

# A Via Láctea, a nossa galáxia

Jacques Lépine

Universidade de São Paulo

---

## Resumo

Apresentamos a Via Láctea, nossa Galáxia, primeiro com uma introdução de como a vemos no céu, e a seguir com a história dos primeiros passos de descobertas, que levaram à conclusão de que a Galáxia não é o próprio Universo, mas apenas uma entre muitas galáxias. Descrevemos seus componentes principais (disco galáctico, braços espirais, bojo, barra), mencionando suas dimensões e formas geométricas. Focalizamos as órbitas das estrelas, responsáveis pela manutenção da forma dos componentes. Explicamos as órbitas, a partir das forças gravitacionais que atuam sobre as estrelas.

## Abstract

We present the Milky Way, our Galaxy, first with an introduction of how we see it in the sky, and then with the history of the first steps of discovery, which led to the conclusion that the Galaxy is not the Universe itself, but just one among many galaxies. We describe its main components (galactic disk, spiral arms, bulge, bar), mentioning their dimensions and geometric shapes. We focus on the orbits of the stars, responsible for maintaining the shape of the components. We explain orbits based on the gravitational forces that act on stars.

---

**Palavras-chave:** Via Láctea, estrutura da Galáxia, dinâmica da Galáxia.

**Keywords:** Milky Way, structure of the Galaxy, dynamics of the Galaxy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43824](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43824)

## 1 Introdução

Desde tempos imemoriais, os homens dedicaram parte de seu tempo a admirar o céu, que era lindo, sem poluição nem luzes elétricas. Vamos brevemente descrever o que se vê no céu. Se veem estrelas, das mais brilhantes até as mais fracas, e direções nas quais existem agrupamentos de estrelas que parecem formar figuras, extensas ou não, as “constelações”. Estas figuras, por serem facilmente reconhecíveis, são usadas como pontos de referência para encontrar outras constelações, ou explicar onde se encontra um objeto de interesse, como a Lua ou um planeta, num dado dia. As constelações são constituídas de estrelas que podem estar a distâncias físicas muito distintas umas das outras, estando apenas “projetadas” no céu a distâncias angulares relativamente pequenas. Os povos da antiguidade deram nomes às constelações, que muitas vezes lembram a forma de um animal, como a constelação do Escorpião, constelação do Cão Menor, etc. Parte dos nomes de constelações que utilizamos hoje nos provêm do grego. Parte das constelações do

hemisfério Sul, que não eram visíveis da Europa, tiveram nomes atribuídos pelos navegadores que primeiro se aventuraram nos mares do Sul (Cruzeiro do Sul, Vela, Carina). Povos situados em outros continentes, ou sem contacto com a civilização europeia, criaram suas próprias denominações de constelações, identificadas com outros objetos, animais ou outras divindades.

Além das constelações, uma grande estrutura em forma de faixa bastante alongada, mas com contornos não bem definidos, nos aparece no céu (Figura 1). Na parte central da faixa a cor parece esbranquiçada. Os gregos associaram essa cor esbranquiçada a leite derramado, criando também um mito para explicar a presença deste leite, que teria sido derramado por uma divindade que estava amamentando. Leite em grego é “galactos”, até hoje. Essa é a origem da palavra Galáxia, objetos galácticos etc. Via Láctea é um sinônimo, mais claro para nós, e que preserva o significado original.

Hoje sabemos que as regiões esbranquiçadas são devidas a uma quantidade enorme de estrelas



**Figura 1:** Na foto da Via Láctea é possível ver do lado esquerdo duas manchas azuladas situadas fora da linha do disco galáctico; são as Nuvens de Magalhães. A inclinação da Galáxia no céu depende da hora da observação; ela parece girar no céu, quando na realidade é a Terra que gira. Em condições normais, mesmo com céu limpo, a Via Láctea não nos aparece tão clara como na foto. Contribui para isso o fato da máquina fotográfica utilizada na foto ser de grande angular, e o tempo de exposição longo, e a ausência de poluição luminosa.

situadas a grande distância, de tal forma que não conseguimos distinguir as estrelas (estrelas não resolvidas), mas percebemos a luz somada delas. O olho humano não possui a resolução para distinguir essas estrelas, mas com um telescópio de bom tamanho, conseguimos vê-las separadamente. Durante séculos, desde os gregos, a nome Galáxia foi atribuído a essa faixa de luz com manchas esbranquiçadas.

É de grande interesse entender como o significado de “Galáxia” mudou no século passado, porque essa é a própria história da abordagem científica das observações de estrelas em seu conjunto.

Relatamos, a seguir, de forma resumida, os principais passos dessa evolução.

Em 1785, William Herschel, músico e astrônomo alemão que vivia na Inglaterra, fez um primeiro “modelo do Universo”, que foi um passo inicial para poder entender, mais de um século depois, a estrutura da Galáxia. Herschel construiu seu próprio grande telescópio, financiado pelo Rei da Inglaterra George III, com espelho metálico polido de 1,2m de diâmetro, e um tubo do telescópio de 12 m de comprimento. Uma grande estrutura de madeira permitia movimentar o telescópio em torno de dois eixos, de azimute e de elevação, e permitia ao observador subir até o foco da imagem produzida pelo espelho, na entrada do tubo de 12m. Herschel estabeleceu um programa sistemático de observações do céu, com



**Figura 2:** O Universo segundo William Herschel.

o objetivo de contar o número de estrelas que apareciam no campo de visão de seu telescópio, nas direções apontadas. Para a execução deste programa, ele contou com a ajuda de sua irmã Caroline Herschel. Para a interpretação dos dados, depois de acumulados durante anos, Herschel considerou que, em qualquer direção, ele estava observando era o Universo até sua fronteira final, a partir da qual só existia o vazio completo. Para estimar a distância dessa fronteira, considerou que a densidade de estrelas era homogênea em todos os lugares, com o mesmo número de estrelas por unidade de volume, e que nas fronteiras do universo a densidade de estrelas caía a zero abruptamente. Outra hipótese importante foi que todas as estrelas do universo são visíveis; nenhuma estrela podia escapar da detecção por ser distante ou fraca (suposição obviamente errada).

Assim, se numa dada direção era possível contar, dentro do campo de visão de seu telescópio, uma quantidade maior de estrelas, do que em outras direções, era porque a fronteira do Universo era mais distante nessa direção. Menos estrelas apareciam em direções onde o fim do Universo era mais próximo

O resultado de suas observações foi esquematizado como na Figura 2.

Esse resultado tem bastante mérito, por ser o primeiro modelo científico do “Universo”. Naquela época era impossível pensar que houvesse alguma coisa além do Universo e não se sabia que existe poeira interestelar que absorve a luz das estrelas. Por isso, o Sol foi colocado bem perto do centro do Universo, porque na realidade o que estamos vendo não é a fronteira da Galáxia, mas a distância até a qual se poderia contar as estrelas, determinada pela absorção da luz pelo meio interestelar. E a Galáxia não tem um fim abrupto (no modelo de Herschel, até a fronteira existem estrelas, depois não há mais nenhuma). O modelo de Herschel foi usado e melhorado ao longo de mais de um século. O astrônomo holandês Ja-

cob Kapteyn, realizou observações de movimentos próprios de estrelas (deslocamento das estrelas no céu). Em 1901, Kapteyn, baseado nessa técnica, estabeleceu uma dependência da distância das estrelas com a magnitude (ou brilho). Concluiu que a Galáxia era um objeto oblato, com 10 kpc de largura e 2 kpc de espessura, com o Sol próximo do centro, a 6 kpc (essas unidades são explicadas mais adiante). O modelo de Kapteyn teve em comum com o de Herschel o fato da Galáxia e do Universo serem uma coisa só.

Voltando um pouco na história, no século XVIII, Charles Messier, astrônomo francês que fazia levantamentos de possíveis cometas, fez também levantamento de pequenas nebulosas, algumas delas com formato espiralado. Ele pensou, naturalmente, que as nebulosas estavam situadas em distâncias pequenas. Catalogou essas nebulosas, denominando-as com a letra M de seu próprio nome, seguida de um número. Esse catálogo sobrevive até hoje, pois contém objetos de grande interesse. Entre esses objetos, M31 é um dos mais brilhantes, e voltaremos a mencioná-lo. No entanto, a natureza desses objetos e suas distâncias só foram estabelecidos vários séculos depois da confecção desse catálogo. Voltemos, então, ao curso da história pós-Messier e pós-Herschel.

Em 1923, Edwin Hubble, astrônomo que trabalhava nos Estados Unidos e teve acesso ao maior e melhor telescópio existente, o telescópio do Monte Wilson, na Califórnia, com o qual fez uma descoberta fundamental, que revolucionou a Astronomia. O telescópio do Monte Wilson, com 2,5 metros de diâmetro, foi instalado em 1917 e permaneceu o maior do mundo até 1949. Hubble mostrou que uma nebulosa brilhante bastante conhecida, M31, ou nebulosa de Andrômeda (por estar na constelação de Andrômeda), estava a uma distância muito maior do que se pensava.

É importante descrevermos com algum detalhe como ocorreu essa descoberta, que deu início a toda a escala de dimensões da Galáxia e do Universo. Essa descoberta é esclarecedora de como a pesquisa astronômica se desenvolvia, com uma descoberta se tornando um degrau para outra imediatamente posterior.

O feito de Hubble foi conseguido graças a observações e estudos anteriores de estrelas Cefeidas, conduzidas por Henrietta Leavitt, que foi estagiária do Observatório de Harvard. As Cefeidas

são estrelas variáveis regulares, com período de variação do brilho (intervalo de tempo entre dois máximos de brilho sucessivos) de poucos até dezenas de dias. Observando Cefeidas que provavelmente estavam a uma mesma distância, por estarem agrupadas (por exemplo, nas Nuvens de Magalhães), verificou-se que as estrelas mais brilhantes tinham um período maior. Assim, nasceu a relação linear período-luminosidade das Cefeidas, publicada em 1912 por Leavitt. Cabia ainda estabelecer as luminosidades expressas em magnitudes absolutas, em vez de aparentes, como inicialmente medidas por Leavitt. O conceito de aparente e absoluto é explicado a seguir

O brilho é uma avaliação da intensidade da radiação que nos chega, com caráter qualitativo e definição vaga. Os astrônomos profissionais preferem usar a definição mais rigorosa de magnitude,

A mesma grandeza de radiação (ou fluxo de energia recebida) poderia ser expressa em termos de brilho ou de magnitude. Em geral, os astrônomos profissionais preferem usar a escala de magnitude, que é uma escala logarítmica, por razões históricas e razões de praticidade. Para comparar a real natureza de estrelas é necessário se livrar do efeito da distância, calculando qual seria sua magnitude se elas fossem todas colocadas a uma mesma distância padrão, como por ex. 10 pc. Essa é a “magnitude absoluta”. Sabendo a magnitude absoluta e a magnitude observada, podemos calcular a distância.

Inicialmente, Leavitt comparou estrelas que considerou estarem a uma mesma distância, por estarem ligadas a um mesmo objeto (Nuvem de Magalhães) mas não sabia qual era essa distância. Sabia as magnitudes aparentes, mas não sabia as magnitudes absolutas. No final Leavitt encontrou algumas Cefeidas a pouca distância do Sol, cuja distância pode ser medida pelo método de paralaxe. Assim, a relação período-luminosidade evoluiu para uma relação período – magnitude absoluta.

