

## Capítulo 1

### A longa história da descoberta da Galáxia

#### *A Antiguidade*

Em noites claras e sem lua, longe de grandes cidades, vemos o céu atravessado por uma grande faixa de luz fraca e difusa; é a Via Láctea, ou Galáxia. A palavra Galáxia vem do grego *galaktos* (leite); como Via Láctea (*Milky Way*, em inglês), a palavra está associada ao aspecto leitoso desta formação. Nas línguas orientais, como chinês, japonês e vietnamita, é o aspecto prateado que influenciou o nome; a Galáxia é chamada de “rio prateado”. As estrelas e a Via Láctea suscitaram a curiosidade dos homens desde as épocas mais remotas. O conceito correto do que é a Galáxia demorou milênios para se estabelecer e, na realidade, permanecem grandes lacunas no conhecimento. Mas, considerando que os primeiros passos concretos aconteceram há apenas cerca de 400 anos, e que nos últimos 50 anos acumulamos mais informação sobre a Galáxia do que em toda a história da humanidade, podemos ficar impressionados com a rapidez com que nosso conhecimento está evoluindo. Vamos retrazar a seguir as principais etapas desta grande aventura da mente humana. Uma foto da Galáxia é apresentada na figura 1-7.

Na Antiguidade, não havia distinção entre cosmologia (estudo do Universo), mitologia e religião. A Via Láctea foi objeto de inúmeros mitos. Os egípcios acreditavam que a Via Láctea era um rio, uma bifurcação do Nilo, que fluía através do reino de Osíris onde os mortos viviam em felicidade eterna. A maioria dos povos do Mediterrâneo acreditava que a abóbada celeste, ou firmamento, era uma fronteira sólida, na qual as estrelas estavam fixadas. Os babilônios, os egípcios e os gregos acreditaram (pelo menos parte deles) que a água era o elemento primordial, a partir do qual o mundo foi construído, e que atrás da abóbada celeste havia água. No Velho Testamento (na Gênese), encontramos também esta noção, comum naquela época: “E Deus fez o firmamento, e separou as águas que estavam debaixo do firmamento das águas que estavam acima do firmamento.”

Entre Thales, um filósofo-cientista que viveu no sexto século antes de Cristo, que defendeu a idéia de que a água era o elemento fundamental, e Ptolemeu, no segundo século depois de Cristo, a Grécia teve dezenas de grandes filósofos, alguns dos quais foram grandes astrônomos (Aristóteles, Heráclides, Aristarco, Hiparco, Ptolomeu). Em geral, os filósofos-astrônomos se dedicaram ao estudo dos movimentos do Sol e da Lua, e até mesmo de Mercúrio e Vênus. A Galáxia não esteve no centro das atenções desses pensadores, com exceção de Anaxágoras, filósofo atômico do quinto século A.C. Anaxágoras considerou que o Universo tinha uma extensão infinita, e continha um número infinito de pequenas sementes, ou átomos. Segundo ele, os céus eram feitos das mesmas substâncias que a Terra, e o Universo não era controlado por deuses. Ele emitiu a hipótese de que a Galáxia resultava da sombra da Terra projetada no céu. Devido à pequena dimensão do Sol, a sombra da Terra se estendia até o infinito; o brilho das estrelas aparecia melhor nas regiões de sombra onde não eram ofuscadas pelo Sol. Mais tarde Aristóteles se encarregou de demonstrar o absurdo desta hipótese: se fosse verdade, a sombra teria que se mover de acordo com o movimento do Sol. Anaxágoras talvez tenha

sido o primeiro cientista acusado de heresia; ele foi julgado e absolvido, mas teve que deixar Atenas por causa do ambiente de hostilidade.

Ptolomeu é o único destes filósofos gregos do qual temos a obra razoavelmente completa; isto porque seus textos foram traduzidos e conservados pelos árabes. O nome árabe de sua obra é o *Almagest*. Nela, encontramos uma descrição detalhada da Galáxia, inclusive uma menção a seu aspecto leitoso que justifica seu nome. A principal preocupação de Ptolomeu, ao fazer essa descrição, era mostrar que as estrelas eram fixas na esfera celeste.

### *Da Idade Média ao final do século 18*

A Via Láctea já foi também chamada de “Caminho de Santiago”. Durante a Idade Média, peregrinos partiam de muitos pontos da Europa, atravessavam a França, e convergiam para Santiago de Compostella (campo de estrelas), cidade do norte da Espanha. A Via Láctea servia de referência para a orientação dos peregrinos, parecendo apontar para a direção de Santiago.

