpuesto a un disco en rotación diferencial. La Figura 7-1-9 muestra el disco rotando en la dirección de las agujas del reloj, las líneas representan órbitas circulares que existirían si no hubiese el campo gravitacional en espiral. El mínimo de la perturbación gravitacional en espiral es la línea fuerte, que gira rígidamente con velocidad angular Ω_p en la misma dirección que el polvo, gas y estrellas que se mueven con su velocidad local de rotación, Ω . El resultado es una rotación rígida superpuesta a un disco con rotación diferencial.

Según esta teoría la Galaxia se trata como un fluido de estrellas, polvo y gas en el que se supone la existencia de una perturbación del potencial gravitacional en forma espiral, que se superpone a la rotación galáctica. Esta onda se desplaza con velocidad angular constante, en nuestra Galaxia la velocidad es $\Omega_p = 11 - 14 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$, luego tarda en dar una revolución $2\pi / \Omega_p = (2\pi / 11) 3.086 \times 10^{16} = 5 \times 10^8$ años, la onda de densidad se mueve unas 2.5 veces más lenta que las estrellas y el gas (el Sol tarda unos 225×10^6 años).

Continuando con la Figura 7-1-9 si consideramos en **b** una órbita no perturbada, ya que equidista de dos brazos la fuerza gravitacional neta es cero y su órbita no se perturba permanece circular. Continuando en su movimiento tiende a moverse más cerca del brazo externo en el punto **c**, donde dominará su fuerza gravitacional y la materia tiende a moverse en

órbitas ligeramente mayores donde, según las leyes de Kepler, su velocidad lineal es menor. Argumentos similares indican que las estrellas o el gas que dejan el brazo espiral cerca del punto **a** tardan más en alcanzar el punto **b** en su movimiento alrededor del centro. Como resultado las estrellas, el polvo y el gas se acumulan a lo largo del potencial gravitacional en espiral. Este proceso tiende a automantenerse, ya que la materia añadida mantiene el potencial existente conforme otra lo deja. Las estrellas y el gas se mueven, por tanto, en órbitas perturbadas representando, el potencial gravitacional en espiral, la perturbación. La frecuencia con que la materia del disco produce un potencial gravitacional en espiral mínimo, está determinada por la velocidad local de rotación angular de la materia respecto al disco: $\Omega - \Omega_p$.

El papel que desempeña la teoría de las ondas de densidad en el mantenimiento de la estructura espiral se puede ilustrar con el siguiente ejemplo: Supongamos una carretera por la que circula en una hora punta un camión a 20 km/h. Debido a esta circunstancia los vehículos que circulan en el mismo sentido, por ejemplo a una velocidad media de 80 km/h, son obligados a reducirla cuando llegan a sus proximidades, produciéndose así lo que se conoce como un tapón de tráfico, donde la densidad de vehículos es máxima. Pasado un tiempo pueden adelantar al camión y consiguen alcanzar otra vez su velocidad media. En el curso del tiempo irán renovándose los vehículos que forman el tapón. Si se fotografía la carretera en instantes diferentes desde un helicóptero, se observa que el tapón se desplaza a la misma velocidad que el camión, que es distinta de la velocidad media de los coches. En nuestra Galaxia, los vehículos son las estrellas, el polvo y el gas y el tapón de tráfico es la onda de densidad, que se mueve a una velocidad diferente y tiene forma de espiral, frena a los objetos estelares a su llegada, permanecen allí un tiempo y después salen del brazo espiral.

Este modelo de ondas de densidad predice la formación de estrellas a lo largo de los bordes internos de los brazos espirales. Los brazos de espiral son simplemente trayectorias que se mueven a través del disco, que no transportan grandes cantidades de materia de un lugar a otro. Las ondas de densidad se mueven a través de las estrellas y gas comprimiendo el disco, igual que las ondas sonoras se mueven a través del aire o en un océano las olas pasan a través del agua, comprimiendo diferentes partes del disco en diferentes instantes. Dentro de unos 15 kpc del centro la onda espiral rota más lentamente que las estrellas y el gas, así la materia que entra en la onda es temporalmente frenada y comprimida conforme pasa y después continúa su camino. Conforme el gas entra en el brazo por la parte interna se comprime y forma estrellas. Las estrellas y sobre todo el gas sufren un frenado, al entrar por el borde interno del brazo, que aumenta la presión. La materia se acumula en la zona de frenado y la compresión origina el proceso de formación estelar, una parte del gas se transforma en estrellas y las más masivas formadas ionizan el gas formando regiones H II. Como las estrellas O y B y las regiones H II tienen una vida corta, su posición debe dibujar los brazos espirales y esto es efectivamente lo que se observa. La formación de estrellas es tanto mayor cuanto más fuerte es la compresión y por lo tanto la Galaxia gira más deprisa. Así es mayor hacia el interior de la Galaxia que hacia el exterior y se anula cuando la velocidad de la onda es igual a la velocidad de rotación galáctica. Lo que explica que no se encuentren regiones H II más allá de 15 kpc a pesar de la presencia de mucho gas.

¿Como se establece la perturbación inicial en el disco? No hay una única respuesta, se cree que puede ser debida: (1) a inestabilidades en el gas (fuerzas no gravitacionales) cerca del bulbo galáctico, (2) efectos de marea de galaxias próximas, como las Nubes de Magallanes y (3) colisiones galácticas,

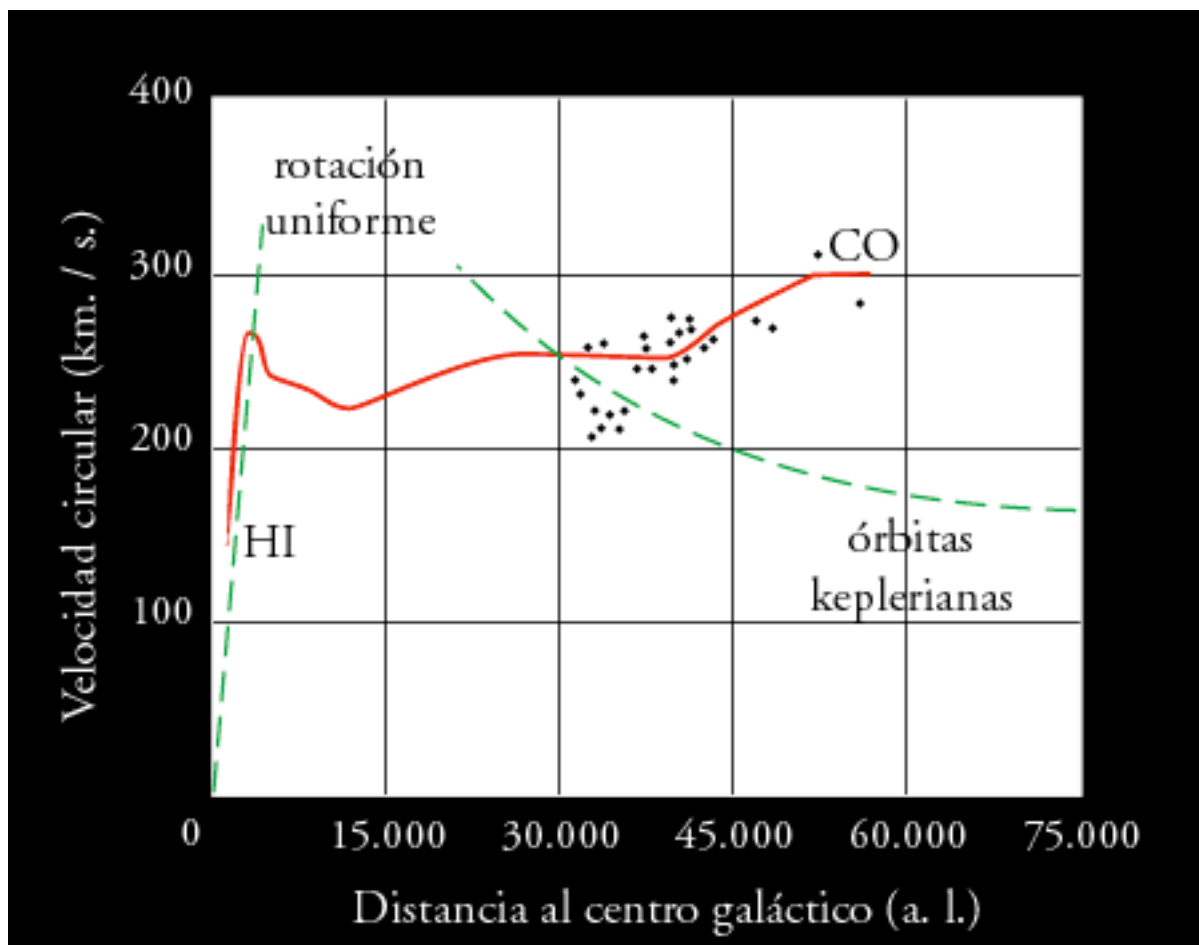
ya que muchas galaxias espirales parecen haber experimentado interacciones gravitacionales con sistemas próximos.



