

## Capítulo 15

### A GALÁXIA

Este capítulo será dedicado ao estudo da nossa Galáxia, a Via Láctea, suas propriedades e constituintes, bem como os mecanismos postulados para a sua formação. Os tópicos abordados serão os seguintes:

- **INTRODUÇÃO: VISÃO GERAL DA ESTRUTURA DA GALÁXIA**

- O tamanho e a forma da Galáxia usando contagem de objetos – W. Herschel

- O tamanho e a forma da Galáxia através do estudo dos aglomerados globulares – H. Shapley

- A estrutura da nossa Galáxia

- Populações estelares

- **MOVIMENTO ORBITAL**

- A Galáxia está em rotação

- **A FORMAÇÃO DA GALÁXIA**

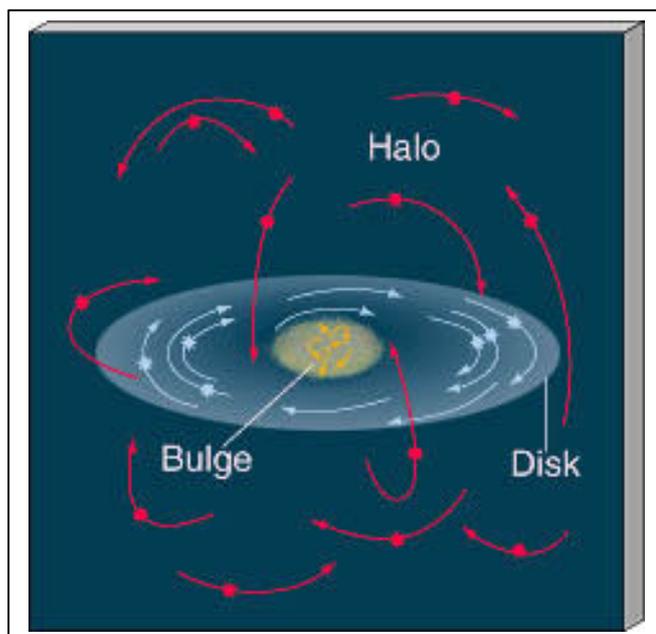
- Estrutura espiral

- Persistência dos braços espirais

- **A MASSA DA NOSSA GALÁXIA**

- Matéria escura

- **O CENTRO GALÁCTICO**



### Bibliografia

- W. Maciel, 1991 "Astronomia & Astrofísica" – IAG/USP
- Zeilik & Smith, 1987 "Introductory Astronomy & Astrophysics"
- Chaisson & McMillan, 1997 "Astronomy Today"

### A GALÁXIA

## INTRODUÇÃO

### VISÃO GERAL DA ESTRUTURA DA GALÁXIA

A nossa galáxia, a Via Láctea (ou Galáxia), é um conjunto formado por estrelas, gás e poeira, isolado no espaço e mantido por sua própria gravidade.

A Galáxia tem três partes principais: um núcleo ou bojo (na região mais central), um disco e um halo. O disco é a parte onde o sistema solar está situado. Estrelas de População I e nuvens interestelares de gás e poeira também habitam o disco. O Sol localiza-se um pouco acima do plano central a uma distância de aproximadamente 8 kpc do centro da Galáxia.

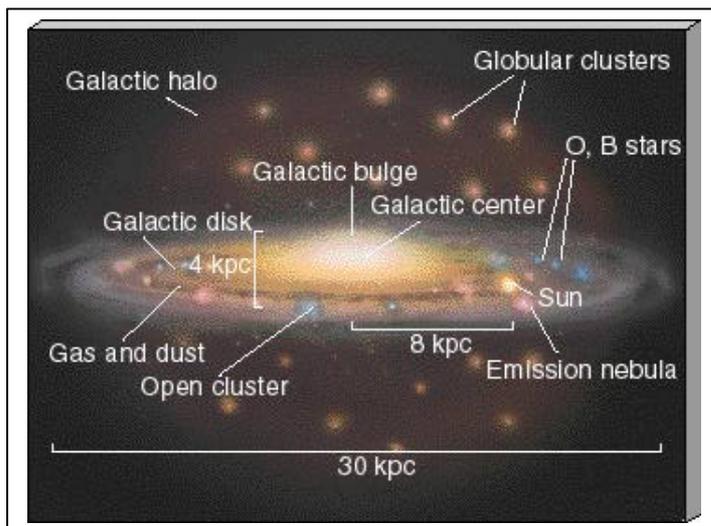


Figura 1 – Esquema da via Láctea com os seus componentes (Chaisson & McMillan, *Astronomy Today*, fig. 14.9, p.399).