Pode-se dizer que depois do longo período de trevas representado pela Idade Média, a primeira grande contribuição à astronomia da era moderna, no mundo ocidental, foi a de Nicolau Copérnico. Embora não seja nossa intenção retrair toda a história da astronomia, mas apenas os episódios diretamente relacionados com a descoberta da natureza da Galáxia, não podemos deixar de mencionar as obras de Copérnico e de Kepler. Através do estudo do movimento dos planetas do Sistema Solar, iniciaram uma verdadeira revolução, ao mostrar que a Terra não era o centro do Universo, já que ela girava em torno do Sol. Copérnico (Niklos Koppernik, em polonês, Copernicus, em latim) nasceu em Torun (Thorn) na Polônia, em 1473, e frequentou diversas universidades na Europa, como as de Cracóvia, Pádua e Roma. Fixou-se em Frauenburg em 1510, onde foi cônego da catedral, e lá permaneceu os últimos 33 anos de sua vida. Em 1543, no mesmo ano de sua morte, foi publicada sua obra *De revolutionibus orbium caelestium*, composta de 6 livros. A obra apresenta os fundamentos da trigonometria e da astronomia esférica, contém um catálogo de estrelas, trata do movimento aparente do Sol, do movimento da Lua, e refuta as teorias da Antigüidade, de Aristóteles e de Ptolomeu. Na teoria de Copérnico, a Terra passa a ser um planeta, como Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, que orbitam em torno do Sol. No entanto, para ele, as estrelas continuam a fazer parte de uma esfera fixa, como imaginavam os astrônomos da Antigüidade. Copérnico considera que essa esfera fixa é bem maior do que pensavam os gregos, já que o movimento da Terra não produz variação da direção das estrelas. Na época de sua publicação, a obra de Copérnico passou quase despercebida.

Johannes Kepler nasceu um século depois de Copérnico, em 1571, na pequena cidade de Weil, no Wurtemberg, Alemanha. Teve a oportunidade de seguir estudos que incluíram Grego, Latim, Ética, Dialética, Física, e Teologia, em parte na universidade de Tübingen. Kepler destinava-se a ser pastor, mas mudou seu interesse para a Matemática. Foi contratado como professor de matemática na universidade de Graz. Teve uma vida atormentada, com várias mudanças devido a perseguições religiosas (na época das guerras de religiões) e vários casamentos. Durante sua estadia em Praga, teve contato com Tycho

Brahe, outro grande astrônomo, de origem dinamarquesa. As observações realizadas por Tycho Brahe foram de grande valia para que Kepler pudesse estabelecer as leis dos movimentos dos planetas. Kepler foi desde o início um entusiasta da teoria de Copérnico, e quis ir mais além. Ele tinha percebido que existia uma relação entre a dimensão das órbitas dos planetas, e seu período de revolução, antes de encontrar uma descrição matemática precisa desta relação. No seu entender, esta relação revelava a harmonia do mundo, uma obra de Deus, e ele queria descobrir os segredos desta harmonia. Passou praticamente sua vida perseguindo este objetivo, indo de revés em revés, sempre persistindo, até estabelecer as três leis que descrevem o movimento dos planetas. As leis dão as formas das órbitas (elípticas), o tempo para percorrer as diferentes partes da órbita, e a tão esperada relação entre o período de revolução e a dimensão da órbita. Estas leis, que sintetizavam os resultados das observações, foram posteriormente explicadas pela teoria da gravitação de Isaac Newton.

Voltemos então à Galáxia. A primeira observação científica da Galáxia foi feita por Galileu em 1610. Galileo Galilei nasceu em Pisa em 1564, de uma família nobre sem posses. Estudou medicina, mas não terminou seus estudos, provavelmente devido a seu temperamento rebelde. Intelectual de muitos talentos, músico, pintor, foi principalmente um dos primeiros físicos experimentais, e astrônomo. Descobriu a regularidade do movimento do pêndulo, e estudou as leis que regem a queda dos corpos sob o efeito da gravidade.

Tendo chegada aos ouvidos de Galileu a notícia da invenção, por um fabricante de óculos holandês, de uma luneta que permitia enxergar à distância, logo empreendeu a fabricação de um instrumento destes. Conseguiu primeiro construir uma luneta com aumento de três vezes, e pouco depois conseguiu um aumento de 32 vezes. Foi Galileu quem cunhou a palavra telescópio, a partir das raízes gregas. Com seu telescópio, Galileu descobriu as montanhas da Lua e os satélites de Júpiter. Ele percebeu também, surpreso, que as manchas claras da Via Láctea nada mais eram do que milhares de estrelas que não se consegue distinguir a olho nu, e que muitas delas estavam reunidas em aglomerados.

Anos mais tarde Galileu teve que enfrentar a condenação da Igreja Católica, através da Inquisição, devido a sua posição favorável à teoria de Copérnico. Galileu se retratou, ajoelhado frente ao tribunal da Inquisição, no dia 22 de julho de 1633, mas teria murmurado no final palavras que ficaram famosas: “*Eppur, si muove!*” (no entanto, ela se move!), se referindo à Terra. Apesar da retratação, Galileu teve que viver os últimos anos de sua vida praticamente em prisão domiciliar. Pelo menos, não teve o final infeliz de Giordano Bruno, queimado vivo em 1600 por convicções semelhantes. É interessante que Kepler e Galileu foram contemporâneos, ambos defensores da teoria de Copérnico, mas nunca se encontraram. Tiveram pouca troca de correspondência; Kepler chegou a pedir uma luneta a Galileu, mas não foi atendido.

