

GALÁXIAS

Roberto Ortiz

1. A Galáxia e as Nuvens de Magalhães

As primeiras distâncias estelares foram determinadas diretamente em meados do século XIX, por meio da paralaxe trigonométrica. Como resultado, a distância das estrelas mais próximas resultou ser da ordem de dezenas de trilhões de quilômetros, valor várias ordens de grandeza superior ao tamanho do Sistema Solar. Já no início do século XX parecia claro que o Sol era apenas uma entre as centenas de bilhões de estrelas que compõem um grande sistema estelar gravitacionalmente ligado, chamado de *Via Láctea* ou simplesmente *Galáxia* e que as dimensões desta última deveriam ultrapassar milhares de quiloparsecs. *Todas* as estrelas que vemos a olho nu (cerca de 5 ou 6 mil) ou por meio de telescópios pequenos pertencem à Via Láctea e o plano onde está concentrada a maior parte de suas estrelas é percebido como uma banda luminosa difusa, a Via Láctea, que Galileu mostrou em 1610 constituir-se de estrelas.

Além da Via Láctea, existem outros objetos difusos no céu, chamados genericamente de *nebulosas*. No hemisfério sul celeste, existem dois objetos que se destacam pelo seu tamanho: a Grande e a Pequena Nuvem de Magalhães.



Figura 1: A Grande (acima, à direita) e a Pequena (à esquerda) Nuvem de Magalhães são galáxias satélites da Via Láctea, ambas visíveis a olho nu e classificadas como tipo *irregular*. Créditos: European Southern Observatory/S. Brunier.

Invisíveis a partir de latitudes europeias, essas duas “nebulosas” foram assinaladas em 1520 por Fernão de Magalhães, navegador português, durante uma de suas viagens marítimas encomendadas

pela coroa portuguesa entre Portugal e o oriente, contornando a África. A olho nu, as Nuvens de Magalhães parecem amorfas, algo semelhante a nuvens de chuva, porém, quando vistas através de um telescópio, revelam-se estruturas complexas, constituídas por estrelas e nebulosas, à semelhança da Via Láctea. O astrônomo inglês John Herschel (filho de William Herschel, o descobridor do planeta Urano) foi o primeiro a estudá-la em detalhe, utilizando-se de seu próprio observatório astronômico instalado nas imediações da Cidade do Cabo (Cape Town), em 1834. Apesar de as Nuvens de Magalhães se parecerem como “miniaturas da Via Láctea”, a determinação de suas distâncias não era conhecida até o começo do século XX. Mesmo assim, pode-se dizer que, nessa época, o Universo conhecido limitava-se à Galáxia e às Nuvens de Magalhães, cujas distâncias eram ignoradas.

Ainda no início do século XX, o astrônomo Edward Pickering (1846-1919), da Universidade de Harvard (EUA) procurava compreender e classificar a enorme diversidade de espectros estelares. Para tanto, empenhou-se na elaboração de um catálogo de espectros que viria a ser conhecido mais tarde como *Catálogo Draper de Espectros Estelares* (geralmente chamado de *catálogo HD – Henry Draper*), publicado entre 1918 e 1924, o qual contém classificação espectroscópica para mais de 200 mil estrelas. Para executar o extenuante trabalho de examinar centenas de milhares de espectros gravados em placas fotográficas de vidro, Pickering contratou dezenas de auxiliares, geralmente do sexo feminino, entre as quais figurava a senhorita Henrietta Swan Leavitt (1868-1921). *Miss Leavitt*, como era conhecida, assim como as demais assistentes, era incumbida de examinar os espectros, classificá-los conforme um padrão e estimar o brilho da estrela correspondente. Ao realizar a tarefa para estrelas situadas na direção da Pequena Nuvem de Magalhães, ela notou que, particularmente entre as estrelas classificadas espectroscopicamente como tipo-G, várias possuíam brilho que se mostrava variável com o tempo. Esse tipo de estrela variável é chamado de *cefeida*, e sua variabilidade resulta de pulsações intrínsecas da estrela a intervalos regulares. A curva de luz, *i.e.* o gráfico da magnitude em função do tempo, de estrelas variáveis do tipo *cefeida* assemelham-se a senóides, com período entre 1 dia e algumas semanas na maioria dos casos. *Miss Leavitt* notou que, na direção da Pequena Nuvem de Magalhães, o período do ciclo era mais longo para aquelas estrelas cujo brilho médio (ou máximo) era maior. Ao plotar a magnitude aparente dessas estrelas como função do logaritmo do seu período, *Miss Leavitt* observou que a relação entre essas duas grandezas era linear e que essa relação poderia ser futuramente utilizada como uma nova escala de distância. Essa relação, denominada *período-luminosidade*, é baseada na hipótese de que todas as estrelas vistas na direção da Pequena Nuvem de Magalhães estavam situadas à mesma distância, ou seja: as cefeidas pertenciam realmente à Pequena Nuvem de Magalhães, não eram simplesmente objetos na mesma linha de visada. Ela imaginou que, se quiséssemos determinar a distância de uma cefeida, bastaria seguir o seguinte procedimento: mede-se o brilho de uma variável cefeida ao longo de alguns dias ou semanas, determinando-se assim o seu *período* de variabilidade; utilizando-se a relação período-luminosidade, estima-se o *brilho* que corresponde ao seu período; a *diferença* entre o brilho da estrela determinado desta maneira e aquele medido diretamente seria um efeito direto da *distância*. Se considerarmos que o brilho de uma estrela diminui com o quadrado da distância, não é difícil calcular a distância da estrela.

A técnica proposta por *Miss Leavitt* é teoricamente correta, porém havia um problema: até a publicação de seus resultados, entre 1908 e 1912, não havia sido determinada a distância de uma cefeida sequer, de modo que se pudesse estabelecer uma calibração absoluta da relação período-luminosidade, o que significa que todas as distâncias determinadas por esse método eram apenas relativas. Por exemplo, poder-se-ia dizer que a distância de uma determinada cefeida era um certo número de vezes maior (ou menor) que a distância à Pequena Nuvem de Magalhães, mas seu valor absoluto – em parsecs – permanecia desconhecido. Essa dificuldade seria logo superada em 1913,

quando o astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967, um dos criadores do **Diagrama Hertzsprung-Russell**) conseguiu determinar a distância de algumas variáveis cefeidas na Via Láctea. Em 1918, o astrônomo Harlow Shapley (1885-1972) re-elaborou o estudo de Hertzsprung e estabeleceu uma relação absoluta entre o período e a magnitude absoluta (portanto a luminosidade) de uma cefeida.