Módulo VII



Unidad didáctica 1: Nuestra Galaxia, llamada Vía Láctea



Curva de rotación de la Galaxia





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.2. Desarrollo histórico en la concepción de nuestra Galaxia

- [William Herschel](#)
- [El universo de Kapteyn](#)
- [El modelo de H. Shapley](#)
- [El **gran debate** de astronomía](#)
- [E. Hubble](#)
- [La rotación diferencial de Oort](#)
- [W. Baade](#)

El estudio científico de la naturaleza física de nuestra [Galaxia](#) comenzó en 1610, cuando Galileo descubrió que la Vía Láctea podía resolverse en innumerables estrellas débiles. Hacia la mitad del siglo XVIII, Thomas Wright e Immanuel Kant describen nuestra Galaxia como constituida por un disco de estrellas en el que el Sol se encuentra inmerso. Kant señaló, además, que nuestra Galaxia no podía ser única sino que deberían existir muchos sistemas similares que llamó *universos islas* que estarían distribuidos a través del espacio y a enormes distancias de nuestro sistema. Pero estas ideas que carecían de soporte científico (a pesar de ser correctas) se consideraron meras especulaciones filosóficas.

William Herschel

Las primeras evidencias empíricas se deben a William Herschel, que hacia el final del siglo XVIII, construyó el [telescopio](#) más grande de la época y lo utilizó para estudiar nuestra Galaxia y otros sistemas estelares. Herschel intentó determinar la forma contando el número de estrellas que podían observarse con diferentes valores de [magnitud aparente](#), en 700 regiones distintas del cielo. Suponiendo que las estrellas están distribuidas uniformemente en el espacio y que el [brillo](#) aparente disminuye inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, dedujo las dimensiones de nuestra Galaxia, admitiendo que además observó los bordes de ésta. Sus conclusiones fueron que nuestra Galaxia era un sistema aproximadamente elíptico, aplanado, donde el Sol estaba situado cerca del centro y que era cinco veces mayor en el plano de la Vía Láctea que en la dirección perpendicular a este plano. Además Herschel realizó un catálogo de [nebulosas](#) y pensaba que la mayoría de ellas eran sistemas estelares similares a nuestra Galaxia que con instrumentos más potentes podrían resolverse en estrellas. También observó que algunas nebulosas, como Orión no eran sistemas estelares sino nubes de polvo y gas. Aún después del trabajo de Herschel no se conocía la forma de

determinar las distancias a las nebulosas y así decidir si eran *universos islas extragalácticos*, comparables en tamaño a nuestra Galaxia pero situados a muy grandes distancias, o por el contrario eran nebulosas que estaban contenidas dentro de nuestra Galaxia.

El universo de Kapteyn

Al final del siglo XIX el desarrollo de la fotografía astronómica abrió nuevas posibilidades en la investigación de nuestra Galaxia. J.C. Kapteyn planeó estudiar 200 áreas distribuidas cuidadosamente sobre el cielo, para hacer recuento de estrellas, estimaciones del brillo, clasificaciones espectroscópicas y medir el movimiento propio y la **velocidad radial** de todos los objetos seleccionados. Del análisis de estos datos, Kapteyn fue capaz de estimar la distancia a estrellas de diferentes brillos aparentes e inferir su distribución en el espacio. En este estudio se supuso que el **medio interestelar** era completamente transparente y esta hipótesis fue un error serio, ya que existe una intensa **absorción** de la luz de las estrellas en el plano galáctico debida a la materia interestelar.

La conclusión del trabajo anterior dió lugar al llamado *universo de Kapteyn*, en él nuestra Galaxia es un sistema esferoidal aplanado de tamaño modesto, aproximadamente cinco veces mayor en el plano galáctico (esto es, el plano de la Vía Láctea) que en la dirección perpendicular a este plano. Descripción muy similar a la de Herschel, pero Kapteyn añadió una escala al sistema y estimaciones cuantitativas de la variación de la densidad de estrellas. En este modelo el Sol fue localizado ligeramente fuera del plano galáctico a una distancia de aproximadamente 650 **parsecs** del centro del sistema.

El modelo de H. Shapley

El *universo de Kapteyn* fue contestado por el modelo desarrollado por H. Shapley y publicado en una serie de artículos entre 1915 y 1919. Este realizó, en el Observatorio de Monte Wilson, observaciones muy detalladas de los cúmulos globulares, que son sistemas estelares con simetría esférica y que contienen del orden de 10^5 a 10^6 estrellas. Debido a su brillo y particular apariencia pueden observarse a grandes distancias del Sol. Además como se encuentran lejos del plano galáctico su luz no disminuye mucho por la **absorción** interestelar. Shapley encontró que los cúmulos globulares estaban distribuidos uniformemente por encima y por debajo del plano galáctico pero no en la dirección perpendicular, en la que mostraban una marcada concentración en la dirección de las Nubes de Sagitario. Shapley argumentó que estos sistemas tan masivos debían ser uno de los mayores elementos estructurales de nuestra Galaxia y que es razonable suponer que estén distribuidos uniformemente alrededor del centro galáctico. Su distribución aparentemente asimétrica implica que el Sol no está localizado cerca del centro de la Galaxia sino bastante lejos de él. Utilizando las estrellas variables pulsantes (RR Lyrae) observadas en los cúmulos globulares, Shapley estimó que el Sol debía estar a unos 15 000 pc (15 kpc) del centro galáctico. Hoy día las mejores estimaciones de esta distancia dan un valor del orden de 9 kpc.

La conclusión de Shapley respecto a la posición del Sol, cerca del borde de nuestra Galaxia, ha sido probada por todas las investigaciones posteriores. También estimó que los cúmulos más distantes de su muestra se encontraban

a unos 70 kpc y de ahí concluyó que el diámetro de nuestra Galaxia era del orden de 100 kpc, aproximadamente 10 veces mayor que el universo de Kapteyn. Actualmente sabemos que la estimación del tamaño de nuestra Galaxia que realizó Shapley es demasiado grande debido a que despreció la absorción interestelar, hoy día se admite un diámetro del orden de 50 kpc para el disco de la Galaxia.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.5. La estructura espiral

- [La distribución del gas en nuestra Galaxia](#)

Por la estructura a gran escala del disco y por la clase de objetos que lo pueblan (jóvenes cúmulos abiertos, asociaciones de estrellas tipo O, [Cefeidas](#) y regiones H II) se piensa que nuestra Galaxia es una espiral de tipo intermedio. Esta sugestión está fuertemente apoyada por las fotografías infrarrojas de la Galaxia que muestran un núcleo central, un anillo ecuatorial de materia oscura y una apariencia general muy similar a las galaxias espirales externas vista de canto, es de esperar por tanto que nuestra Galaxia tenga brazos de espiral.

