

Universo de Galáxias

Gastão B. Lima Neto

Universidade de São Paulo

Resumo

Galáxias são estruturas fundamentais no Universo. A descoberta da natureza extragaláctica das nebulosas espirais só ocorreu em meados dos anos 1920. Durante o século que se passou desde então, aprendemos muito sobre as galáxias. Este texto descreve como chegamos à conclusão de que o Universo é povoado de galáxias, muitas semelhantes à nossa própria, a Via Láctea. Veremos como classificamos as galáxias, quais são suas principais propriedades, como elas se formam e evoluem, e como estão distribuídas pelo Universo.

Abstract

Galaxies are fundamental structures in the Universe. The discovery of the extra-galactic nature of spiral nebulae only occurred in the mid-1920s. During the century that has passed since then, we have learned a lot about galaxies. This text describes how we came to the conclusion that the Universe is populated by galaxies, many similar to our own, the Milky Way. We will see how we classify galaxies, what their main properties are, how they form and evolve, and how they are distributed throughout the Universe.

Palavras-chave: galáxias: formação, morfologia, propriedades, estrutura em grande escala

Keywords: galaxies: formation, morphology, properties, large scale structure

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43889](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43889)

1 Introdução

Em uma noite escura, com a Lua abaixo do horizonte, podemos perceber uma faixa nebulosa cruzando o céu de um lado a outro. Na Antiguidade, os Gregos chamavam esta faixa de *galaxias kýklos*, ou círculo leitoso (*gala* significa leite em grego). Esta faixa seria o leite derramado pela deusa Hera quando seu marido, Zeus, tentou fazê-la amamentar o pequeno Hércules. Os Romanos adotaram este nome e passaram a chamar esta faixa no céu de *via lactea*, ou caminho leitoso. Este é o nome que damos até hoje em português, Via Láctea (com acento agudo).

A natureza da Via Láctea permaneceu um mistério até Galileu Galilei descobrir algo que mudaria completamente nossa compreensão desta faixa nebulosa. Em 1609, ao apontar sua luneta para a Via Láctea, Galileu descobriu que ela era constituída de inúmeras estrelas. Galileu descobriu que a aparência leitosa era devida às estrelas distantes não resolvidas a olho nu.

A Via Láctea não é o único objeto nebuloso no céu. No Hemisfério Sul é possível observar em noites escuras as chamadas Nuvens de Magalhães.

No Hemisfério Norte, tem um pequeno objeto nebuloso, difícil de observar à olho nu, a Nebulosa de Andrômeda.

Com o início das observações astronômicas sistemáticas utilizando telescópios, o número de objetos nebulosos descobertos começou a aumentar durante o século 17. Em 1716, o astrônomo Edmond Halley (1656–1742) publica uma resenha sobre o que ele chama de nebulosas ou “manchas claras como nuvens entre as estrelas fixas”, relatando as descobertas de astrônomos do século 17 como Giovanni Hodierna (1597–1660), Ismaël Bullialdus (1605–1694) e Johannes Hevelius (1611–1687).

Já na metade do século 18, o astrônomo inglês Thomas Wright (1711–1786) sugere em uma série de artigos que as nebulosas seriam como a Via Láctea, composta por uma distribuição de estrelas. Um modelo em particular, sugere que as estrelas da Via Láctea estariam distribuídas em uma concha esférica. O filósofo alemão Immanuel Kant (1724–1804) adota este pensamento, imaginando o Universo infinito com inúmeras nebulosas como a Via Láctea. Esta ideia foi chamada

mais tarde por Alexander von Humboldt (1769–1859) de universos-ilhas.

O primeiro catálogo de nebulosas (objetos de aparência difusa quando observados nos telescópios da época) foi elaborado pelo francês Charles Messier (1730–1817). Entre 1774 e 1781, Messier catalogou 103 objetos difusos (7 foram acrescentados posteriormente). Destes, 40 são de fato galáxias.

Messier estava interessado em cometas, algo ainda enigmático na época, e catalogava objetos difusos para que não fossem confundidos com cometas. O astrônomo germano-inglês William Herschel (1738–1822) elevou nosso conhecimento de nebulosas para um outro patamar. Junto com sua irmã, Caroline Herschel (1750–1848), eles catalogaram cerca de 2500 nebulosas entre 1780 e 1802. O filho de William, John Herschel (1792–1871) dá continuidade ao catálogo acrescentando nebulosas observáveis do Hemisfério Sul. Em 1864, o catálogo tinha cerca de 5000 nebulosas.

Expandindo o catálogo de Herschel, John Dreyer (1852–1926) publica o *New General Catalog*, NGC, com 7840 objetos (muitos dos quais são galáxias) em 1888. Este catálogo e seu suplemento, o *Index Catalog* com mais 5386 objetos (também publicado por Dreyer) são ainda muito utilizados hoje em dia, especialmente quando estamos interessados em galáxias próximas e brilhantes.

Com o advento de telescópios maiores e de melhor qualidade, foi possível a descoberta de estruturas em algumas nebulosas. Em 1845, usando um telescópio de 1,83 metros de diâmetro (o maior do mundo na época) construído em seu castelo, Lord Rosse (William Parsons, 1800–1867) descobre que muitas espirais possuem uma estrutura espiral, isto é, “braços” espirais.

Desde meados do século 19, os astrônomos notavam uma segregação. Na região da Via Láctea não se encontravam nebulosas espirais ou globulares. Em um livro de 1882, Joseph Gillet e William Rolfe ilustram esta segregação graficamente (Fig. 1). Esta observação era usada como um argumento de que as nebulosas teriam uma relação com a Via Láctea e, provavelmente, fariam parte dela. Hoje sabemos que não observamos galáxias na região do céu ocupada pela nossa Galáxia devido à absorção pelo meio interestelar.

