

Parte III

ASTROFISICA GALACTICA

Capítulo 7

La Vía Láctea

7.1 Introducción

En un cielo muy transparente y sin Luna es posible apreciar una banda nebulosa que atravieza de horizonte a horizonte la bóveda celeste. El observador casual podría confundirla con un fenómeno atmosférico más, pero cuando se la observa por un período prolongado se puede apreciar que se mueve conforme lo hacen las estrellas, lo que demuestra su verdadera naturaleza celeste.

En muy buenas condiciones y tras una observación detenida es fácil notar también que no es simplemente una banda luminosa homogénea sino que posee una intrincada estructura. En vez de una, observamos dos bandas luminosas que zigzagean y corren paralelas, y que en algunos puntos parecen fundirse (ver figura 7.1). A algunas tribus primitivas, estas características peculiares le merecieron el nombre a esta estructura de "Espinazo de la Noche". Los griegos que estaban muy dados a elevar al cielo las historias de su mitología la creían el resultado del derramamiento de la leche materna de Hera, esposa de Zeus, cuando alimentaba al insaciable y fuerte Heracles. Además la consideraban el

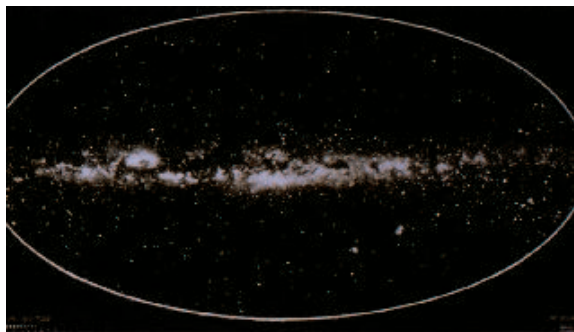


Figura 7.1: La Vía Láctea.

camino a través del cual transitaban los dioses hacia el trono del dios mayor, Zeus. Ambas representaciones le merecieron a esta particular estructura celeste el nombre de *Vía Láctea* o *Galaxia* que aun sigue siendo utilizado en el presente.

Fué solo con el advenimiento del telescopio en Astronomía, con Galileo, que la verdadera naturaleza de la Vía Láctea fue develada. A mediados del siglo XVII Galileo notó que lo que parecía ser una nube se revelaba a través del telescopio como un conjunto innumerable de estrellas muy débiles y apretadas.

Después de la pionera observación de Galileo, sólo hasta mediados del siglo XVIII aparecieron las primeras propuestas realísticas de lo que verdaderamente era la vía Láctea. Immanuel Kant y Thomas Wright propusieron por primera vez que esta peculiar "nube de estrellas" representaba un gigantesco sistema discoidal de estrellas al que pertenecía nuestro Sol, que ocupaba su centro.

Las ideas primeras de Kant y Wright fueron ratificadas por el estudio que hizo el astrónomo inglés William Hershell hacia finales del mismo siglo, de la distribución de las estrellas sobre la Vía Láctea. Con el objetivo de determinar la distribución en el espacio de las estrellas que pertenecían a la Galaxia, Hershell la dividió en un conjunto de alrededor de 700 regiones sobre las cuales realizó conteos de las estrellas con distintos brillos aparentes. Con los supuestos de que todas tenían el mismo brillo intrínseco (magnitud absoluta), de que nada podría entre ellas y nosotros absorber la luz que emitían y que su densidad en el espacio (densidad volumétrica) era constante en los límites que suponía definidos y conocidos para el sistema, Hershell llegó a la conclusión, ya intuita por Kant y Wright, de que las estrellas de la Vía Láctea formaban un sistema en forma de disco, centrado en el Sol y cuyo diámetro superaba en un factor de 5 el valor de su grosor.

Usando mejores técnicas astrométricas y estadísticas pero conservando la metodología de Hershell, un siglo más tarde Jacobus C. Kapteyn, concluyó que el sistema formado por las estrellas visibles sobre la Vía Láctea, tenía la forma de una esfera muy achatada sin un límite definido y en la que la densidad de estrellas caía al 1% de su valor central (cerca al Sol) a una distancia del mismo de unos $8kpc$. En este sistema, y a diferencia de lo encontrado por Hershell, el Sol no ocupaba precisamente el centro de la distribución, pero se encontraba ciertamente muy cerca de él ($38pc$ sobre el plano de simetría y a $650pc$ del centro medido sobre dicho plano).

La imagen que teníamos de la Galaxia, como un sistema fundamentalmente centrado en el Sol (lo que desde el punto de vista astrofísico parece completamente arbitrario), cambió radicalmente después de los estudios de la distribución de cúmulos globulares que haría ya bien entrado el siglo XX (1915-1919) Harlow Shapley. Shapley, en una primera aproximación al problema se puso en la tarea de determinar la distancia a la que se encontraban un centenar de cúmulos globulares desde el Sol. Esto lo consiguió observando la variación del brillo de algunas de las estrellas que pertenecían al cúmulo. Ciertos tipos de estrellas variables, como las estudiadas por Shapley, presentan una conocida correlación entre el período de variación de su brillo y su luminosidad intrínseca. A esta conexión se la conoce como relación período-luminosidad, y es bien conocida desde los estudios de Henrietta Leavitt a principios del siglo XX. Conocido el período de algunos

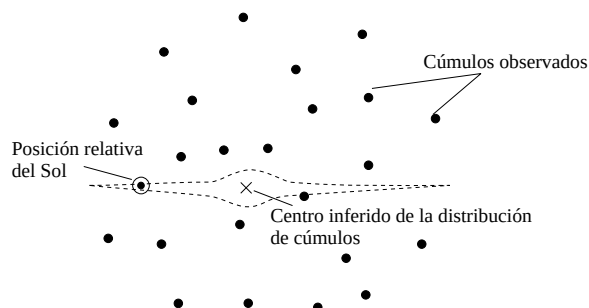


Figura 7.2: La distribución de cúmulos globulares en nuestra Galaxia.

tipos de estrellas variables es posible deducir la magnitud absoluta media (asociada con la luminosidad media) de estas estrellas. Cuando se compara la magnitud absoluta (deducida por este método) y la magnitud aparente (medida) de la estrella observada, es posible determinar su distancia utilizando la relación , así ,

$$d = 10^{(m-M+5)/5}$$

Si se supone que la distancia a la que se encuentra la estrella variable observada en el cúmulo es del orden de la distancia misma al cúmulo, se encuentra, por el método anterior la distancia a este último. Conocida su distancia y posición precisa sobre la bóveda celeste (dirección en la que se encuentra) Shapley pudo elaborar un mapa en el espacio de la manera como se distribuían los cúmulos observados (ver figura 7.2). El resultado por el encontrado, le permitió establecer que los cúmulos se distribuían de manera aproximadamente esférica en torno a un centro que estaba a unos 70 kpc desde el Sol en dirección a la constelación de Sagitario, formando un sistema que tenía un diámetro cercano a los 100 kpc. El Sol perdería así su privilegiada posición en la Galaxia y una visión más precisa de la manera como estaban distribuidas las estrellas en este gigantesco sistema vió la luz.