Sí se quiere delinear la estructura espiral se debe analizar la distribución, relativa al Sol de objetos cuidadosamente seleccionados que sirven como trazadores de los brazos de espiral. Estos trazadores deben satisfacer los siguientes criterios:

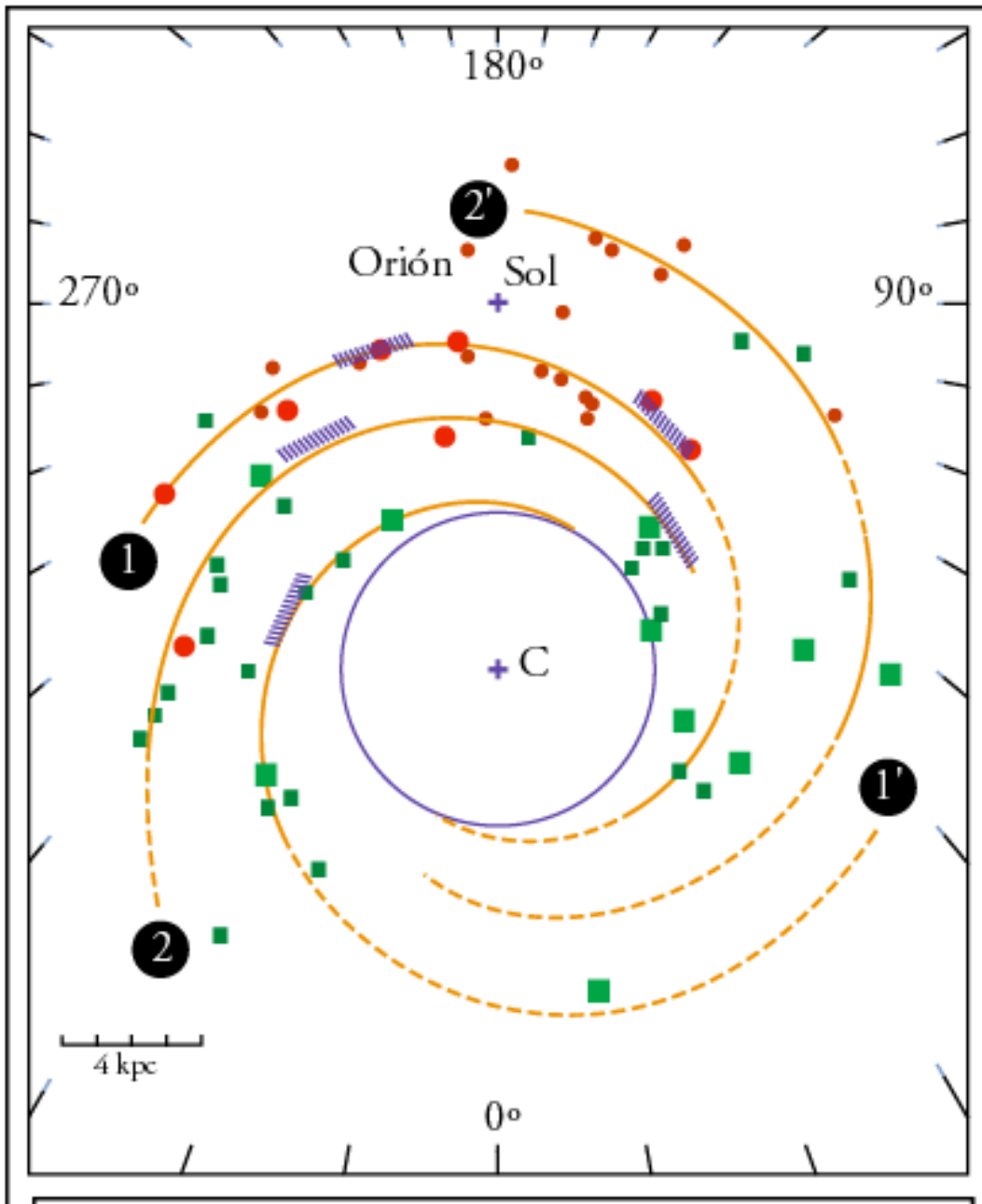
1. Estar asociados con los brazos de espiral a partir de observaciones de [galaxias](#) externas.
2. Ser jóvenes, así durante su vida no se han movido lejos de la posición original donde nacieron.
3. Ser luminosos, para que se pueden ver a grandes distancias, permitiendo trazar los brazos coherentemente con sus grandes longitudes.
4. Ser objetos cuyos [brillos](#) intrínsecos estén bien definidos y sean fáciles de determinar, junto con la estimación correcta de la [absorción](#) interestelar y el enrojecimiento.

Varios tipos de objetos satisfacen estos criterios, como son las regiones H II, las asociaciones de estrellas O, los cúmulos galácticos jóvenes, las Cefeidas y ciertos tipos de supergigantes. Las regiones H II son fáciles de encontrar y de identificar ya que su fuente de excitación son las estrellas O y satisfacen el criterio de juventud y alta [luminosidad](#). Sus distancias se pueden estimar a partir del conocimiento del [tipo espectral](#), enrojecimiento y magnitudes aparentes de las estrellas asociadas con ella. Los cúmulos jóvenes satisfacen todos los criterios enumerados antes. Sus distancias se determinan muy bien ya que sus estrellas están muy cerca o en el ZAMS y por tanto tienen muy poco rango de magnitudes absolutas y sus colores también se conocen muy bien. Lo mismo se aplica a las asociaciones de estrellas O que son extremadamente jóvenes. Las Cefeidas clásicas son buenos trazadores de la

estructura espiral ya que obedecen a la relación período-color-luminosidad que permite obtener sus distancias. Las supergigantes de tipo A - M se observan en los brazos espirales de las galaxias externas. Sin embargo no son tan buenos trazadores de los brazos espirales como las regiones H II o las asociaciones O porque son más viejas que esos objetos y probablemente se han alejado mucho de su lugar de formación. Además la calibración en magnitud absoluta no es muy precisa y es difícil determinar su enrojecimiento interestelar, las incertidumbres en su distancia estimada es del orden del 30%.

La distribución del gas en nuestra Galaxia

La estructura espiral también se puede estudiar por la distribución del gas en nuestra Galaxia. Observaciones radioastronómicas de la línea de 21 cm pueden utilizarse para detectar la estructura espiral en la componente gaseosa. Los resultados indican que el hidrógeno se distribuye en una estructura más o menos continua de brazos.



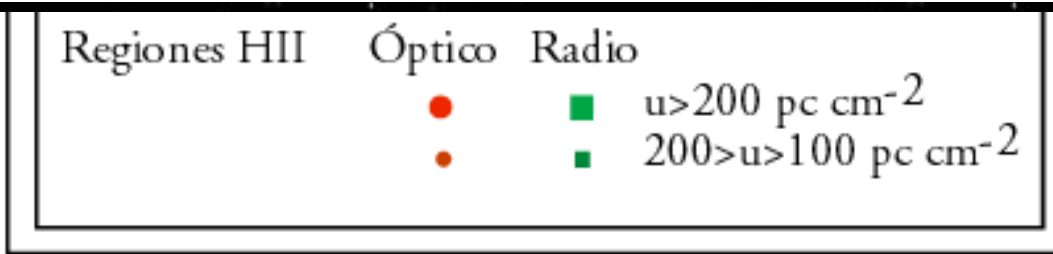


Figura 7-1-8: Estructura espiral de la Galaxia determinada a partir de las regiones H II (círculos) y de radio observaciones (cuadrados). Se han ajustado cuatro brazos espirales a los datos. 1 Brazo espiral mayor, Sagitario-Carina. 2 Brazo intermedio, Escudo-Cruz. 1' Brazo interno de Norma, simétrico de 1. 2' Brazo externo de Perseo, simétrico de 2. El Sol se encuentra en un segmento de brazo llamado el brazo de Orión.