A astronomia caminhou de forma lenta, nos séculos 17 e 18. É verdade que a teoria da gravitação de Newton, publicada na segunda metade do século 17, foi um dos maiores avanços da história das ciências e da astronomia. No entanto, não abordaremos a teoria nem a biografia de Newton, tendo em vista nossos objetivos já mencionados. Na área do conhecimento da Galáxia, decorriam-se décadas entre os avanços significativos. Depois de

Galileu, merece destaque o modelo da Galáxia do astrônomo amador inglês Thomas Wright (1711-1786), apresentado em 1750 no livro *Uma teoria original do Universo*, pelo fato de estar bastante próximo da visão moderna. Segundo Wright, números quase infinitos de estrelas formam conjuntos isolados no espaço. O Sol faz parte de um destes sistemas; o Sol assim como as outras estrelas estão distribuídos num disco achatado, que orbita em torno de seu centro, no qual estaria concentrada uma massa muito grande. Já que o Sol faz parte deste disco, a distribuição de estrelas nos aparece como uma faixa no céu. O modelo de Wright inspirou o filósofo Immanuel Kant (1724-1804), que publicou em 1755 *A Teoria dos Céus*. De acordo com Kant, as estrelas que formam a Via Láctea giram em torno do centro da mesma, e muitas nebulosas distantes têm também a forma de discos que giram sobre si; estes numerosos sistemas se aglomeram em torno de um centro, e existem muitos destes sistemas, numa hierarquia que se repete em escalas maiores, infinitamente. Embora os modelos de Wright e de Kant fossem mais baseados em especulação do que em dedução científica, chegaram perto daquilo que sabemos hoje ser a descrição correta.

### *De Herschel a Kapteyn*

A maior contribuição daquela época ao estudo da Galáxia foi a do astrônomo inglês William Herschel, nascido em Hanover (Alemanha) em 1738. Herschel começou sua carreira na Inglaterra como músico, tocando órgão na cidade de Bath, alcançando inclusive posição de destaque como compositor<sup>1</sup>. Herschel realizou suas primeiras observações durante suas horas vagas com um pequeno telescópio refletor de 5 cm de diâmetro. Encontrando dificuldades para conseguir um telescópio maior, partiu ele próprio para a construção, desgastando e polindo centenas de espelhos, com a ajuda de seu irmão e de sua irmã. Esta, Carolina Herschel, participou ativamente das pesquisas e observações de William, e desenvolveu pesquisas independentes, descobrindo nebulosas e cometas. Carolina pode ser considerada a primeira mulher astrônoma profissional<sup>2</sup>. O maior dos telescópios construídos por Herschel foi um instrumento com 1,30 m de diâmetro e 13 m de comprimento, em 1789 (figura 1-1). Mas antes disto ele já tinha conseguido muitos resultados científicos; sendo que suas primeiras apresentações à Royal Society datam de 1780. Ele pesquisou a estrela variável Mira, as montanhas da Lua, as manchas solares e descobriu o planeta Urano.

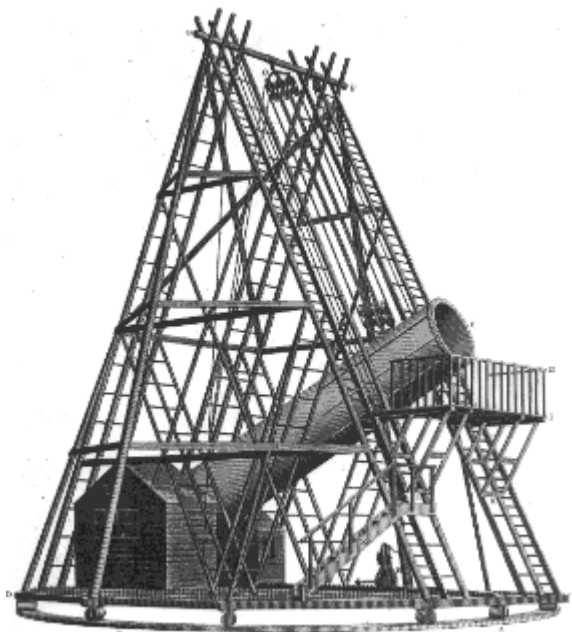
O trabalho de Herschel que mais nos interessa aqui foi o de contar as estrelas em muitas direções do céu. Ele formulou a hipótese de que a maior concentração aparente de estrelas em algumas direções era devida a uma maior extensão da Via Láctea. Em outras palavras, Herschel supôs que a densidade espacial de estrelas era uniforme até a fronteira da Galáxia, e daí caía subitamente a zero; assim, numa direção onde se vê uma maior

---

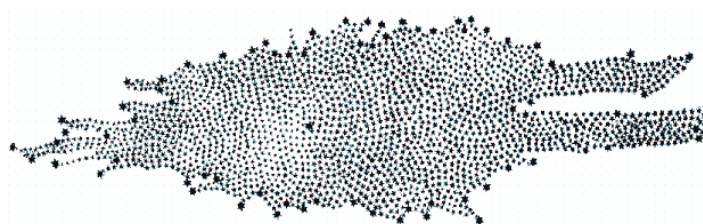
<sup>1</sup> As músicas de Herschel caíram no esquecimento por muitos anos, mas foram revividas recentemente graças a um astrônomo francês do Observatório de Meudon, Dominique Proust, também organista, que lançou um CD com músicas de Herschel.