Uma vez estabelecida uma relação absoluta para as variáveis cefeidas, a distância dessas estrelas, em parsecs ou em anos-luz, pôde ser prontamente determinada, bastando obter o período de variabilidade da estrela a partir de sua curva de luz. Utilizando essa técnica, Harlow Shapley determinou a distância de diversos aglomerados globulares da Via Láctea que continham cefeidas. Essa técnica foi posteriormente aplicada à Grande e à Pequena Nuvem de Magalhães e suas distâncias determinadas como 50 e 60 quiloparsecs, respectivamente (160 e 200 mil anos-luz).

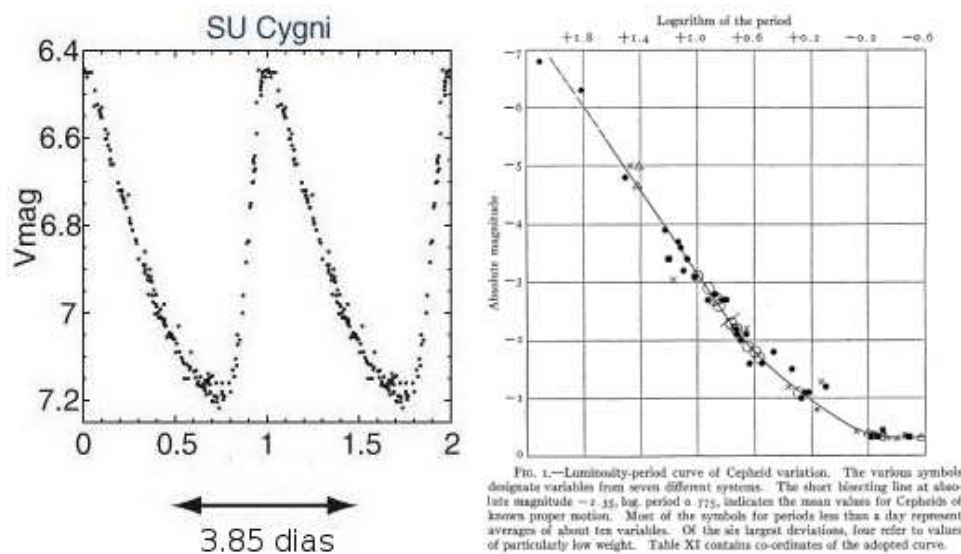


FIG. 1.—Luminosity-period curve of Cepheid variation. The various symbols designate variables from seven different systems. The short horizontal line at absolute magnitude -2.35 , log. period 0.775 , indicates the mean values for Cepheids of known proper motion. Most of the symbols for periods less than a day represent averages of about ten variables. Of the six largest deviations, four refer to values of particularly low weight. Table XI contains co-ordinates of the adopted curve.

Figura 2: À esquerda: curva de luz de uma cefeida típica, denominada SU Cygni. À direita: relação período-luminosidade, conforme a publicação original de Harlow Shapley (1918).

2. O grande debate

Uma vez estabelecido que as Nuvens de Magalhães eram objetos externos à Via Láctea, a pergunta que surge naturalmente é: o Universo restringe-se somente à Galáxia e às Nuvens de Magalhães? Para respondê-la, vamos examinar o céu mais cuidadosamente.

Charles Messier (1730-1817) era um astrônomo caçador de cometas. Sua metodologia de trabalho consistia em vasculhar o céu com seu telescópio, em busca de objetos de aparência difusa, não-estelares. Durante sua vida, descobriu ao todo 13 cometas, mas também cansou-se de confundir-los com outros objetos de aparência difusa que não eram cometas. Para ajudar outros astrônomos a não incorrer no mesmo erro, elaborou e divulgou uma lista de objetos difusos no céu, chamados genericamente de **nebulosas**, em virtude de apresentarem um aspecto difuso à vista desarmada. Sua lista contém cerca de uma centena de objetos e é comumente chamada de **Catálogo Messier**. Assim, o primeiro objeto de sua lista é chamado de **M1** (a nebulosa do caranguejo, na constelação de **Taurus**), o

segundo **M2** e assim por diante. As nebulosas apresentam aspectos variados: algumas são amorfas, outras são elípticas, enquanto outras exibem uma estrutura espiral. Até o começo do século XX imaginava-se que, com exceção das Nuvens de Magalhães, todas as nebulosas pertenciam à Via Láctea. No entanto, a variedade de formas e aspectos exigia mais respostas por partes dos astrônomos: Por que motivo possuem diferentes formas? É possível classificá-las segundo uma sequência evolutiva? Como determinar suas distâncias? São todas elas fisicamente semelhantes?

As nebulosas do Catálogo de Messier têm diversos tamanhos, entre alguns minutos de arco até vários graus. Para se calcular o tamanho *real* desses objetos há de se conhecer suas distâncias. Por exemplo: um objeto cujo diâmetro *aparente* é de 10 minutos de arco (um terço do diâmetro da Lua Cheia) teria 2,9 parsecs de diâmetro real se estivesse à distância de 1 quiloparsec. Por outro lado, se esse mesmo objeto estivesse situado à distância de 100 quiloparsecs, seu diâmetro seria 100 vezes maior, ou seja: 290 parsecs. Portanto, para se compreender a natureza física de um objeto é fundamental determinar corretamente a sua distância.

No hemisfério norte, há um objeto catalogado como número 31 da lista de Messier. Visto através de um telescópio, **M31**, também conhecido como “nebulosa” de Andrômeda, possui uma estrutura marcadamente espiral. Outro bom exemplo de nebulosa espiral é **M51** na constelação de *Canis Venatici*. Ambos sugerem tratar-se de um objeto em rotação, como a espuma que vemos na superfície de um capuccino bem tirado quando mexemo-lo com uma colher! Além desses, um número muito grande de objetos difusos de aparência espiral pode ser visto através de telescópios. Porém, diferentemente das estrelas, eles estão espalhados igualmente em todas as direções, e não estão concentrados na direção do plano Galáctico.



Figura 3: A galáxia de Andrômeda (**M31**) e duas de suas galáxias-satélites: **M32** (de formato elíptico, próxima do bojo, à esquerda) e **M110** (logo abaixo do bojo). Andrômeda é do tipo *espiral* enquanto **M32** e **M110** são galáxias *elípticas*. Créditos: NASA/Tony Hallas.