O nosso Sol está em uma posição desfavorável para a observação da estrutura Galáctica, pois este faz parte dela. Astrônomos ópticos que tentam estudar os braços espirais para reconstruir a estrutura da Galáxia deparam-se com a poeira interestelar. Já os rádio-astrônomos podem observar além da poeira (devido ao maior comprimento das ondas de rádio comparado ao das ondas no óptico) e portanto eles podem detectar a emissão rádio das nuvens de gás que marcam os braços espirais da Via Láctea.

O disco galáctico pode ser visto a olho nu em uma noite estrelada como uma banda de luz difusa que divide o céu em dois. Quando olhamos na direção perpendicular ao disco galáctico vemos relativamente poucas estrelas, mas quando olhamos na direção do disco vemos tantas estrelas que a luz destas chega a se fundir formando uma banda de luz brilhante.

## O tamanho e forma da Galáxia usando contagens de objetos – W. Herschel

No final do século XVIII, muito antes dos métodos de medidas de distâncias terem sido desenvolvidos, o astrônomo inglês W. Herschel tentou estimar o tamanho e a forma da nossa Galáxia simplesmente contando quantas estrelas ele podia ver em diferentes direções no céu. Supondo que todas as estrelas tinham o mesmo brilho, ele concluiu que a Galáxia era achatada, em forma de disco e que o Sol ocupava o seu centro.

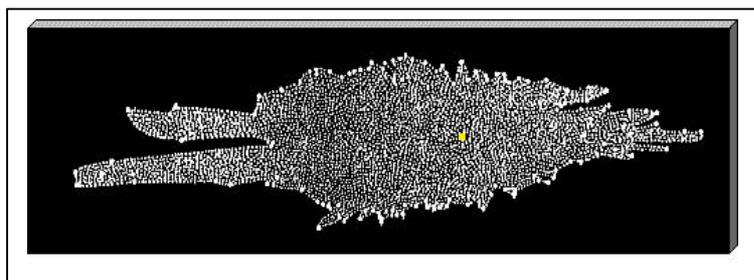


Figura 2 – A Via Láctea, como proposta por Herschell (*Chaisson & McMillan, Astronomy Today, fig. 14.3, p.394*).

Hoje sabemos que a Galáxia tem uma extensão de várias dezenas de kiloparsecs e o Sol não está em seu centro. Como puderam as primeiras observações estarem tão erradas? Devido ao fato dos astrônomos, até 1930, não saberem dos efeitos que a absorção interestelar da luz (devido ao gás e a poeira) poderiam causar nas observações ópticas. Hoje sabemos que o Sol está em um local onde há obscurecimento em quase todas as linhas de visada. Por este motivo Herschel viu contagens uniformes ao longo do disco e pensou que o Sol estava no centro dele.

Nosso entendimento da forma real da nossa Galáxia e a conclusão de que existem muitas galáxias iguais a nossa no Universo só vieram quando indicadores de distâncias como Cefeidas e RR Lyraes foram descobertos.

## O tamanho e forma da Galáxia através do estudo dos aglomerados globulares – Shapley

Os aglomerados globulares são provavelmente os sistemas mais velhos da nossa Galáxia. Eles estão distribuídos em volta do bojo e do halo Galáctico. Através da identificação de RR Lyraes em vários aglomerados globulares e da determinação das distâncias até eles, Shapley, no começo do século, descobriu que os aglomerados globulares distribuem-se em um volume enorme, aproximadamente esférico, de 30 kpc de diâmetro. Ele concluiu, acertadamente, que o Sol não está no centro desta distribuição e sim a 8 kpc dele. O centro da nossa Galáxia pode ser observado na direção da constelação de Sagitário. Shapley interpretou a distribuição de aglomerados globulares como um mapa indicador da distribuição das estrelas na Via Láctea. Ele mudou completamente a concepção que havia na época da morfologia da nossa Galáxia e “tirou” o Sol do centro do Universo.

Entretanto ele cometeu o erro de achar que a nossa Galáxia era isolada no Universo. Foi só no final dos anos 20, quando Hubble descobriu Cefeidas na galáxia de Andrômeda, que outras galáxias foram reconhecidas como tal.