Hubble, ao observar a Nebulosa de Andrômeda (M31) com o telescópio do Monte Wilson, reconheceu a existência de Cefeidas por seus períodos característicos, apesar das estrelas serem bastante mais fracas que as Cefeidas próximas. Fazendo uso da relação período-magnitude absoluta, calculou a distância da nebulosa de Andrômeda, e verificou que esta estava muito além do per-

mitido pelas fronteiras do Universo de Herschel. Rompeu-se, assim, o conceito de que o Universo de Herschel, assim como o de Kapteyn, representavam o verdadeiro Universo. Em poucos anos, percebeu-se que não apenas M31, mas muitas outras nebulosas do catálogo de Messier também estavam a grandes distâncias.

Concluiu-se que o Universo de Herschel é apenas uma grande estrutura local, que hoje chamamos de “a Galáxia”, e que o verdadeiro Universo contém muitas outras galáxias (com “g” minúsculo), assim chamadas por terem semelhança com nossa Galáxia.

Tendo apresentado, nesta Introdução, nossa Galáxia partindo de nosso primeiro contato visual, e a história das descobertas iniciais, temos que decidir como prosseguir. Seria interessante varrer um grande número de tópicos: como morfologia da Galáxia, sua composição estelar (distribuição de massas, temperaturas, luminosidades, idades, abundâncias químicas das estrelas), o meio interestelar, e a história da Galáxia no contexto cosmológico. Enfim, toda a Astrofísica se encontra na Galáxia. Diante dessa missão impossível, nossa opção será de nos restringir a algumas questões muito específicas da Galáxia: dimensões dos grandes componentes, curva de rotação, braços espirais, a ressonância de co-rotação, correntes estelares. Abordaremos também a matéria escura, dentro do contexto galáctico.

## 2 As outras galáxias

A conclusão de que existem muitas outras galáxias, foi de grande ajuda para conhecermos melhor nossa própria Galáxia. Há uma grande variedade de formas de galáxias, e inclusive, podemos dizer que não existem duas iguais. Mas mesmo sendo diferentes entre si, podemos reconhecer alguns elementos básicos em comum. Várias galáxias apresentam um halo, um bojo, um disco, uma barra, e braços espirais. Nem todas as galáxias apresentam todos esses componentes, mas a nossa os tem. Discutiremos suas formas e dimensões.

Edwin Hubble, que contribuiu para estabelecer o conceito de galáxias, como vimos, propôs uma forma de classificá-las, que apresentamos na Figura 3. Do lado esquerdo ficam as galáxias “elíp-

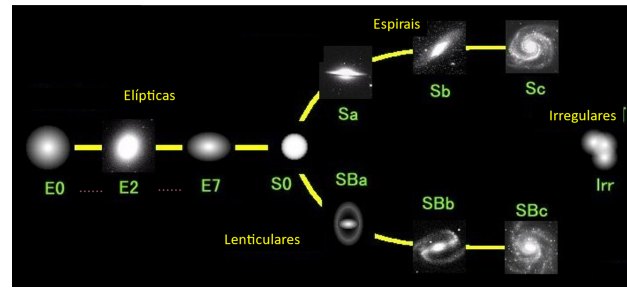


Figura 3: A classificação de galáxias de Hubble.

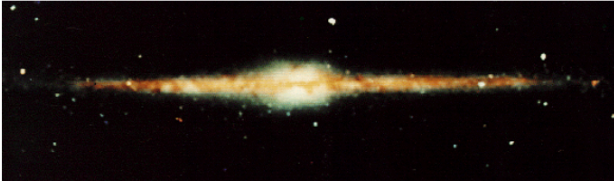
ticas” e do lado direito as espirais, divididas em dois ramos, as espirais sem barra (ramo superior), e as com barra (ramo inferior). Nossa Galáxia se aproxima do tipo Sc, sem barra, embora mais adiante mencionaremos a existência de uma barra, ainda que pequena. A classificação de galáxias por Hubble é apenas uma das várias classificações propostas até hoje, mas teve o mérito de ser a primeira.

## 3 Os componentes da galáxia

Descreveremos as formas e as dimensões dos componentes de nossa Galáxia que foram estabelecidas por meio de observações e de modelos. Não daremos mais tanta ênfase histórica (quem descobriu o que) com algumas exceções. Entre os componentes, dedicaremos mais espaço ao disco galáctico do que aos outros, porque ele apresenta uma física mais variada e interessante, e temos informações mais precisas sobre ele, porque é nele que residimos.

### 3.1 O disco galáctico

Utilizamos, em nossas descrições, distâncias em parsecs (pc) unidade introduzida por astrônomos da área de astrometria, que medem distâncias de estrelas pelo método da paralaxe (medida da amplitude dos pequenos movimentos oscilatórios das estrelas, com período anual). Um parsec é a distância que corresponde a uma paralaxe de 1 segundo de arco, e é aproximadamente  $3 \times 10^{13}$  km. Utilizaremos também o kpc, (mil parsecs). Em muitos textos encontramos distâncias em anos-luz, o que parece mais intuitivo (a distância percorrida pela luz em 1 ano), embora não tenhamos como medir distâncias, observacionalmente,



**Figura 4:** Imagem da Galáxia num eixo de latitude (eixo vertical) e longitude (eixo horizontal). A imagem é construída utilizando os dados de levantamento feito no infravermelho próximo (missão espacial IRAS).

a partir de sua definição, ao contrário do parsec. Um parsec é igual a 3,26 anos-luz.

### 3.1.1 Descrição geral

O disco é uma estrutura que se parece, em termos de forma, com os discos de vinil ou os CDs de computadores; com espessura fina em comparação com o raio. A espessura é da ordem de 200 pc, enquanto o diâmetro é da ordem de 20 kpc, (uma razão de 100). Na realidade, tanto a espessura quanto o raio não possuem dimensões claramente definidas, porque a densidade de estrelas vai diminuindo gradativamente nessas duas direções (perpendicular ao disco, e ao longo do disco), e não há um fim brusco. A função exponencial, do tipo  $\rho(z) = \rho(0)e^{-z/h}$ , representa bem essa variação, onde  $z$  representa a altura (ou distância) ao plano central do disco e  $h$  é a escala de altura. Uma pequena complicação é que existem duas “populações” de estrelas, com idades de estrelas distintas e com escalas de altura distintas: o disco “fino” e o disco “espesso” são distinguíveis porque as estrelas do disco fino são mais jovens que as do disco espesso. O leitor que não tiver familiaridade com a função exponenciais poderá “pular” as próximas linhas, sem muito prejuízo. A densidade total é então uma soma:

$$\rho(z) = \rho_f(0)e^{-z/h_f} + \rho_e(0)e^{-z/h_e}, \quad (1)$$

onde  $\rho_f(0)$  e  $h_f$  representam respectivamente a densidade no plano e a escala de altura do disco fino, e  $\rho_e(0)$  e  $h_e$  os mesmos parâmetros para o disco espesso. Há muitas estimativas na literatura, e geralmente se considera que  $h_f = 100$  pc e  $h_e = 150$  pc. A densidade do disco fino é bastante maior que a do disco espesso, contendo 85% do total de estrelas no disco. Note que “escala de altura” e “espessura” são conceitos distintos, porque a espessura conta as duas faces do disco.



**Figura 5:** Galáxia “warped” vista pela borda, ESO 510-G13. Pode ser vista a luminosidade da região central do halo.

O Sol é uma estrela comum, situada no meio da espessura do disco. É uma estrela típica do disco fino. Devido a essa posição, no disco, não enxergamos este componente em sua totalidade, como aconteceria se o Sol estivesse a uma grande altura com relação ao disco.

O disco nos aparece como a faixa com grande densidade de estrelas, atravessando o céu (é a Galáxia da antiguidade). Utilizando dados da região espectral do infravermelho, por exemplo em 2,2 microns de comprimento de onda, na qual a absorção da luz pela poeira interestelar é bem menor que no visível, enxergamos mais longe. Percebemos melhor neste caso que o disco é uma estrutura com espessura pequena (Figura 4).

### 3.1.2 O warp ou empenamento do disco galáctico

O disco não é 100% plano. É parecido com um chapéu, com uma aba inclinada para baixo, e do lado oposto, para cima. Essa deformação é chamada de “warp”, termo inglês que significa empenamento. O Sol está no disco a 8,5 kpc do centro. Até essa distância, o warp não é perceptível, mas a maiores distâncias do centro (a 12 kpc, aproximadamente) ele começa a se manifestar. Um exemplo de galáxia com warp, vista pela borda, é mostrado na Figura 5. Mapeamentos na linha de 21cm (explicada mais adiante) mostram que o desvio do disco com respeito a um plano perfeito é da ordem de 1 kpc, na direção de maior empenamento, a uma distância de 15 kpc do centro. É um empenamento bastante modesto. Quem desejar ver mais detalhes a respeito, para nossa galáxia, pode consultar por exemplo o artigo de revisão de Kaberla e Kerp (2009).



### 3.1.3 As órbitas das estrelas, no disco (primeira parte)

As órbitas das estrelas podem ser estudadas se tivermos conhecimento das forças que atuam sobre elas. No plano do disco, em particular, esse conhecimento nos vem da “curva de rotação”. Nosso roteiro será de ida e volta. Os fundamentos das órbitas estelares serão brevemente abordados, e depois explicaremos a curva de rotação e como ela é obtida. Voltaremos a uma discussão das órbitas, considerando as implicações da curva de rotação. Na primeira fase dessa discussão, suporemos que as nuvens de gás se comportam como as estrelas.

Para entender por que o disco é uma estrutura estável, um ponto importante a ser sempre lembrado é que as estrelas nunca colidem. Mesmo com uma densidade estelar relativamente alta, como no disco, as estrelas são tão distantes entre si, e tão pequenas, comparando com suas distâncias médias, que as colisões são raríssimas. Exceções a essa regra podem ocorrer se elas estiverem aprisionadas em um objeto com densidades estelares muito altas, como um aglomerado globular.

Como as estrelas não colidem, as únicas forças que conseguem atuar sobre elas são as forças gravitacionais globais, provenientes de grandes conjuntos de estrelas, como as do bojo e do disco. Por esse motivo, as órbitas não apresentam variações bruscas de direção, sendo curvas suaves.

Faremos uma comparação com o sistema solar. Os planetas, como as estrelas, não colidem entre si, e a força dominante que age sobre eles é a atração gravitacional do Sol. As órbitas resultantes são elípticas, com o Sol em um dos focos da elipse (lei de Kepler). No caso das órbitas circulares, a velocidade dos planetas ao longo da órbita é dada pela equação  $V = (MG/r)^{1/2}$ , onde  $V$  é a velocidade orbital,  $M$  a massa do Sol,  $G$  a constante gravitacional, e  $r$  o raio da órbita. A explicação desta fórmula é a seguinte. A força de repulsão centrífuga que atua sobre um planeta devido ao movimento em órbita circular é  $mV^2/r$ , e a força de atração gravitacional é  $GMm/r^2$ , onde  $m$  é a massa do planeta. O planeta se mantém em órbita aproximadamente circular porque a força de atração e a de repulsão se equilibram. Igualando as duas expressões das forças, obtemos a expressão mais acima (a massa do planeta foi eli-

minada, por aparecer dos dois lados da equação). Por semelhança com o problema de um planeta, podemos afirmar que as velocidades das estrelas em suas órbitas em torno do centro galáctico dependem da massa central e do raio da órbita, mas não da massa das estrelas. Por isso faz sentido atribuir uma velocidade de rotação média a uma região da Galáxia: não há estrelas mais rápidas e outras mais lentas, com raras exceções.