Estabelecer a natureza das nebulosas espirais era a questão central dos astrônomos no começo do século XX. Havia pelo menos duas possibilidades: (1) se estivessem próximas poderiam ser nuvens

de gás em rotação, presumivelmente precursoras de sistemas planetários em formação, semelhantes ao Sistema Solar; (2) se estivessem distantes, objetos externos à Via Láctea, seriam grandes demais para ser sistemas planetários em formação e neste caso deveriam ser constituídos por um número muito grande de estrelas, cujo brilho somado torná-los-iam visíveis, mesmo a grandes distâncias. Sua aparência difusa, resultaria dessa grande aglomeração de estrelas que seriam individualmente indistinguíveis quando presentes em grande número e vistas a grandes distâncias. No caso da segunda hipótese ser verdadeira, a nebulosa de Andrômeda constituir-se-ia um “Universo-ilha”, uma grande concentração de estrelas e gás, semelhante à Via Láctea, conforme conjectura elaborada pelo filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) em 1755. Por extensão, outras nebulosas de aparência espiral também configurariam objetos semelhantes à Galáxia e o Universo estaria povoado deles, genericamente chamados de *galáxias* (com *g minúsculo*, para diferenciá-los da *Via Láctea*, a *Galáxia*).

Andrômeda constituía-se o foco de atenção dos astrônomos em virtude de ser facilmente observável do hemisfério norte. A “nebulosa” ou “galáxia” de Andrômeda é visível a olho nu por habitantes daquele hemisfério e seu tamanho aparente atinge 3° ou 4°. Uma das maneiras mais eficientes de se determinar sua natureza física é por meio da análise de seu espectro e essa técnica já era conhecida na virada dos séculos XIX-XX. Se Andrômeda fosse uma nebulosa gasosa, poderia emitir um *espectro de emissão*, tal como a nebulosa de *Orion*. Porém, para a surpresa dos astrônomos, o espectro de Andrômeda revelou-se contínuo, com linhas de absorção, como os espectros estelares. Essa característica, contudo, não elimina completamente a possibilidade de que Andrômeda fosse constituída por gás, se supusermos que ela é uma *nebulosa de reflexão*. Neste caso, seu brilho seria o resultado da reflexão da luz (emitida por uma ou mais estrelas) por grãos de poeira misturados ao gás da nebulosa. Com efeito, esse mecanismo é bastante eficiente e talvez metade da luz que vemos em nebulosas como *Orion* resulte da reflexão da luz estelar por grãos, a despeito de *Orion* possuir também linhas de emissão. O espectro de uma nebulosa de reflexão é semelhante ao espectro da fonte luminosa, assim como o espectro da Lua é semelhante ao espectro solar. Portanto, se Andrômeda fosse uma nebulosa de reflexão, seu espectro seria semelhante ao das estrelas que atuariam iluminando os grãos. Na nebulosa de *Orion*, quatro estrelas muito brilhantes, situadas na parte central da nebulosa, são facilmente identificáveis como a fonte de radiação da nebulosa. No entanto, em Andrômeda tais estrelas não eram visíveis, o que indicava que a hipótese de Andrômeda ser uma nebulosa de reflexão e/ou emissão era pouco provável.

A questão da natureza de Andrômeda foi o assunto central de uma conferência que ocorreu na cidade de Washington D.C. em 26 de abril de 1920. Durante a reunião, Harlow Shapley (1885-1972) sustentava que objetos como Andrômeda seriam constituintes da Via Láctea e portanto estariam próximos e seriam pequenos, como nuvens de gás em rotação. Por outro lado, Heber Curtis (1872-1942) argumentava que Andrômeda e as demais “nebulosas espirais” eram na realidade galáxias externas à Via Láctea e portanto o Universo seria constituído por um número muito grande de galáxias, como a Via Láctea e as Nuvens de Magalhães. A aceitação dessa ideia era difícil para os astrônomos na época. Primeiro, havia algumas evidências experimentais (que mais tarde revelaram-se errôneas) de que algumas nebulosas espirais semelhantes a Andrômeda apresentavam rotação visível em uma escala de tempo de anos ou dezenas de anos. Portanto, se esses objetos estivessem de fato a distâncias de 10^8 parsecs ou mais, algumas partes da nebulosa estariam girando a velocidades próximas à da luz ou mesmo superior a ela!

Outra dificuldade encontrada na época foi a descoberta da estrela *S Andromedae*, uma variável do tipo *nova* na direção da nebulosa. Estrelas do tipo *nova* são relativamente raras e caracterizam-se por um súbito aumento de brilho. Em seu máximo, *S And* atingiu magnitude 7, o que significava que,

se ela estivesse à mesma distância de Andrômeda, brilharia como uma fração não-desprezível de uma galáxia inteira, e esse fato parecia inconcebível na época. Por outro lado, Curtis viria a descobrir muitas outras variáveis do tipo *nova* em direção a Andrômeda, o que parecia uma coincidência extraordinária que em uma determinada região do céu houvesse tantos eventos desse tipo, a não ser que houvesse ali um “Universo-ilha”. Os demais astrônomos presentes à reunião dividiram-se entre apoiar cada um dos lados e ao final não houve acordo.

O embate entre Shapley e Curtis viria a ser chamado posteriormente de “o grande debate” e sua solução só apareceria alguns anos mais tarde, quando o astrônomo Edwin Hubble (1889-1953) conseguiu identificar estrelas isoladas na periferia de Andrômeda com o recém-inaugurado telescópio de *Mount Wilson*, nos Estados Unidos da América. Essa descoberta indicava que Andrômeda era constituída por estrelas. Alguns anos mais tarde, Hubble encontrou algumas estrelas variáveis do tipo *cefeida* na direção de Andrômeda. Nessa época, Shapley já havia calibrado a relação período-luminosidade descoberta por *Miss* Leavitt e, uma vez medidos o período de variabilidade das cefeidas de Andrômeda, sua distância pôde ser prontamente determinada. Segundo Hubble, Andrômeda estaria a pelo menos 250 quiloparsecs de distância (cerca de 800 mil anos-luz). Embora o valor mais correto esteja próximo de 780 kpc, os resultados de Hubble mostraram que Andrômeda era definitivamente um objeto externo à nossa Galáxia. Medidas de distância posteriores, de outras nebulosas com estrutura espiral, confirmaram sua natureza extragaláctica.