No final do século 19 e início do século 20,



Figura 1: Ilustração do livro *Astronomy for the use of schools and academies*, de J.A. Gillet e W.J. Rolfe (1882), mostrando que onde está a maior parte das estrelas (na região da Via Láctea), há poucas nebulosas e vice-versa. A relação entre nebulosas e a Via Láctea ainda não era conhecida na época

uma discussão intensa girava em torno da natureza da Via Láctea e das nebulosas graças às observações que se acumulavam. Um dos modelos mais populares, baseados na representação de William Herschel de 1785, descrevia a Via Láctea como uma distribuição achatada de estrelas, com o Sol muito próximo do centro. Jacobus Kapteyn (1851–1922), usando o método de contagem de estrelas como Herschel fez, chega a uma conclusão semelhante durante as primeiras décadas do século 20, estimando o diâmetro da Via Láctea em 20 kpc. Por outro lado, Harlow Shapley (1885–1972) estuda a distribuição de aglomerados globulares no céu e estima a distância destes objetos usando estrelas variáveis. Shapley conclui que a Via Láctea tem cerca de 100 kpc de diâmetro e o Sol se encontra distante do centro, a cerca de 15 kpc.

Segundo Kapteyn e colaboradores, as nebulosas seriam como a Via Láctea, ilhas no Universo (como Wright e Kant imaginavam), enquanto Shapley e colaboradores acreditavam que as nebulosas fariam parte da Via Láctea. Em 1920, em Washington/EUA, houve um evento que ficou conhecido como Grande Debate, onde Shapley e Herber Curtis (1872–1942) apresentaram

suas respectivas visões de mundo (Curtis era defensor do modelo de Kapteyn). Este debate é muitas vezes associado ao início da Astronomia Extragaláctica.

Enquanto isto, Vesto Slipher (1875–1969) começou a obter sistematicamente o espectro de nebulosas espirais. Com espectros de boa qualidade é possível determinar a velocidade radial uma vez que linhas espectrais aparecem deslocadas em relação ao espectro de um objeto em repouso. Em 1917, Slipher já tinha medido o espectro de 25 nebulosas espirais; destas 3 tinham velocidade em nossa direção e 22 nebulosas estavam se afastando. As velocidades medidas eram muito mais elevadas do que as das estrelas que já haviam sido observadas. O trabalho de Slipher sugeria fortemente que estas nebulosas não poderiam fazer parte da Via Láctea.

Finalmente, entre 1908 e 1912, Henrietta Leavitt (1868–1921) fez um estudo aprofundado de estrelas variáveis, identificando mais de 1700 objetos. Em 1912, ela publicou a famosa relação período-luminosidade de estrelas Cefeidas, a partir de um conjunto de 25 estrelas deste tipo identificadas na Pequena Nuvem de Magalhães. Quanto mais luminosa é a estrela Cefeida, maior é o seu período de variabilidade. A relação período-luminosidade permite a determinação da distância destas estrelas, uma vez que medimos sua magnitude aparente e o período de pulsação da estrela Cefeida, através da relação de Leavitt, nos dá a luminosidade da estrela ou, equivalentemente, sua magnitude absoluta. A diferença entre a magnitude aparente e a absoluta nos dá diretamente a distância.

Em 1917, entra em operação o então maior telescópio do mundo, o Hooker com 2,5 metros de diâmetro, no Monte Wilson (Califórnia/EUA). A partir de 1922, Edwin Hubble (1889–1953) começa a observar com este telescópio. Graças ao seu tamanho, Hubble pôde resolver estrelas Cefeidas em algumas nebulosas e, usando a relação período-luminosidade de Leavitt, determinou a distância destas nebulosas. Com as observações de 1924, Hubble inicialmente publica em 1925 as distâncias das nebulosas de Andrômeda (M31) e da nebulosa do Triângulo (M33), mostrando de forma conclusiva que estes objetos não podem fazer parte da Via Láctea por estarem tão distantes. Nos anos seguintes, a determinação das distâncias

de outras nebulosas confirmam esta conclusão.

A partir de 1926, fica claro que as nebulosas espirais e as nebulosas elípticas (de forma arredondada) são, de fato, objetos extragalácticos, isto é, galáxias como a nossa Via Láctea.

2 Classificação morfológica

Quando queremos entender melhor uma classe de objetos, uma das maneiras mais práticas e de bons resultados é através de um sistema de classificação. Um exemplo disto está na biologia, quando Carl von Linné (1707–1778) propõe em 1728 um sistema de classificação de plantas baseado na forma, isto é, morfológica, dos órgãos de reprodução, Estame e Pistilo.

Antes mesmo de reconhecermos a natureza extragaláctica das nebulosas, já havia propostas de classificação morfológica. Max Wolf (1863–1932) em 1908 e John Reynolds (1874–1949) em 1920 publicam sistemas de classificação de nebulosas (incluindo galáxias).

Em 1926, Hubble publica o primeiro sistema de classificação de galáxias propriamente ditas. Esta primeira versão propunha uma sequência, começando pelas galáxias de forma mais esféricas, indo para as mais achatadas e, em seguida, bifurcando em duas sequências paralelas, uma de galáxias espirais normais e outra de espirais barradas (isto é, com uma estrutura central linear, como uma barra). Em 1936, Hubble modifica seu sistema de classificação ficando parecido com o que usamos até hoje, incluindo as galáxias lenticulares, de morfologia intermediária entre elípticas e espirais. Também inclui as galáxias irregulares, além da sequência das espirais. Por causa da bifurcação entre espirais normais e barradas, o sistema de classificação de Hubble é conhecida como sistema de diapasão (veja Fig. 2).