Los resultados de las observaciones ópticas y radioastronómicas se dan en la Figura 7-1-8. Las regiones H II son las que mejor dibujan la estructura espiral, el 80% de ellas se distribuyen en cuatro brazos espirales mayores, simétricos dos a dos y hay algunos interbrazos o segmentos de brazos. El Sol está localizado en un segmento de brazo, relativamente corto, llamado el brazo de Orión y en las proximidades de esa [constelación](#) hay formación de estrellas. Dos brazos espirales mayores están situados a un y otro lado del Sol. El brazo de Sagitario-Carina (1) en el lado del centro galáctico, este es el brazo que se ve durante los meses de verano cuando se mira a la [Vía Láctea](#). Durante los meses de invierno nuestra visión hacia afuera del centro galáctico es el brazo externo de Perseo (2'). Los otros dos brazos mayores son el intermedio Escudo-Cruz (en el hemisferio sur) o de Cygnus (en el hemisferio norte) (2) y el brazo espiral mayor interno de Norma (sur) o Centaurus (norte) (1') simétrico del 1. En la parte central no se excluye la presencia de una barra.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.2. Desarrollo histórico en la concepción de nuestra Galaxia

- [William Herschel](#)
- [El universo de Kapteyn](#)
- [El modelo de H. Shapley](#)
- [El **gran debate** de astronomía](#)
- [E. Hubble](#)
- [La rotación diferencial de Oort](#)
- [W. Baade](#)

El **gran debate** de astronomía

No todos los astrónomos aceptaron las ideas de Shapley sino por el contrario la mayoría apoyaba el modelo de Kapteyn. Uno de los mayores críticos de Shapley fue H.D. Curtis del Observatorio de Lick y un líder en el estudio de las nebulosas espirales. Éste estaba convencido que las espirales eran sistemas externos a nuestra **Galaxia**, pero creía que el tamaño de ésta era el del universo de Kapteyn. En Abril de 1920, Curtis y Shapley se encontraron en la Academia Nacional de Ciencias, esta reunión se conoce con el nombre del *gran debate* de la **Astronomía**. Los dos problemas principales discutidos fueron: 1) el tamaño de nuestra Galaxia y la escala de distancias dentro de ella y 2) las distancias a las nebulosas espirales y en consecuencia sí eran o no sistemas **extragalácticos**.

Respecto a la primera cuestión Shapley esgrimió los argumentos que ya hemos descrito y que son correctos, los de Curtis hoy día sabemos que fueron erróneos, ya que argüía que las estrellas rojas de Shapley eran enanas y son en realidad gigantes rojas muy luminosas. Concerniente a la segunda cuestión Curtis sostuvo que las nebulosas espirales eran galaxias como la nuestra y que estaban situadas a distancias que iban desde 150 kpc para Andromeda hasta los 3000 kpc para las más distantes. Shapley mantuvo la opinión de que las espirales estaban relativamente más cerca y que no eran comparables en tamaño a nuestra Galaxia. Shapley estuvo equivocado en esta segunda cuestión. Al final del gran debate las opiniones de los astrónomos permanecieron divididas.

E. Hubble

La naturaleza de las nebulosas espirales fue aclarada definitivamente en 1923 por E. Hubble, que trabajando en el Observatorio de Monte Wilson, descubrió estrellas variables **Cefeidas** en una **nebulosa** espiral cercana M31, por la relación entre el periodo y el **brillo** (módulo 5, unidad 3) obtuvo un valor de 300 kpc para su distancia. Así Hubble estableció definitivamente la existencia de las **galaxias** espirales.

La cuestión de la naturaleza de nuestra Galaxia fue finalmente establecida por consideraciones cinemáticas y dinámicas. B.Lindblad en 1926 corroboró la localización del centro galáctico realizada por Shapley y desarrolló un modelo matemático para la rotación de nuestra Galaxia alrededor de un eje que pasa por su centro.

En apoyo del gran tamaño de nuestra Galaxia, Lindblad proporcionó un argumento en contra del universo de Kapteyn. La masa total calculada a partir del modelo de Kapteyn produce un campo gravitacional demasiado débil para retener a los cúmulos globulares como miembros ligados a la Galaxia. La velocidad observada de estos objetos respecto al Sol es del orden de 250 km/s que es mucho mayor que la velocidad de escape del modelo de Kapteyn. Pero en nuestra Galaxia se encuentran un gran número de cúmulos globulares luego o se forman muy rápidamente para compensar a los que escapan o son realmente miembros permanentes de la Galaxia y están ligados por fuerzas gravitacionales más intensas que las predichas por el modelo de Kapteyn. Como los cúmulos globulares son muy masivos, parecía muy improbable que pudiesen formarse tan rápidamente como para compensar su pérdida y Lindblad se inclinó por la segunda alternativa que implica una Galaxia mucho mayor y mas masiva que la del modelo de Kapteyn.

La rotación diferencial de Oort

Finalmente, Oort desarrollo una teoría cinemática de la *rotación diferencial* de la Galaxia, esto es, no rota como un cuerpo sólido sino que las partes centrales tienen una velocidad angular de rotación más rápida que las partes exteriores. Una rotación diferencial implica que la velocidad angular de rotación depende de la distancia al centro, cuanto más nos alejamos del centro más lenta es la rotación, hecho que se comprueba por las observaciones. Esta teoría prueba sin lugar a dudas que nuestra Galaxia es un gran sistema rotante con el Sol localizado bastante lejos del centro. Así en 1927 el *universo de Kapteyn* pasó a ser historia.

W. Baade

En 1944 W. Baade abrió un nuevo campo en el estudio de las [galaxias](#), cuando pudo resolver en estrellas los núcleos de las galaxias espirales M31, M32 y [NGC 205](#) y de las elípticas NGC 147 y NGC 185. Baade encontró que las estrellas más brillantes de los sistemas esferoidales eran gigante rojas y de un carácter totalmente diferente de las brillantes supergigantes azules que se encuentran situadas en los brazos espirales. Baade, entonces clasificó las estrellas en poblaciones, describió la Población I como la constituida por objetos asociados a los brazos espirales, son muy luminosos y como ejemplos tenemos las estrellas jóvenes y calientes de [tipo espectral](#) O y B, las variables Cefeidas y regiones HII ([nebulosas](#) de emisión). La Población II está compuesta de objetos encontrados en la componente esferoidal de las galaxias, esto es, en el bulbo y en el [halo](#).

La noción de poblaciones estelares ha sido muy útil y ha conducido a un importante avance en el conocimiento de la estructura y evolución de las galaxias. Por ejemplo, los objetos de la Población I asociados con la estructura espiral pueden utilizarse como trazadores de esta estructura de nuestra Galaxia. El concepto de [población estelar](#) es también muy importante en la teoría de evolución estelar, encontrándose que los objetos de la Población II son todos viejos con edades estimadas casi igual a la del Universo, mientras que los objetos de la Población I muestran un amplio rango de edades.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.4. Masa de la Galaxia

- [Diferentes modelos](#)

La masa de las galaxias, altamente aplanadas como la nuestra, se puede calcular suponiendo que sólo el movimiento de rotación galáctica es importante y se desprecian los movimientos aleatorios del gas y las estrellas que son muy pequeños comparados con la velocidad de rotación. Así se considera una Galaxia ideal en que todos sus constituyentes, estrellas y gas, se mueven en órbitas circulares alrededor del centro de la Galaxia. En consecuencia se podrá utilizar la curva de rotación para estimar la masa galáctica.

Diferentes modelos

El método implica la construcción de modelos simples de distribución de masa galáctica, la elección del modelo se basa en el aspecto de la [galaxia](#). El modelo contiene algunos parámetros libres que se ajustan de forma que la curva de rotación teórica se aproxime a la observada. Una limitación del método es que las curvas de rotación no establecen correctamente el borde de la galaxia. En nuestra Galaxia, la curva de rotación no está bien determinada para distancias al centro galáctico mayores que la del Sol, ya que es un problema difícil determinar la estructura de un sistema desde dentro de él.

Consideremos primero el modelo más simple posible, se supone que esencialmente toda la masa de la Galaxia está contenida en un núcleo esférico de masa, M_p , que en la posición solar produce el mismo campo gravitacional que una masa puntual. Ahora calculamos el valor de M_p para producir la velocidad de rotación observada cerca del Sol,

$$G M_p / R_0^2 = \theta_0^2 / R_0$$

donde $R_0 = 8.5 \text{ kpc}$ y $\theta_0 = 220 \text{ km/s}$ obtenemos, $M_p = (R_0 / G) \theta_0^2 = 0.9 \times 10^{11} M_\odot$.

Aunque esta masa proporciona la velocidad de rotación correcta del Sol, sin embargo, el ajuste a la curva de rotación completa es muy pobre, en particular, el valor máximo de la velocidad de rotación es demasiado alto y cerca del Sol la velocidad disminuye con la distancia mucho más rápidamente que lo observado. A pesar del ajuste tan pobre de la curva de rotación, la masa obtenida difiere probablemente en no más del 50% del valor real de la

masa contenida dentro del radio R_0 .