3. Tipos de galáxias

Nem todas as galáxias do Universo são espirais. Em 1925, astrônomo Edwin Hubble elaborou uma classificação morfológica que, por sua simplicidade, é amplamente utilizada até hoje. Segundo esse sistema, as galáxias podem ser genericamente agrupadas em duas classes: *regulares*, que apresentam simetria de rotação e as *irregulares*. Essas últimas, além de não apresentarem simetria de rotação, também não apresentam núcleo. As galáxias regulares por sua vez dividem-se em *elípticas* (designadas pela letra *E*, maiúsculo) e *espirais* (designadas por *S*). Cada um desses tipos e classes possui subtipos, que visam descrever mais minuciosamente suas propriedades morfológicas. Eles são descritos a seguir.

3.1. Galáxias Elípticas (*E*)

Vistas através de um telescópio, aparecem como elipses, como elipsóides com simetria de revolução. Além de seu formato elíptico não apresentam quaisquer outras estruturas predominantes, a menos de um núcleo, geralmente pequeno e muito brilhante, sem limites bem definidos. Os limites externos da galáxia são mal definidos e elas geralmente não possuem sinais de poeira interestelar, o que sugere que, diferentemente de galáxias espirais como a Via Láctea, as elípticas são pobres em gás e poeira.



Figura 4: A galáxia **M86** (ou **NGC4406**). Classificada como tipo **E3**, é uma elíptica gigante e o objeto dominante do aglomerado de galáxias de Virgo, localizado na constelação do mesmo nome. Créditos: Hubble Space Telescope.

As galáxias elípticas possuem graus variados de achatamento. Obviamente, a razão axial é uma função do ângulo de visada, mas apenas um estudo cinemático detalhado pode fornecer informações sobre a direção do eixo de rotação dessas galáxias. Se chamarmos de **a** e **b** os eixos maior e menor da elipse, respectivamente, uma galáxia elíptica é classificada como **EN**, onde **N** é o inteiro mais próximo da seguinte relação: $N = 10 (a-b) / a$. Deste modo, uma galáxia cuja dimensão de seu eixo maior seja igual a duas vezes à de seu eixo menor seria classificada como **E5** (verifique). A observação de galáxias elípticas mostra que **N** varia entre 0 e 7, o que significa que existe um limite para o achatamento desse tipo de galáxia.

A cor das galáxias elípticas geralmente tende ao amarelo ou alaranjado, o que sugere que a maior parte da sua luz é gerada por estrelas gigantes de tipos espectrais K e M. Essa observação, juntamente com a ausência de nuvens moleculares sugere que galáxias elípticas geralmente não possuem formação estelar ativa e suas estrelas são geralmente velhas. Portanto, diferentemente de galáxias como a Via Láctea, as galáxias elípticas não “repõem” sua população estelar velha com novas gerações de estrelas.

Galáxias elípticas são as que apresentam maior intervalo de tamanho e massa. Existem galáxias elípticas anãs, pouco maiores que um aglomerado globular, mas também há outras virtualmente gigantes, até cem vezes maiores que a Via Láctea. Alguns bons exemplos de galáxias elípticas anãs são **M32 (NGC221)** e **M110 (NGC205)**, galáxias satélites de Andrômeda, facilmente visíveis em fotografias, onde aparecem como duas elipses bem proeminentes. Como estão praticamente à mesma distância de Andrômeda, é fácil comparar os seus tamanhos, na razão direta de seus diâmetros aparentes: o eixo maior de **M32** e de **M110** é de 2,0 e 5,2 quiloparsecs, respectivamente. No outro extremo de tamanho, localizada no centro do aglomerado de galáxias de Virgo está uma galáxia elíptica

gigante, denominada **M86 (NGC4406)**, classificada como tipo **E3**, segundo Hubble. **M86** é a galáxia predominante em Virgo e exerce enorme influência gravitacional na parte interna do aglomerado. Diversos outros aglomerados de galáxias possuem galáxias elípticas gigantes em seu centro.

3.2. Galáxias Espirais (S)

Tanto as galáxias espirais como as espirais barradas apresentam um bojo central, de coloração semelhante às galáxias elípticas. O estudo das propriedades espectro-fotométricas das galáxias espirais revelou impressionantes semelhanças entre seus bojões e a população estelar das galáxias espirais, o que sugere que ambas são constituídas por um grande número de gigantes de tipo espectral K e M e pouco gás. O bojo é geralmente a parte mais brilhante de uma galáxia espiral.

A característica mais marcante de galáxias desse tipo é a existência de braços espirais, enrolados em torno do núcleo e bojo. Quando vistas de perfil (como a galáxia NGC891) as galáxias espirais revelam-se extremamente achatadas, como um disco. Os braços espirais são delineados por estrelas muito jovens e massivas, frequentemente associadas a nebulosas ionizadas, chamadas comumente de **regiões HII**. Esses objetos conferem aos braços espirais uma coloração branco-azulada, muito característica. Associadas aos braços espirais existem nuvens de poeira, sempre associadas a nuvens de gás molecular, regiões de formação de estrelas. Em fotografias, as nuvens de gás e poeira aparecem sob a forma de linhas escuras tortuosas, permeando os braços espirais. Embora os braços espirais sejam muito brilhantes, eles não se constituem o maior contribuinte para a massa da galáxia. De fato, o número de estrelas massivas, concentradas nos braços espirais, é muitíssimo menor do que a quantidade de estrelas de baixa massa, geralmente anãs de tipos espectrais K e M. Estas últimas encontram-se distribuídas de maneira mais uniforme em todo o disco da galáxia e não apresentam uma estrutura morfológica muito evidente em fotografias.

O número de braços espirais, assim como seu aspecto, é variável, mas geralmente apresentam-se aos pares. Existem também galáxias com quatro braços e/ou braços espúrios, geralmente ramificações dos braços principais. Quanto ao formato dos braços espirais, Hubble assinalou dois tipos: espirais normais e “barradas”, designadas respectivamente pelas letras S e SB. Nas espirais normais, os braços espirais estendem-se a partir da periferia do bojo até os limites exteriores da galáxia, como a espiral de espuma sobre uma xícara de *capuccino*. Já nas espirais barradas, a estrutura espiral surge de dentro do bojo da galáxia e estende-se para fora, ao longo do plano da galáxia, como uma barra com comprimento de vários quiloparsecs. A partir de um certo ponto os braços seguem uma curva abrupta, como um cotovelo, de onde seguem como espirais mais ou menos normais, até os limites externos da galáxia. As galáxias espirais são ainda classificadas de acordo com o grau de “enrolamento” dos braços espirais. Segundo a classificação de Hubble, as galáxias cujos braços espirais estão mais enrolados próximos ao núcleo recebem a denominação **a**; aquelas que apresentam enrolamento médio são denominadas como **b**; aquelas cujos braços espirais (normais ou barradas) são mais abertos são classificadas como **c**. Deste modo, uma galáxia classificada como **SBa**, por exemplo, é uma espiral barrada com braços bastante fechados em torno de seu núcleo; a classificação **Sc** denomina uma galáxia espiral normal com braços espirais bastante abertos.