O sistema de Hubble teve algumas mudanças, notadamente por Erik Holmberg em 1958, Gérard de Vaucouleurs em 1959 e Allan Sandage em 1961, com algumas subdivisões, inclusão de dois tipos de galáxias irregulares (Irr1 e Irr2), presença ou não de anéis (estrutura circular em torno da galáxia). Contudo, a essência da classificação de Hubble continua a mesma, uma sequência que começa com as galáxias ditas *early type* (traduzido como: tipo precoce), as elípticas e lenticulares,

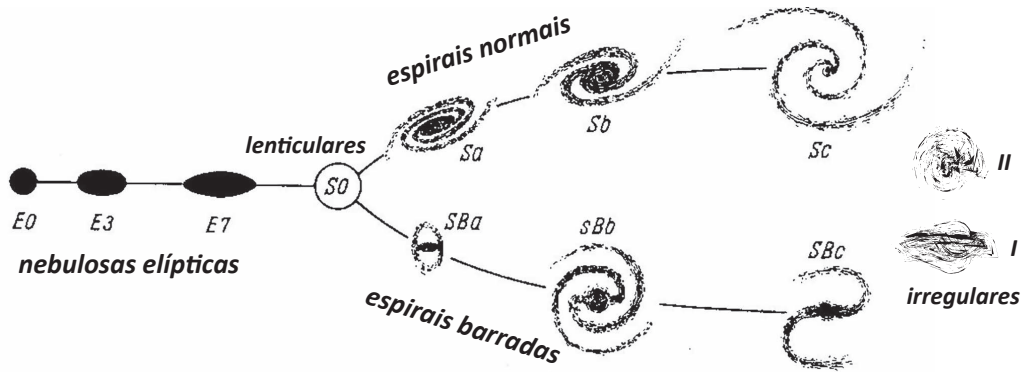


Figura 2: Classificação morfológica em diapasão de Hubble (1936).

passa pelas espirais e termina nas irregulares (estas duas últimas ditas *late type* (traduzido como: tipo tardio)). Apesar da nomenclatura, a classificação morfológica de Hubble não é uma sequência evolutiva. No início do século 20, acreditava-se que as estrelas se formavam quente, *early type*, O, B, A, e esfriavam durante sua vida, tornando-se estrelas frias, *late type*, K, M (mais tarde descobrimos que as estrelas não evoluem assim).¹ Hubble, contudo, usou *early* e *late* no sentido de mais simples para mais complexo em termos de morfologia e esta denominação é ainda usada frequentemente hoje em dia.

O sucesso da classificação de Hubble vem de sua simplicidade e das correlações observadas de propriedades observacionais e físicas globais das galáxias ao longo da sequência morfológica. Por exemplo, galáxias *early type* são geralmente de cor vermelha enquanto galáxias *late type* são mais azuladas. As galáxias *early type* são mais pobres em gás e poeira no meio interestelar, enquanto que as galáxias *late type* possuem mais gás e poeira. Por isto, podemos concluir que as galáxias *early type* não formam mais estrelas, isto é, suas estrelas já são velhas. Já as galáxias *late type* ainda estão formando estrelas ativamente, como, por exemplo, a Via Láctea, que atualmente forma cerca de $1 M_{\odot}$ de estrela por ano, em média.

¹Desde o início do século 20, as estrelas são classificadas espectralmente pela sua temperatura superficial usando as letras O, B, A, F, G, K e M, onde o tipo O é a mais quente e as estrelas de tipo M, as mais frias. Era comum dizer que as estrelas mais quentes eram de tipo *early* e as mais fria de tipo *late*. As letras estão fora de ordem alfabética porque elas se referiam originalmente à intensidade das linhas do hidrogênio (tipo A com linhas mais fortes, tipo O praticamente sem linhas do hidrogênio aparentes no visível).

A classificação de Hubble foi desenvolvida a partir de observações no óptico, o que corresponde às bandas (filtros) fotométricos clássicos *B* (azul) e *V* (visível). Além disto, esta classificação foi feita para galáxias relativamente brilhantes, portanto, relativamente próximas. Tomando a nossa vizinhança celeste, dentro de um raio de aproximadamente 1 Gpc, nos temos 70% de galáxias espirais, 14% de lenticulares, 10% de elípticas e 6% de irregulares.

A classificação morfológica é baseada nas observações feitas no visível e em um intervalo de brilho superficial acessível às observações feitas na primeira metade do século 20. Isto significa que a classificação morfológica de Hubble privilegia certos tipos de galáxias (por exemplo as de maior taxa de formação estelar) em detrimento de outras (as galáxias anãs e as de fraco brilho superficial).

Quando as galáxias começaram a ser observadas em outros comprimentos de onda, além do visível, ficou claro que a classificação morfológica depende da banda fotométrica utilizada. Por exemplo, uma galáxia espiral observada no ultravioleta distante poderia ser classificada como uma irregular, já que veríamos principalmente as regiões de formação estelar intensa

2.1 Galáxias elípticas

Galáxias elípticas são geralmente objetos com pouco ou nenhuma estrutura, suas estrelas estão em uma distribuição elipsoidal ou esférica. A Fig. 3 mostra algumas elípticas típicas.

No sistema morfológico de Hubble, as galáxias elípticas são classificadas segundo seu grau de achatamento aparente, isto, de sua imagem pro-

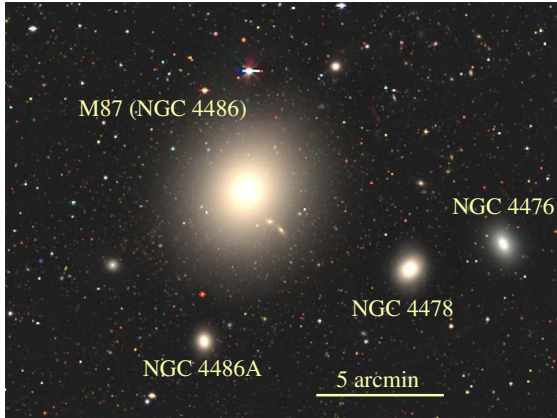


Figura 3: Exemplo de galáxias elípticas. M87, NGC 4478 e NGC 4486A são classificadas como elípticas. Com NGC 4476, há controvérsia, alguns classificam como elíptica outros como lenticular. Imagem do DESI Legacy Survey.