El modelo siguiente de la galaxia sería una masa puntual en el núcleo y una cantidad de masa significativa fuera del núcleo. Las observaciones de las galaxias espirales como la nuestra sugieren que el disco tiene una forma (mostrada por la distribución de su luz) que es aproximadamente la de un esferoide muy plano, aparte del núcleo aproximadamente esférico. Se debe pues considerar un modelo que tenga una masa puntual y una masa esferoidal. Se supone que el semieje mayor del esferoide es R_0 , y debemos tener en cuenta que una considerable fracción de la masa de la Galaxia puede estar fuera del esferoide. Con este modelo se obtiene para la masa puntual $M_p = 0.69 \times 10^{11} M_{\odot}$ y para el esferoide $M_{sph} = 0.11 \times 10^{11} M_{\odot}$ que dan una masa total dentro del radio R_0 de

$$M = 0.80 \times 10^{11} M_{\odot}$$

la masa obtenida difiere muy poco de la masa obtenida con el modelo más simple.

Introduciendo más refinamientos en los modelos, se estima que la masa total de la Galaxia es dos veces la contenida dentro del radio solar, parece claro que la masa total es al menos del orden de $1.5 \times 10^{11} M_{\odot}$, pero podría ser mucho mayor si tuviese un halo masivo que se extendiese hasta radios mucho mayores que R_0 . Una distribución de masa esférica o esferoidal más allá del Sol no ejercería ninguna fuerza gravitacional neta en la vecindad solar, así las observaciones de la curva de rotación dentro del radio solar no impiden la existencia de un halo masivo. Hay observaciones que sugieren la existencia de este halo masivo.



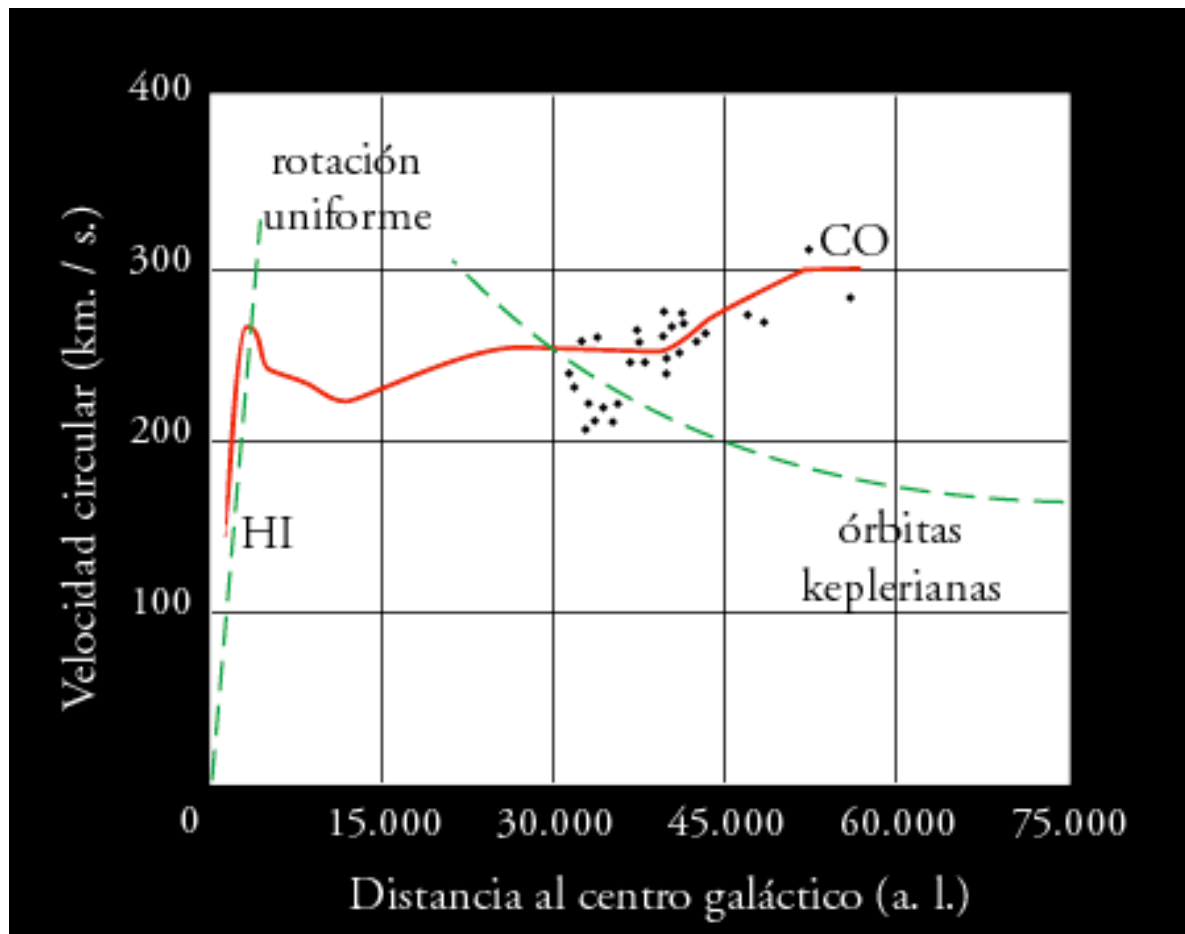


Figura 7-1-7: Curva de rotación de la Galaxia. La curva de trazos indica como sería la curva de rotación de la Galaxia si ésta rotase uniformemente o fuese de masa puntual (órbita Kepleriana).

Sí la mayor parte de la masa de la Galaxia terminase en el borde de la estructura visible, el movimiento Kepleriano predice que la velocidad orbital de las estrellas y del gas, más allá de 15 kpc, debería disminuir hacia fuera, pero la curva de rotación no disminuye sino que permanece prácticamente plana hasta unos 40 a 50 kpc (Figura 7-1-7). Esto implica que la masa contenida a grandes distancias continua aumentando más allá de la órbita del Sol y que nuestra Galaxia está rodeada de un halo de materia oscura que también se ha puesto en evidencia, como se verá más adelante, en otras galaxias.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.3. Estructura de la Galaxia

Estructura:

- [Nucleo](#)
- [Bulbo central](#)
- [Disco](#)
- [Halo](#)
- [Rotación galáctica](#)
- [La ley de rotación de la Galaxia](#)
- [Curva de rotación](#)