## A estrutura da nossa Galáxia

Acredita-se que o disco galáctico seja fino, com uma largura de aproximadamente 300 pc, ou seja 1/100 do diâmetro da Galáxia. O bojo tem uma extensão de aproximadamente 6 kpc no plano do disco Galáctico e 4 kpc na direção perpendicular ao plano. No comprimento de onda óptico a observação do bojo é muito afetada por absorção interestelar. Outros comprimentos de onda mais longos (infravermelho, rádio) possibilitam um estudo mais completo sobre a estrutura do bojo.

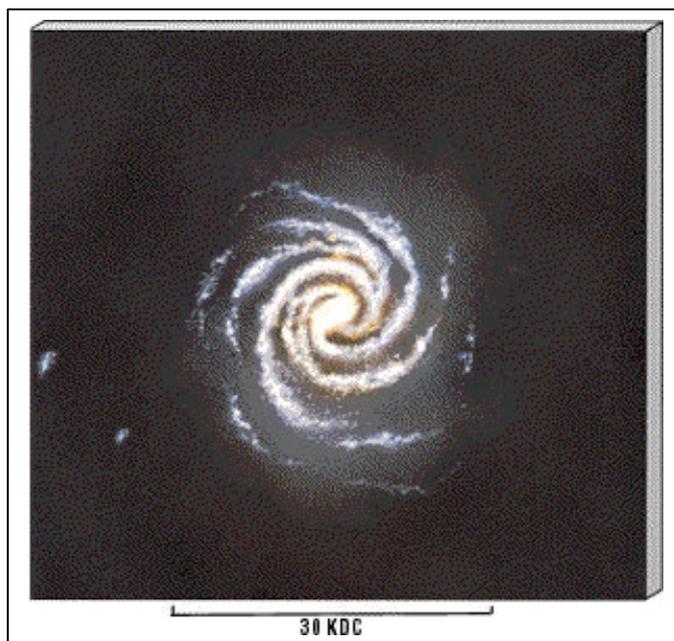


Figura 3 – Concepção artística da nossa Via Láctea, mostrando a estrutura em braços espirais (Chaisson & McMillan, *Astronomy Today*, fig. 14.13, p.403).

## Populações estelares

As três componentes da Galáxia, disco, bojo e halo, distinguem-se entre si na morfologia e em muitas outras propriedades. Por exemplo, o halo não contém gás e poeira enquanto o disco e o bojo contêm grandes quantidades dos dois. Tanto a aparência quanto a composição são diferentes para as três componentes.

Estrelas no bojo e halo são mais vermelhas do que as estrelas mais azuladas do disco. A presença de estrelas O e B no disco dá uma coloração azul a este devido ao fato destas estrelas serem muito mais brilhantes do que as anãs G, K e M, (apesar das anãs

estarem presentes em maior número). O disco contém estrelas de População I, aglomerados abertos jovens e regiões de formação estelar.

Já o halo não tem gás e poeira e suas estrelas e aglomerados globulares são parte de uma população muito mais velha (População II). A formação estelar no halo já terminou há pelo menos 10 bilhões de anos. A população do halo é, então, predominantemente vermelha.

O bojo contém uma densidade alta de gás e, portanto, há muita formação de estrelas ocorrendo nesta parte da Galáxia. Há também estrelas mais velhas nas regiões mais periféricas do bojo Galáctico onde há pouco gás. O bojo tem portanto propriedades intermediárias entre o disco e o halo. As estrelas mais velhas do bojo e do halo são também as que contêm menos metais. Isto está de acordo com o cenário de enriquecimento do meio interestelar através da evolução de sucessivas gerações de estrelas desde o princípio do Universo (os aglomerados globulares e estrelas do halo e da periferia do bojo da Galáxia representam as primeiras gerações de objetos da Galáxia e por isso estes possuem menos metais).

## MOVIMENTO ORBITAL

Qual é o movimento das estrelas, poeira e gás em nossa Galáxia? O disco da Galáxia está em rotação em volta do centro Galáctico.

Estrelas no halo e bojo não tem um movimento tão ordenado quanto as estrelas do disco. Elas têm um caminho mais ou menos randômico a percorrer, mas sempre em torno do centro Galáctico.