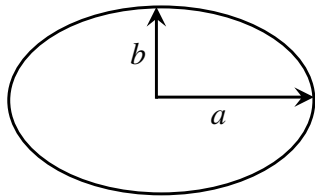


Figura 4: Classificação de galáxias elípticas segundo seu achatamento aparente. Os semi-eixos maior e menor são a e b , respectivamente.

jetada no céu (veja a Fig. 4). A notação é a letra “E” seguida de um número n dado pelo valor inteiro de $n = 1 - b/a$.

Assim, E0 significa uma elíptica com imagem redonda; E5 é uma elíptica onde o semi-eixo maior é o dobro do semi-eixo menor. Como a forma é projetada no céu, uma E0 pode ser esférica como também pode ser uma E7 vista de frente (na direção do eixo-maior).

Esta escala vai até E7. Não são observadas galáxias elípticas mais achatadas do que as E7. A razão disto é que elípticas mais achatadas são dinamicamente instáveis e, caso algum processo pudesse gerar elípticas mais achatadas, elas rapidamente se tornariam mais arredondadas, com um achatamento menor.

As maiores galáxias elípticas não são achatadas por efeito de rotação, mas sim devido à anisotropia da distribuição de velocidades. Nestas elípticas, as estrelas se movem com mais velocidade em média em uma direção (a do semi-eixo maior) e mais lentamente na direção do eixo menor.

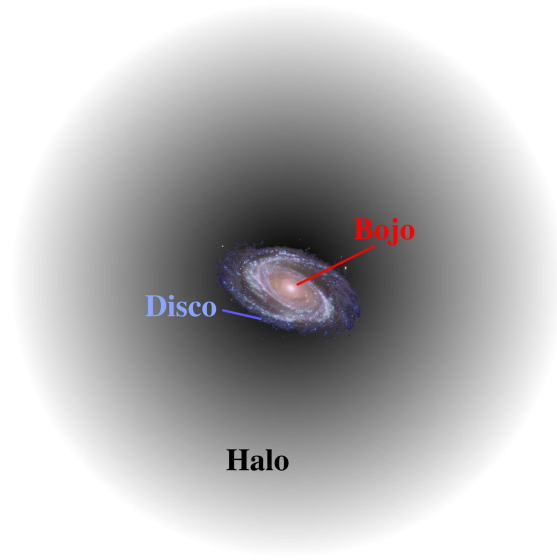


Figura 5: Representação de uma galáxia espiral com suas principais componentes: bojo, disco e halo

2.2 Galáxias espirais

As galáxias espirais têm como principal característica a presença de braços espirais que partem do centro da galáxia, a região chamada de bojo, ou de uma estrutura em forma de barra da região central. Os braços têm este destaque por terem uma população estelar mais jovem, portanto com estrelas muito luminosas e azuladas.

As galáxias espirais têm 3 componentes principais: o bojo central, o disco estelar e o halo (Fig. 5). O bojo tem a maior densidade de estrelas, portanto é a componente mais brilhante. O disco, onde estão os braços espirais, contém a maior parte das estrelas e é a componente mais luminosa. O halo, que geralmente assumimos de forma aproximadamente esférica, contém a maior parte da massa.

O bojo é uma componente que é semelhante à uma mini galáxia elíptica, com uma população estelar mais envelhecida e uma distribuição elipsoidal de estrelas. Algumas galáxias espirais têm um pseudo-bojo, uma estrutura central semelhante ao bojo clássico, mas com estrelas mais jovens e uma rotação mais importante. O pseudo-bojo é o resultado de uma evolução lenta que ocorre em algumas galáxias.

Os braços espirais são ondas de densidade que se propagam no disco. A forma dos braços não muda devido à rotação da galáxia. Devido à compressão do gás, a formação de estrelas é mais

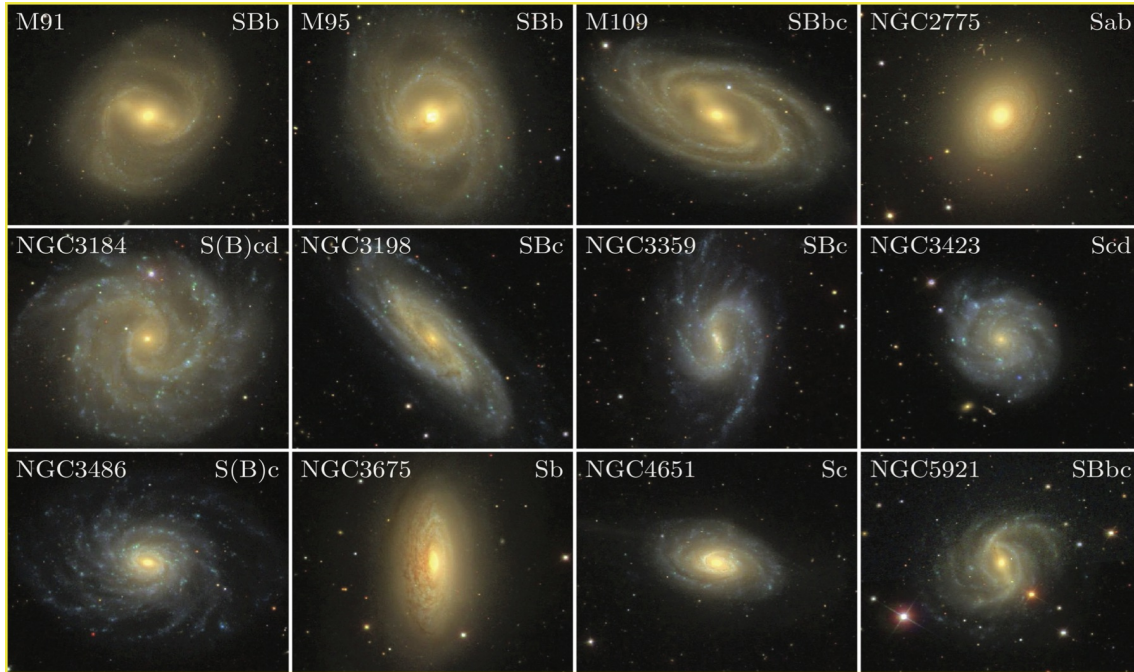


Figura 6: Exemplo de galáxias espirais com suas respectivas classificação morfológica. Imagens obtidas do Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Quando tem um (B), significa que a barra estelar é relativamente fraca.

acentuada nesta região. Desta forma, os braços se sobressaem nas observações óticas porque ele é traçado por estrelas jovens e massivas (e por isso muito luminosas).