<sup>2</sup> O termo profissional significa aqui que o trabalho científico de Carolina Herschel foi realizado com seriedade e continuidade por muitos anos. Note-se que uma contemporânea, a francesa Hortense Lepaute, realizou cálculos da órbita do cometa Halley.

quantidade de estrelas, a distância até a fronteira deveria ser grande. Herschel deduziu desta maneira a extensão do sistema estelar em um grande número de direções, chegando à representação da figura 1.2, publicada em 1785. Para Herschel, a Via Láctea se confundia com o próprio Universo, e tinha a forma de uma lente, com duas elongações maiores de um lado. Ele concluiu que o Sol ficava próximo ao centro do sistema. Este é o primeiro modelo que podemos chamar de científico da Galáxia, pois foi baseado em um grande número de medidas. Herschel deve ser considerado como o pai de um método científico usado até hoje, que é o de contagem de estrelas para desvendar a estrutura da Galáxia, como voltaremos a discutir neste livro.



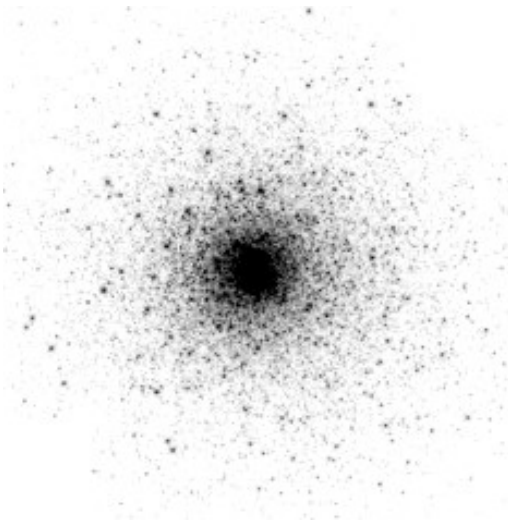
**Figura 1-1:** O telescópio de 1,3m de diâmetro construído por Herschel.



**Figura 1-2:** A Galáxia segundo o modelo de Herschel

O modelo de Herschel sobreviveu até o início do século 20, apesar de estar mais afastado da realidade do que o modelo de Wright, pois Herschel achava que a Galáxia e o Universo eram uma coisa só. Os seguidores de Herschel aperfeiçoaram vários aspectos do método estatístico, passaram a estimar as distâncias das estrelas baseando-se em suas

luminosidades aparentes, e levaram em conta o fato da distribuição espacial não ser uniforme, como mostra a existência de aglomerados. A versão mais recente do modelo de Herschel foi o chamado “Universo de Kapteyn”, apresentado em 1922 pelo astrônomo holandês Jacobus Cornelius Kapteyn, nascido em 1851. Neste último modelo o Universo mantinha sua forma lenticular, com 18 kpc de diâmetro e 3.5 kpc de espessura (1 kpc = 1000 pc, onde pc é abreviação de parsec<sup>3</sup>), sendo a densidade de estrelas maior no centro, onde estaria situado o Sol. Este modelo foi considerado como a palavra final, cientificamente estabelecida, por quase todos os astrônomos no início do século passado. Sua descrição aparece na revista *Astrophysical Journal*, a mesma revista de prestígio onde até hoje muitos astrônomos publicam seus resultados. O modelo aceito pela maioria estava bastante errado, pelas dimensões, pela posição atribuída ao Sol, e principalmente por considerar que este sistema estelar incluía todo o Universo. Podemos ter a impressão de este modelo foi mais uma tentativa de se colocar o Homem numa posição central no Universo, como uma repetição de um ciclo histórico. No entanto, temos que reconhecer que o modelo de Kapteyn era baseado em observações e em hipóteses que pareciam razoáveis.



**Figura 1-3:** O aglomerado globular NGC6093,

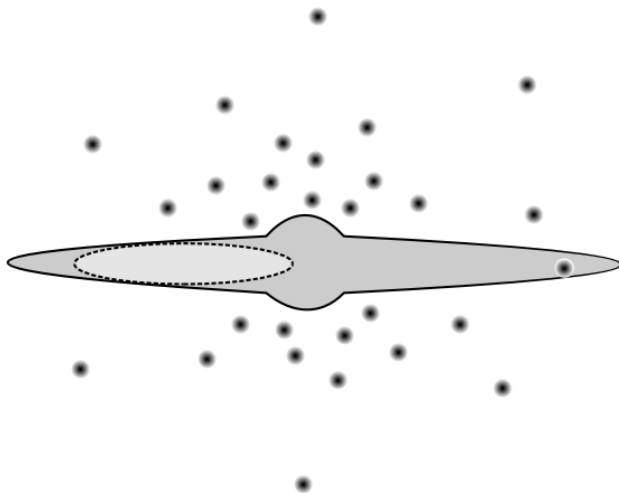
### *O grande debate e a visão moderna*

Existiam vozes discordantes que foram ignoradas pela maioria. Antes mesmo do modelo de Kapteyn ser publicado, uma nova visão estava surgindo. Um estudo da distribuição espacial dos aglomerados globulares, iniciado em 1915 por Harlow Shapley, do Observatório de Monte Wilson, Califórnia, trouxe resultados que transformaram nossa visão da Galáxia. Os *aglomerados globulares* (ver exemplo na figura 1-3) são concentrações esféricas de até um milhão de estrelas, e se encontram distribuídos acima e abaixo do plano de simetria da Galáxia, até distâncias relativamente grandes deste plano (alguns kpc). Partindo inicialmente do estudo de um determinado tipo de estrelas variáveis na vizinhança do Sol, as RR Lyrae, Shapley conseguiu obter o valor médio do brilho