### A galáxia está em rotação

Da mesma maneira que o movimento orbital dos planetas evita com que estes caiam sobre o sol, o movimento das estrelas e nuvens ao redor do centro galáctico faz com que estes fiquem em seus devidos lugares. Sem este movimento de rotação, a força de gravidade mútua entre os corpos já teria feito com que o Sol e todos os outros objetos do disco tivessem caído sobre o centro Galáctico. O movimento coletivo de estrelas e gás ao redor do centro de uma galáxia é chamado de rotação galáctica.

Observações de rádio feitas na linha de 21 cm de hidrogênio nos dão informações importantes sobre a rotação da Galáxia. Através de medições do desvio de Doppler, os astrônomos podem determinar a velocidade dos objetos na direção radial a nossa linha de visada. Estas observações indicam claramente que a Galáxia não gira como um corpo

sólido mas sim em rotação diferencial. Isto significa que estrelas a diferentes distâncias do centro Galáctico giram com diferentes velocidades.

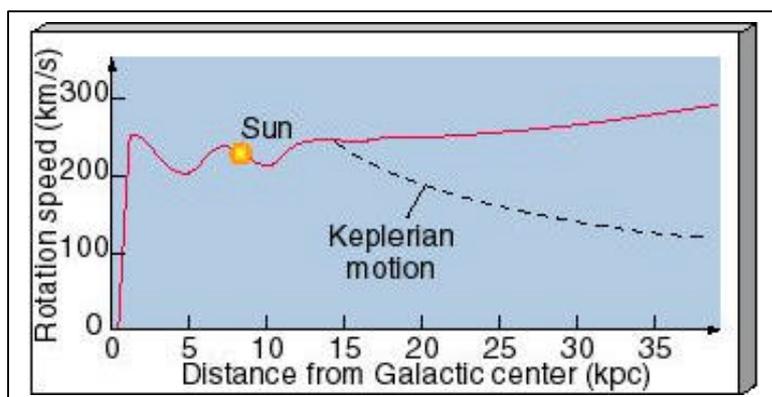


Figura 4 – Curva de rotação da Galáxia (*Chaisson & McMillan, Astronomy Today, fig. 14.17, p.407*).

O Sol logicamente também está em movimento de rotação, no disco. Devido à rotação diferencial, o Sol é como um carro em uma rodovia circular, com a faixa para os veículos rápidos a um lado, e a faixa para os lentos na outra. Assim, os veículos rápidos que passam a frente do Sol parecem, para um motorista no referencial do Sol, estarem se movendo para um lado, enquanto

que os veículos que são deixados para trás, na faixa lenta, parecem se mover para o outro lado.

Através das observações de rádio, na linha de 21 cm, podemos determinar a velocidade das estrelas e gás em relação ao Sol. Para determinar a velocidade do Sol em relação ao centro da Galáxia devemos usar um referencial que está aproximadamente em repouso com relação ao movimento do disco Galáctico. Aglomerados globulares e estrelas do halo da Galáxia podem servir como um referencial de repouso, uma vez que eles não participam da rotação geral do disco (o movimento destes é randômico). Usando a média do movimento do halo como um referencial a velocidade do Sol ao redor do centro Galáctico foi determinada. O valor encontrado foi de 230 km/s. Uma vez conhecida a velocidade do Sol e sua distância até o centro galáctico podemos calcular o período orbital, o tempo que o Sol gasta para fazer uma volta completa ao redor do centro Galáctico. O período orbital do Sol é de aproximadamente 225 a 230 milhões de anos.

A curva de rotação de uma galáxia mostra a velocidade das estrelas e nuvens interestelares a várias distâncias do centro da galáxia.

## A FORMAÇÃO DA GALÁXIA

Nos limitaremos a discutir a formação do halo e do disco.

A formação da protogaláxia começou com a contração de uma nuvem grande de gás e poeira. As primeiras estrelas e aglomerados globulares foram formados em uma distribuição irregular e extensa, cobrindo várias dezenas de kiloparsecs em todas as direções, parecida com a distribuição dos objetos do halo da nossa Galáxia, como vista

atualmente. Muitos astrônomos acham que as primeiras estrelas se formaram muito antes, em pequenos sistemas que depois se fundiram para formar a nossa Galáxia. O halo como visto hoje teria ainda a mesma forma, em um cenário ou outro.