El increíble y abrupto perfeccionamiento de nuestras técnicas observacionales y del análisis teórico de los resultados por ellas provistos, le han permitido al astrofísico del presente hacerse a una idea muy precisa de lo que es nuestra Galaxia. Sabemos bien que ella es un conjunto de estrellas, nubes de gas y polvo y hasta una misteriosa materia invisible (materia oscura), que se distribuyen principalmente en la forma de un disco aplanado de alrededor de 50 kpc, donde el Sol ocupa una posición, no central, a unos 8 kpc del centro, y que está rodeada de un halo de cúmulos globulares, cuya distribución es más o menos esférica con un diámetro similar al del disco, rodeado a su vez, según lo revelan las más recientes observaciones de un superhalo de materia oscura.

Dedicaremos el presente capítulo a estudiar de manera más o menos detallada la estructura (morfología) y dinámica de nuestra Galaxia, lo que nos servirá en los capítulos restantes, para abordar de manera más general el estudio de otros sistemas similares, a los que por

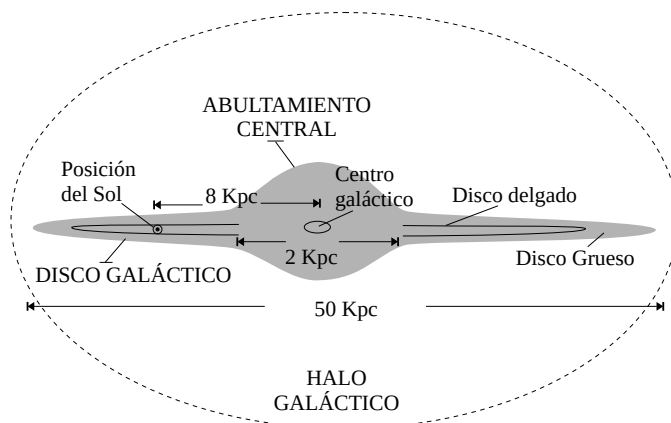


Figura 7.3: La morfología de la Vía Láctea.

analogía llamaremos "galaxias".

7.2 Morfología de la Galaxia

Como lo habíamos expresado en el penúltimo párrafo de la sección anterior, el advenimiento en el último siglo de técnicas observacionales y teóricas más elaboradas, han permitido al astrofísico construir una idea bastante precisa de la manera como se configura la materia que constituye nuestra Galaxia. Han sido de particular ayuda los recientes adelantos relativos a la observación en otras longitudes de onda del espectro electromagnético, principalmente en la banda de radio, las que nos han permitido la observación de las regiones más remotas desde las cuales ningún otro tipo de radiación puede llegar hasta nosotros. El profundo conocimiento de las estrellas, su estructura y evolución, adquirido en los últimos dos siglos y perfeccionado con la aparición de nuevas herramientas teóricas (la mecánica cuántica por ejemplo que dió pie a la elaboración de una mejor teoría del átomo y su núcleo) y prácticas (la invención de los computadores electrónicos), así como también el creciente conocimiento de las propiedades del medio que llena el espacio entre las estrellas, nos han permitido también, obtener la clara imagen que hoy tenemos de la morfología y dinámica de la Galaxia.

La Galaxia puede considerarse formada por 3 subsistemas (vease figura 7.3): el disco, el abultamiento central (*central bulge*) y el halo. Cada uno de ellos comprende una distinta distribución de estrellas (discoidal para el disco y esferoidal o elipsoidal para el halo y el abultamiento central) así como una distinta composición química de sus constituyentes, distinto contenido de materia interestelar y una distinta dinámica. A continuación describiremos las características particulares de cada uno de estos subsistemas.

7.2.1 El disco galáctico

Desde los tiempos de Hershell sabemos que la inmensa mayoría de las estrellas que pertenecen a la Galaxia, no están distribuidas de manera aleatoria en el espacio alrededor del centro del sistema. Ellas se agrupan constituyendo una estructura discoidal. Nuestros estudios de la distribución del medio interestelar en la Galaxia, demuestran también una clara tendencia a concentrarse en el disco que forma las estrellas (una prueba de ello lo constituye la observación de la banda oscura característica en el plano meridional de la Vía Láctea, que como sabemos no es otra cosa que una gran acumulación de miles de densas nubes, que se encuentran por lo anterior en el plano central del sistema formado por las estrellas). El disco de la Galaxia es pues el lugar en el que se acumula la mayor parte de su materia visible (en forma de estrellas y nubes interestelares).

El disco tiene en total (teniendo en cuenta no sólo las estrellas, su principal componente, sino también el gas y el polvo interestelar) un diámetro medido de alrededor de $50kpc$. El Sol, una de las estrellas que lo compone, se encuentra ubicado a una distancia $R_o = 8,5kpc$, valor que llamaremos en adelante, la *Distancia Galactocéntrica*, y que será una de las principales constantes involucradas en el estudio de la cinemática galáctica.

El grosor del disco, varía punto a punto a todo su ancho y largo. Dado que es imposible definir para un sistema discreto de partículas un límite bien definido se cuantifica el grosor del disco galáctico mediante el uso del denominado "grosor característico", z_c . La distribución vertical de estrellas en el disco de la Galaxia, varía de forma exponencial,

$$n \propto n_o \exp(-z/z_c)$$

donde n es la densidad numérica de estrella a una altura z sobre el plano medio del disco y n_o es el valor de esta primera cantidad en $z = 0$. Se define el "grosor característico" del mismo, como la altura a la cual la densidad de estrellas ha caído en un factor de e^{-1} respecto a su valor en el plano medio.