---

<sup>3</sup> O kiloparsec (kpc) é a unidade básica de distância no estudo da Galáxia, e pode ser simplesmente aceita como tal. Uma definição mais precisa do parsec será dada no próximo capítulo.

intrínseco<sup>4</sup> destas estrelas. Os aglomerados globulares contêm estrelas desse tipo, identificáveis por sua variabilidade, com período inferior a 1 dia. A partir do brilho aparente destas estrelas, Shapley estimou a distância de um certo número de aglomerados globulares, suficientemente próximos para que suas estrelas RR Lyrae fossem observadas. Shapley verificou que os diâmetros reais dos aglomerados globulares variavam pouco, de objeto para objeto. A partir desta constatação ele estimou a distância de todos os aglomerados, mesmo os mais distantes, comparando o diâmetro aparente com o diâmetro real. Shapley estudou então a distribuição espacial dos aglomerados globulares, e verificou que havia muito mais aglomerados numa região do céu do que em outras. Ou seja, o centro da distribuição espacial de aglomerados globulares se encontrava completamente deslocado com relação ao centro presumido da Galáxia segundo o modelo de Kapteyn, do qual o Sol deveria estar próximo. Shapley argumentou com razão que o centro da região onde se distribuem os aglomerados deveria ser o próprio centro da Galáxia, e determinou sua direção e distância, estimada em 15 kpc. Concluiu ainda que o tamanho total da Galáxia atingia 100 kpc, muito maior do que o estimado por Kapteyn. Os trabalhos de Shapley acenderam um debate sobre as dimensões da Galáxia, mas não chegaram a convencer o *establishment* científico. A distribuição espacial dos aglomerados globulares obtida por Shapley é ilustrada na figura 1-4.



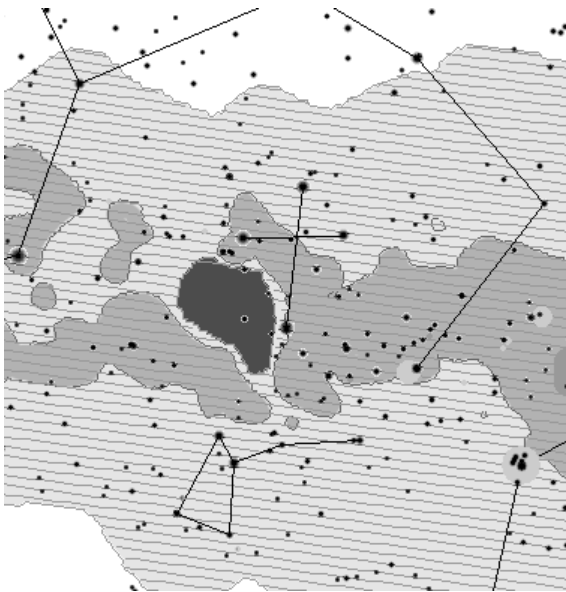
**Figura 1-4:** Posições relativas dos aglomerados globulares e do Universo de Kapteyn (em pontilhado) em relação a Galáxia como a conhecemos hoje. Grande parte da Galáxia não era conhecida por causa da absorção da luz pela poeira interestelar.

O que faltava para selar o debate entre Shapley e os partidários do modelo de Kapteyn, era alguma evidência de que a luz das estrelas é absorvida no espaço interestelar.

Vários astrônomos, entre os quais o próprio Kapteyn, estavam conscientes de que se tal absorção existisse, as densidades de estrelas e dimensões deduzidas para a Galáxia poderiam estar erradas. A observação de áreas escuras no céu, visíveis a olho nu, sugeria fortemente a existência de nuvens de material absorvente. O Saco de Carvão, uma grande nuvem escura situada próximo do Cruzeiro do Sul, pode ser visto na foto da Galáxia

<sup>4</sup> Os conceitos de magnitude absoluta e de magnitude aparente, mais precisos do que “brilho intrínseco” ou “brilho aparente” usados aqui, e a forma de calcular a distância, são discutidos em detalhe no capítulo 2.

apresentada na figura 1-7. O esquema apresentado na figura 1-5 deve ajudar na localização na foto.



**Figura 1-5:** Posição do Saco de Carvão (mancha escura) com relação ao Cruzeiro do Sul

Em algumas destas manchas negras não se observa nenhuma estrela, mesmo com o auxílio de um telescópio. Parecia muito improvável que estas regiões fossem buracos na distribuição de estrelas. No entanto, a existência de algumas nuvens absorventes não era prova de que existisse material absorvente em todo o espaço. Kapteyn chegou a procurar evidências de poeira interestelar. Como outros astrônomos, ele imaginava corretamente que se pequenas partículas no espaço espalhassem a luz das estrelas, o processo de espalhamento não atuaria da mesma forma sobre os vários comprimentos de onda; a luz azul seria mais afetada que a luz vermelha. Esperava-se um avermelhamento aparente das estrelas distantes, pelo mesmo motivo que o Sol parece avermelhado quando está próximo ao horizonte. Kapteyn não teve sucesso nesta empreitada, provavelmente devido à imprecisão das medidas naquela época.