Estas ondas de densidade são o resultado de uma perturbação no disco galáctico. Discos auto-gravitantes são intrinsecamente instáveis à certas perturbações. Estas perturbações podem ser internas, devidos à própria distribuição das estrelas ou interações entres as diferentes componentes, ou podem ser de origem externa, devido à passagem próxima de uma outra galáxia.

Além deste tipo de instabilidade, os discos auto-gravitantes quando são perturbados formam com certa facilidade uma barra central (as chamadas espirais barradas).

A geometria do halo massivo também pode provocar um outro tipo de perturbação. Se o halo for suficientemente achatado e seu eixo não coincidir com o eixo do disco estelar, este irá se “torcer” (do inglês, *to warp*). Este efeito é particularmente difícil de ser observado devido à projeção da galáxia no plano do céu). Algumas observações (ou melhor, análises) sugerem que nossa própria galáxia seja “torcida” (*warped*).

Finalmente, a passagem próxima ou o canibalismo de pequenas galáxias, causam uma trans-

ferência da energia cinética orbital para energia cinética interna da galáxia, no caso, do disco estelar. Isto produz um aumento principalmente na espessura do disco. Deve-se notar que mesmo na ausência de perturbadores externos, o disco estelar aumenta de espessura espontaneamente devido aos encontros entres as estrelas e entre as estrelas e nuvens massivas (que possuem algumas dezenas ou centenas de massas solares).

Na classificação morfológica de Hubble, as espirais são notadas de Sa até Sd (na versão original tinha apenas 3 categorias) e SBa até SBd, no caso das barradas. Cerca de 50% a 60% de galáxias espirais tem uma barra proeminente. A Fig. 6 ilustra vários exemplos de galáxias espirais com suas classificações.

A subdivisão, de a à d, pode ser feita em relação à luminosidade relativa do bojo em relação ao disco. Nas Sa, a luminosidade do bojo chega ser um pouco superior à metade da luminosidade do disco, isto é, $L_{\text{bojo}}/L_{\text{disco}} \simeq 0,5$. Esta razão é aproximadamente 0,45, 0,32, 0,15 e 0,10 para os subtipos Sb, Sbc, Sc e Sd (Sbc é o tipo intermediário entre Sb e Sc).

Outro critério usado é a abertura dos braços espirais. As Sa têm braços com menos abertura, enquanto as Sc e Sd têm a maior abertura.

2.2.1 A Via Láctea

O Sistema Solar faz parte de uma galáxia que chamamos de Via Láctea. É uma galáxia espiral barrada de tipo SBbc, com quatro braços espirais. O disco estelar da Via Láctea tem cerca de 15 kpc de raio e menos de 1 kpc de espessura, e o Sol se encontra a cerca de 8 kpc do centro, muito próximo do plano galáctico.

O espaço entre as estrelas não é vazio, o Meio Interestelar (MIS) contém cerca de 10% da massa visível da Via Láctea. Aproximadamente, 99% do MIS está na forma de gás e 1% de poeira.

No centro da Via Láctea existe um buraco negro supermassivo com cerca de $3 \times 10^6 M_{\odot}$.

2.3 Galáxias lenticulares

Galáxias com este tipo morfológico têm uma forma de disco com um grande bojo central. As galáxias lenticulares são chamadas S0 ou SB0 (normais e barradas, respectivamente). Estas galáxias têm um bojo muito grande em relação ao disco, geralmente fraco e sem a presença de braços espirais. A formação estelar é muito pequena ou nula. Isto significa que estas galáxias tem cores semelhantes às elípticas e também são consideradas *early type*.

As S0s podem ser facilmente confundidas observacionalmente (pelo imageamento) com elípticas que possuam um envelope estelar estendido. Algumas destas galáxias apresentam poeira em seus discos estelares. Galáxias lenticulares são geralmente encontradas em ambientes mais densos, como os aglomerados de galáxias.

2.4 Galáxias irregulares

A galáxias que não são espirais, elípticas ou lenticulares são classificadas de irregulares (lembrando que estamos lidando com galáxias brilhantes e relativamente próximas). Elas não apresentam nenhuma forma ou simetria bem definida.

As galáxias satélites da Via Láctea, as Nuvens de Magalhães, são exemplos clássicos de irregulares. Na classificação de Hubble estas galáxias são notadas Irr I e Irr II. As Irr I são semelhantes à Grande Nuvem de Magalhães, com alguma pequena indicação de estrutura simétrica, como uma barra. As Irr II por sua vez não apresentam nenhum traço de simetria.

Galáxias com muita poeira também podem ter aparência irregular quando observadas no visível, apesar de pertencerem a outra classe morfológica. No sistema de classificação morfológico de de Vaucouleurs, as galáxias irregulares são classificadas como Sm ou Im.

2.5 Galáxias anãs

A maior parte das galáxias do Universo são as chamadas anãs, de baixa luminosidade e massa quando comparadas com as galáxias ditas normais, isto é, $L \lesssim 5 \times 10^8 L_{\odot}$ no visível. A grande maioria das galáxias vizinhas da Via Láctea são anãs. As Nuvens de Magalhães estão na fronteira: para alguns autores elas são galáxias normais, para outros anãs.

As galáxias anãs têm sua própria classificação morfológica: anãs irregulares (ricas em gás, com formação estelar), anãs elípticas (semelhantes às elípticas normais, mas com massa total inferior à $\sim 10^9 M_{\odot}$, e as anãs esferoidais (pobres em gás e com baixo brilho superficial). Um exemplo de anã elíptica é M32, satélite da galáxia de Andrômeda, descoberta por Charles Messier.