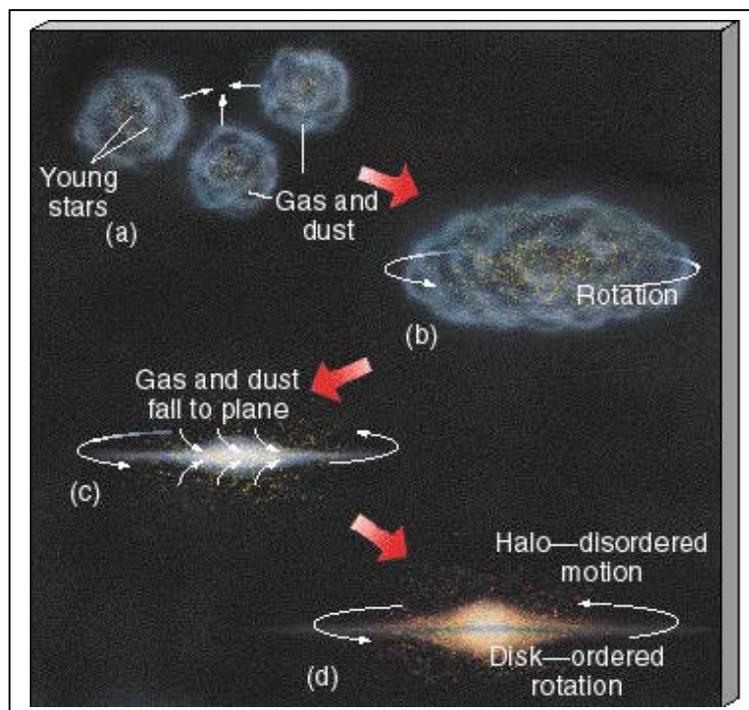


Figura 5 – Modelo proposto para a formação da nossa Galáxia (Chaisson & McMillan, *Astronomy Today*, fig. 14.12, p.402).

A formação do disco se deu por contração de parte desta nuvem inicial, assemelhando-se a formação do sistema solar, (mas em uma escala muito maior). O disco se achatou pela rotação rápida que adquiriu, em consequência de conservação do momento angular. As estrelas formadas no disco então herdaram o movimento de rotação do disco. A formação de estrelas no halo cessou quando todo o gás e poeira colapsou para formar o disco. Por isso o halo é formado por estrelas velhas, uma vez que as estrelas jovens, azuis e massivas do halo já fizeram a sua evolução há muito tempo (quando a Galáxia foi formada) deixando para trás só as estrelas de baixa massa que tem vida longa.

## Estrutura espiral

Se quisermos estudar a estrutura da Galáxia necessitaremos de outro comprimento de onda ao invés do visível, pois este é "barrado" pela absorção interestelar que é muito forte no disco Galáctico.

A chave para a observação do gás interestelar do disco Galáctico está na linha de rádio de 21 cm produzida pelo hidrogênio atômico e nas linhas de rádio produzidas por

moléculas presentes nas nuvens moleculares. Estes comprimentos de onda não são afetados por poeira e portanto nos possibilitam observar e reconstruir a estrutura do disco Galáctico.

As linhas moleculares nos permitem estudar a distribuição das nuvens interestelares mais densas. De acordo com estudos no comprimento de onda de rádio o centro da distribuição de gás no disco coincide aproximadamente com o centro do sistema de aglomerados globulares. Este centro comum é chamado de Centro Galáctico.

Estudos em rádio nos dão a melhor evidência de que vivemos em uma galáxia espiral. O diâmetro da parte visível da nossa Galáxia é de aproximadamente 30 kpc.

### Persistência dos braços espirais

Os braços espirais da nossa Galáxia contém gás interestelar, poeira, objetos pré-estelares, nebulosas de emissão, estrelas O e B e aglomerados jovens formados recentemente. Os braços espirais são a parte da Galáxia onde a formação de estrelas ocorre. O brilho destes objetos é a razão pela qual os braços espirais de outras galáxias são facilmente visíveis a grandes distâncias.