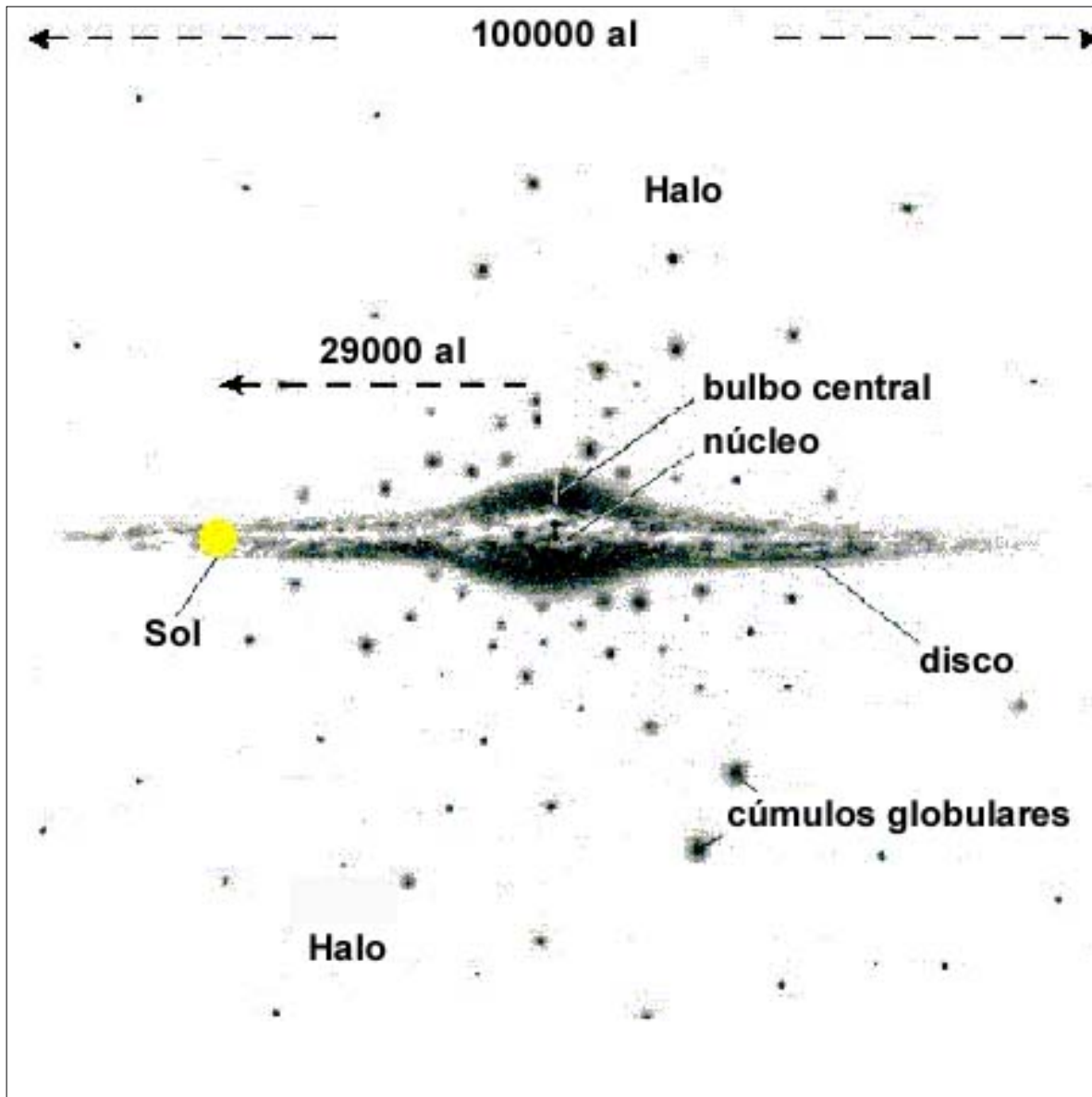


Figura 7-1-3: Estructura de una galaxia

Nuestra Galaxia es grande, pero no de las mayores, contiene unas 10^{11} estrellas, las galaxias mayores contienen 10^{12} o 10^{13} estrellas. Además de estrellas, las galaxias contienen materia en la forma de gas interestelar, pero parece que la mayoría de la masa visible está almacenada en las estrellas. En una primera aproximación podemos considerar las galaxias simplemente como un sistema de estrellas. Sin embargo, veremos que las **galaxias** contienen mucha materia invisible y que esta materia no es ni estrellas ni gas. Las estrellas y las galaxias se mantienen unidas por la fuerza gravitatoria. Muchos de los conocimientos detallados que tenemos de las estrellas han sido obtenidos a partir del Sol, nuestra estrella más cercana, de la misma forma es de esperar que estudiando nuestra Galaxia aprenderemos mucho sobre las restantes galaxias. Aunque hay una diferencia importante, mientras que estamos situados cerca del Sol, sin embargo, estamos dentro de la Galaxia y es difícil descubrir la estructura de un objeto desde dentro.

Aunque estrellas y galaxias son objetos que se mantiene unidos por la fuerza atractiva de gravitación, se diferencian en importantes aspectos. Un simple hecho observacional es que mientras la mayoría de las estrellas son esféricas

o se desvían ligeramente de la forma esférica, existen galaxias de muchas formas desde esencialmente esféricas a aquellas que son muy aplanadas y que tienen muy poca simetría. La gran variedad en formas galácticas indica que la clasificación de galaxias puede ser mucho más complicada que la clasificación de estrellas.

El conocimiento de la estructura de nuestra Galaxia está basado en la obtención de distancias a los objetos cada vez más lejanos. Para las estrellas suficientemente próximas se utiliza la [paralaje](#) trigonométrica (< 200 pc).

Debido a la [absorción](#) interestelar (1mag/kpc) el método mejor son las variables pulsantes o *candelas estándares*. Shapley sabía que las variables RR Lyrae existían en los cúmulos globulares y después del descubrimiento de la relación periodo-[luminosidad](#) para las [Cefeidas](#), lo aplicó a las RR Lyrae calculando las distancias a los cúmulos globulares y encontrando que tenían una distribución esférica, identificando el centro de la distribución espacial de los cúmulos globulares con el centro de la Galaxia, una región hacia Sagitario. El Sol, que no pertenece a esta componente sino a la componente plana o disco, está por tanto lejos del centro de nuestra Galaxia.

La Galaxia está constituida por un disco plano de enorme dimensiones que contiene un gran número de estrellas y una elevada concentración de materia interestelar. Este disco exhibe unos brazos espirales que arrancan del centro o núcleo. El disco está rodeado por una esfera concéntrica de material menos denso, llamado halo, donde se encuentran los cúmulos globulares. Si se pudiese ver de canto o si fuésemos desde dentro hacia fuera (Figura 7-1-3) se distinguiría:

- El **núcleo** que es una compacta acumulación de estrellas de unos 100 pc de diámetro, contiene polvo y gas interestelar.
- **Bulbo** central que tiene una distribución de estrellas aproximadamente esférica de 6 kpc de diámetro
- **Disco**, constituido por estrellas y gas en un volumen de forma de disco con unos 25 kpc de diámetro y un espesor de unos 300 pc, el sistema solar está localizado hacia el borde del disco. El disco es el que contiene la estructura espiral.
- **Halo**, distribución esférica de estrellas y cúmulos globulares que se extiende más allá del disco, de unos 30 kpc de diámetro.



El Sol, la Tierra y los planetas están inmersos en el disco cerca de un brazo de espiral y muy alejados del centro. Esta posición impide contemplar la Galaxia como un todo y la [absorción](#) interestelar dificulta mucho la observación en la dirección del núcleo.



La distinción en Poblaciones de las estrellas está también relacionada con su localización espacial en la Galaxia. Las estrellas situadas en el disco son ricas en metales y pertenecen a la Población I. El bulbo central comprende una mezcla de estrellas de la Población I y II, mientras que el halo visible parece estar compuesto sólo de estrellas viejas y con poco contenido metálico de la Población II.





ÍNDICE

AUTOEVALUACIÓN

ACTIVIDADES

U. 1. NUESTRA GALAXIA, LLAMADA VÍA LACTEA

1.3. Estructura de la Galaxia

Estructura:

- [Nucleo](#)
- [Bulbo central](#)
- [Disco](#)
- [Halo](#)
- [Rotación galáctica](#)
- [La ley de rotación de la Galaxia](#)
- [Curva de rotación](#)

Rotación galáctica

Las observaciones indican que la mayoría de las estrellas en la vecindad solar y naturalmente en toda la [Galaxia](#) están confinadas en un disco estrecho. El plano de la Galaxia esta definido por la [Vía Láctea](#) y el centro de la Galaxia es en la dirección de las nubes de estrellas más densas en la [constelación](#) de Sagitario. Como la Vía Láctea define un gran círculo en el cielo, es obvio que el Sol, actualmente, está muy próximo al plano galáctico y su desviación o distancia es menos de unos 10 pc. Aunque la mayoría de las estrellas en la vecindad solar están en un disco estrecho, el espesor aparente del disco depende del tipo espectral de las estrellas, el resultado de las observaciones se muestra en la Tabla 17.1, las estrellas de los primeros tipos, que son jóvenes, están confinadas en un disco más estrecho que las de los últimos tipos espectrales que tienen en media una edad mayor.