Continuando com a comparação das órbitas de estrelas em torno do centro da Galáxia com as de planetas em torno do Sol, a maior diferença entre esses dois tipos de órbitas provém do fato que a massa que produz a força de atração para o centro da Galáxia varia com o raio galáctico. O Sol tem massa constante, enquanto o “centro da galáxia” tem uma massa que depende do volume considerado. À medida que nos afastamos do centro, o volume que temos que levar em consideração na região central aumenta, o número de estrelas contidas nesse volume aumenta, logo a massa total do conjunto aumenta.

Adotando uma aproximação razoável, colocando-nos numa distância  $r$  do centro, podemos considerar que apenas as estrelas contidas no interior do volume esférico de raio  $r$  contribuem para a atração gravitacional. As estrelas situadas fora dessa esfera não contribuem. Como varia, então, a velocidade orbital, em função do raio? No caso dos planetas e supondo que eles estão em órbitas praticamente circulares, a lei é  $V = (MG/r)^{1/2}$ , como já vimos. Ou seja, a dependência de  $V$  em  $r$  é do tipo  $r^{-1/2}$ . Para as estrelas do disco,  $M$  em nossa última equação não representa mais a massa do Sol, mas a massa total das estrelas dentro da esfera de raio  $r$ .  $M$  depende de  $r$ ,  $M(r)$  crescendo junto com  $r$ . A velocidade dada por nossa fórmula, portanto, cai menos abruptamente que  $r^{-1/2}$ ; ela pode ser constante ou mesmo aumentar. No entanto, o crescimento de  $M$  com  $r$  não pode seguir por longas distâncias, porque sabemos, por meio das pesquisas de contagens de estrelas, que a densidade de estrelas decresce exponencialmente, dentro do disco, em função da distância ao centro; chega um valor de  $r$  para o qual  $M(r)$  é constante, daí para a frente.

A lei de densidade em função do raio do disco é difícil de ser observada em nossa Galáxia, devido ao obscurecimento pela poeira e às grandes dis-

tâncias percorridas pela luz dentro do disco. Essa lei é mais bem observada em outras galáxias.

Antes de tentar se aprofundar nessa questão, para termos alguns números em mãos, temos que apresentar mais detalhadamente a curva de rotação de nossa e de outras galáxias.

### 3.1.4 A curva de rotação do disco

A curva de rotação, gráfico da velocidade de rotação das estrelas (ou do gás interestelar) no disco em função da distância ao centro, é um dos conjuntos de dados mais importantes para entender a estrutura de nossa Galáxia, e de outras galáxias.

Essa curva só pode ser obtida, de forma confiável, por meio de observações diretas, e não por meio de modelos, que eventualmente não contabilizam corretamente todas as formas possíveis de matéria, e dependem de muitos parâmetros desconhecidos. Então, observamos a curva de rotação e tentamos deduzir, a partir desta curva, que representa a realidade objetiva, a densidade de matéria (soma de todas as formas de matéria) existente no disco, e demais parâmetros, em função do raio.

- Linha de 21 cm.

Historicamente, as primeiras medidas da curva de rotação da galáxia foram feitas através de observações em frequência de rádio, que apresentam a vantagem de praticamente não serem absorvidas pela poeira. Na década de 1950 foi descoberta a linha de 21 cm de comprimento de onda, ou frequência de 1420.4 MHz, do hidrogênio neutro H (distinto da molécula H<sub>2</sub>). A existência de dois níveis de energia no átomo de H, está relacionada com a orientação do spin do elétron em relação ao spin do próton do átomo H.

O resultado direto de uma observação, com um radiotelescópio funcionando em 21 cm apontado para uma direção no céu, fixada em ascensão reta e declinação, é um espectro. Este é um gráfico da intensidade da radiação recebida em função da frequência. Cada pequeno trecho da linha de visada, em seu referencial, emite na mesma frequência de radiação de H, 1424,4 MHz. No entanto, a radiação de um trecho, ao alcançar o radiotelescópio, não está mais na frequência ori-

ginal, devido ao efeito Doppler. Há uma relação direta entre a frequência recebida de um trecho com a velocidade com a qual o gás está se afastando ou aproximando do observatório. Assim, o eixo de frequência pode ser considerado como um eixo de velocidade. O eixo de intensidade de radiação é diretamente medido em volts na saída do receptor, mas pode ser “calibrado” por meio de comparação com a radiação de corpo negro de objetos a diferentes temperaturas, e ser apresentado em unidades de temperatura.

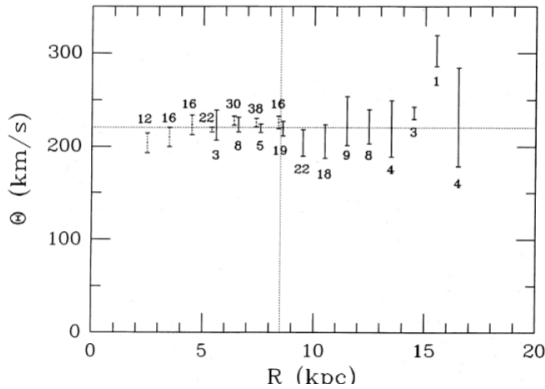
Num espectro, não temos a informação da distância dos trechos de gás ao longo da linha de visada. Mas pelo menos para um ponto do espectro, conseguimos descobrir onde se situa a o gás que está emitindo, É o ponto na linha de visada situado o mais próximo do centro do disco (ou centro da Galáxia). Nesse ponto a velocidade de rotação, vista como um vetor (uma flecha) se encontra totalmente orientada na direção do observador e o efeito Doppler será máximo. Esse ponto recebeu um nome (ponto subcentral).

Observando em diferentes longitudes galáctica, e calculando a cada vez a posição do ponto subcentral, obtemos pares de raio-galáctico-velocidade.

Um gráfico destes pontos descreve a velocidade de rotação em função do raio galáctico; é o que chamamos de curva de rotação. Essa curva descreve como varia a velocidade de rotação em função do raio galáctico

- Linha de CO.

Esse método de obtenção da curva de rotação, que parece um pouco complicado e trabalhoso (porque exigia a obtenção de muitos espectros) era o único de que se dispunha na década de 70. A observação de estrelas a grande distância não era possível. Na década de 80 surgiu uma melhoria, que foi o uso de uma linha espectral da molécula CO, em 115 GHz ou 2,6 mm, que substituiu a linha de 21 cm. Trabalhando com frequências mais altas, os radiotelescópios tinham resolução angular melhor e a obtenção de espectros estava livre das interferências radioelétricas produzidas pela atividade humana. Levan-



**Figura 6:** Curva de rotação de Fich et al., composta com dados de HI, de CO, e de regiões HII para os pontos mais externos.

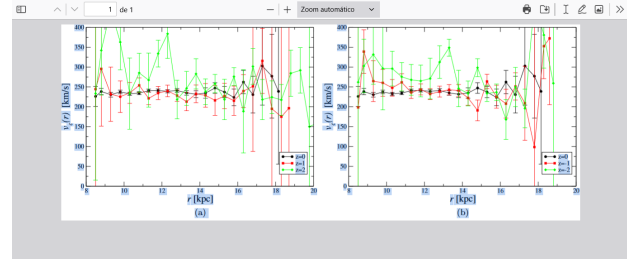
tamentos bastante citados usando CO foram publicados por D. Clemens em 1985 [1] e por Fich et al em 1989 [2]. Ambos fizeram uso de metodologias semelhantes entre si e com os levantamentos em 21 cm, fazendo uso dos pontos subcentrais. Note-se que a metodologia dos pontos subcentrais não permite ir além de 8.5 kpc, porque não existe esse ponto além da órbita solar.

Outros métodos foram utilizados por Clemens e por Fich et al., fazendo uso de regiões HII (esferas de hidrogênio ionizado) para ir além desse raio. Mostramos na Figura 6 a curva obtida por Fich et al.

O resultado interessante e incontestável é que a curva de rotação é bastante plana, com valor de 220 km/s entre aproximadamente 3 kpc do centro até cerca de 15 kpc.

Recentemente, resultados totalmente novos sobre a curva de rotação foram obtidos a partir dos dados da missão espacial Gaia, que mediu os movimentos próprios de estrelas com boa precisão até uma distância de cerca de 8 kpc do Sol, mas alcançando raios galácticos até 18 kpc, com menor precisão. São medidas diretas da velocidade e da distância, que não dependem da teoria dos pontos subcentrais. Esses dados recentes, apresentados na Figura 7, confirmam e estendem a curva de rotação obtida anteriormente pelos radioastrônomos, mas agora com barras de erro menores.

Podemos constatar que a curva de rotação é surpreendentemente plana se olharmos bem no centro do disco ( $z=0$ ), região para a qual as bar-



**Figura 7:** Resultados do levantamento Gaia para a curva de rotação. Para nossos efeitos, só interessam os dados para  $z = 0$  (linha preta) que corresponde a observações exatamente no meio do disco galáctico (em altura), e apresentam barra de erros menores. Publicado por Chrobakova et al (2020).

ras de erro na velocidade são muito pequenas, até uma distância ao centro de 14 kpc, pelo menos. A curva parece ser plana até 18 kpc, mas depois de 16 kpc a qualidade dos dados piora. Os dados de Gaia apresentados por Chrobakova et al (2020) [3] são apresentados para 3 valores da latitude galáctica e só discutiremos os dados para  $z = 0$  (dentro do plano). De acordo com o modelo de rotação do disco galáctico que discutimos anteriormente, o fato da curva ser plana só pode acontecer se a densidade de estrelas cai precisamente de forma a compensar a lei de  $r^{-1}$  da teoria mais simples.

Um grande problema nos espera. As curvas de rotação das galáxias, e não só da nossa, que são o gráfico da velocidade do material do disco em função da distância ao centro, foram medidas, e apresentam-se planas, em sua grande maioria. A ausência de queda da velocidade de rotação a grandes distâncias, em princípio, indicaria que  $M(r)$  ainda não terminou de crescer, a grandes distâncias do centro. No entanto, os programas de contagem de estrelas indicam, a existência de uma queda exponencial de contagens de estrelas, em função dos raios galácticos. Esta contradição levou à sugestão de que existe uma forma de matéria que não é detectável por nossos instrumentos, a matéria escura. Uma pergunta de leigos nos vem à cabeça: como assim, não há mais matéria, se estamos conseguindo medir a curva de rotação por meio de radioastronomia, para o gás, ou dos dados de GAIA para as estrelas? A resposta teria que ser quantitativa: de fato, existe matéria visível, a grandes distâncias, mas não em quantidade suficiente para explicar uma curva plana. Voltaremos a questão da matéria escura no final



do texto.