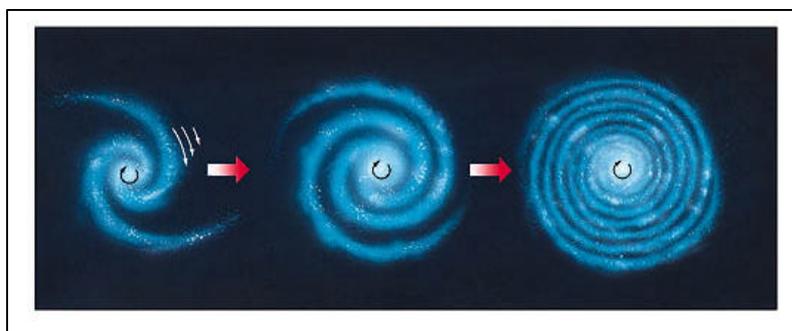


Figura 6 – Persistência dos braços espirais (*Chaisson & McMillan, Astronomy Today, fig. 14.15, p.405*).

Um problema que os astrônomos enfrentam quando tentam entender a estrutura espiral é como esta estrutura persiste. O problema é o seguinte: nós sabemos que as estrelas do disco não se movem juntas suavemente, mas sim mudam constantemente suas posições em relação umas as outras a medida que orbitam ao redor do centro Galáctico. A rotação diferencial torna impossível que qualquer estrutura em larga escala "ligada" ao material do disco sobreviva. Portanto, os braços espirais não podem ser simplesmente regiões de formação de estrelas girando juntamente com o resto do disco Galáctico.

Como então os braços espirais da Galáxia mantêm sua estrutura embora o disco gire em rotação diferencial? O cenário que melhor explica a existência de braços espirais baseia-se na explicação dos braços em termos de "ondas espirais de densidade" – ondas de compressão do gás que se movem pelo disco Galáctico, comprimindo nuvens de gás interestelar e provocando o processo de formação estelar a medida que passam. Os

braços espirais que observamos são formados por nuvens de gás densas e pelas novas estrelas recém-formadas, criados pela passagem das "ondas de densidade".

Esta explicação da estrutura espiral evita o problema da rotação diferencial porque o padrão da onda não está ligado a nenhuma parte particular do disco Galáctico. Os braços espirais que vemos são simplesmente "ondas" que se movem pelo disco, e não grandes quantidades de massa sendo transportadas de um lugar para outro. A onda (de densidade) se move através das estrelas e gás da mesma maneira que ondas sonoras atravessam o ar ou ondas no oceano movem a água.

A onda de densidade que forma um braço espiral comprime diferentes partes do disco em momentos diferentes. Embora a velocidade angular de rotação do material do disco varie com a distância ao centro da Galáxia, a onda em si permanece intacta, definindo os braços espirais.

Como exemplo podemos descrever o processo que ocorre próximo ao centro galáctico. A onda "se move" mais lentamente que as estrelas e gás. Assim, o material do disco encontra a onda em um dado momento, é temporariamente desacelerado e comprimido (a medida que ele passa pela onda) e depois continua se movendo com a mesma velocidade que tinha antes do "encontro" (analogia com um carro – material do disco – passando por uma área de engarrafamento – onda). Quando o material galáctico começa a ser comprimido pela onda de densidade que forma um braço espiral, estrelas O e B brilhantes são formadas e estas têm um tempo de vida muito curto. Desta maneira, associações de estrelas massivas jovens, nebulosas de emissão, etc, só são encontrados nos braços espirais, próximo de onde "nasceram". Já as estrelas mais velhas são vistas à frente dos braços espirais pois estas tiveram tempo de se distanciar da onda de compressão que causaram sua formação. Com o tempo muitas estrelas da região do braço e entre-braços se espalham e passam a formar parte do disco como um todo.

Algumas perguntas que ainda não foram respondidas são: de onde vêm estas ondas de densidade? Alguns astrônomos explicam que supernovas ao explodir podem provocar uma onda de densidade que comprime o meio e provoca formação estelar. No entanto, este processo só pode formar pedaços de braços espirais e não braços completos, como vemos em várias galáxias espirais.

Outros cenários que foram propostos para a formação inicial da onda são: 1) instabilidades do gás próximo ao bojo Galáctico; 2) efeitos gravitacionais de galáxias próximas; 3) uma possível assimetria do tipo de barra no bojo pode ter exercido grande influência sobre o disco e pode ter começado o processo de formação dos braços espirais. A verdade é que não sabemos ainda ao certo como galáxias como a nossa adquiriram seus braços espirais.