El grosor característico del disco galáctico en cualquier punto depende en general del tipo de estrellas estudiadas. Cuando se describe la distribución de estrellas jóvenes y luminosas se encuentra $z_c \simeq 50pc$. Si en su lugar se estudia la distribución de estrellas más envejecidas y rojizas se obtiene, $z_c \simeq 325pc$. Esta diferencia permite establecer la existencia de dos componentes estelares bien diferenciadas: el disco joven ($z_{c,young} \simeq 50pc$) y el disco viejo ($z_{c,old} \simeq 325pc$).

Cuando se examina en detalle la composición química de las estrellas pertenecientes al disco, se reconoce la existencia de claras diferencias que permiten deducir la existencia de una tercera componente conocida como "disco grueso".

Las diferencias en composición química de las estrellas en la Galaxia, están en general cuantificadas por un parámetro conocido como la metalicidad. Ella es una medida de la cantidad mayor o menor de elementos pesados presentes en la estrella y se define como la diferencia en el contenido de Hierro, un buen representante de los elementos pesados, respecto a Hidrógeno, en la estrella y en el Sol, así,

$$\left[\frac{Fe}{H}\right] = \log\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right) - \log\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_{\odot}$$

En virtud de esta definición puede decirse que nuestro Sol tiene una metalicidad $[Fe/H] = 0$, las estrellas con un menor contenido de metales que el tienen metalicidades, $[Fe/H] < 0$ y aquellas con contenidos más altos son tales que $[Fe/H] > 0$.

Las diferencias en el contenido de metales entre las estrellas se deben fundamentalmente a la composición química de la nube de la que se formaron, en particular a su mayor o menor contenido de elementos pesados. Sabemos que los más livianos elementos, Hidrógeno y Helio fueron creados en los primeros minutos del universo. Los elementos más pesados, que ahora integran la mayoría de nuestros cuerpos y del planeta en general, se formaron en el seno de las estrellas. Los procesos evolutivos de estas últimas son capaces de transportar lentamente los elementos pesados sintetizados en su interior hasta el medio interestelar del que más tarde se formarán otras estrellas. En este escenario, podemos decir que las estrellas más primitivas que utilizaron la materia directamente formada en el Big-Bang, contenían muy poco o nada de elementos pesados : eran estrellas altamente pobres en estos elementos (su metalicidad es muy baja, $[Fe/H] \approx -4,5$. Las estrellas formadas más recientemente, que utilizaron parte de la materia expelida por las primeras después de su proceso evolutivo se vieron enriquecidas con los recién formados elementos pesados, y presentan por tanto altas metalicidades ($\left[\frac{Fe}{H}\right] \approx 1$). Se habla así de la existencia de dos tipos extremos de poblaciones estelares : la denominada Población I, a la que pertenecen estrellas jóvenes con un alto contenido de elementos pesados (nuestro Sol es una de ellas por ejemplo) y Población II, a la que pertenecen estrellas viejas de muy baja metalicidad. La metalicidad de las estrellas del disco joven y el disco viejo, en conjunto, oscila entre $-0,5 < \left[\frac{Fe}{H}\right] < 0,3$. Otro grupo de estrellas, a primera vista indistinguible, con más bajas metalicidades ($-0,6 < \left[\frac{Fe}{H}\right] < 0,4$) parecen pertenecer al disco, constituyendo un sistema con un grosor característico de $z_{c,thick} = 1,4kpc$, que se conoce como el disco grueso, en contraposición con el denominado disco delgado, constituido por la superposición del disco viejo y el disco joven.

Los estudios cinemáticos del disco delgado (que contiene el 98% de la materia del disco galáctico) permiten encontrar para este subsistema una masa total de alrededor de $6 \times 10^{10} M_{\odot}$ en forma de estrellas y $5 \times 10^5 M_{\odot}$ en la forma de gas y polvo. La luminosidad total de la componente delgada del disco galáctico en la banda azul (la banda en la que emite el 99

$$\Upsilon_{thin} = 3M_{\odot}/L_{\odot}$$

La relación masa luminosidad para un sistema dado de estrellas permite establecer cuál es el tipo más común de estrella que aporta masa y luminosidad al sistema. Esto se obtiene usando la conocida relación masa luminosidad para las estrellas de la secuencia principal, introducida en la sección 1.7 y expresada por,

$$L = L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha}$$

donde vimos que $\alpha \approx 4$ para estrellas con masas superiores a $0,5M_{\odot}$. De la anterior expresión la relación masa luminosidad para una estrella de masa M y luminosidad L , está dada por,

$$\Upsilon = M/L = M / (L_{\odot} (M/M_{\odot})^{\alpha})$$

Conocida la relación masa-luminosidad para la estrella (expresada en unidades de $M_{\odot}/L_{\odot}$) su masa estará dada por,

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

Se concluye, utilizando este resultado, que la masa de las estrellas típicas del disco galáctico es,

$$M = 3^{1/(1-\alpha)} M_{\odot} = 0,69 M_{\odot}$$

Valor que coincide con el calculado por la teoría de formación estelar.

Ciertas estructuras de interés sirven como trazadoras de la estructura del disco de nuestra Galaxia. Lo son así por ejemplo las agrupaciones de estrellas jóvenes (agrupaciones O,B), las nubes de hidrógeno atómico y las regiones HII. Estudiando la distribución de estos trazadores se ha descubierto que la materia en el disco de la Galaxia se acumula formando una regular estructura espiral como la observada en otras galaxias.

En este patrón espiral, el Sol ocupa el que ha terminado denominandose el Brazo de Orión-Cisne, aunque algunos investigadores piensan que podría tratarse más bien del Puente de Orión, una gran reunión de estrellas y gas que comunican dos brazos vecinos, uno exterior conocido como el brazo de Perseo y otro interior al que se da el nombre de brazo de Sagitario.

7.2.2 El Abultamiento Central

A cerca de $1kpc$ del centro de la Galaxia el disco parece sufrir un engrosamiento sustancial, seguido también de un cambio drástico en las características de las estrellas que lo componen, su composición química y cinemática. Esta región, más que una prolongación del disco es distinguida como un subsistema separado conocido como el Abultamiento Central de la Galaxia.

Las estrellas en esta región de la Galaxia se distribuyen aproximadamente formando un elipsoide prolato (ver sección 8.4), cuyo eje mayor, de $1kpc$, parece orientado formando respecto a la visual dirigida desde el Sol al centro de la Galaxia formando un ángulo de casi 45 grados. En dirección vertical la distribución de materia tiene un grosor característico de $400 pc$ lo que determina las dimensiones del eje menor del elipsoide.