2.6 Galáxias em alto redshift

A classificação em diapasão de Hubble só é válida para galáxias com baixo *redshift* cosmológico. As galáxias mais distantes são muito mais irregulares e, a partir de um certo ponto não observamos mais galáxias como as espirais, com discos estelares.

As galáxias já começam a se formar (isto é, já são estruturas gravitacionalmente ligadas e com formação estelar) depois de algumas centenas de milhões de anos após o *big bang*. A partir deste momento, a taxa de formação estelar (em galáxias) aumenta gradativamente até quando o universo tem cerca de 3 a 4 bilhões de anos. Quando o Universo tem cerca de 6 bilhões de anos, esta taxa de formação estelar começa a diminuir e assim continua até os dias de hoje.

Um dos desafios atuais é a observação das primeiras galáxias que se formaram no Universo. Telescópios como o James Webb Space Telescope e o futuro Giant Magellanic Telescope nos darão uma visão muito mais completa dos eventos da época da formação de galáxias.

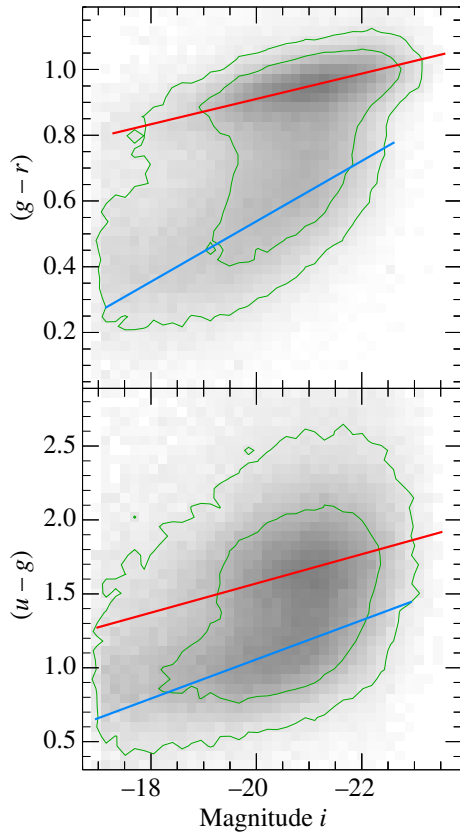


Figura 7: Relação cor–magnitude de um conjunto de $\sim 183\,000$ galáxias mostrando o caráter bimodal da distribuição das propriedades das galáxias. Nos diagramas cor–magnitude são mostradas a sequência vermelha das elípticas e lenticulares, e a nuvem azul das espirais e irregulares. Figura adaptada de Blanton et al. 2003.

3 Relação cor–magnitude de galáxias

Com levantamentos de centenas de milhares de galáxias, por exemplo o SDSS, estudos estatísticos das propriedades das galáxias se tornaram muito mais precisos. Um fato notável foi a confirmação de uma bimodalidade das propriedades físicas das galáxias no Universo local ($z \lesssim 0,25$). Tomando a relação cor $(g-r) \times$ magnitude i , notamos claramente a presença de duas concentrações na distribuição das galáxias, que correspondem às galáxias azuis e vermelhas (veja Fig. 7). Esta bimodalidade vermelha/azul já não é tão clara usando o índice de cor $(u-g)$.

As galáxias vermelhas se distribuem ao longo de uma linha no diagrama cor–magnitude, a chamada sequência vermelha. Também notamos que as galáxias vermelhas são, em média, mais luminosas do que as galáxias azuis. As galáxias

azuis se encontram em uma região chamada nuvem azul.

Entre a sequência vermelha e a nuvem azul há uma região intermediária com número menor de galáxias, o chamado Vale Verde (*Green Valley*). Esta é uma região de transição no diagrama cor–magnitude das galáxias. Possivelmente, as galáxias iniciam sua evolução na região da nuvem azul (com alta taxa de formação estelar) e caminham para a sequência vermelha. Os mecanismos por trás desta evolução devem ser o *feedback* de supernovas e do núcleo ativo central (que todas as galáxias massivas aparentam ter), e os efeitos do meio ambiente como a *ram-pressure* (pressão de arraste), por exemplo. Aparentemente, a galáxia de Andrômeda e talvez a Via Láctea estejam hoje no Vale Verde, com suas respectivas taxas de formação estelar caindo.

4 Distribuição de galáxias

As galáxias não se distribuem pelo Universo de forma aleatória. Devido à gravitação, as galáxias tendem a se agruparem. A maior parte das galáxias se encontram em estruturas gravitacionalmente ligadas.

Aglomerações com até várias dezenas de galáxias brilhantes são chamadas de grupos. Grupos com algumas poucas galáxias são chamados de grupos pobres. A Via Láctea, junco com M31 (galáxia de Andrômeda), M33, a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães e mais cerca de 60 galáxias anãs forma o chamado Grupo Local.

O Grupo Local tem uma massa total de cerca de $3 \times 10^{12} M_{\odot}$, sendo dominado dinamicamente por nossa galáxia e M31. Grupos ricos podem chegar até cerca de $10^{14} M_{\odot}$ com várias dezenas de galáxias brilhantes.

Os grupos de galáxias podem ser relativamente rarefeitos (grupos soltos, como o Grupo Local) ou compactos, onde as galáxias estão praticamente se tocando de tão próximas que estão uma das outras. Grupos compactos são particularmente interessantes para o estudo da evolução de galáxias em ambientes densos. A fig. 8 mostra exemplos destes tipos de grupos de galáxias.

Alguns grupos têm apenas uma galáxia muito brilhante no centro (geralmente uma galáxia elíptica), cercada de galáxias mais fracas em volta.