## A MASSA DA NOSSA GALÁXIA

Podemos medir a massa da Galáxia determinando as velocidades das nuvens de gás e das estrelas do disco Galáctico. A terceira lei de Kepler (modificada por Newton) relaciona o período orbital, o tamanho da órbita e a massa de quaisquer dois objetos orbitando um ao redor do outro, ou seja:

*massa total (em massas solares) = raio da órbita (em AU)<sup>3</sup> / período da órbita (em anos)<sup>2</sup>.*

A distância até o centro Galáctico é de 8 kpc e a órbita do Sol é de 225 milhões de anos. Substituindo estes números na equação acima encontramos que a massa da nossa Galáxia é de  $10^{11}$  massas solares.

Esta massa, que está dentro da órbita do Sol, é a parte da massa da Galáxia que determina a órbita solar. O restante da massa da Galáxia, que está fora da órbita solar, não tem influência sobre o período do Sol. Este fato foi descoberto por Isaac Newton.

### Matéria escura

Para se determinar a massa da Galáxia em grandes escalas, isto é, para se encontrar quanta massa está contida em esferas com raios progressivamente maiores, devemos medir as velocidades de estrelas e gás dentro de órbitas mais externas que a órbita solar. Isto pode ser feito através de observações de rádio do gás (usando a linha de 21cm). O diagrama de velocidades em função da distância até o centro da Galáxia se chama "Curva de Rotação".

Qual a massa da Galáxia dentro de dois raios da órbita solar, ou seja, dentro da parte luminosa da nossa Galáxia?  $2 \times 10^{11}$  é a resposta. Se toda a massa da Galáxia estivesse contida dentro do raio que contém a matéria luminosa esperaríamos (pela lei de Kepler) que a curva de rotação da Galáxia tivesse um comportamento Kepleriano para raios maiores que duas vezes o raio da órbita solar. No entanto isto não acontece. A velocidade orbital continua aproximadamente constante até a última medida, indicando que a massa cresce linearmente com o raio. A conclusão é então que a **maior parte da massa da galáxia não está associada à parte luminosa central e sim à parte periférica** da Galáxia. A Via Láctea é muito maior do que a parte luminosa que podemos observar. O halo escuro invisível, também presente em todas as outras galáxias do Universo, tem uma massa muito maior que a soma das massas de todas as estrelas e material interestelar detectados nesta região. Ainda não é sabido de que material é composto este halo escuro e por isso dizemos que este é formado de "matéria escura", cuja natureza ainda não entendemos. Esta matéria escura não é detectada em nenhum

comprimento de onda, de raios gama até rádio. Só sabemos da sua existência pela força gravitacional que esta massa exerce.

## O CENTRO GALÁCTICO

O núcleo da nossa Galáxia é uma região repleta de estrelas. Se vivêssemos em um planeta próximo ao centro Galáctico poderíamos ver milhões de estrelas tão brilhantes quanto Sirius (a estrela mais brilhante próxima ao Sol).



Figura 7 – O centro da nossa Galáxia, assinalado na foto com um círculo, região da nebulosa M8, constelação de Sagitário (Chaisson & McMillan, *Astronomy Today*, fig. 23.22, CD\_ROM).

Devido à absorção interestelar da luz no comprimento de onda visível, a maior parte do nosso conhecimento sobre o centro da Galáxia vem de observações no infravermelho e rádio. O centro da Galáxia contém uma fonte forte de rádio chamada de "Sagittarius A". Em pequena escala filamentos podem ser vistos em "Sagittarius A" (escalas de 100 pc). A presença destes sugere a vários astrônomos que há campos magnéticos muito fortes na vizinhança do centro Galáctico, criando estruturas similares em aparência (mas muito maiores) às que são observadas no Sol. Em escalas ainda

menores existe um anel ou disco de material que está em rotação e que tem o tamanho de apenas alguns parsecs. Observações de linhas espectrais no infravermelho apresentam um alargamento que indica a existência de gás no centro Galáctico girando muito rapidamente. Para manter este gás em órbita deve haver um corpo bastante massivo no centro Galáctico com um milhão de massas solares ou mais (este valor pode ser calculado pela terceira lei de Kepler). A combinação de uma massa muito alta com um espaço físico muito pequeno sugere que um buraco negro possa habitar o centro Galáctico. No entanto, muitos astrônomos não acreditam nesta hipótese.

Além de radiação em 21 cm, a fonte de Sagitarius A produz radiação síncrotron, criada pelo movimento de elétrons ao redor do campo magnético.