La composición química de las estrellas en el Abultamiento Central varía desde una pobre metalicidad ($[Fe/H] > -1$) hasta una muy alta ($[Fe/H] < 1$), con un promedio de $+0,3$. Esto sugiere que la inmensa mayoría de las estrellas de este subsistema de la Galaxia son relativamente jóvenes (no superarían los 10 mil millones de años. Esto se ve apoyado por el hallazgo en su interior de una ingente cantidad de nubes moleculares (que podrían sumar aproximadamente $10^8 M_\odot$) probablemente responsables por la aparición de las estrellas más jóvenes.

La masa estimada del abultamiento central, utilizando métodos cinemáticos, asciende a $10^{10} M_\odot$ y su luminosidad en la banda azul es $L_B = 3 \times 10^9 L_\odot$, lo que da para este subsistema una razón masa luminosidad igual a $\Upsilon = 3 M_\odot / L_\odot$, similar a la componente delgada del disco.

7.2.3 Halo Galáctico

Rodeando el disco y el Abultamiento central de la Galaxia, los subsistemas galácticos que contienen la mayor parte de la materia luminosa de la Vía Láctea, se encuentra el que es denominado el Halo Galáctico. La componente visible de dicho halo, el denominado halo estelar, está formada por la reunión de los llamados cúmulos globulares y las denominadas estrellas de campo, estrellas que no pertenecen a los cúmulos y que exhiben altísimas velocidades, muy distintas de las que presentan las estrellas del disco galáctico.

Entre la población de cúmulos es reconocible además una clara diferencia en la composición química de las estrellas que los constituyen. Se habla así de los cúmulos globulares pobres en metales ($[Fe/H] > -0,8$) y los que son ricos en ellos ($[Fe/H] > -0,8$). Los primeros se distribuyen situándose a distancias muy grandes del centro galáctico e imitando la distribución de las estrellas de campo. Los cúmulos ricos en metales, se encuentran cerca al Abultamiento central de la galaxia y tienen características similares a las de las estrellas que constituyen la componente gruesa del disco.

Cúmulos pobres en metales y estrellas de campo se distribuyen en una región con forma de un elipsoide oblato, que tiene un semieje mayor, sobre el disco de la Galaxia, de unos $50 kpc$ y un semieje menor en dirección perpendicular al disco entre 0,8 a 0,9 veces la longitud del semieje mayor.

La masa total del Halo puede ascender a $10^9 M_\odot$ de la cual aproximadamente el 1% se encuentra en la forma de cúmulos globulares y el restante lo contiene las estrellas de campo. La luminosidad total del Halo, en la banda azul es $L_B = 10^9 M_\odot$, lo que da para este subsistema una razón masa - luminosidad de $\Upsilon_{halo} \simeq 1 M_\odot / L_\odot$.

A una escala mayor parece existir lo que ha terminado por denominarse el Halo de Materia Oscura. Con una distribución aproximadamente esférica de radio cercano a los 100 kpc, esta componente del halo galáctico está formada por materia que sin tener propiedades emisivas de ningún tipo, crea un efecto gravitacional sobre la restante materia luminosa de la Galaxia (en la próxima sección, hablaremos un poco acerca de la manera como se ha supuesto la existencia de este halo de materia invisible). Las principales componentes de la materia oscura en el halo de nuestra Galaxia podrían ser los denominados MACHOs

(Massive Compact Halo Objects), objetos masivos, compactos, numerosos y poco luminosos, en la forma por ejemplo de agujeros negros, enanas rojas, enanas marrones (cuerpos con unas 10 veces la masa del planeta júpiter y cuya presión y temperatura interior no son suficientes para encender los procesos de fusión nuclear). En la sección dedicada a la curva de rotación de la Galaxia hablaremos un poco más en detalle sobre esta peculiar componente de la Galaxia.

En síntesis y sumando los aportes de los distintos subsistemas galácticos (y sólo teniendo en cuenta el debido a la materia luminosa) puede decirse que nuestra Galaxia tiene una masa total de alrededor de $9 \times 10^{10} M_{\odot}$, la que parece representar apenas el 10% de la masa total, que parece estar en su mayoría concentrada en la forma de materia oscura. La luminosidad total de la Galaxia, en la banda azul, asciende a los $2,3 \pm 0,6 \times 10^{10} L_{\odot}$, la que representa aproximadamente el 67% de la luminosidad bolométrica (en toda el espectro electromagnético). La otra componente importante de la emisión galáctica la constituye la emisión en el infrarrojo por parte del polvo interestelar. Al tener esta última en cuenta encontramos finalmente para la Galaxia una luminosidad bolométrica de $3,6 \times 10^{10} L_{\odot}$.

7.3 Cinemática de la Galaxia

A pesar de que nuestras cortas observaciones (del orden de 100 000 años) parecen mostrarnos una Galaxia invariable y quieta, ella realmente es un ente dinámico. Su aparente quietud se debe al hecho de que el tiempo en el que acaecen cambios considerables en su apariencia, producidos obviamente por cambios en la posición del Sol, son muy grandes (del orden de centenares de millones de años) cuando los comparamos con la edad de nuestra especie. El estudio detallado de los objetos que la constituyen (nubes, estrellas, cúmulos) nos revela la existencia de una agitación constante y organizada : toda la materia en la Galaxia está orbitando en torno el centro geométrico de la misma. El estudio de esta cinemática de la Galaxia, el estudio de las velocidades "instantáneas" de las estructuras observadas que pertenecen a ella, le revela al astrofísico detalles importantes sobre la manera como está distribuida globalmente la materia que la constituye y se presenta de gran importancia en la determinación de la existencia de las más peculiares componentes, la materia oscura y el agujero negro supermasivo que parece residir en el centro mismo de la Galaxia.