Figura 5: A galáxia NGC1365 é uma espiral barrada gigante, localizada na constelação de Fornax. Créditos: ESO/IDA/Danish 1.5 m/ R. Gendler, J-E. Ovaldsen, C. Thöne, and C. Feron.

Estudos recentes mostram que a Via Láctea parece ser do tipo **S**B**b**, em razão de alguns indícios que sugerem a presença de uma barra em sua parte mais central. No entanto, essa classificação é bastante incerta em virtude de encontrarmos-nos dentro da Via Láctea, o que nos impede de obter uma visão geral, como a que temos de galáxias externas. Para se compreender essa dificuldade, imagine como uma pessoa pode ter ideia dos contornos de um bosque, quando ela se encontra em seu interior. Além da dificuldade de se ver as árvores mais distantes – cuja visão é parcialmente obstruída pelas árvores mais próximas – não se consegue estabelecer com precisão os limites externos do bosque. Em contrapartida, um observador situado externamente ao bosque, em uma montanha ou com vista aérea, pode discernir perfeitamente seu formato e seus limites.

3.3. Galáxias Lenticulares (S0)

Em 1936, Hubble introduziu um tipo particular em seu sistema de classificação, algo intermediário entre as elípticas e as espirais. As galáxias **lenticulares** recebem esse nome em razão de apresentarem um formato de lente, uma espécie híbrida, algo entre uma elíptica e uma espiral, achatada como essa última, porém sem braços espirais. Assim como as galáxias elípticas, as lenticulares apresentam uma forte condensação central.

Apesar de as galáxias lenticulares apresentarem um disco bem definido, elas possuem pouco gás, e como consequência não possuem estrelas jovens. Diversos autores têm opinado sobre a possível origem desse tipo particular de galáxia, o qual reúne características tanto de galáxias elípticas como de espirais, sem contudo se enquadrarem perfeitamente nesses dois tipos. Spitzer e Walter Baade (1893-1960) notaram que esse tipo de galáxia é mais comum em grupos densos e aglomerados de galáxias, o que os levou a sugerir que o gás das lenticulares poderia ter sido removido durante colisões de galáxias. No entanto, sabe-se hoje que somente uma pequena fração das **S0** poderia ser explicada dessa forma. Matthews & Baker sugeriram em 1971 que o vento galáctico originado a partir de supernovas poderia varrer o gás das galáxias elípticas e lenticulares, porém essa teoria não explica a maior frequência de

galáxias *S0* em aglomerados de galáxias. Gunn & Gott propuseram em 1972 que o movimento de galáxias no meio intra-aglomerado produziria uma perda de gás, o que de certa forma está de acordo com a maior frequência desse tipo de galáxia em aglomerados. Por outro lado, existem lenticulares fora de aglomerados e para explicar sua existência, van den Bergh (1963-1972) sugeriu que eventos explosivos no núcleo dessas galáxias poderiam expulsar sua matéria interestelar. De qualquer modo, parece não existir uma explicação única para a existência de galáxias do tipo lenticular.



Figura 6: Galáxia NGC3115, do tipo lenticular, vista de perfil. Créditos: Imagem obtida com o telescópio CFHT, Universidade do Texas e Observatório McDonald.

3.4. Galáxias Irregulares (Irr)

Recebem essa denominação em razão de não apresentarem simetria bem definida. Algumas galáxias irregulares possuem algumas estruturas particulares, o que levou os astrônomos a subdividirem essa categoria em dois subtipos, de acordo com sua morfologia:

- **Galáxias irregulares Tipo I:** apresentam uma distribuição de luz irregular, são muito ricas em estrelas jovens e gás, como as espirais. O protótipo dessa classe é a *Grande Nuvem de Magalhães*, a qual apresenta uma barra facilmente discernível. Galáxias desse tipo possivelmente eram espirais no passado e foram posteriormente distorcidas pela interação gravitacional originada de galáxias próximas ou mesmo por colisões.
- **Galáxias irregulares Tipo II:** são verdadeiramente irregulares e não apresentam estruturas morfológicas de qualquer tipo. São ricas em gás (e poeira) e assim como as de tipo I, aparentam serem resultantes de interações gravitacionais intensas com galáxias próximas e/ou resultam de colisões entre galáxias.

Além da classificação de Hubble, diversos outros sistemas têm sido sugeridos. Os mais importantes são o de van den Bergh (1960), de Holmberg, de Gerard de Vaucouleurs e de Yerkes (ou Morgan). Geralmente são variações do sistema de Hubble, algumas vezes acrescentando outros parâmetros galácticos, tais como inclinação da galáxia, índices de cor, etc.

4. Evolução galáctica

O estudo da população estelar de outras galáxias mostra diversas semelhanças com a Via Láctea, sobretudo se tomarmos as de tipo espiral. A população do *bojo* das galáxias espirais é dominada pela luz de estrelas gigantes, geralmente de tipo espectral *K* ou *M*, o que sugere que essa população é formada por estrelas velhas. Estudos espectro-fotométricos da população estelar das galáxias de tipo elíptico apontou semelhanças com o bojo das galáxias espirais. Em contrapartida, os braços das galáxias espirais caracterizam-se pela presença de estrelas jovens e massivas, muitas das quais ainda localizadas em aglomerados de estrelas recém-formados e associações de estrelas, frequentemente associadas a uma forte concentração de gás molecular. As galáxias espirais também exibem um grande número de aglomerados globulares distribuídos em formato elipsoidal, os quais são exemplos representativos da população do *halo*, a mais antiga de uma galáxia.