### 3.2 Braços espirais.

Segundo a classificação de Hubble, as galáxias que possuem discos extensos apresentam também braços espirais, independentemente de terem barra ou não. Os braços são considerados como ondas de densidade, regiões onde a densidade de gás é maior, o que estimula a formação de estrelas, já que estas são o resultado de colapso gravitacional de nuvens de gás. Chegamos ao ponto de acreditar que as estrelas só nascem no interior de braços, não havendo formação estelar nas regiões inter-braços. Tampouco nascem estrelas no bojo ou no halo.

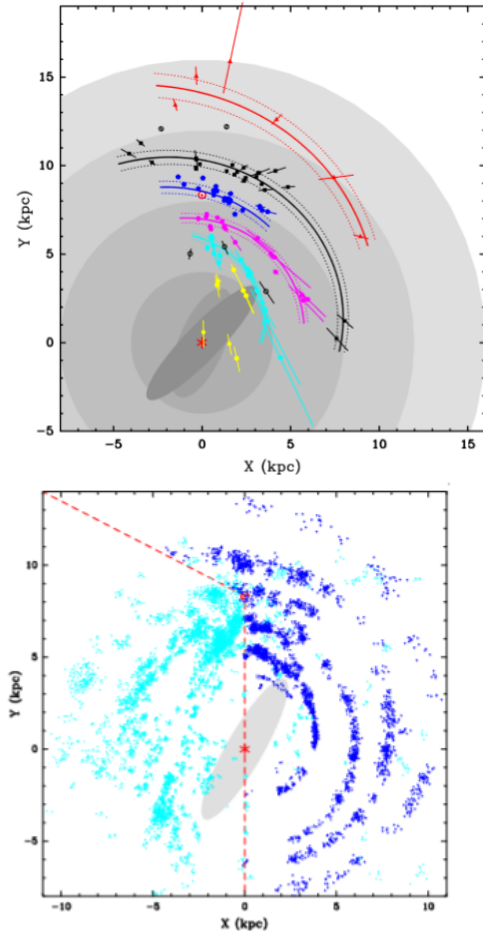
Como sabemos onde estão os braços? As estrelas massivas, com uma dezena de massas solares ou mais, são muito luminosas, e têm vida curta, da ordem de 15 milhões de anos. Esses números, um pouco imprecisos, nos vêm dos estudos de evolução estelar, que envolvem as taxas de reações nucleares no centro das estrelas. Não discutiremos aqui as questões de evolução estelar.

O tempo de vida muito curto faz com que as estrelas massivas não tenham tempo de se afastar do centro do braço no qual nasceram, antes de desaparecer. Estão, praticamente, onde nasceram. Ao mesmo tempo, a luminosidade elevada dessas estrelas faz com que possam ser observadas a grande distância. Estas duas propriedades, em conjunto, tornam as estrelas massivas os objetos ideais para traçar os braços. Apresentamos nas Figura 8 os mapas dos braços espirais da Galáxia, publicados por Mark Reid e colaboradores.

É impressionante como a forma espiral é bem traçada e regular. O “*pitch angle*” de um braço (ângulo com o qual a espiral corta qualquer círculo com centro no núcleo galáctico, e que descreve a “abertura” dos braços), é tipicamente 7 graus para os vários braços apresentados. Cada galáxia tem seu “*pitch angle*” dominante.

#### 3.2.1 O dilema do enrolamento

Os braços são, portanto, regiões com excesso de estrelas massivas e de gás interestelar (o que permite formar novas estrelas). Podemos nos perguntar como os braços sobrevivem com uma curva de rotação, que apresenta velocidade praticamente constante com o raio. Com velocidade

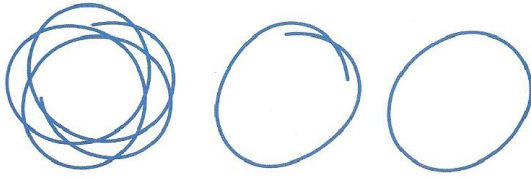


**Figura 8:** Mapas dos braços espirais da Galáxia apresentados por Mark Reid e colaboradores em 2 artigos distintos. Os traçadores de braços são *masers* de água e de metanol, regiões HII e fontes MSX vermelhas. Como os *surveys* (levantamentos) foram realizados principalmente a partir do hemisfério norte há, uma deficiência de dados para as longitudes galácticas negativas, nos trabalhos de Reid et al. Mas tais dados existem.

constante, um ponto do braço situado a 10 kpc do centro (por exemplo) as estrelas demoram o dobro do tempo para dar a volta da Galáxia do que um ponto a 5 kpc. Portanto, os braços deveriam ficar cada vez mais “enrolados”, com as partes internas dando mais voltas do que as partes externas, por unidade de tempo. Esse é “o dilema do enrolamento”, para o qual existe uma solução. Para explicá-la vamos descrever melhor as órbitas estelares.

#### 3.2.2 Traçando órbitas - “*integração*” de órbitas

Para traçar a órbita de uma estrela no plano galáctico, utilizamos um método matemático que



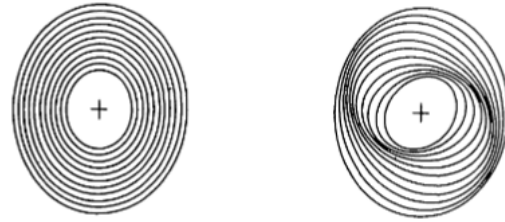
**Figura 9:** Órbita estelar típica no disco da Galáxia.

chamamos de integração, sem relação com a integração de funções. Tomemos uma estrela para a qual foi medida a velocidade nas duas direções, radial e longitudinal (em coordenadas galácticas). Temos, portanto, o vetor velocidade completo (não vamos nos preocupar com a direção perpendicular ao plano). No instante  $t_1$  temos a posição  $P_1$  e a velocidade  $V_1$  (são vetores porque estamos trabalhando com as duas componentes, radial e longitudinal, dessas grandezas) No instante  $t_2 = t_1 + dt$ , onde  $dt$  é um intervalo de tempo pequeno, a nova posição será  $P_2 = P_1 + V_1 dt$ . Como os números do lado direito da equação são conhecidos  $P_2$  é obtido facilmente. Para estabelecer a nova velocidade  $V_2$ , devemos relacionar a mudança de velocidade ( $a \times dt$  onde  $a$  é a aceleração) às forças que atuam sobre a estrela, que são a atração gravitacional do centro da galáxia e a força centrífuga. Temos  $V_2 = V_1 + a dt$ . Obtidos  $P_2$  e  $V_2$ , usamos o mesmo procedimento para obter  $P_3$  e  $V_3$ , e assim sucessivamente.

Notemos que o vetor aceleração possui componente longitudinal nula, pois as forças que mencionamos só atuam na direção radial. E, novamente, embora as forças dependam de  $m$  (massa da estrela), as acelerações, não. Mas só as acelerações entram nas equações da integração. Em consequência a trajetória obtida não depende da massa da estrela.

Mostramos na Figura 9 uma órbita típica de uma estrela do disco, integrada ao longo de um tempo suficiente para dar várias voltas (9-a), e no centro (9-b) mostramos apenas 1 volta.

Essa órbita pode ser entendida como a soma de um movimento circular com uma oscilação em torno do raio dessa órbita. Se a estrela foi deslocada para raios maiores que a órbita de equilíbrio, sem alterar sua velocidade longitudinal, a velocidade ficará menor devido a lei de conservação de momento angular ( $L = R \times V = \text{constante}$ ) Por outro lado, se  $V$  diminui, a força centrífuga



**Figura 10:** Explicação simples de como a precessão das órbitas produz uma estrutura espiral (Kalnajs, 1973).

$mv^2/r$ , que depende de  $V$ , também diminui. As duas forças, força centrífuga e força de atração do centro galáctico, que estavam em equilíbrio numa órbita circular, deixaram de estar em equilíbrio, e a atração gravitacional passou a dominar. A estrela cai em direção ao centro galáctico. Nessa queda, a estrela atravessa o círculo da órbita não perturbada, em seu caminho para o centro. A conservação do momento angular aumenta novamente a velocidade. Essa sequência não tem fim, e parece com o problema de uma mola com um peso, na qual aplicamos um deslocamento. A mola volta para seu lugar, mas ultrapassa o ponto de equilíbrio, vai até o extremo do outro lado, passando a oscilar em torno do ponto de equilíbrio. No caso da estrela o ponto de equilíbrio é o raio da órbita circular de origem. Assim, com a aplicação de simples leis da mecânica clássica, conseguimos entender as órbitas que nos foram reveladas através da integração numérica; explicamos a Figura 9.

O que podemos dizer, sobre a frequência da oscilação? Examinando a Figura 9 podemos notar que o período da oscilação para dentro e para fora (denominada oscilação epicycloidal) quase coincide com o período orbital. Se o período dessa oscilação radial fosse um pouco maior, a trajetória demoraria um pouco mais para completar uma volta, e depois de uma volta a curva coincidiria em posição com o ciclo anterior. Nesse caso teríamos uma curva fechada, e a volta seguinte coincidiria exatamente com a que acaba de ser concluída. Essa seria uma situação ideal, com uma trajetória permanente.

Kalnajs (1973) [4] teve uma ideia que deu vida aos braços espirais. Gostaríamos de ter curvas fechadas, para ter um sistema totalmente estável. Vamos supor que enquanto estamos traçando uma órbita, giramos o papel lentamente, de forma

que depois de uma volta, a pequena rotação do papel faça com que a curva se tornasse fechada. Se continuarmos com a rotação do papel, depois dessa volta, a curva estaria de novo fechada.

Kalnajs desenhou uma série de órbitas elípticas com espaçamento igual, como na Figura 10 (esquerda). Em seguida aplicou uma pequena rotação a cada uma delas, sendo essa pequena rotação medida em relação à órbita anterior, como na Figura 9 (centro). Aparecem regiões onde as órbitas ficam mais próximas umas das outras, e as regiões com maior densidade de órbitas desenharam uma espiral, que lembra os braços espirais de uma galáxia. Esse exercício, que parece uma brincadeira, pode nos dar mais informações. Vimos acima que uma órbita elíptica aberta, pode ser vista como fechada, num determinado sistema de referência em rotação. O fechamento da órbita é atribuído a oscilação da estrela em torno de sua órbita estável (oscilação epicycloidal). Depois de alguma manipulação matemática, concluímos que se um dado momento as inclinações das elipses estão como na Figura 10 (direita), num momento seguinte todas elas terão girado de uma mesma quantidade, de tal forma que a figura espiral se mantém com o mesmo aspecto, girando com uma velocidade constante. Ou seja, a velocidade de rotação dos braços espirais, está ligada à frequência epicycloidal e à frequência orbital. Os braços são locais onde existe uma grande quantidade de órbitas, portanto maior concentração de massa, o que chega a caracterizá-los como poços de potencial de forma alongada. Ao mesmo tempo, o poço de potencial tende a atrair e fixar as órbitas, sincronizando-as, o que dá consistência e bom tempo de vida ao sistema todo.

Estamos convencidos de que essa é a única boa explicação para os braços espirais: são regiões de adensamento de órbitas estelares. Não fazem sentido modelos de braços em que estes se deslocam uns em relação aos outros ou se cruzam, como existem na literatura. Bifurcações de braços são razoavelmente comuns, mas a explicação em termos de dinâmica de órbitas, ainda não foi suficientemente estudada.