Para estudiar el movimiento de cualquier objeto, es necesario primero definir el sistema respecto al cual referiremos su posición y el cambio de la misma en el tiempo. El sistema de referencia natural utilizado en astronomía es aquel que tiene como origen la Tierra misma. La posición de cualquier cuerpo en la Galaxia, en un sistema centrado en la Tierra, se indica por medio de 3 coordenadas (Ver figura 7.4) : la distancia que nos separa del cuerpo en cuestión (r), la "altura angular" medida sobre el plano galáctico desde la posición del Sol o Latitud Galáctica (b) y el ángulo, medido a partir de la línea que une el Sol con el centro galáctico en dirección contraria a las manecillas del reloj vista desde el norte (desde allí la rotación galáctica se realiza en el sentido de las manecillas

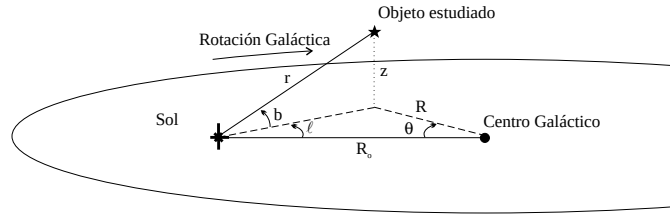


Figura 7.4: Coordenadas Galácticas.

del reloj), de la proyección sobre el plano galáctico de la visual dirigida al cuerpo o Longitud Galáctica l . A este se lo conoce como el sistema de coordenadas galácticas. En este sistema de coordenadas la posición del centro galáctico estará indicada por la tripleta $(l_o, b_o, r_o) = (0, 0, 8, 0 \pm 0, 5kpc)$ donde $8, 0 \pm 0, 5kpc$ es precisamente la distancia solar galactocéntrica.

A pesar de lo adecuado que parezca ser, desde el punto de vista observacional, el sistema de coordenadas galácticas, su origen (la Tierra o a la escala galáctica, el Sol, indiferentemente) está en constante movimiento. Un más adecuado sistema de coordenadas, que utiliza un origen en "reposo", es el denominado sistema de coordenadas cilíndricas galactocéntricas. La posición de cualquier cuerpo en la galaxia, en este sistema se indica por medio de 3 números (Ver figura ref: coordenadas): la distancia al centro galáctico de la proyección del cuerpo sobre el disco o distancia galactocéntrica (R), la altura lineal sobre el disco (z) y el ángulo formado por la línea que une la posición actual del Sol y el centro galáctico, y la proyección sobre el disco galáctico del radio vector dirigido al cuerpo considerado medido en la dirección de la rotación galáctica o azimut galáctico (θ).

En el sistema de coordenadas cilíndricas galactocéntricas, las distintas componentes de la velocidad de un cuerpo se denotan por,

$$\Pi \equiv \frac{dR}{dt}$$

$$\Theta \equiv R \frac{d\theta}{dt}$$

$$Z \equiv \frac{dz}{dt}$$

En este sistema de coordenadas, estudios precisos de la posición del Sol le asignan la tripleta $(R, z, \theta) = (8, 0 \pm 0, 5kpc, 30pc, 0)$.

Dado que las observaciones que realizamos desde Tierra estarán indefectiblemente expresadas en un sistema unido a ella (del tipo del sistema de coordenadas galácticas) es de interés establecer la conexión entre este último y el más adecuado sistema de coordenadas cilíndricas galactocéntricas. Tal conexión sólo es posible sin embargo si conocemos con precisión el movimiento del Sol en la Galaxia relativo al centro de la misma. El

movimiento solar es sin embargo, como el de las demás estrellas en la Galaxia, bastante complicado y distinto de la sencilla imagen de órbitas circulares perfectas residentes todas sobre el plano de simetría del disco. Por esta razón, se ha convenido la utilización de un idealizado sistema respecto al que se miden las velocidades de las estrellas vecinas al Sol. Este sistema se ubica exactamente sobre el plano galáctico ($z = 0$) a una distancia igual a la distancia solar galactocéntrica R_o y moviéndose en torno al centro galáctico con rapidez constante en una órbita circular. A este se lo conoce como el Sistema Estándar de Reposo Local (Local Standard of Rest, LSR), que por su definición está caracterizado por,

$$\Pi_{LSR} = 0$$

$$\Theta_{LSR} = \Theta_o$$

$$Z_{LSR} = 0$$

Donde Θ_o se puede considerar como la velocidad tangencial galactocéntrica promedio de las estrellas vecinas al Sol. Determinaciones precisas de esta cantidad asumen para ella un valor estándar de,

$$\Theta_o = 220 km s^{-1}$$

La velocidad de los cuerpos en la Galaxia relativa al LSR es conocida como la velocidad peculiar del cuerpo y sus componentes (u, v, w) están dadas por,

$$u = \Pi - \Pi_{LSR} = \Pi$$

$$v = \Theta - \Theta_{LSR} = \Theta - \Theta_o$$

$$w = Z - Z_{LSR} = Z$$

Medidas precisas del movimiento relativo al Sol de las estrellas vecinas, proveen el valor de las componentes de la velocidad peculiar del Sol, su velocidad respecto al LSR,

$$u_{\odot} = -9 km s^{-1}$$

$$v_{\odot} = 12 km s^{-1}$$

$$w_{\odot} = 7 km s^{-1}$$

Es decir, el Sol está, respecto al LSR, ascendiendo respecto al disco ($w > 0$), moviéndose levemente hacia adentro ($u < 0$) y adelantándose un poco en su movimiento orbital ($v > 0$).

En conjunto el Sol está viajando, respecto a sus estrellas vecinas a $16,5 km s^{-1}$ en una dirección indicada por $b = 25^\circ$ y $l = 53^\circ$, hacia la constelación de Hércules. A ese punto imaginario en el espacio, hacia el que parece dirigirse el Sol se lo conoce como el Apex Solar. El punto contrario, del que parece alejarse, se la llama por el contrario el Antiapex Solar.

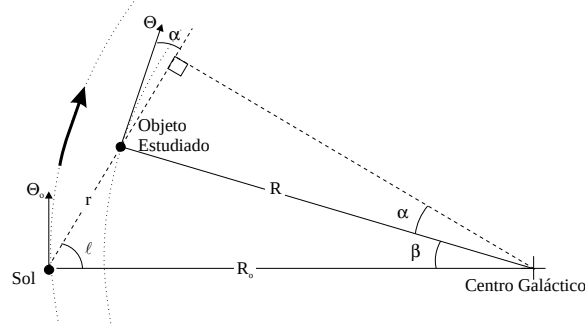


Figura 7.5: Explicación de la manera como se determina la velocidad de rotación galáctica en función de la distancia galactocéntrica

Hechas todas estas definiciones, ocupémonos ahora del problema de determinar el movimiento de los cuerpos que constituyen la Galaxia respecto al centro de la misma (en el sistema de coordenadas cilíndricas galactocéntricas) a partir de las observaciones disponibles en Tierra.