O quadro acima indica que uma galáxia pode ser bastante heterogênea quanto ao seu conteúdo estelar. As *populações estelares de uma galáxia*, assim como da Via Láctea, são o resultado de diferentes processos físicos atuantes na galáxia, alguns dos quais favorecem a formação de estrelas onde há concentração de gás (nos braços espirais) enquanto outras regiões permanecem povoadas somente por estrelas de “primeira geração”, de baixa massa e muito velhas. Pode-se concluir que galáxias são concentrações de estrelas com características muito variadas, bastante heterogêneas.

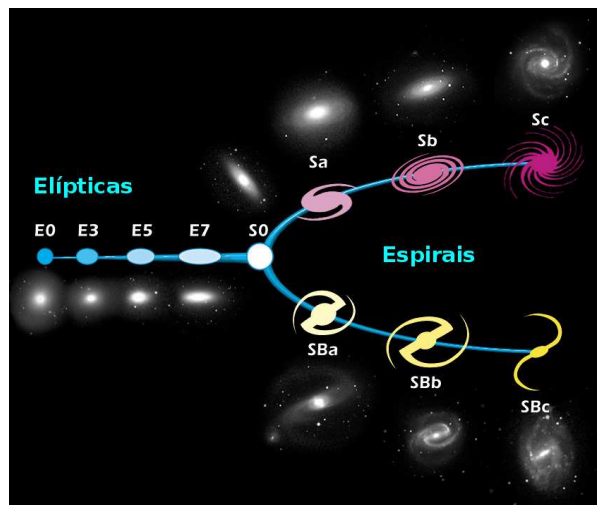


Figura 7: O sistema de classificação de galáxias de Edwin Hubble. As galáxias elípticas são classificadas como *E0, E1... E7*, conforme seu “achatamento”. Galáxias espirais subdividem-se em dois ramos: as espirais “normais” (*S*) e as espirais “barradas” (*SB*). Galáxias do tipo irregular não aparecem nessa sequência.

Quando Edwin Hubble apresentou sua proposta de classificação morfológica, ele dispôs os tipos galácticos em uma ordem progressiva: *E0 – E1 – E2 ... E7 – S0* e do tipo lenticular em diante abrir-se-iam dois ramos: *Sa – Sb – Sc* ou *SBa – SBb – SBc*, dependendo da morfologia dos braços espirais: normal ou espiral barrada. Não está claro se esta foi a intenção de Hubble, mas aparentemente essa sequência parece indicar uma ordem evolutiva. Segundo essa interpretação, as galáxias seriam formadas como elípticas, tornar-se-iam cada vez mais achatadas, desenvolveriam um disco em rotação

e finalmente optariam entre tornarem-se espirais *normais* ou *barradas*. O fato é que a maioria (cerca de $\frac{3}{4}$) das galáxias mais próximas são do tipo espiral e uma teoria de galáxias em evolução deve reproduzir esse fato. Com efeito, se a sequência de Hubble fosse também uma sequência evolutiva e se todas as galáxias do Universo foram formadas mais ou menos na mesma época então é natural concluir que diferentes galáxias evoluíram em diferentes escalas de tempo de modo a explicar por que ainda existem galáxias elípticas que ainda não se tornaram espirais, já que a observação do Universo próximo mostra que não existem galáxias em formação, as protogaláxias.

Hoje acredita-se que a sequência de Hubble não é uma sequência evolutiva e que a diferença morfológica entre as galáxias é o resultado de diferentes condições físicas na época de sua formação. Nem todas as nuvens de gás pré-galácticas tinham as mesmas propriedades e essas diferenças de alguma maneira afetaram a maneira como a galáxia foi formada. As duas propriedades mais importantes na formação de uma galáxia a partir do colapso gravitacional de uma nuvem de gás são: a massa e o momento angular. A massa pode ser prontamente compreendida como a quantidade de matéria acumulada em cada nuvem proto-galáctica, que variava de nuvem para nuvem. O momento angular pode ser compreendido como a “quantidade de rotação” de uma nuvem de gás, de maneira análoga à “quantidade de movimento” de uma partícula. O momento angular depende da maneira como a massa é distribuída na galáxia. Nuvens de gás dotadas de maior momento angular (ou quantidade de rotação) evoluíram para sistemas mais achatados, presumivelmente espirais ou lenticulares, enquanto nuvens proto-galácticas com menor momento angular tornar-se-iam galáxias elípticas.

Não se sabe exatamente como, mas após cerca de 350 milhões de anos algumas regiões do Universo desenvolveram maior densidade de matéria, formando as *protogaláxias*. A partir deste ponto, astrônomos divergem sobre a evolução dessas estruturas. Segundo o *cenário top-down* (em português, “de cima para baixo”), as protogaláxias, após o início do colapso gravitacional, fragmentaram-se formando estruturas menores, as galáxias. Segundo essa interpretação, as flutuações de matéria no Universo primordial geraram inicialmente *aglomerados de galáxias*, que por sua vez fragmentaram-se em partes menores, as galáxias. Há no entanto um cenário alternativo, chamado *bottom-up* (“de baixo para cima”) que se contrapõe ao anterior. Segundo essa alternativa, as flutuações de matéria formadas após o Big Bang geraram nuvens de gás, que por sua vez aglutinar-se-iam em estruturas maiores devido à atração gravitacional, formando as galáxias. Após alguns milhões de anos, as partes mais centrais da protogaláxia contrair-se-iam mais rapidamente do que a periferia, iniciando a formação do núcleo da galáxia. No restante da galáxia, o gás condensar-se-ia localmente, formando estrelas. No entanto, nem todo o gás teria sido efetivamente transformado em estrelas, restando uma parte residual que iria constituir a matéria interestelar. Dependendo do momento angular da galáxia, a contração da nuvem de gás aumentou a velocidade angular da galáxia, posteriormente formando um disco. O gás interestelar então teria se acumulado no plano equatorial da galáxia, onde ele seria posteriormente convertido na formação de futuras gerações de estrelas. Essa sequência de eventos explica por que a primeira geração de estrelas e os aglomerados globulares, ao se formarem primeiro, não possuíam muitos elementos mais pesados que o hélio. Ainda hoje observamos que a população do halo das galáxias é muito velha. Por outro lado, o plano galáctico, onde novas gerações de estrelas se sucedem, é rico em elementos pesados, chamados genericamente pelos astrônomos de *metais*.