Na vizinhança imediata do Sol existe o braço local, que certamente se destaca por sua natureza que é distinta dos braços normais. Ele é bastante curto e possui ângulo de inclinação praticamente nulo. Esse braço é uma consequência da resso-

nância de co-rotação.

### 3.3 A ressonância de co-rotação, local privilegiado

Uma ressonância, em vários domínios da Física, é a forte amplitude de oscilação ou de vibração de um sistema, em resposta a duas frequências próximas ou coincidentes. Esse termo é usado às vezes quando uma das frequências é a "frequência natural" do sistema. Por exemplo ao projetar um equipamento mecânico vamos evitar que haja ressonância entre a frequência natural dessa estrutura e a frequência gerada por um motor integrado ao equipamento. Em mecânica celeste, o estudo das ressonâncias entre movimentos de planetas, seus satélites, e corpos celestes menores, é uma atividade preponderante,

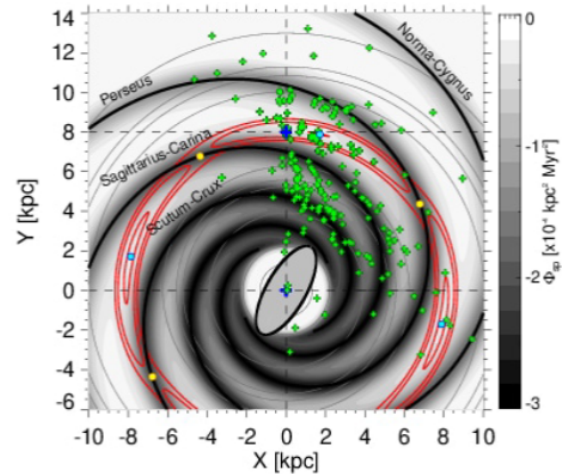
Em nossa Galáxia, a ressonância de co-rotação de refere à coincidência entre a velocidade de rotação das estrelas do disco e a velocidade de rotação dos braços espirais. Vamos abordar diversos aspectos dessa ressonância. Sabemos que os braços espirais da Galáxia giram como um corpo rígido, com velocidade de rotação muito bem determinada, que estimamos em 28 km/s por kpc (Dias et al, 2000 [5]), A velocidade é proporcional ao raio, para um corpo rígido, por isso usamos a unidade de km/s por kpc, o que dá 232 km/s no raio 8.3 kpc Por outro lado, as estrelas do disco galáctico giram em torno do centro galáctico com uma velocidade de 232 km/s, que é a mesma para qualquer raio. Este último valor é o que podemos verificar nas curvas de rotação das Figuras 6 e 7. Portanto reencontramos que a velocidade de uma estrela situada na co-rotação é zero, em relação aos braços espirais, como sabemos. Em consequência, uma estrela situada na ressonância de co-rotação nunca vai atravessar um braço espiral. Vamos agora examinar o caso de uma estrela que se encontre 100 pc apenas mais para o exterior do disco, no raio galáctico 8.4 kpc A velocidade dos braços vai para  $28 \times 8.4 = 235$  km/s, ou seja 3 km/s mais rápido que as estrelas que continuam em 232 km/s. O tempo para uma estrela para ir de um braço para o outro seria como se a estrela viajasse com 3 km/s. Para percorrer os 13,3 kpc que há entre um braço espiral e o próximo, com essa velocidade colocada em unidades de kpc/ano chegamos a um tempo

de 4,3 bilhões de anos. Vale a pena lembrar de um raciocínio feito pelo astrônomo soviético L.S. Marochnik em 1983 [6]. A primeira hipótese é que a vida tal como a conhecemos na Terra seria totalmente destruída se o Sol atravessasse um braço espiral. Num braço espiral há formação e explosão de estrelas massivas, supernovas e outras fontes de raios cósmicos e de raios X. Essas radiações têm condições de esterilizar completamente um planeta. A vida teria que recomeçar do zero, uma vez acabada a travessia. Os cálculos feitos por diversos autores que estudam fontes de radiação em nossa Galáxia corroboram essa conclusão.

A segunda hipótese do Marochnik é que o aparecimento da vida num planeta, desde suas formas mais simples, contando sua evolução até chegar a vida inteligente é um processo que demanda aproximadamente 4,5 bilhões de anos. Como chegar a tal resultado? A única estrela que ele pode citar como exemplo é o Sol, com a vida na Terra, que muito provavelmente não existia em forma inteligente há 200 milhões de anos atrás. Talvez falte uma definição do que é vida inteligente, mas vamos prosseguir. Se estivéssemos numa órbita situada a apenas 100 pc da nossa, mais para fora ou para dentro com relação à órbita ressonante, já não teríamos existido, porque o tempo passado desde a última passagem num braço seria menor que 4,3 bilhões de anos. Esse tempo é inferior ao tempo para desenvolver uma civilização. Isto significa que a faixa que pode ser habitada para seres inteligentes, no disco galáctico, é uma faixa muito estreita de 200 pc no total, e que temos sorte que o Sol tenha nascido nesta faixa. É uma sorte, mesmo?

### 3.4 Potencial efetivo

O “potencial efetivo” é um método clássico da mecânica clássica utilizado para descrever órbitas de estrelas num sistema em que o próprio potencial gravitacional se encontra em rotação. Essa definição pode ser pouco esclarecedora, e valeria a pena estudar esse assunto, mas seria muito longo tratar desta questão aqui, e iremos direto aos resultados. Temos que estar de posse da descrição do potencial de um braço, somar o efeito de todos os braços, e levar em conta a velocidade de rotação dos braços. Podemos usar dados do modelo de braços espirais de Junqueira et al (2013) [7].



**Figura 11:** Em vermelho encontram-se as curvas de nível do potencial efetivo devido à rotação dos braços galácticos. Aparecem 4 ressonâncias equidistantes separadas de 90 graus. O Sol tem sua posição indicada por um ponto azul, na posição  $x = 0, y = 8$  kpc. “Nossa” ressonância se estende desde o braço de Sagittarius-Carina até o braço de Perseus, com um comprimento da ordem de 10 kpc. Essa ressonância coincide muito bem com o braço local. Os pontos verdes são fontes de emissão *maser* geralmente consideradas como indicadores de braços espirais. A amostra dos *masers* sofre de um viés nas detecções, que resultam de um levantamento feito só numa parte do céu, e por isso não comentaremos a distribuição.

Ele adotou uma gaussiana como sendo a forma do perfil de um braço, com uma largura da ordem de 1 kpc, sendo que a distância entre os braços é da ordem de 3 kpc. O resultado do cálculo de potencial efetivo é mostrado na Figura 11 (Barros et al, 2021 [8]).

### 3.5 As “correntes estelares” ou “moving groups”

Vamos introduzir aqui os “*moving groups*”, o que a primeira vista parece um assunto deslocado da descrição dos grandes componentes da Galáxia, mas mostraremos que eles tem seu lugar na descrição das propriedades do disco galáctico.

Nas primeiras décadas do século 20 foram aprimorados os catálogos de estrelas, sempre privilegiando as mais próximas, e foram acumuladas as medidas de velocidades das estrelas, tanto no plano de céu, motivadas em parte pelo interesse em se medir distâncias de estrela por meio de paralaxe, quanto na direção radial (perpendicular ao plano do céu) por meio de espectros; logo se notou que algumas estrelas se deslocavam no



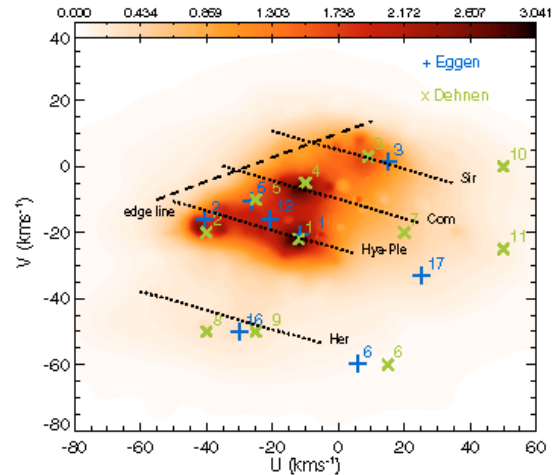
céu, muito além da paralaxe, mas com um movimento sempre numa mesma direção, com velocidade constante. Esses movimentos foram chamados de movimentos próprios. Nada de anormal, até aí: é aceitável que uma estrela tenha sua própria velocidade, no espaço. No entanto, veio uma surpresa quando se descobriu que alguns grupos de estrelas, contendo por exemplo uma dezena de estrelas, possuíam a mesma velocidade em pc/ano ( não falamos mais de velocidade angular) e apontando para uma mesma direção. O.J. Eggen publicou uma grande quantidade de estudos sobre esse assunto nas décadas de 1970 a 1990, mas outros autores também contribuíram. Esses grupos foram às vezes chamados de “*superclusters*” (superaglomerados) – ou de “*stellar streams*” (correntes de estrelas), até que no final o termo “*moving groups*” se consolidou, e foi adotado em diversas línguas (francês, português, etc). Portanto, usaremos “*moving groups*”. A expressão “*superclusters*”, agora abandonada, vinha da suposição de que as estrelas provenientes de um mesmo aglomerado poderiam ter velocidades muito parecidas. No entanto os *moving groups* contém estrelas com uma variedade de idades, o que exclui um nascimento único.

T. Antoja (2008) [9] re-catalogou todos os *moving groups*, com a lista das estrelas atribuídas a cada um deles, num trabalho de fôlego, e com análise inovadora. Claro, os dados que requerem mais atenção são as componentes de velocidade  $U$  e  $V$  observadas nas direções  $X$  e  $Y$  das coordenadas, no plano galáctico. São esses dados que comprovam a pertinência a algum *moving group*. Para complementar o estudo, Antoja coletou na literatura as idades e metalicidades.<sup>1</sup> Estes dados existem apenas para uma pequena fração das estrelas do novo catálogo, mas são importantes para tentar esclarecer a origem das estrelas de cada grupo.

O método de análise foi o de “*wavelet*” (pequenas ondas). Esse método tem por objetivo alisar os dados, dando a suas propriedades um aspecto de variação contínua. O resultado da análise é dado na Figura 12.

Sem a análise por *wavelet* a distribuição estaria cheia de pequenos picos e buracos, devido a erros nas medidas de estrelas e a incomplezas (pequenas zonas sem estrelas). O método *wavelet*

<sup>1</sup>Em Astronomia, “metalidade”



**Figura 12:** Resultado da análise feita por T. Antoja et al. (2008) da distribuição de velocidades no plano  $U, V$  de uma grande quantidade de estrelas da vizinhança solar. A distribuição foi submetida a um procedimento de suavização, o “*wavelet*”. As cores, explicadas acima do gráfico, são proporcionais aos números de estrelas por unidade de área do gráfico. Os *moving groups* são identificados com nomes de alguma estrela ou grupo de estrelas bem conhecidos, que pertencem ao grupo, como Sirius, Hyades, Pleiades. Antoja inseriu no gráfico uma linha tracejada, que denominou “*edge line*” - linha de borda - porque outros autores, trabalhando com números menores de estrelas, já tinham chamado atenção sobre essa linha.

consegue dar ênfase aos aspectos da distribuição que são realmente significativos.