Imaginemos para empezar un cuerpo observado por simplicidad en el plano mismo de la Galaxia ($b = 0^\circ$) en una longitud galáctica l , a una distancia galactocéntrica R y heliocéntrica r , dotado de una velocidad respecto al centro de la Galaxia cuya única componente no nula es Θ (Ver figura 7.5).

Desde Tierra (que se supone situada exactamente en la posición y con la velocidad del LSR) los estudios espectroscópicos permiten determinar la velocidad a la que se aleja o acerca el cuerpo en la dirección de la visual (dirección del radio vector r). Más refinados estudios pueden proveer del valor de la velocidad tangencial (perpendicular a la visual), si es conocido el movimiento propio del cuerpo (desplazamiento angular) y su distancia. Consideraciones geométricas elementales (ver figura 7.5) permiten escribir la relación existente entre los distintos parámetros asociados al cuerpo y las observadas componentes tangencial y radial de su velocidad respecto al observador en Tierra,

$$v_r = \Theta \cos \alpha - \Theta_o \sin l$$

$$v_t = \Theta \sin \alpha - \Theta_o \cos l$$

$\Theta(R)$ se puede escribir como $R\Omega(R)$, donde Ω es la velocidad angular del movimiento de traslación. Introduciendo esta cantidad, y reconociendo las identidades geométricas,

$$R \cos \alpha = R_o \sin l$$

$$R \sin \alpha = R_o \cos l - r$$

la velocidad radial y tangencial del cuerpo respecto al observador en Tierra es,

$$v_r = (\Omega - \Omega_o) R_o \sin l \quad (7.1)$$

$$v_t = (\Omega - \Omega_o) R_o \cos l - \Omega r \quad (7.2)$$

Nótese, del anterior par de relaciones, que una vez indicada la longitud galáctica del cuerpo y su distancia, y después de medir las componentes de su velocidad respecto a la Tierra, es posible obtener su velocidad angular respecto al centro galáctico. Si se toman cuerpos a muy diversas distancias heliocéntricas, r , y por tanto a distintas distancias galactocéntricas, R , se puede construir la curva de rotación galáctica, R vs. $\Omega(R)$, de gran interés en el estudio de la dinámica galáctica. Lamentablemente, muchos de los cuerpos cuya distancia puede ser fiablemente encontrada (estrellas, cúmulos galácticos, nebulosas difusas) están escondidos a la observación directa por efecto de los poderosos efectos absorbentes del polvo interestelar y así nuestra exploración de la rotación galáctica no puede ser llevada más allá de unos centenares de parsecs desde el Sol, lo que representa una fracción minúscula de la curva de rotación total. Más adelante veremos un método en el que utilizando la emisión en 21 cm del hidrógeno neutro que puede atravesar grandes distancias en el disco galáctico y que explota las anteriores relaciones nos permite construir la curva buscada.

Una aproximación, permite reescribir las anteriores relaciones para el caso del estudio de cuerpos situados en regiones vecinas al Sol, las que finalmente proveen valiosos métodos para determinar el valor de las constantes R_o y Ω_o .

Si hacemos la suposición de que el cuerpo estudiado se encuentra suficientemente cercano como para que $\Omega \simeq \Omega_o$ y si suponemos que la función $\Omega(R)$ varía "suavemente" con R , podemos escribir la expansión,

$$\Omega(R) = \Omega(R_o) + \left. \frac{d\Omega}{dR} \right|_{R_o} (R - R_o) + \dots$$

Considerando sólo los términos de primer orden, se obtiene la aproximación,

$$\Omega - \Omega_o \simeq \left. \frac{d\Omega}{dR} \right|_{R_o} (R - R_o)$$

en esta aproximación (7.1) y (7.2) se reescriben como,

$$v_r \simeq \left[\left. \frac{d\Omega}{dR} \right|_{R_o} - \frac{\Omega_o}{R_o} \right] (R - R_o) \sin l$$

$$v_t \simeq \left[\left. \frac{d\Omega}{dR} \right|_{R_o} - \frac{\Omega_o}{R_o} \right] (R - R_o) \cos l - \Omega_o r$$

Pero es claro que si $d \ll R_o$ entonces $\beta \ll 1$ y $\cos \beta \approx 1$ de donde,

$$R_o = d \cos l + R \cos \beta \simeq d \cos l + R$$

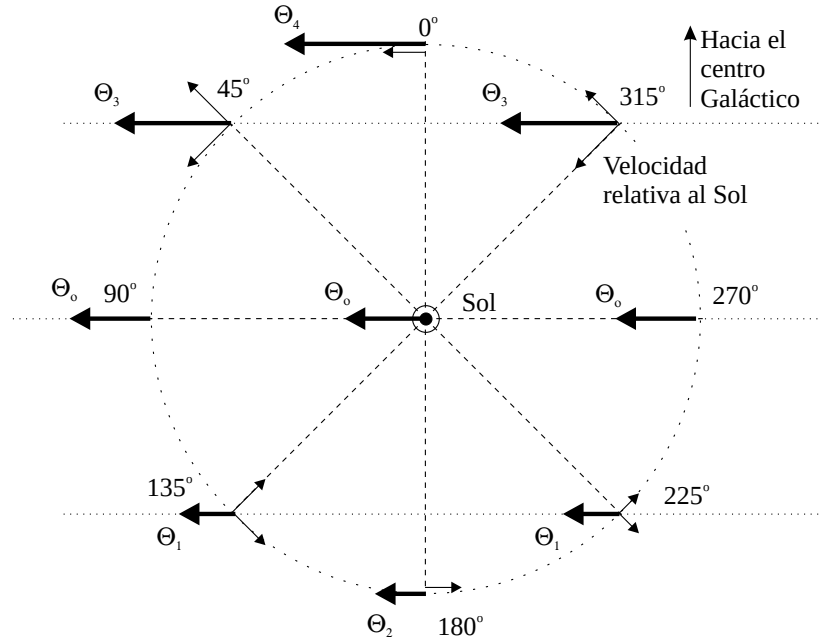


Figura 7.6: Las componentes tangencial y radial de estrellas en el vecindario solar a distintas longitudes galactocéntricas.