Apenas em 1930, em consequência dos estudos de *aglomerados galácticos* realizados pelo astrônomo norte-americano de origem suíça Robert Julius Trumpler, obteve-se uma prova convincente da existência de poeira interestelar. O nome destes aglomerados não é muito apropriado, porque tanto eles quanto os aglomerados globulares, que já mencionamos, pertencem à Galáxia. Eles são também chamados de *aglomerados abertos*. Os aglomerados galácticos são diferentes dos globulares; eles contêm menos estrelas (de centenas até milhares) e se concentram no plano de simetria da Galáxia, onde a poeira se encontra em maior quantidade. Trumpler estimou a distância dos aglomerados galácticos, baseando-se no brilho das estrelas. Estes aglomerados geralmente não contêm estrelas variáveis, mas nesta época, Trumpler já tinha condições de classificar as estrelas a partir das observações dos espectros. Ele pode comparar o brilho das estrelas com o de estrelas próximas do mesmo tipo, e inferir a distância. Sabendo o diâmetro angular dos mesmos aglomerados, calculou também o tamanho ou diâmetro linear (em parsecs) destes. Chegou a conclusão surpreendente de que os aglomerados abertos mais distantes eram maiores. Era mais razoável então supor que os aglomerados tinham todos mais ou menos a



mesma dimensão, mas que o que estava errado era a distância estimada. Supondo que a luz das estrelas era parcialmente absorvida por partículas do meio interestelar, Trumpler calculou o valor médio desta absorção, para que as distâncias ficassem corretas. Encontrou uma absorção proporcional à distância, de 0,7 magnitude por kpc (o conceito de magnitude será discutido no próximo capítulo). Ao mesmo tempo, ele verificou que quanto mais distante o aglomerado, mais avermelhadas eram suas estrelas. Este efeito era esperado, se a absorção fosse causada por grãos muito pequenos; estes absorveriam menos a luz vermelha do que a luz azul. Enfatizamos que o efeito da poeira, descoberto por Trumpler por meio dos aglomerados galácticos, não tinha sido notado nos estudos de aglomerados globulares, porque estes últimos se encontram em sua maioria fora do plano de simetria da Galáxia, e é neste plano que o efeito da poeira é mais importante.

Voltando alguns anos para trás, ao mesmo tempo que ocorria o debate sobre a dimensão da Galáxia, a visão de que a mesma representava a totalidade do Universo foi abalada pelos trabalhos de Edwin Hubble, iniciados em 1923 e apresentados numa série de artigos de 1926 a 1929. Hubble estudou as “nebulosas” espirais com o novo telescópio do Monte Wilson, de 2,5 metros. Este telescópio, inaugurado em 1917, foi durante 30 anos o maior do mundo. Da mesma forma que Galileu resolveu com sua luneta as manchas esbranquiçadas da Galáxia, Hubble conseguiu resolver as imagens de estrelas em duas destas nebulosas catalogadas por Messier, M31 e M33, que hoje sabemos serem galáxias espirais próximas (M31 é também conhecida como a Nebulosa de Andrômeda). Se estas estrelas tivessem brilho intrínseco parecido com os das estrelas da vizinhança solar, isto implicaria em distâncias enormes para M31 e M33, que não poderiam portanto fazer parte da Galáxia. As conclusões eram inicialmente incertas porque as imagens observadas poderiam ser de condensações de nebulosa, em vez de estrelas. Tudo mudou quando Hubble descobriu estrelas variáveis *cefeidas* em M31. Estas estrelas variam em luminosidade de forma bastante regular, com períodos entre 1 a 50 dias, sendo que quanto maior seu período, maior sua luminosidade (fenômeno conhecido como relação período-luminosidade). A partir da medida do período de algumas cefeidas, Hubble confirmou suas suspeitas e determinou as distâncias de M31 e M33, da ordem de 300 kpc.

Somente por volta de 1930 o Universo de Kapteyn foi totalmente abandonado, devido ao acúmulo de descobertas que não conseguiam se encaixar neste modelo, como a distribuição espacial de aglomerados globulares, a rotação da Galáxia, a poeira interestelar e a descoberta de outras galáxias. Durante os anos que seguiram, a teoria da estrutura e rotação da Galáxia e das *populações* estelares conheceu grande desenvolvimento sob o impulso do sueco Bertil Lindblad, do holandês Jan H. Oort, e do alemão naturalizado norte-americano Walter Baade. Como estamos chegando perto da época atual, mencionaremos aqui de forma resumida algumas das principais contribuições destes pesquisadores, sem nos estender sobre a vida deles. Afinal são quase nossos contemporâneos.

Lindblad desenvolveu um modelo da Galáxia, no qual esta é constituída de sub-sistemas ou famílias de estrelas, cada sub-sistema girando em torno do centro da Galáxia com velocidade diferente e apresentando um grau de achatamento diferente. Por exemplo o conjunto de aglomerados globulares forma um sistema praticamente esférico (sistema esferoidal), com velocidade de rotação global pequena ou inexistente. As órbitas

individuais são muito alongadas, parecidas com a dos cometas em torno do Sol. A direção na qual a órbita é alongada é diferente para cada aglomerado, e os movimentos são diferentes para cada aglomerado, alguns girando em sentido contrário dos outros, de tal maneira que não há uma rotação do conjunto. Estes movimentos garantem a estabilidade do sistema, ou seja, o esferóide mantém sua forma, na média. Ao contrário, algumas famílias (populações) de estrelas são distribuídas em forma mais achatada, isto é, em forma de discos espessos, e apresentam rotação organizada, praticamente todas girando na mesma direção e com velocidades parecidas.