Sintetizando: Não há evidências de que as idades das galáxias sejam significativamente diferentes, mas pelo contrário, todas parecem ter se formado entre 10 e 13 bilhões de anos atrás. As estrelas da componente elipsoidal de todas as galáxias formaram-se muito rapidamente, em uma escala de tempo comparável à do colapso da protogaláxia (cerca de 10^9 anos). As estrelas do halo se formaram a partir do gás que continha pouco momento angular por unidade de massa, durante o tempo de

colapso. O gás que continha mais momento angular formou o disco. O tipo de galáxia (basicamente espiral ou elíptica) foi determinado pela quantidade de gás livre deixada no disco após o colapso. Esse gás iria formar o disco da galáxia. Galáxias do tipo irregular poderiam resultar de interações gravitacionais com outras galáxias ou mesmo colisões.

5. A massa das galáxias e a matéria escura

A massa de uma galáxia pode ser inferida a partir de argumentos cinemáticos e dinâmicos. A importância de sua determinação tem, pelo menos, duas implicações principais: (1) saber se toda a matéria visível contribui para a massa total das galáxias ou se há uma quantidade significativa de matéria que ainda não foi detectada; (2) conhecer a densidade do Universo, a qual determinará se ele está se expandindo a uma taxa constante ou com aceleração.

O intervalo de massas galácticas é bastante grande e a maioria das estimativas fornece apenas limites inferiores. Uma das dificuldades encontradas é determinar o limite de extensão de uma galáxia, pois suas regiões mais periféricas exibem menor brilho e podem não ser detectadas, mesmo por grandes telescópios. Quanto à menor massa de uma galáxia, este também é um fator difícil de se determinar com precisão, devido a duas razões principais: (1) é difícil descobrir galáxias anãs devido ao seu baixo brilho, mesmo próximo à Via Láctea; (2) não há uma definição exata para galáxia, apesar dos extensos estudos realizados até agora. Por exemplo, existem alguns aglomerados globulares – com massa de $\sim 10^6$ massas solares – que são tão massivos como algumas galáxias elípticas anãs. Galáxias elípticas gigantes têm massa de até 10^{12} ou até mesmo 10^{13} massas solares. Em contrapartida, galáxias espirais, como a Via Láctea, têm intervalo de massa menor. A tabela abaixo ilustra valores típicos de massas galácticas, segundo o tipo morfológico.

<i>Tipo Morfológico</i>	<i>Massa (em massas solares)</i>
<i>E gigante</i>	10^{13}
<i>M31</i>	3×10^{11}
Via Láctea	2×10^{11}
<i>S pequena</i>	10^{10}
<i>Irr-I típica</i>	10^{10}
<i>E anã</i>	$10^6 - 10^7$

A determinação da massa galáctica pode ser feita de diversas maneiras, mas a mais comum delas é baseada na velocidade de rotação obtida a partir do efeito Doppler. Considere uma galáxia vista de perfil, em repouso com relação a um observador; sua rotação faz com que um lado se mova em direção a esse observador enquanto o outro afaste-se dele. Pode-se calcular a velocidade de rotação

para cada ponto da galáxia medindo-se o desvio do comprimento de onda das linhas de seu espectro com relação ao comprimento de onda “de laboratório”. Utiliza-se a seguinte relação:

$$V/c = \Delta\lambda / \lambda$$

onde V é a velocidade de rotação do ponto considerado, c é a velocidade da luz e $\Delta\lambda$ é o desvio Doppler da linha espectral com comprimento de onda λ . Correções podem ser feitas nessa relação para o caso de galáxias que não sejam vistas exatamente de perfil e para corrigir possíveis distorções geométricas (geralmente para galáxias com aspecto *torcido*, conhecidas como *warp*). O gráfico da velocidade de rotação de uma galáxia em função da distância ao seu centro é chamada de *curva de rotação* da galáxia.

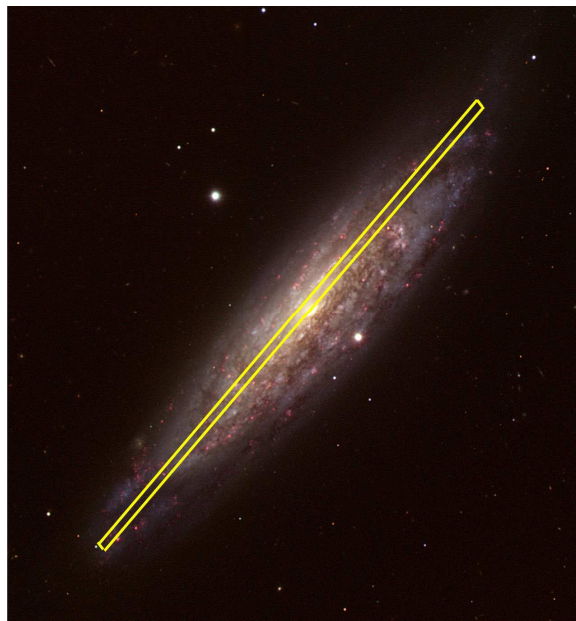


Figura 8: Obtenção da curva de rotação. A fenda do espectrógrafo, representada pelo retângulo amarelo na figura acima, é posicionada ao longo do eixo-maior da galáxia. O espectro correspondente ao lado da galáxia que gira em direção ao observador exibirá um desvio para o violeta, enquanto o espectro relativo ao lado que se afasta dele será desviado para o vermelho, devido ao efeito Doppler.

É interessante comparar a curva de rotação de uma galáxia com o seu perfil de brilho. A curva de rotação permite-nos calcular a distribuição da *massa dinâmica* enquanto o perfil de brilho nos fornece a distribuição da *massa luminosa* da galáxia. Curiosamente, observa-se que essas duas distribuições podem ser muito diferentes. A diferença entre elas mostra que, em algumas galáxias, parece existir uma quantidade de matéria que não contribui para a luminosidade da galáxia. Essa quantidade é chamada de *matéria escura da galáxia* e sua natureza ainda é desconhecida. Alguns astrônomos postulam que sua distribuição é aproximadamente esférica, como a população do halo. A quantidade de matéria escura também varia de galáxia para galáxia, mas geralmente ela existe em menor quantidade em galáxias espirais mais luminosas e em contrapartida é a matéria dominante em galáxias anãs. A matéria escura também parece existir no espaço *entre* as galáxias, conforme estudos de

aglomerados de galáxias têm revelado. A determinação correta da quantidade de matéria escura é um fator determinante em modelos cosmológicos que visam determinar a taxa de expansão do Universo. Se sua densidade exceder um certo valor crítico então a expansão do Universo deve sofrer uma retração. Determinações de distância e velocidade de afastamento de galáxias muito longínquas a partir de explosões de supernovas revelaram que a expansão do Universo parece se dar de forma acelerada. Se esses resultados forem confirmados então deve haver algum fenômeno físico, ainda não determinado, responsável por essa aceleração. De qualquer modo, são necessários mais dados para se compreender satisfatoriamente esses fenômenos.