de donde,

$$v_r = Ad \sin 2l \quad (7.3)$$

$$v_t = Ad \cos 2l + Bd \quad (7.4)$$

donde A y B reciben el nombre de constantes de Oort, en honor a Jan Oort quien en 1927 realizó por primera vez este razonamiento, y que están por definición dadas por,

$$A \equiv -\frac{1}{2} \left[\frac{d\Omega}{dR} \Big|_{R_o} - \frac{\Theta_o}{R_o} \right]$$

$$B \equiv -\frac{1}{2} \left[\frac{d\Omega}{dR} \Big|_{R_o} + \frac{\Theta_o}{R_o} \right]$$

Es posible entender la dependencia de las velocidades tangencial y radial de las estrellas vecinas al Sol con la longitud galáctica, tal y como es dada por las que llamaremos relaciones de Oort, representadas en las ecuaciones (7.3) y (7.4), cuando se examina la figura 7.6 . En ella se han representados los movimientos de estrellas situadas a la misma distancia del Sol, en el centro con longitudes galácticas de 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 305°. Las estrellas con longitudes galácticas de 90 y 270°, se mueven, en nuestro sencillo modelo se mueven sobre la misma órbita solar y tienen por tanto una similar

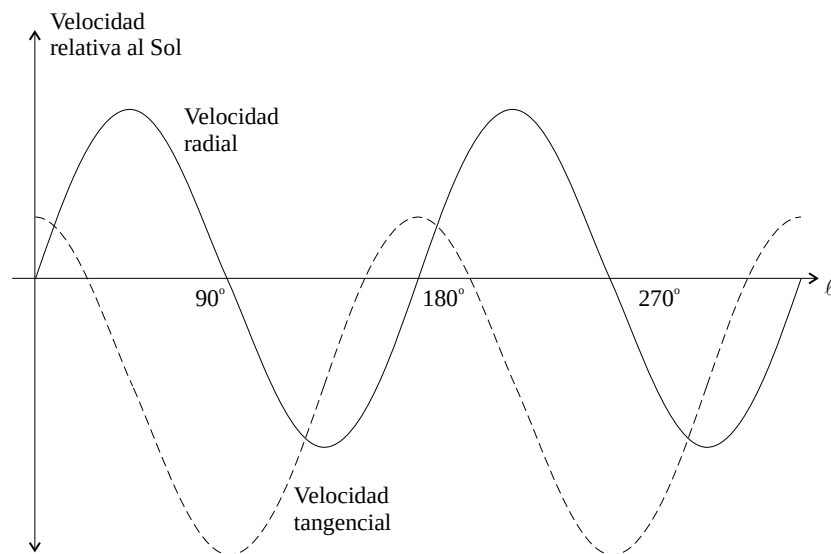


Figura 7.7: La dependencia de la velocidad radial y tangencial con la longitud galactocéntrica.

velocidad de traslación por lo que su velocidad radial y tangencial serán nulas. Por otro lado las estrellas con longitudes galácticas de 0 y 180° por encontrarse sobre el mismo radio galáctico en el que reside el Sol tienen también velocidades radiales nulas, pero sus velocidades tangenciales serán positiva (hacia la izquierda), para la estrella más cercana al centro galáctico ($l = 0^\circ$) y negativa (hacia la derecha) para la más alejada ($l = 180^\circ$). En posiciones intermedias la dirección de ambas componentes, tangencial y radial dependerá de si la órbita de la estrella considerada es mayor o menor a la órbita solar y de si sobre ella está adelantada o atrasada respecto a la posición del Sol.

Si fuera posible medir las velocidades tangencial y radial de un buen número de estrellas situadas aproximadamente a la misma distancia desde el Sol, y a distintas longitudes galácticas, sería posible construir las curvas representadas en la figura 7.7. Por (7.3) vemos que la medida de la amplitud de la curva v_r vs. l nos proveería del valor de la constante A , con el cual, la medida de la diferencia entre las curvas de velocidad radial y tangencial en cada punto nos darían también el valor de B .

Los resultados obtenidos a partir de análisis precisos de información observacional dan los siguientes valores para estas constantes,

$$A = 14,4 \pm 1,2 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

$$B = -12,0 \text{ km s}^{-1} \pm 2,8 \text{ kpc}^{-1}$$

De su definición es posible obtener finalmente el valor de Ω_o , dado por,

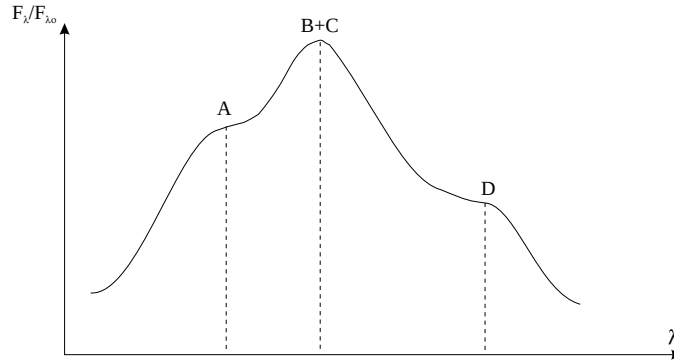


Figura 7.8: Típica topología de la línea de los 21 cm cuando es medida en una cierta dirección sobre el plano de la Galaxia.

$$\Omega_o = A - B = 26,4 \pm 4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

tomando el valor estándar de $R_o = 8,0 \pm 0,5 \text{ kpc}$ obtenemos también el valor de la velocidad tangencial del LSR,

$$\Theta_o = 211,2 \pm 45,2 \text{ km s}^{-1}$$

en buen acuerdo con el valor introducido antes, y obtenido por métodos distintos.