É relativamente fácil medir a velocidade de uma estrela com relação a nós (em relação à Terra ou ao Sistema Solar) na direção radial, ou seja ao longo da linha que une o Sol à estrela estudada. Os movimentos de aproximação ou de afastamento, que acontecem na direção radial, provocam deslocamentos nas linhas espectrais. O conceito de velocidade radial será discutido no próximo capítulo. Desde o início do século os dados de velocidades radiais vinham se acumulando, e percebeu-se que existiam *estrelas de alta velocidade*, com características distintas daquelas que formam a grande maioria de nossa vizinhança.

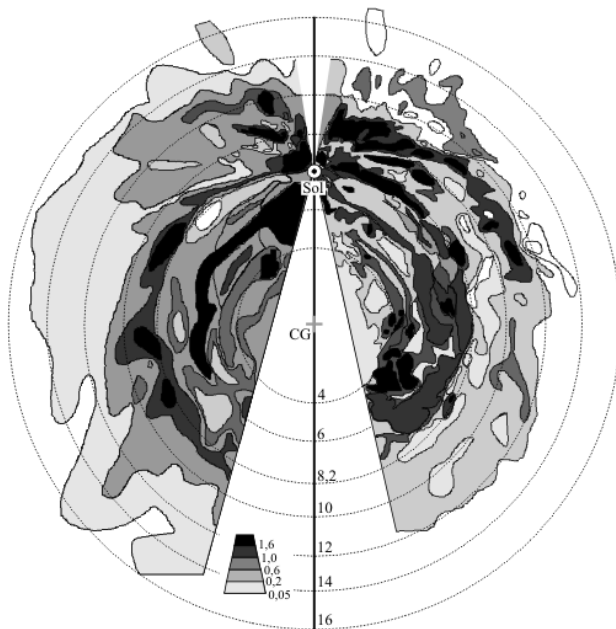
Oort percebeu que estas estrelas de alta velocidade poderiam ser entendidas dentro do modelo de Lindblad. Nós (o Sistema Solar e as estrelas vizinhas) pertencemos a um sistema achatado ou disco, que está girando com velocidade elevada de em torno de seu eixo, situado no centro da Galáxia. As estrelas próximas, quase todas pertencentes ao mesmo sistema, não apresentam velocidades aparentes importantes, porque se encontram girando junto com o Sol em torno do centro galáctico. É como se estivéssemos correndo numa maratona com muitos participantes; nossa distância aos corredores vizinhos quase não varia. Mas se a maratona passar por uma pessoa parada, esta pessoa é que parece estar com velocidade anormal; sua velocidade relativa é alta. Como as estrelas do sistema esferoidal possuem órbitas alongadas em torno do centro galáctico, em vez de rotação coletiva, elas podem apresentar velocidades aparentes altas.

Olhando agora em mais detalhe as estrelas que fazem parte do mesmo sistema que o nosso (as que estão na maratona), constatamos que estas podem apresentar pequenas velocidades radiais sistemáticas, em relação ao Sol. Isto acontece porque estrelas que se encontram um pouco mais próximas do centro galáctico têm período de rotação menor. É como se a maratona estivesse numa pista circular; quem está do lado interno leva vantagem e parece estar correndo mais depressa, porque a pista interna é mais curta. Oort se dedicou ao estudo desta *rotação diferencial*, à determinação da velocidade de rotação do Sol em torno do centro galáctico (um problema difícil, sobre o qual não há um consenso, até hoje) e à determinação da distância do Sol ao centro.

Baade estudou as galáxias vizinhas, em particular M31 e duas pequenas galáxias que são companheiras desta. Ele percebeu que as estrelas que aparecem nos braços espirais, geralmente azuis, são bem distintas daquelas que aparecem na proximidade do centro e constituem um sistema esferoidal, que são bastante avermelhadas. As primeiras foram chamadas por Baade de *população I* e as segundas de *população II*. Com a noção de populações estelares estabeleceu-se uma conexão entre as propriedades dinâmicas dos

sistemas estelares (os tipos de órbitas, como mencionamos anteriormente), e as características intrínsecas das estrelas que os compõem, como por exemplo a cor.

Na metade do século passado, com o advento da radioastronomia, deu-se uma verdadeira revolução no estudo da Galáxia. Em 1944 o holandês H.C. van de Hulst previu que o hidrogênio do meio interestelar deveria emitir na região rádio do espectro. O estado fundamental (de mais baixa energia) do átomo H é subdividido em dois níveis de energia muito próximos, sendo que a transição entre eles corresponde a uma radiação de frequência 1420 Mhz ou comprimento de onda de 21 cm. Tratava-se de uma previsão teórica impossível de ser verificada em laboratório. Durante a Segunda Guerra Mundial as tecnologias de radar e de microondas tinham sido bastante desenvolvidas, e vários grupos se lançaram na construção de receptores para a frequência prevista. Em 1951, quase simultaneamente pesquisadores holandeses, americanos e australianos anunciaram a detecção da linha de 21 cm. Em poucos anos todo o plano da Galáxia, onde se concentra o hidrogênio, tinha sido inteiramente mapeado. A radiação rádio, não sendo absorvida pela poeira existente no disco galáctico, penetra distâncias muito maiores do que a radiação visível, tornando toda a Galáxia acessível. Foi possível estimar a quantidade de gás existente na Galáxia, sua distribuição espacial e sua distribuição de velocidades; com esta foi estabelecida a *curva de rotação* da Galáxia, que é o gráfico da velocidade de rotação do gás em função da distância ao centro. Esta curva permitiu estimar pela primeira vez a massa da Galáxia. O mapa da distribuição de H no plano galáctico, a que se chegou na década de 50, publicado por Oort, é apresentado na figura 1.5. Hoje ele é considerado impreciso, devido às suposições feitas para passar dos dados observados para distâncias de concentrações de gás. Mas este mapa teve o mérito de revelar uma estrutura espiral em grande escala.