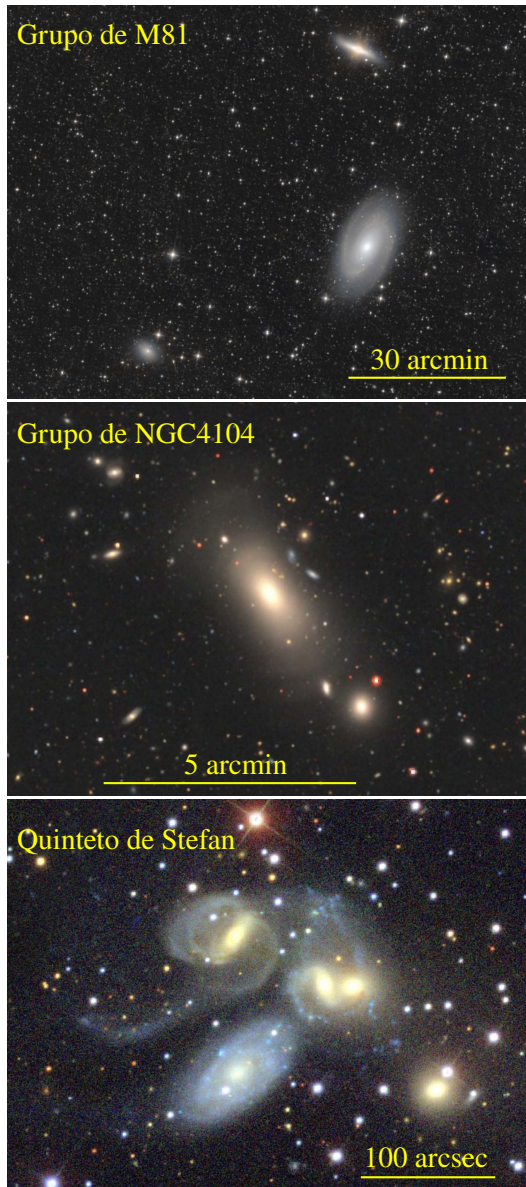


Figura 8: Exemplos de grupos de galáxias. ACIMA: grupo solto, com poucas galáxias (imagem do unWISE Survey). MEIO: grupo fóssil, com uma elíptica gigante central (imagem do DESI Survey). ABAIXO: grupo compacto. A galáxia espiral azulada, na parte inferior não faz parte do grupo, é uma galáxia que por acaso está na frente (imagem do SDSS).

Quando estes grupos tem uma emissão forte em raios-X, indicando uma massa elevada, são chamados de grupos fósseis (veja Fig. 8).

Sistemas ligados gravitacionalmente e em equilíbrio (ou próximo do equilíbrio) com massa superior à $10^{14} M_{\odot}$ são chamados aglomerados de galáxias. Em um Universo dominado pela matéria escura fria (CDM, de *Cold Dark Matter*), os aglomerados de galáxias são as últimas e mais

massivas estruturas formadas.

Os maiores aglomerados de galáxias do Universo chegam a ter até cerca de $5 \times 10^{15} M_{\odot}$ e têm um diâmetro de cerca de 4 a 5 Mpc com milhares de galáxias brilhantes.

Aglomerados de galáxias têm três componentes principais: as galáxias que contam com cerca de 2 a 3% da massa total, um gás muito quente e rarefeito entre as galáxias que contribuem com 12 a 13% da massa total e a CDM, com 85% da massa total. O gás intra-aglomerado tem uma temperatura que está no intervalo de cerca de 10^7 a 10^8 K, mais quente que o núcleo do Sol. Este gás é um forte emissor de raios-X.

Estruturas maiores, como super-aglomerados e os filamentos cósmicos, com tamanhos que variam entre dezenas a centenas de milhões de parsecs, estão fora de equilíbrio e não consideramos como estruturas já formadas. Muitos grupos e aglomerados de galáxias se encontram nestes super-aglomerados e filamentos.

Finalmente, também temos grandes regiões no Universo onde praticamente não há galáxias. São os chamados vazios cósmicos. Estas regiões têm, aproximadamente, entre 30 e 100 Mpc de diâmetro. A fronteira dos vazios são os filamentos e “muros” cósmicos.

5 Formação e evolução de galáxias

A principal força por trás da formação de estruturas no Universo, desde estrelas até aglomerados de galáxias, é a gravitação. Uma vez fora de equilíbrio, a matéria colapsa e forma diversos tipos de objetos.

Com esta ideia, em 1962, Ollin Eggen, Donald Lynden-Bell e Allan Sandage propuseram o chamado modelo monolítico, onde as galáxias espirais se formariam a partir do colapso de uma grande massa de gás.

Neste cenário, uma grande nuvem de hidrogênio e hélio primordial, com diâmetro de cerca de 100 kpc e com um pouco de rotação, começa a colapsar devido à instabilidade gravitacional. Durante esta fase de cerca de centenas de milhões de anos, algumas estrelas e os aglomerados globulares se formam no halo. Devido à dissipação de energia e conservação do momento angular, o gás resfria e se acumula em um disco em rotação

rápida: lá, as estrelas passam a se formar continuamente. Após o colapso, não há mais formação de estrelas no halo. O gás no disco permite a formação de estrelas até hoje.

O resultado deste processo é de um disco com formação estelar (algumas massas solares por ano se tornando estrelas, em média) e uma população mais velha de objetos no halo (estrelas de baixa massa e aglomerados globulares).

Este modelo, inicialmente foi também proposto para galáxias elípticas por Richard Larson em 1974. Neste caso, o momento angular é muito pequeno (praticamente não há rotação) e a maior parte do gás se transforma em estrelas durante o colapso.

Contudo, este modelo não explica adequadamente algumas propriedades observacionais. Na Via Láctea e muitas outras galáxias, observa-se aglomerados globulares de diferentes metalicidades. Isto significa que estes aglomerados não se formaram simultaneamente, contrariamente ao previsto pelo modelo de colapso monolítico. Também observamos que muitas estrelas do halo giram no sentido inverso do disco, em desacordo com o modelo monolítico.