Como ya habíamos explicado, la relación precisa entre v_r o v_t y $\Omega(R)$, nos permitirían encontrar, si es conocida la distancia r al objeto estudiado, la curva de rotación de la Galaxia. Nos topamos sin embargo con la dificultad de que dicha distancia sólo puede ser determinada en el caso de objetos que están escondidos tras el oscuro velo de l polvo interestelar que llena la Galaxia. La observación de la línea de los 21 cm emitida por el hidrógeno neutro en las nubes difusas, ofrece nuevas esperanzas a la solución del problema. Cuando se mide la intensidad de esta línea en un determinada longitud galáctica, se encuentra un resultado como el presentado en la figura 7.8). Los distintos picos que caracterizan este espectro son producidos por efecto de que las nubes que producen la emisión que los constituye se mueven a distintas velocidades radiales relativas al Sol, por efecto del movimiento de rotación galáctico. Como puede apreciarse en la figura 7.9, el pico correspondiente a la máxima velocidad radial relativa (máximo desplazamiento Doppler), corresponde a la emisión de una nube centrada en un punto en donde el radio galáctico correspondiente es perpendicular a la visual dirigida a la nube misma. Para ella, de modo elemental se encuentra que,

$$r = R_o \cos l$$

Una vez conocida la distancia a la nube y, por el desplazamiento Doppler, su velocidad radial relativa, es posible finalmente encontrar la velocidad angular Ω a la distancia

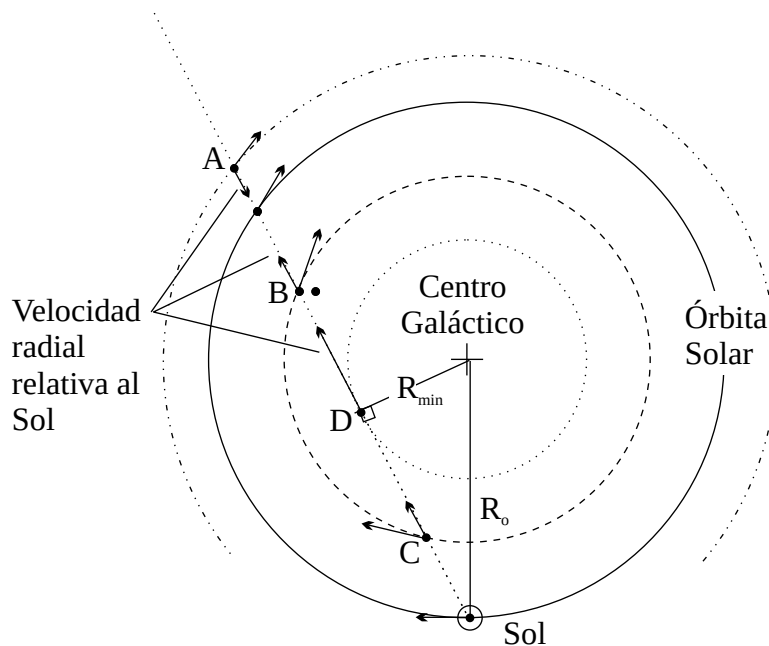


Figura 7.9:

galactocéntrica a la que ella se encuentra ($R = R_o \sin l$).

Una serie de hechos limitan la capacidad que tiene este método para proveer la curva de rotación galáctica. El primero y más obvio es el de que es imposible utilizarlo para observaciones con $90 < l < 270$, es decir no es posible obtener información sobre la rotación galáctica observando el hidrógeno neutro, para $R > R_o$. Por otro lado para longitudes galácticas menores a 20 grados, el movimiento de las nubes empieza a alejarse sustancialmente de la aproximación de movimientos circulares y las velocidades radiales medidas ya no están en acuerdo con el sencillo modelo elaborado.

A pesar de estas dificultades, la utilización de otros medios para determinar la rotación galáctica en las zonas prohibidas al método descrito, ha permitido construir finalmente la curva buscada (ver figura 7.10). Las peculiaridades exhibidas por tal curva, y la información que de ella podemos extraer en términos de la distribución global y la cantidad total de materia en nuestra Galaxia serán discutidas en la sección dedicada a las curvas de rotación de las galaxias espirales en el siguiente capítulo.

7.4 Ejercicios

- 7.1 Cuando se observa la emisión de hidrógeno neutro en la dirección correspondiente a 30° de longitud galáctica, se encuentra un pico con un desplazamiento Doppler dado por $\Delta\lambda = 0,08mm$. Determinar la distancia galactocéntrica de la nube que

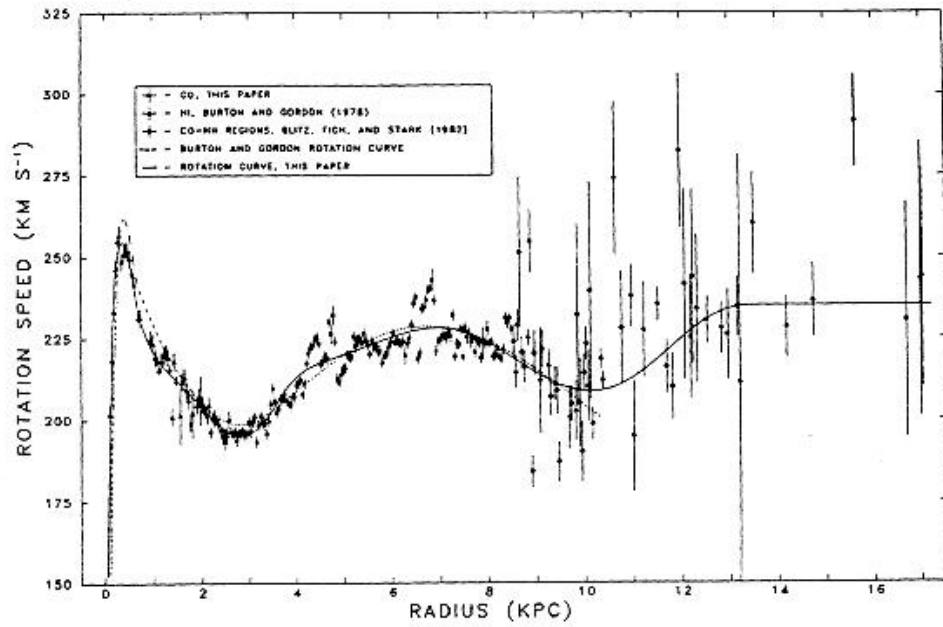


Figura 7.10: La curva de rotación de la Vía Láctea.

produce el pico y la velocidad de rotación correspondiente.

- 7.2 Estimar $d\Theta/dr$ en el vecindario solar asumiendo que las constantes de Oort A y B son $14,4$ y $-12,0 \text{ km s}^{-1} \text{ Kpc}^{-1}$, respectivamente. ¿Qué dice esto acerca de la variación de Θ con R en la región vecina al Sol?
- 7.3 La velocidad de rotación de un punto de la Galaxia situado a una distancia de $0,4 \text{ Kpc}$ del centro es 200 km/s . Sabiendo que la curva de rotación presenta un comportamiento lineal para $R < 0,8 \text{ Kpc}$, estimar la densidad de la Galaxia en $R=0,4 \text{ Kpc}$ en $M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ y en kg m^{-3} .