Tabla 17.1

Clase de objeto	Espesor medio del disco en pc
estrellas tipo O	50
estrellas tipo B	60
estrellas tipo A	115
estrellas tipo F	190
enanas G	340
enanas K	350
enanas M	350
gigantes G	400
gigantes K	270
gas y polvo interestelar	100
estrellas de alta velocidad	3000
cúmulos globulares	4000

El Sol está actualmente cerca del plano galáctico, pero no mantendrá esta posición indefinidamente. Como otras estrellas similares puede alejarse muchos Kpc del plano galáctico. Sin embargo el campo gravitacional generado por las restantes estrellas de la Galaxia acaba invirtiendo el sentido del movimiento de modo que puede llegar a atravesar el disco galáctico, para lo que se precisaría unos 10^7 años, que es mucho menos que la edad de la Galaxia. Este proceso puede haber sucedido muchas veces a lo largo de la vida del Sol. Lo mismo debe ocurrir para el movimiento en la dirección radial del disco. Este fenómeno sugiere que el sistema solar debe encontrarse en un estado de equilibrio estadístico, con estrellas moviéndose en sentidos contrarios respecto al plano galáctico. Por ello, como el Sol no está en reposo observamos asimetrías en las velocidades de las estrellas de la vecindad solar

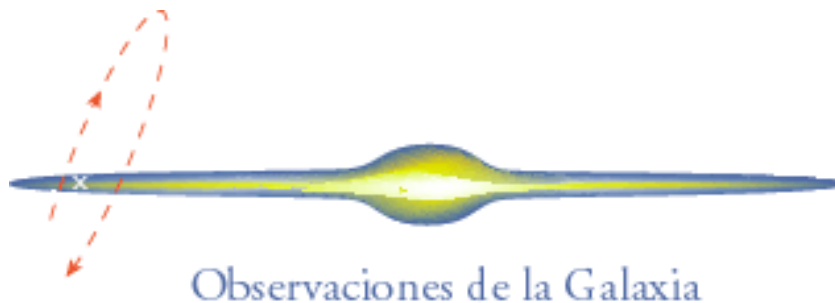


Figura7-1-4: Órbita de una estrella del halo cuando pasa a través del disco de la Galaxia. La posición del Sol está señalado con una x.

Cuando se estudian los movimientos de las estrellas en la vecindad solar se encuentra que todas las estrellas muy jóvenes tienen pequeñas velocidades (10 - 20 km/s) y que están confinadas en un disco estrecho pero una pequeña proporción de estrellas de los últimos tipos, cuyas edades no pueden establecerse inmediatamente, tienen velocidades de hasta varios cientos de km/s. Con tales velocidades estas estrellas de *alta velocidad* son capaces de moverse muchos kiloparsecs desde el plano galáctico antes de que su movimiento sea invertido por el campo gravitacional de la Galaxia. Esto significa que estas estrellas pasan la mayor parte de su tiempo en el halo de la Galaxia (Figura 7-1-4). Este hecho ilustra una importante propiedad de la Galaxia: es un sistema dinámico en el que todas las estrellas se están moviendo en el campo atractivo gravitacional de todas las demás estrellas. Todas las estrellas que están en el halo pasan periódicamente a través del disco y las estrellas que están en la vecindad solar, en un momento dado, no permanecen siempre ahí. Aunque no podemos ir al halo a estudiar su población de estrellas, sí somos capaces de hacerlo cuando las estrellas del halo pasan cerca de nosotros.

Las estrellas de alta velocidad forman parte de la población del halo que contiene los cúmulos globulares en particular. Estas estrellas escapan de los cúmulos durante su vida y es posible que todas las estrellas individuales de alta velocidad fueran antes miembros de los cúmulos, se formaron dentro y han escapado. El estudio de los diagramas H-R de los cúmulos globulares estima su edad alrededor de los 13.5×10^9 años, aunque esta edad es incierta los cúmulos globulares son los sistemas más viejos de la Galaxia y las estrellas de alta velocidad son probablemente de edad similar. Tanto los cúmulos globulares como las estrellas de alta velocidad tienen una fracción mucho más baja de elementos más pesados que el H y el He, en su composición química, que las estrellas del disco. Éstas tienen típicamente entre 1/2 y 2 veces el contenido de elementos pesados del Sol. En contraste las estrellas de algunos cúmulos globulares y estrellas de alta velocidad tienen 1/200 el contenido de elementos pesados del Sol o aún menos.

La rotación de la Galaxia fue descubierta hacia la mitad de los años veinte y su existencia era crucial para entender el alto grado de aplanamiento del disco galáctico. Ahora consideraremos dos formas de determinar la velocidad de rotación del Sol, los dos métodos que son simples en concepción pero no en ejecución, dependen de la observación de los cúmulos globulares y del Grupo Local de Galaxias.

Los cúmulos globulares forman un sistema que no está aplanado, como asociamos el aplanamiento del disco con su rápida velocidad de rotación, esto sugiere que los cúmulos globulares deben ser o no rotantes, o lentos rotadores. Sin embargo al observarlos obtenemos una velocidad de rotación significativa, que tiene que ser debida a la velocidad de rotación del Sol. Diferentes observaciones de los cúmulos globulares proporcionan valores para la rotación solar comprendidos entre 200 y 220 km/s.

Nuestra Galaxia, como veremos en el tema siguiente, forma parte de un sistema de galaxias llamado el Grupo Local de Galaxias, y es la segunda más masiva del grupo siendo la más grande la [galaxia](#) Andromeda (M31). Se supone que el grupo local no rota y usamos su velocidad de rotación aparente para estimar la velocidad de rotación del Sol. Los valores obtenidos son del orden de 300 km/s. Este resultado y el anterior son algo diferentes y sugieren que la velocidad del Sol debe estar entre 200 y 300 km/s y que ni los cúmulos globulares, ni el Grupo Local de Galaxias rotan muy rápidamente.

Es razonable suponer, en una primera aproximación, que las estrellas se mueven en rotación pura alrededor del centro de la Galaxia, despreciando sus movimientos en el plano galáctico y él perpendicular al plano. La rotación de la Galaxia es una rotación diferencial los objetos no giran con la misma velocidad angular, ésta disminuye con la distancia al centro galáctico y disminuye tan rápidamente que la velocidad lineal de rotación permanece prácticamente la misma, de unos 220 km/s, desde 1 kpc hasta 15 kpc del centro. Así el Sol situado a unos 10 kpc (R_0) tarda alrededor de 200 millones de años en dar una vuelta completa alrededor del centro de la Galaxia.

La ley de rotación de la Galaxia

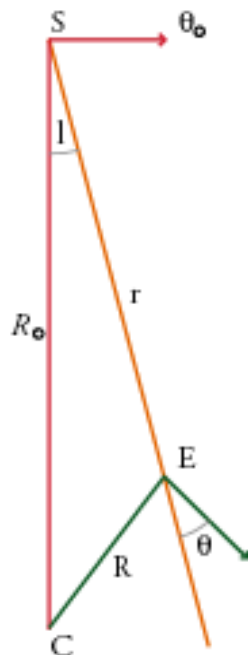


Figura 7-1-5: La posición del Sol es S y una estrella E de longitud galáctica l y distancia R al centro de la Galaxia C. Las flechas indican los movimientos circulares del Sol y la estrella.

La ley de rotación de la **Galaxia** o la obtención de su curva de rotación, está basada en la medida de velocidades radiales respecto al Sol. Se puede expresar la velocidad radial, v_r , en función de la velocidad lineal de rotación o de la velocidad angular. Supóngase (Figura 7-1-5) una estrella E, de longitud galáctica l , a la distancia R del centro y a la distancia r del Sol y cuya velocidad lineal de rotación es θ , y θ_0 es la velocidad lineal de rotación del Sol. La **velocidad radial** observada de la estrella E será la diferencia de las proyecciones de θ y θ_0 sobre la línea de observación SE

$$v_r = \theta \cos \alpha - \theta_0 \sin l$$

en el triángulo SEC: $\sin l / R = \sin (90 + \alpha) / R_0 = \cos \alpha / R_0$ sustituyendo en la expresión anterior

$$v_r = (\theta / R) R_0 \sin l - \theta_0 \sin l$$

Curva de rotación

Para construir la curva de rotación es necesario obtener simultáneamente las velocidades de rotación y las distancias galactocéntricas de un gran número de objetos. Esto se puede hacer a partir de estrellas de tipo O y B, de [Cefeidas](#), pero sobre todo a partir de las regiones H II que tienen un espectro de líneas de emisión que permiten medir las velocidades radiales. Las distancias a que se encuentran las regiones H II es la misma que la de la estrella excitadora, que se calcula a partir de la [magnitud absoluta](#) y la medida de la aparente. Las distancias heliocéntricas, r , se transforman en distancias galactocéntricas, R , por la relación geométrica (ver Figura 7-1-5):

$$R^2 = R_0^2 + r^2 - 2 r R_0 \cos l$$

la velocidad radial observada, como hemos visto antes, se transforma en velocidad de rotación galactocéntrica por medio de