A subdivisão entre os diversos subgrupos parece pouco clara na Figura 12, que é um gráfico de distribuição de velocidades. No entanto os *moving groups* apresentam posições distintas no espaço  $XY$ , o que ajuda a reconhecer a qual *moving group* determinada estrela pertence.

Esse trabalho de Antoja foi excelente para fornecer um quadro descritivo detalhado dos *moving groups*, mas não chegou a esclarecer a razão dos movimentos.

### 3.6 Mapas dinâmicos e a origem dos *moving groups*

O Sol se encontra preso dentro de uma espécie de bolha que é a zona de co-rotação, uma pequena área do disco no local onde o efeito da ressonância é mais concentrado. Os astrônomos que trabalham em astronomia dinâmica desenvolveram ferramentas que geralmente os astrônomos de outras áreas ignoram; uma delas é “o mapa dinâmico”.

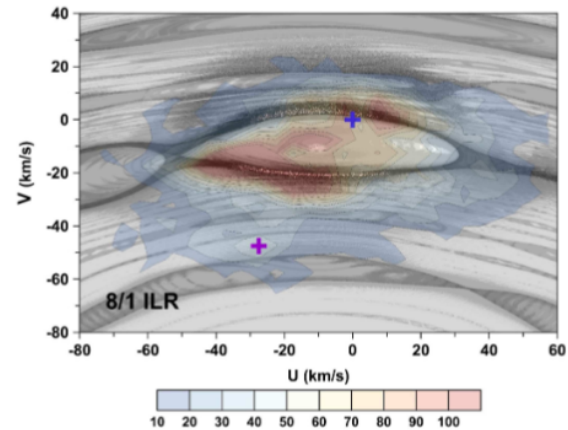


Esses mapas são obtidos integrando as órbitas de um grande número de estrelas de uma região. Eles revelam a existência de órbitas que são chamadas de caóticas. Essas, em vez de se mostrarem lisas e regulares como as órbitas normais, apresentam-se como indo e vindo em longitude e latitude, de forma aleatória, com mudanças muito frequentes de amplitude e de direção da velocidade. Os especialistas em mecânica celeste já tinham constatado, observando coleções de objetos de diversos tipos, que os mapas dinâmicos apresentam em torno das ressonâncias, fronteiras ricas em órbitas caóticas

T.A. Michtchenko, pesquisadora do IAG-USP, e seu grupo, empreenderam o trabalho de construir um mapa dinâmico das estrelas da vizinhança solar

O mapa foi feito “integrando” as órbitas de estrelas que foram observadas pela missão GAIA, selecionando as que estão dentro de um raio de 1 kpc em torno do Sol. Essa seleção de amostra garante que as distâncias, e velocidades radiais e longitudinais foram medidas com precisão suficientes para nosso propósito de integração seja bem sucedido. Como já discutimos anteriormente, para proceder a uma integração, temos que dispor de um modelo que descreve as forças que atuam sobre a estrela. Anteriormente, chegamos a fazer apresentar integração de órbitas num ambiente maior, sem considerar os braços, quando o objetivo era explicar os braços. Mas agora, foi possível levar em conta os braços, e nos concentrar em uma área bastante menor. O leitor sabe que um braço é constituído de muitas órbitas estelares próximas umas das outras. Um lugar que concentra um grande número de estrelas atua como um centro de atração gravitacional.

Para levar em frente uma integração com a presença dos braços, foi usado o modelo de braços espirais de Junqueira et al. Ele adotou uma gaussiana como sendo a forma do perfil, com uma largura da ordem de 1 kpc, quando sabemos que a distâncias entre os braços é da ordem de 3 kpc. Nessas escalas, o disco da Galáxia é parecido com uma telha ondulada, em termos de largura, separação e profundidade de máximos de potencial. Porque os braços parecem tão finos na Figura 8, ao contrário da Figura 12? Nossa resposta é porque as estrelas, que são os marcadores de braços, só se formam no fundo do poço, onde a densidade



**Figura 13:** Mapa dinâmico de uma região da vizinhança solar, construído por Michtchenko et al (2017), no qual a ressonância de co-rotação está em evidência. Foi superposta a distribuição de *moving groups* de T. Antoja, a mesmo da Figura 12, colocada na mesma escala em, em tons marrons. A posição do Sol é indicada pela cruz azul dentro da ressonância.

do gás é maior. O leitor não precisa se preocupar com a amplitude de nossa telha ondulada. A amplitude do potencial que estamos descrevendo é muito pequena, da ordem de 3% do potencial geral da curva de rotação, e que é responsável pela estrutura espiral. Tudo que foi dito a respeito da forma das órbitas estelares em seções anteriores continua válido. Estamos introduzindo uma pequena perturbação, mas esta é necessária para obter um mapa dinâmico.

T. Michtchenko et al (2017) [10] fizeram a integração das órbitas das estrelas selecionadas como descrito acima; o resultado é apresentado na Figura 13. Nessa figura, cujos eixos são as velocidades  $U$  e  $V$  das estrelas, podemos reconhecer perfeitamente a ressonância de co-rotação, dentro de seu contorno que indica a grande quantidade de órbitas caóticas. Esse são os pontos iniciais das órbitas calculadas, ou seja, iniciando uma integração de órbita partir de um ponto desse contorno, teremos uma órbita caótica.

Na mesma região do mapa reproduzimos o mapeamento dos *moving groups* realizado por Antoja, apresentado anteriormente na Figura 12, em tons marrons. A semelhança do contorno caótico da ressonância local com a forma da região de velocidades dos *moving groups* é inegável.

O mínimo que podemos dizer é que uma grande fração dos *moving groups* se encontram no interior da zona de ressonância, na qual o Sol também

se encontra. Podemos nos perguntar, ainda assim, porque a coincidência não é perfeita. Acreditamos que pode ser consequência dos erros acumulados para chegar até o mapa dinâmico. Vários parâmetros importantes foram fixados por modelos, como por exemplo a posição exata dos braços espirais, largura e profundidade do potencial dos braços, valor exato do raio de co-rotação, etc. Assim, pequenos erros nos parâmetros podem ter afetado o resultado final. Outro fator que pode dar a impressão de ajuste imperfeito é que além da co-rotação existem outras ressonâncias, como duas visíveis no mapa dinâmico e designadas por 8/1. Outras menores ainda como a 12/1 são praticamente invisíveis na Figura 13. Essas ressonâncias menores tem a capacidade de capturar estrelas formando *moving groups*

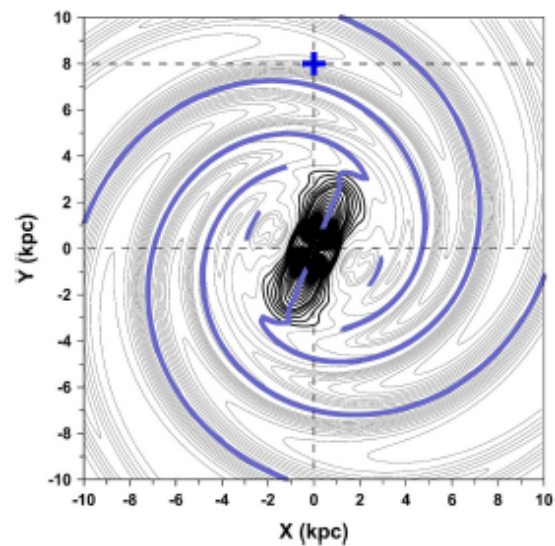
A descoberta da natureza dos *moving groups* foi um feito importante, que está permitindo novos avanços, em andamento, no entendimento da dinâmica das estrelas da vizinhança solar. Terminamos aqui a discussão do disco galáctico, e passaremos a apresentar a barra e o bojo da Galáxia. Tratando-se de objetos mais distantes, nos quais não estamos imersos, e que são mais difíceis de observar, não será surpresa se muitas vezes as informações apresentadas forem mais imprecisas

#### 4 A barra

A barra é um elipsoide que em sua dimensão maior (o eixo da barra) tem comprimento total da ordem de 7 kpc, ou seja 3,5 kpc entre o centro galáctico e a ponta. Esse eixo tem orientação com ângulo entre 20 e 22 graus com relação com relação à linha que une o centro da Galáxia ao Sol. A largura da barra, dentro do plano do disco Galáctico, é de aproximadamente 3 kpc. A espessura, na direção perpendicular ao plano, é da ordem de 1,5 kpc

Em praticamente todas as representações do disco galáctico que incluem a barra, esta é representada por um oval, sem maiores detalhes sobre a forma real. Apresentamos na Figura 14 o desenho da barra segundo Michtchenko et al (2018) [11], no qual o formato externo é parecido com um retângulo.

Um dilema que se apresenta na organização deste capítulo é saber se a barra e o bojo são dois

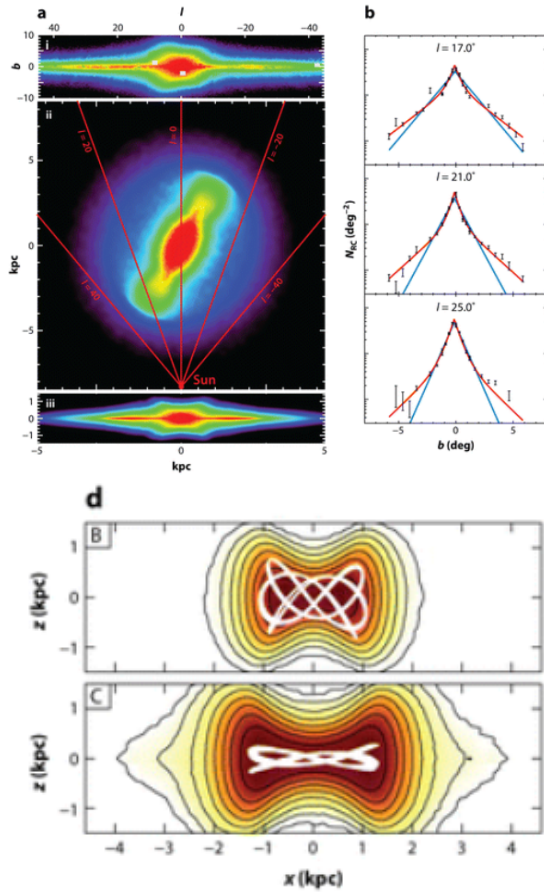


**Figura 14:** A barra da galáxia segundo Michtchenko et al (2018).

componentes distintos, ou a barra é um apenas prolongamento do bojo.