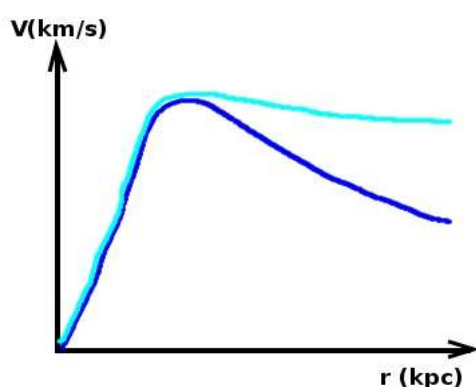


Figura 9: Curva de rotação de uma galáxia sem (azul escuro) e com (azul claro) matéria escura. A diferença entre as duas curvas é devida à presença de matéria que não emite qualquer tipo de radiação (luz, infravermelho, ondas de rádio), mas contribui com massa.

6. Núcleos de galáxias

Acredita-se que pelo menos metade das galáxias possuam um buraco negro (**BN**) gigante em seu núcleo. Ele origina-se da agregação de gás e estrelas, um processo natural em uma região do espaço onde a densidade de matéria é muito acima da média da densidade de estrelas no disco ou nos braços espirais, por exemplo. A própria Via Láctea possui um buraco negro em seu núcleo cuja massa é estimada em 4×10^7 massas solares, mas outras galáxias possuem buracos negros muito mais massivos.

A adição de massa ao **BN** ocorre por meio de um **disco de acreção**, constituído basicamente por gás, o qual é gradativamente atraído pela gravidade do buraco negro. À medida que o gás se aproxima do **BN** ele é comprimido e acelerado ao longo do disco de acreção. Esse processo ocasiona o aquecimento e ionização do gás, gerando radiação intensa, principalmente na região infravermelha do espectro. Portanto, embora os **BN** não irradiem, eles podem ser detectados graças à intensa radiação emitida pelo disco de acreção que os envolve. Um exemplo desse fenômeno é o disco de acreção detectado em torno do núcleo da galáxia **NGC4261**. Além do disco de acreção propriamente dito, existem dois jatos de matéria sendo lançados ao espaço a grandes velocidades, na direção perpendicular ao disco de acreção da galáxia. NGC4261 é um exemplo de **galáxia com núcleo ativo**, um fenômeno que acredita-se ocorrer em cerca de 1% de todas as galáxias, espirais, elípticas ou irregulares.

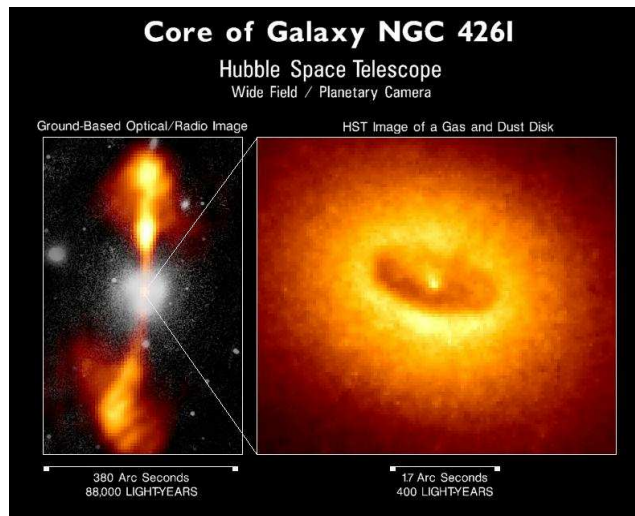


Figura 10: O núcleo da galáxia *NGC4261*, que abriga um buraco negro. Na imagem à esquerda, uma composição de imagens obtidas em radiofrequências e na faixa visível do espectro, podem ser vistos dois gigantescos jatos de gás sendo ejetados do núcleo da galáxia a distâncias de mais de 30 kpc (100 mil anos-luz). Na imagem da direita, obtida pelo telescópio espacial Hubble (ou *Hubble Space Telescope*, *HST*), pode-se ver o disco de acreção que gira em torno do buraco negro. Créditos: *Space Telescope Science Institute, PR-92-27A*.

O termo *galáxia com núcleo ativo* refere-se a uma vasta gama de objetos. Os *quasares* são *núcleos ativos de galáxias* situados a enormes distâncias. Nessas galáxias, o núcleo brilha mais do que todo o restante da galáxia, o que levou os astrônomos a chamá-las de *objetos quasi-stelares*, o que em latim significa “objeto quase-estelar”, devido à sua aparência de seu núcleo, quase pontual, como as estrelas quando vistas ao telescópio. Cerca de 10% dos quasares são também intensas fontes de rádio ou “radiofontes quase-estelares” (em inglês/latim *quasi-stellar radio sources* ou *QSR*). A análise do espectro em radiofrequências revelou que a radiação emitida pelos *QSR* é do tipo *synchrotron* ou *sincrotrônica*, gerada por cargas elétricas aceleradas a velocidades relativísticas, *i.e.* a velocidades próximas à da luz. Galáxias chamadas de *Seyfert* são espirais normais, exceto pelo seu núcleo, o qual irradia o correspondente a cerca de metade da luminosidade da galáxia inteira. O espectro óptico dos núcleos *Seyfert* geralmente possui linhas de emissão de alta excitação sobrepostas a um contínuo intenso na região vermelha do espectro. Os *objetos BL Lacertae* também são outra categoria de *núcleo ativo*: não exibem linhas de emissão, mas possuem variabilidade, e acredita-se que sejam galáxias elípticas com núcleos ativos, o análogo das *Seyfert* para galáxias elípticas.

7. Referências bibliográficas

- Asimov, I., 1972, *O Universo*, Edições Bloch, Rio de Janeiro
- Carroll, B.W. & Ostlie, D.A., *An introduction to modern galactic astrophysics and cosmology*, Pearson-Addison-Wesley, San Francisco, EUA, 2ª. edição.
- Elmegreen, D.M., 1998, *Galaxies & galactic structure*, Prentice-Hall, New Jersey, 1998
- Shapley, H., 1918, *The Astrophysical Journal*, **48**, 89
- Tayler, R.J., *Galaxies: structure and evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993, ed. revisada.