Um modelo alternativo foi proposto em 1978 por Leonard Searle e Robert J. Zinn e desenvolvido por Simon White, Martin Rees e Carlos Frenk (1978 e 1991), Blumenthal e colaboradores (1984). Este cenário se mostrou mais satisfatório quando foi reconhecido que o modelo que melhor representa nossas observações são dominados pela chamada matéria escura fria. Em modelos cosmológicos onde a maior parte da matéria é CDM, as primeiras estruturas que colapsam são de pequena massa, por volta de 10^5 a $10^6 M_{\odot}$. Objetos de maior massa são formados por fusões sucessivas, no que é chamado de modelo hierárquico.

A sequência de fusões do modelo hierárquico pode ser representada por uma “árvore de fusões” (Fig. 9), mostrando de forma gráfica o crescimento dos objetos de interesse.

Os objetos que colapsam no modelo hierárquico são halos de matéria escura. A matéria “normal” formada de átomos constitui apenas cerca de 10% de toda a matéria e flui para o centro dos halos de matéria escura fria. No centro dos halos, quando o gás consegue se resfriar, há formação de estrelas.

Outro aspecto importante é o meio ambiente onde as galáxias vivem. Uma relação, já obser-

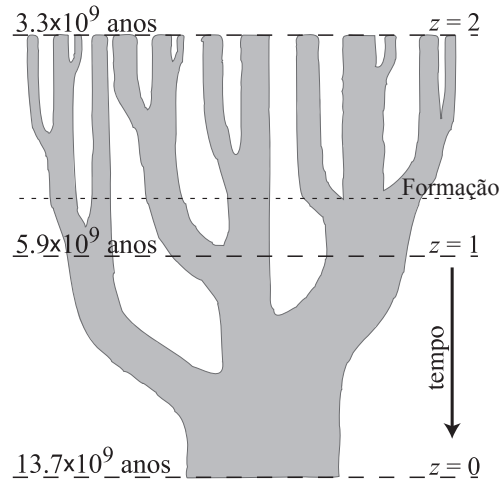


Figura 9: Exemplo de uma “árvore de fusões”, representando a sequência de fusões em um Universo dominado por CDM em que estruturas maiores se formam por fusões sucessivas (modelo hierárquico). A largura dos “caules” e do tronco representam a massa dos objetos. De forma arbitrária, podemos definir a formação de um objeto (uma galáxia, por exemplo) como o momento em que metade de sua massa já tenha sido incorporado. O *redshift* cosmológico é representado por z e o tempo à esquerda corresponde à idade do Universo.

vada por Hubble, foi mostrada de forma mais rigorosa por Alan Dressler em 1980 e chamada de segregação morfológica. Galáxias de tipo *early* (elípticas e lenticulares) se encontram preferencialmente em ambientes mais densos, como aglomerados de galáxias. Já as galáxias de tipo *late* se encontram mais frequentemente em grupos esparsos e no campo. A segregação morfológica nos diz que o meio ambiente afeta a evolução de galáxias.

Um aspecto desta relação é chamado de pre-processamento. Antes de chegarem nos aglomerados, muitas galáxias vivem em grupos; os grupos podem colidir e se fundirem formando estruturas maiores, até aglomerados. Nos grupos, as galáxias já sofrem efeitos ambientais e quando passam a fazer parte dos aglomerados, já estão pre-processadas.

Além de observações cada vez mais profundas² e de melhor qualidade em todos os comprimentos de onda, muito do que estamos aprendendo sobre a formação e evolução de galáxias vem de simulações numéricas. Nestas simulações, partimos de

²No estudo da origem e evolução de galáxias, destacamos, por exemplo, telescópios como James Webb Space Telescope (JWST) e os futuros grandes telescópios Giant Magellanic Telescope (GMT, com participação brasileira), e European Extremely Large Telescope (EELT)

condições iniciais de quando o Universo era relativamente homogêneo, há mais de 13 bilhões de anos atrás, e seguimos a evolução das estruturas do Universo obedecendo às leis da física como a gravitação e hidrodinâmica. Também é levado em conta processos físicos como formação de estrelas, explosão de supernovas, núcleos ativos em galáxias, por exemplo.

Desta forma, podemos responder à pergunta: o que são galáxias?. De forma sucinta, são halos de matéria escura com estrelas (com gás e poeira, geralmente), em equilíbrio gravitacional. Além disto, todas as galáxias com uma componente esferoidal (galáxias elípticas e galáxias com bojo central) possuem um buraco negro supermassivo (isto é com massa superior a cerca de $10^6 M_{\odot}$) no centro. Até hoje não se conhece uma galáxia sem matéria escura, ainda que alguns objetos aparentemente podem ter uma deficiência de matéria escura como NGC 1277 segundo estudo publicado em 2023 por Sébastien Comerón e colaboradores.

Por fim, incluo na seção de referências, alguns livros que servem de introdução e de aprofundamento aos assuntos aqui abordados.

Agradecimentos

Agradeço o apoio financeiro do CNPq, processo 303130/2019-9.

Sobre o autor

Gastão B. Lima Neto (gastao@astro.iag.usp.br)

é formado em Física pela Universidade de São Paulo, fez o Mestrado em Física no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP) e Doutorado em Física no Observatório de Meudon-Paris, França. Após pós-doutorados em Potsdam, na Alemanha, Lyon e Paris, na França, atua como professor do Departamento de Astronomia do IAG/USP desde 1998. Sua pesquisa aborda a astrofísica extragaláctica, com interesse na emissão de raios-X de grupos e aglomerados de galáxias, simulações numéricas de N -corpos e fotometria óptica de galáxias.

Referências

- [1] F. Combes et al., *Galaxies and Cosmology* (Springer Berlin Heidelberg, 1995).
- [2] D. M. Elmegreen, *Galaxies & Galactic Structure* (Prentice Hall, 1997).
- [3] H. Mo, F. van den Bosch e S. White, *Galaxy Formation and Evolution* (Cambridge University Press, 2010).
- [4] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction* (Springer Berlin Heidelberg, 2015).
- [5] L. S. Sparke e J. S. Gallagher, III, *Galaxies in the Universe: An Introduction* (Cambridge University Press, 2007), 2 ed.