Essa é uma discussão bizantina. Os textos do século passado tinham tendência em separá-los completamente em dois componentes da Galáxia, talvez influenciados pelas classes de galáxias introduzidas por Hubble. As galáxias tinham, ou não tinham, braços. Portanto, barra e bojo são componentes independentes. Mais recentemente, no entanto, percebeu-se que a conexão entre a barra e o bojo não é tao definida, no local onde se esperaria uma fronteira. Parece haver uma continuidade entre os dois componentes. A espessura da barra vai crescendo, das extremidades da barra até o bojo, coincidindo com a espessura do bojo. Nessa a respeito de bojo + barra ou um bojo-barra, tendemos a acreditar que esta segunda posição é a mais viável. De qualquer forma, o importante é tentar descrever toda a geometria de forma correta. á um consenso de que a barra é constituída de estrelas velhas e pouco luminosas, com baixa metalicidade, precisamente como acontece no bojo, e em contraste com o disco, no qual as estrelas mais jovens são abundantes

Para comparação na Figura 15 apresentamos o modelo da barra por Bland Hawthorn e Gherard (2016). A imagem do centro, com a barra vista de cima tem semelhança com a Figura 14 (de Michtchenko et al [10], veja também [11]) se consideramos a contorno colorido em verde. A imagem de cima mostra de forma clara que a



**Figura 15:** Mostramos sugestões de órbitas de estrelas que poderiam existir no interior da barra-bojo. Essas órbitas poderiam explicar a forma de amendoim (peanut-shaped) sugerida para o bojo (Bland-Hawthorn and Gerhard, 2016)

barra está na continuidade do bojo. As duas linhas que não são paralelas, na parte superior e inferior, são explicadas por um efeito de perspectiva de uma barra com ângulo de 22 graus com respeito a linha Sol-centro, um lado (longitudes positivas) estando mais próximo do que o outro (longitudes negativas).

Na Figura 15 mostramos sugestões de órbitas de estrelas que poderiam existir no interior da barra-bojo. Essas órbitas poderiam explicar a forma de amendoim (peanut-shaped) sugerida para o bojo (Bland-Hawthorn e Gerhard, 2016, [12], ver também [13]).

Uma observação mais recente, como sugere que essa depressão que vemos na parte superior e inferior da Figura 15 realmente existe. Há uma controvérsia com relação ao comprimento da barra. Gerhard e Wegg, e López-Corredoira [13, 14], por exemplo, defendem a ideia de uma barra longa,

que seria espessa até a distância de 3,5 kpc do centro, e depois, seria prolongada por uma estrutura de pouca espessura até 4,6 kpc do centro. Não compartilhamos essa visão. Por exemplo, na Figura 8 que representa a os braços espirais, há uma barra oval, representada esquematicamente. Na extremidade mais próxima de nós, a barra está sendo atravessada por pelo menos 2 braços espirais. Isso é impossível, não pode haver braço espiral dentro de uma barra. Isso mostra que a barra não pode ser mais longa que 3,5 kpc

A maioria dos pesquisadores considera que esse prolongamento não faz parte da barra, e que a barra tem comprimento entre 2,9 e 3 kpc. A “extensão” aparente poderiam até ser braços espirais:, pois sabemos Galáxia possui dois braços conectados a cada uma das extremidades da barra, dando origem à estrutura de 4 braços. Gerhard estava motivado a considerar uma barra mais comprida e além disso a velocidade de rotação da barra mais alta do que a do disco (40 km/s/kpc em vez de 28 km/s/kpc), para dar uma explicação que ele considera mais correta do conjunto de ressonâncias e suas coincidências com os *moving groups*. Michtenko contrapôs seus argumentos e mostrou que seu modelo, em que a barra gira como o disco, é menos arbitrário, explica melhor as coincidências de ressonâncias de Lindblad com os *moving groups* observados; e produz uma conexão estável entre os braços e a barra.

## 5 O bojo

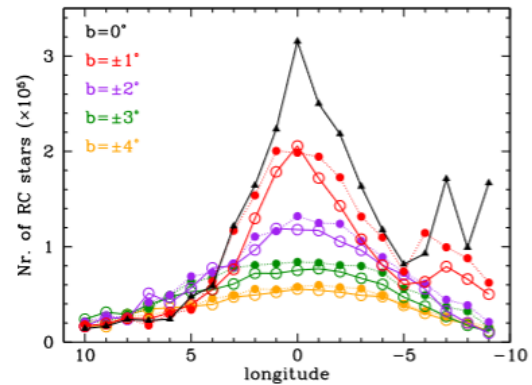
A visão clássica de um bojo é inspirada da forma de galáxias elípticas. O bojo e o halo são componentes aproximadamente esféricos, com centro coincidindo com o centro do disco. Em uma primeira aproximação tem a forma de um esferoide (ou de uma bola achatada). O achatamento é moderado, com dimensão cerca de 20% menor na direção do eixo do disco. O bojo é constituído de estrelas bastante mais velhas que as do disco, com cor avermelhada, e com órbitas sem organização aparente. As idades são estimadas por meio de diagramas HR (um gráfico da luminosidade versus índice de cor de amostras de estrelas) e pela composição química, sendo que as estrelas do bojo são mais pobres em metais do que as estrelas do disco. O que escrevemos acima era uma

espécie de consenso, mas, no entanto, sem grande precisão quanto às dimensões. A forma do bojo foi obtida recentemente de maneira confiável por um grupo internacional ligado ao ESO (E. Valenti et al, 2016 [15]). Esses autores fizeram varreduras em longitude no intervalo de  $+10^\circ$  a  $-10^\circ$  e em latitude, no intervalo de  $-9.5^\circ$  a  $+9.5^\circ$ , cobrindo bem toda a região central (Figura 6), contando as estrelas de tipo “red clump” (RC). Esse termo, que poderia ser traduzido por “aglomeração vermelha”, designa uma região do diagrama HR. Por enquanto, vamos só reter a informação de que as RC são estrelas bastante luminosas e vermelhas, e relativamente fáceis de serem detectadas no infravermelho.

A Figura 16 mostra as quantidades de estrelas RC ao longo das linhas de visadas para cada ponto, usando como unidade um milhão de estrelas por grau quadrado. Podemos ver que é para latitude  $b = 0$  que temos as maiores densidades (linha preta) e que para essa latitude, temos um pico acentuado em longitude zero. Portanto, o bojo tem um forte pico de densidade em seu centro. Podemos reparar, também, que uma série de pontos situados numa linha de latitude constante (por exemplo a linha amarela) terá menos contagens quanto mais afastada passa do centro. Observando essa figura estimamos o tamanho do bojo. Se considerarmos que o bojo “acaba” onde a densidade caiu para 10% do valor do pico, podemos avaliar a dimensão, no sentido da longitude, em 5 graus, e em sentido da latitude, em 4 graus. Sabendo que o bojo está a 8 kpc, tomando a tangente do ângulo, obtemos as dimensões em unidades de kpc, 0,7 kpc e 0,56 kpc, respectivamente, sendo a dimensão ao longo da longitude (o equador do esferoide), 25% maior. Os números não são muito diferentes daqueles que tínhamos para o esferoide, antes do artigo de Avanti et al.

## 6 O halo

O halo é o maior componente da Galáxia, mas no entanto será aquele que receberá a menor atenção em nosso texto. É esférico, com raio de até 100 kpc, sendo possível, no entanto, que algumas órbitas estelares atinjam 300 kpc. Como outras estruturas, suas fronteiras não são bem definidas, e assim, também, suas dimensões. Tem densidade



**Figura 16:** Quantidades de estrelas RC ao longo das linhas de visadas do bojo para cada ponto, usando como unidade um milhão de estrelas por grau quadrado.

de gás e de estrelas muito baixas, decrescendo de dentro para fora. As órbitas estelares parecem aleatórias, existindo muitas com um movimento de rotação no sentido retrógrado (contrário à rotação do disco). Em contraste com sua baixa densidade, o halo contém objetos proeminentes, que são uma centena de aglomerados globulares. Estes aglomerados são concentrações esféricas de estrelas, dos quais M92 (Figura 17) é um exemplo. Os aglomerados globulares contêm de 100 000 até milhões de estrelas, que são as estrelas mais velhas encontradas na Galáxia, com idades de 12 a 13 bilhões de anos, sendo que a idade do universo é estimada em 13,7 bilhões de anos. Considera-se que não há distinção entre as estrelas do halo e as dos aglomerados globulares, em termos de distribuição de massa e de idades. Talvez halo seja constituído de remanescentes de aglomerados globulares?

### 6.1 Um estudo da velocidade e excentricidade das estrelas em função da metalicidade

A seguir apresentamos um estudo da distribuição de metalicidade num estudo que inclui estrelas do halo por B. Carney et al (1996) [16]. A metalicidade, na prática, é um índice que fornece a razão de átomos de Fe (ferro) para H, porque uma linha de Fe é a única fácil de medir. O índice  $[\text{Fe}/\text{H}]$  ou  $[\text{m}/\text{H}]$  é fornecido numa escala logarítmica decimal (somar 1 equivale a aumentar a abundância relativa por um fator 10). Esse índice é um indicador de idade, pois a metalicidade au-





**Figura 17:** O aglomerado globular M 92.

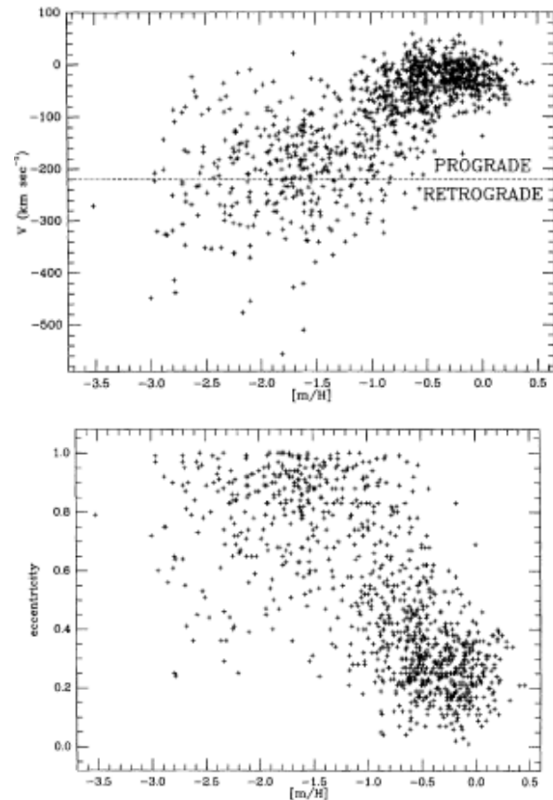
menta com a idade. As estrelas do disco galáctico estão na concentração de pontos à direita com velocidades próximas de 0. A velocidade é pequena porque estão sendo medidas a partir do Sol, e as estrelas vizinhas têm velocidades parecidas.

As estrelas do halo apresentam velocidades negativas. As velocidades das estrelas do halo estão centradas em -220, a velocidade do Sol no disco, como se o halo representasse um referencial sem rotação, em média, mas existem estrelas com rotação em sentido contrário do disco.

Um outro estudo dos mesmos autores apresenta a excentricidade das órbitas. Este parâmetro mede o alongamento das órbitas. Uma órbita circular em excentricidade 0, uma estrela com órbita extremamente alongada pode chegar a excentricidade 1.

Nesse novo gráfico, não existem órbitas circulares (a excentricidade de um círculo é zero) mas a grande maioria das estrelas tem órbitas bastante alongadas, com excentricidade próximas de 1, como se não fossem elípticas, ou como se praticamente não existisse uma concentração central de massa. Em resumo, temos no halo estrelas com órbitas muito difíceis de serem modelizadas.