**Figura 1-6:** Distribuição de hidrogênio neutro no plano galáctico resultante dos mapeamentos realizados na década de 50. As regiões mais escuras indicam maior densidade de H. O mapa exclui uma região em torno do centro galáctico (em claro), porque nestas direções, o modelo não é capaz de decidir a distância do gás. Os círculos indicam distâncias ao centro galáctico, em kpc.

Entre 1965 e 1968 principalmente, mas continuando nos anos seguintes, descobriu-se a existência de grande diversidade de moléculas no espaço, no interior de *nuvens moleculares*. Estas moléculas emitem na região rádio do espectro; algumas delas, como CO, bastante abundantes, apresentam emissão intensa, o que permitiu que se mapeasse novamente a Galáxia, desta vez em sua componente molecular. Novos tipos de radiotelescópios e de receptores rádio tiveram que ser desenvolvidos, porque muitas das linhas de emissão de moléculas aparecem na região milimétrica do espectro, até então inexplorada. No Brasil, o radiotelescópio do Itapetinga (em Atibaia, SP), inaugurado em 1972, contou com um receptor na frequência de 22 GHz (comprimento de onda 1,35 cm), na qual existe uma linha intensa da molécula de H<sub>2</sub>O (vapor de água). Este radiotelescópio permitiu a detecção de um bom número de regiões galácticas de emissão da água, e o estudo de fontes galácticas de emissão rádio no contínuo (fora das linhas). Na mesma época entrou em funcionamento o telescópio de 1,6 m do Pico dos Dias (Brazópolis, MG), que foi por muitos anos o melhor instrumento astronômico do país. Na década de 70, a radiação infravermelha passou a ser um novo instrumento de exploração da Galáxia. O satélite IRAS, lançado em 1982, fez mapas completos do céu nos comprimentos de onda de 12, 25, 60 e 100 microns. Trata-se de uma região do espectro que se estende desde o chamado infravermelho médio (para o comprimento de onda menor) até o infravermelho distante (assim denominado por ser o mais distante, em comprimento de onda, da luz visível). Apenas uma pequena região espectral do infravermelho, próxima do visível, pode ser observada a partir do solo com telescópios tradicionais; este é o motivo do uso de satélites para o infravermelho médio e distante. Como as ondas de rádio, a radiação infravermelha é muito pouco absorvida pela poeira interestelar. Mas, enquanto as estrelas praticamente não emitem na região rádio, os objetos que mais emitem radiação em 12 microns são as estrelas. Por isso, com IRAS foi possível estudar o disco galáctico e observar claramente o bojo, que é a região central luminosa e amarelada que conseguimos ver em imagens de outras galáxias espirais.

A quantidade de informação acumulada nos últimos anos sobre a Galáxia é imensa, com dados obtidos em todas as regiões do espectro de radiação: raios gama, raios-X, ultravioleta, visível, infravermelho, rádio. No entanto muitas incógnitas e incertezas permanecem. Até mesmo nossa distância ao centro galáctico viu sua estimativa variar consideravelmente nos últimos anos. Temos apenas uma visão superficial de como a Galáxia se formou. Algumas grandes questões que estão no centro de debates atuais, serão parcialmente abordadas neste livro. Quais são os processos físicos que desencadeiam a formação de estrelas, e que controlam a massa das estrelas formadas? Como evoluiu a Galáxia desde sua formação? Existe matéria não visível, ou “escura”? Como sobrevivem os braços espirais? Existe uma “barra” central? Existe um buraco negro central? Como explicar as diferenças de abundância química dos elementos em função da distância ao centro? Às vezes, os caminhos para responder a estas questões passam pelo estudo de outras galáxias; estudando as outras, descobrimos regras gerais e compreendemos mais facilmente a nossa. Inversamente, algumas hipóteses que formulamos só podem ser verificadas em nossa galáxia, graças à facilidade de observação, e o entendimento dos processos físicos nos permitem avançar no estudo do universo como um todo.



**Figura 1-7:** Foto da Via Láctea com objetiva de grande angular (com permissão de Fred Espenak). Numa foto, devido ao tempo de exposição, é possível ver detalhes que não são perceptíveis a olho nu. Nesta, podemos intuir a posição do bojo, e distinguir nuvens de poeira, e o conjunto de estrelas brilhantes do Escorpião e do Centauro, comentados no capítulo 5. No lado direito inferior, podemos ver o Cruzeiro do Sul e a nuvem escura Saco de Carvão (ver a figura 1-5 para conseguir localizar).