$$v_r = (\theta / R) R_0 \sin l - \theta_0 \sin l$$

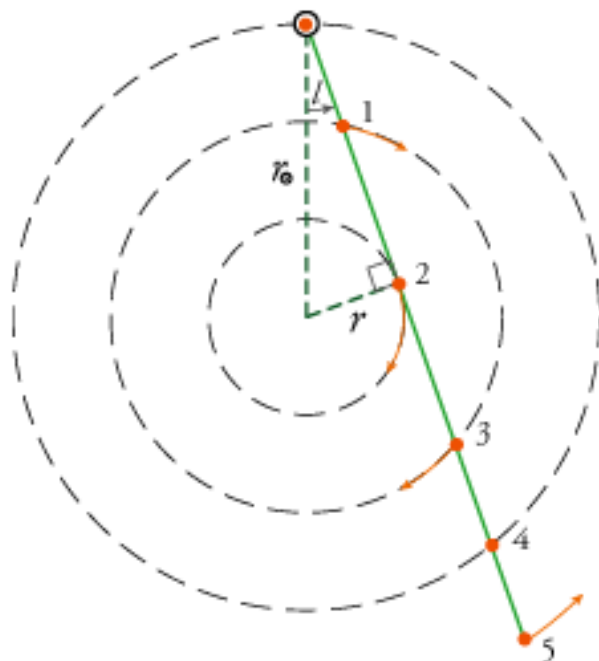


Figura 7-1-6:
Trayectoria a gran escala de la rotación diferencial para un observador que se mueve con la velocidad del Sol. La nube 2 es la que tiene la máxima velocidad positiva.

Para obtener la curva de rotación se necesitan alcanzar grandes distancias, pero debido a la [absorción](#) interestelar es necesario recurrir a las observaciones radioastronómicas. Se observan las nubes de H I en la línea de 21 cm, imagínese que apuntamos un [radiotelescopio](#) en la dirección de longitud galáctica l . Debido a la rotación diferencial se verá la nube de H I 2 (Figura 7-1-6) que se mueve más deprisa alejándose de nosotros; las nubes 1 y 3 se mueven más lentamente alejándose; la nube 4 no tiene movimiento relativo a nosotros y la nube 5 se mueve hacia el observador. Como no conocemos las distancias, en el caso de la nube 1 y 3 sólo vemos que tienen la misma velocidad radial y la misma posición angular en el cielo (igual l en el plano galáctico). Sin embargo, la nube 2 es única, ya que sólo hay un punto tangente que da lugar a que la velocidad relativa al Sol sea máxima. Como en este punto tangente sí conocemos la distancia:

$$R = R_0 \sin l$$

se puede obtener la velocidad de rotación y la distancia simultáneamente.

Apuntando el [radiotelescopio](#) a diferentes longitudes galácticas, l , podemos obtener la velocidad de rotación para diferentes distancias. Este método sólo es válido para valores de la distancia R menores que la distancia solar al centro galáctico R_0 . Para distancias exteriores tenemos que utilizar las regiones H II.

Para determinar R_0 se puede utilizar el método original de Shapley que supone que el centro de la Galaxia es el centro del sistema de los cúmulos globulares. Hay tres problemas al usar esta técnica, se necesita un catálogo suficientemente completo de cúmulos distribuidos alrededor del centro, segundo, debe haber una [luminosidad](#) absoluta bien definida, para algún tipo de estrella del cúmulo, para poder deducir la distancia a partir de la luminosidad aparente y por último la distancia estimada no debe estar seriamente afectada por la absorción interestelar. Dos investigaciones recientes dan:

$$R_0 = 8.5 \pm 1.0 \text{ kpc} \quad R_0 = 6.8 \pm 0.8 \text{ kpc}$$

En 1964 la [Unión Astronómica Internacional](#) (IAU) adoptó el valor de $R_0 = 10$ kpc y velocidad de rotación igual a 250 km/s. En 1982 un comité de la IAU recomendó nuevos valores estándares, su recomendación fue aceptada en 1985, donde $R_0 = 8.5$ kpc, velocidad de rotación = 220 km/s.

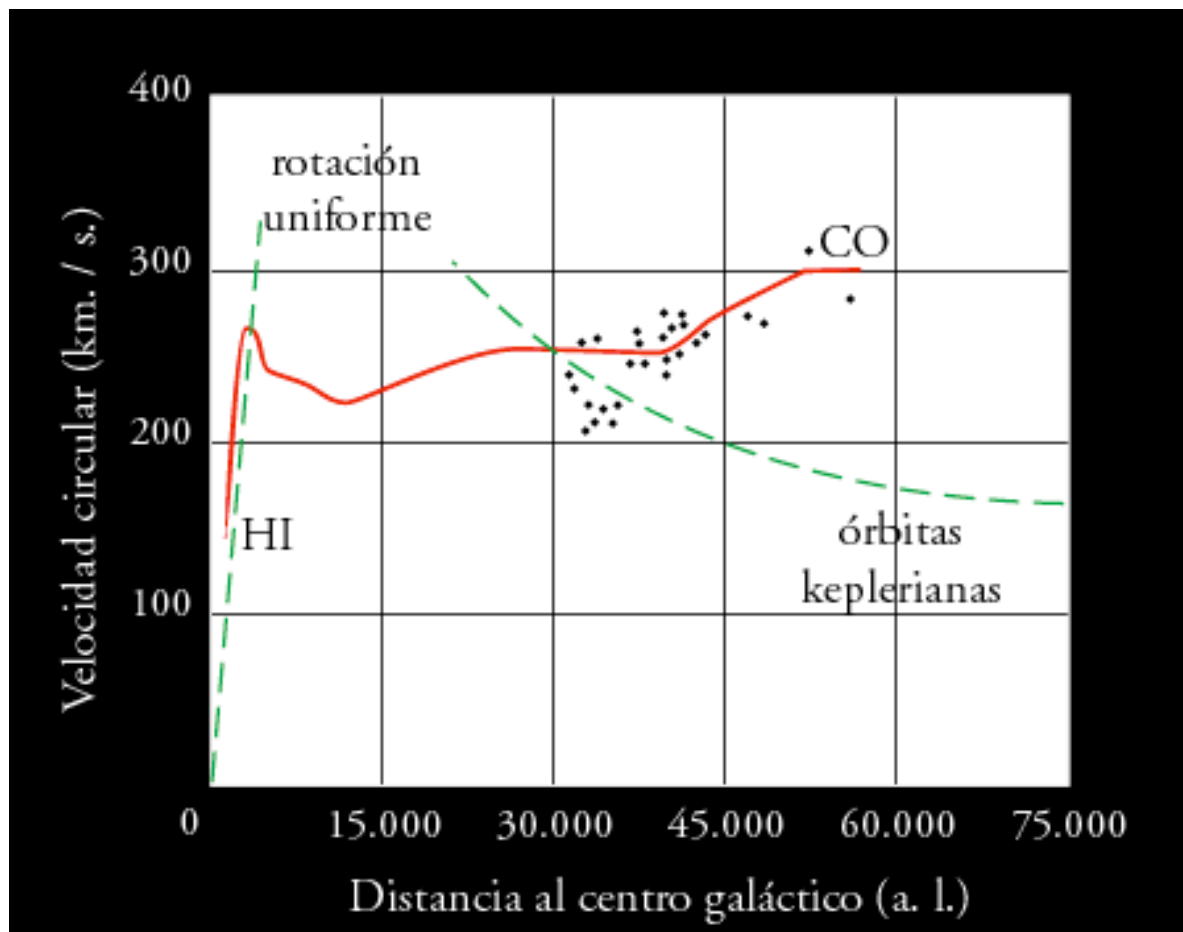


Figura 7-1-7: Curva de rotación de la Galaxia. La curva de trazos indica como sería la curva de rotación de la Galaxia si ésta rotase uniformemente o fuese de masa puntual (órbita Kepleriana)

Una vez obtenidas las velocidades de rotación y las distancias al centro galáctico se puede construir la curva de rotación que tiene la forma de la Figura 7-1-7 La estructura detallada de la región central es incierta, sin embargo es seguro que después de una rápida subida cerca del centro de la Galaxia, la velocidad de rotación varía relativamente lenta para grandes distancias. Por tanto, la Galaxia es un sistema que rota diferencialmente con la velocidad angular disminuyendo hacia fuera, hay un declive después de la subida inicial y luego es prácticamente plana.