Para finalizar a seção sobre o halo, apresentamos uma figura muito esquematizada representando a Galáxia, com seu disco, seu halo com alguns aglomerados globulares, seu bojo e seu disco. Há uma representação, por meio de flechas, da órbita da Galáxia Anã de Sagitário. Esta é uma galáxia anã que está caindo sobre a Galáxia, e que será totalmente absorvida, mas que no mo-



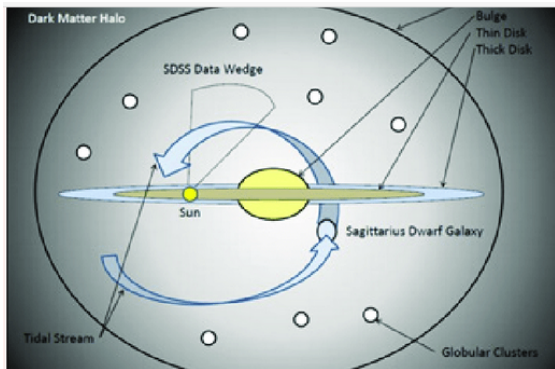
**Figura 18:** Velocidade e excentricidade das órbitas estelares em função da metalicidade, B. Carney et al, (1996).

mento podemos considerar como um habitante do halo. Por enquanto não atravessou o disco, mas deverá fazê-lo. O ponto de incidência não será muito longe do Sol.

## 7 Conclusão

Espero que este texto tenha contribuído para o leitor entender uma série de fenômenos, relacionados com a nossa Galáxia, e que além disso, para ele perceber que o fato de entender alguns fenômenos proporciona uma sensação agradável de descoberta. Fazer ciência, hoje, talvez seja menos prazeroso do que era algumas décadas atrás, porque o ritmo das descobertas ultrapassa o ritmo natural de nosso aprendizado. Não temos o tempo de digerir uma quantidade impressionante de dados novos, oriundos de “surveys” muito eficientes feitos por missões espaciais, em comprimentos de ondas antes inexplorados. As interpretações de dados e os modelos se multiplicaram.. Numa reunião científica com boa quantidade de participantes, modelos incompatíveis en-





**Figura 19:** Representação da Galáxia com seus diversos componentes.

tre si convivem. Os autores não têm tempo para ler e entender os artigos dos outros. Inclusive, astrônomos jovens pensam que o que foi feito em épocas anteriores tem pouco valor. Como podiam fazer boa ciência no passado, se não possuíam todos esses dados que temos hoje?

Aproveitando a reflexão sobre aspectos gerais dos rumos da ciência, discutiremos o do problema da matéria escura, que parece ser o protótipo do assunto no qual o questionamento faz falta.

A hipótese da matéria escura surgiu em parte para explicar por que as curvas de rotação de galáxias são planas até grandes distâncias do centro do disco, onde não há mais matéria suficiente para sustentar essas curvas, que deveriam cair. Foi qualificada de escura porque não a vemos e não a detectamos. Outra questão que sustentou (e ainda sustenta) a hipótese da matéria escura é a distribuição de velocidades de galáxias situadas na periferia de aglomerados de galáxias. A “descoberta” da matéria escura é atribuída a Fritz Zwicky, astrônomo suíço-búlgaro, que publicou um artigo em 1933 sobre essas velocidades. O conceito apareceu também relacionado com as curvas de rotação de galáxias, que implicavam em massas muito maiores do que se imaginava, para os halos galácticos

A questão extragaláctica envolve dimensões muito maiores do que as dos discos halos galácticos, e poderia eventualmente revelar um outro tipo de matéria escura. Mas vamos estabelecer uma ligação entre escalas de dimensões diferentes. O conceito de matéria escura é uma explicação para efeitos gravitacionais que não são explicados pela mecânica clássica nem pela relatividade geral, que tornariam necessária a existência de mais

matéria do que conseguimos ver ou detectar.

Aparentemente a maioria dos astrônomos acredita em matéria escura, embora não disponhamos de levantamento de opinião que confirme esse dado.

Voltando às curvas de rotação, que ocupam uma posição importante neste texto, cabe esclarecer que não faltam candidatos convencionais para os efeitos gravitacionais observados. Um exemplo seria um disco rico em moléculas H<sub>2</sub>, que não emitem nem absorvem radiação, por não possuírem um momento de dipolo. Como o elemento H é um elemento primordial muito abundante, não seria surpreendente que uma boa parte desse elemento se encontre na forma de H<sub>2</sub>. Existem teorias de reações moleculares que estabelecem uma provável relação entre abundância de CO e a de H<sub>2</sub>. No entanto, há um problema em se usar CO como traçador de H<sub>2</sub>: as calibrações feitas na vizinhança solar da razão CO/H<sub>2</sub> não são válidas a grande distância. Deveriam ser corrigidas, porque há diminuição da abundância relativa de CO com a distância galatocêntrica. CO foi produzido no interior de estrelas, ao contrário de H que é primordial. Este fato sugere que a densidade de H<sub>2</sub> é subestimada.

É interessante voltar a olhar para a Figura 8 na qual aparece um braço espiral se estendendo até 14 kpc. Um braço espiral indica a presença de estrelas massivas, e de gás para formá-las. Como poderia estar lá, tão longe do centro do disco? A matéria que forma braço não poderia estar ajudando a curva a ficar plana?

Outra contribuição que foi sugerida para a massa, e que não é estranha, é a dos *Machos* (*Massive Compact Halo Objects*), que são, no halo, uma população de estrelas escuras, tipo estrelas de nêutrons, ou mesmo anãs vermelhas, que seriam indetectáveis a grandes distâncias.

Além dos componentes “massivos” invisíveis, não podemos excluir explicações para a curva plana que não sejam de matéria escura, mas de simples mecânica celeste e hidrodinâmica? Há evidências de que o disco da Galáxia está em expansão. Por exemplo, J. Sanders et al (1919) concluíram que o raio até a metade da massa do disco da galáxia aumentou em 43% nos últimos 7 bilhões de anos. Há um processo de expansão em andamento. Como se comporta a distribuição de matéria e a distribuição de excentricidade das

órbitas durante essa expansão?

Independentemente disso, sabemos que o disco é bombardeado por uma chuva de pequenas nuvens de gás que provém de grandes distâncias da Galáxia. Como a curva de rotação é afetada por esse processo de acreção? Os braços espirais também devem ter um papel na evolução do disco. Como os braços se comportam como um corpo rígido, a grandes distâncias apresentam velocidades de rotação muito maiores que as das estrelas para a mesma distância. Por exemplo, a 16 kpc a matéria continuaria com uma velocidade de 220 km/s (se a curva for plana), mas os braços giram a uma velocidade da ordem do dobro disso, considerando que a co-rotação é próxima do Sol em 8,5 kpc. A velocidade dos braços com relação ao meio circundante seria de 200 km/s, o que sugere ondas de choque violentas. Não poderia haver indução, pelos braços espirais, de estrelas com altas velocidades? Lembrando que os braços são formadores de estrelas, podemos nos perguntar com que velocidade as estrelas seriam ejetadas dos braços, logo depois de formadas? Seriam as estrelas mais visíveis, por serem jovens? Seriam injetadas em órbitas com raios maiores? Enfim, na lista acima, há algumas sugestões de fenômenos que eventualmente poderiam levar a curvas planas.

Nossa ignorância sobre esses fenômenos é grande. Mas alguns problemas são tratáveis. Com um trabalho árduo, dentro da física clássica, por exemplo estudando a interação entre os braços espirais e as estrelas, e as órbitas estelares com grande velocidade inicial, deveria ser possível haver algum progresso.

É muito cedo para poder afirmar que estão descartadas todas as soluções dentro da física clássica. E se não estão descartadas, é então muito cedo para declarar que a matéria escura existe com certeza.

### Agradecimentos

Agradeço à minha esposa Ruth Gruenwald por seu apoio constante, inclusive em questões de internet/informática. Agradeço os meus colaboradores em artigos científicos, com os quais tive o prazer de manter discussões sobre a estrutura da Galáxia, e escrever vários artigos, em particu-

lar Tatiane Michtchenko, Douglas Barros, Wilton Dias, Hektor Monteiro, Sergio Scarano Jr. Agradeço Júlio Fabris por ter me convidado a redigir esse texto para os *Cadernos de Astronomia*, e ajudado na fase de edição. Agradeço a FAPESP e o CNPq pelos auxílios recebido durante muitos anos, que possibilitaram chegar a estes resultados.

### Sobre o autor

Jacques Lépine ([jacques.lepine@iag.usp.br](mailto:jacques.lepine@iag.usp.br)) é professor titular no IAG-USP e pesquisador 1A do CNPq. É membro da Academia Brasileira de Ciências e da Academia Mundial de Ciências (TWAS). Dedicar atualmente a maior parte de seu tempo ao LLAMA, projeto de radiotelescópio nos Andes.

### Referências

- [1] D. Clemens, *Massachusetts-Stony Brook Galactic plane CO survey: the galactic disk rotation curve.*, *The Astrophysical Journal* **295**, 422 (1985).
- [2] L. Fich, M.; Blitz e A. A. Stark, *The Rotation Curve of the Milky Way to  $2R_0$* , *The Astrophysical Journal* **342**, 272 (1989).
- [3] Ž. Chrobáková et al., *Gaia-DR2 extended kinematical maps-III. Rotation curves analysis, dark matter, and MOND tests*, *Astronomy & Astrophysics* **642**, A95 (2020).
- [4] A. Kalnajs, *Spiral structure viewed as a density wave*, *Publications of the Astronomical Society of Australia* **2**(4), 174 (1973).
- [5] W. d. S. Dias et al., *The spiral pattern rotation speed of the Galaxy and the corotation radius with Gaia DR2*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **486**(4), 5726 (2019).
- [6] L. Marochnik, *On the position of the Sun in the Galaxy*, *Astrophysics* **19**, 278–283 (1983).

- [7] T. Junqueira et al., *A new model for gravitational potential perturbations in disks of spiral galaxies. An application to our Galaxy*, *Astronomy & Astrophysics* **550**, A91 (2013).
- [8] D. Barros et al., *INSERIR TITULO DO ARTIGO*, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **8**, 48 (1981).
- [9] T. Antoja et al., *Origin and evolution of moving groups-I. Characterization in the observational kinematic-age-metallicity space*, *Astronomy & Astrophysics* **490**(1), 135 (2008).
- [10] T. A. Michtchenko et al., *Modelling resonances and orbital chaos in disk galaxies-Application to a Milky Way spiral model*, *Astronomy & Astrophysics* **597**, A39 (2017).
- [11] T. A. Michtchenko et al., *Combined dynamical effects of the bar and spiral arms in a Galaxy model. Application to the solar neighbourhood*, *Astronomy & Astrophysics* **615**, A10 (2018).
- [12] J. Bland-Hawthorn e O. Gerhard, *The galaxy in context: structural, kinematic, and integrated properties*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **54**, 529 (2016).
- [13] O. Gerhard e C. Wegg, *The Galactic Bar*, in *Lessons from the Local Group* (Springer International Publishing, 2015), 43–52.
- [14] M. López-Corredoira et al., *A major star formation region in the receding tip of the stellar galactic bar. II. Supplementary information and evidence that the bar is not the same structure as the triaxial bulge previously reported*, *The Astronomical Journal* **118**(1), 381 (1999).
- [15] E. Valenti et al., *Stellar density profile and mass of the Milky Way bulge from VVV data*, *Astronomy & Astrophysics* **587**, L6 (2016).
- [16] B. W. Carney et al., *A survey of proper motion stars. XIII. The Halo population*, *The Astronomical Journal* **112**, 668 (1996).