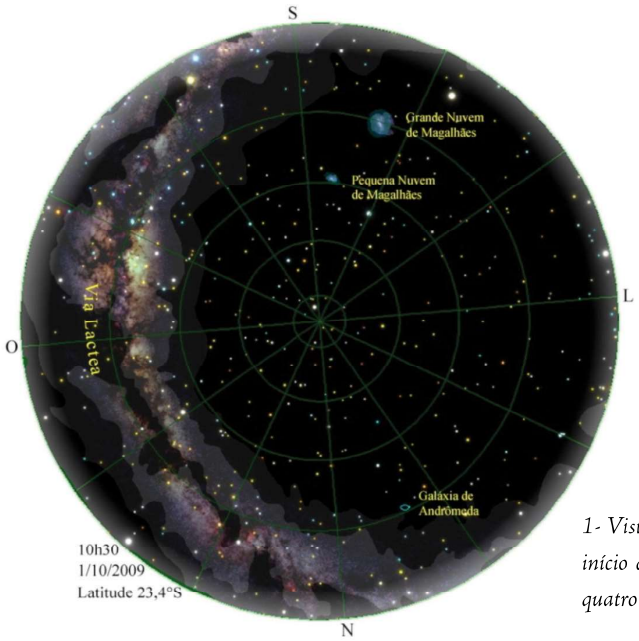
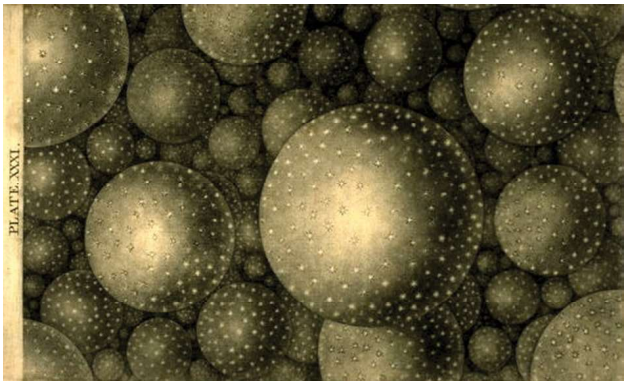
Capítulo 9

Galáxias

Gastão B. Lima Neto

9.1 Introdução: o que são galáxias
9.2 Descoberta das galáxias e da Via Láctea
9.3 Forma das galáxias
9.3.1 Galáxias Elípticas
9.3.2 Galáxias Espirais
9.4 Curvas de rotação
9.5 Distribuição em grande escala
9.5.1 Distribuição de galáxias: Grupo Local
9.5.2 Grupos Compactos
9.5.3 Aglomerados de Galáxias
9.5.4 Superaglomerados
9.5.5 Estrutura em grande escala
9.6 Galáxias peculiares: colisões galácticas
9.6.1 Galáxias ativas, radiogaláxias e quasares
9.7 Formação de galáxias
9.8 Lentes gravitacionais





2- "Universos-Ilha" imaginado por Thomas Wright e popularizado por Immanuel Kant a partir de 1755. A Via Láctea seria uma dessas esferas de estrelas.

1- Vista panorâmica do céu de São Paulo no início de outubro, quando podemos observar quatro galáxias ao mesmo tempo.

9.1 Introdução: o que são galáxias

Imagine que você esteja próximo do Trópico de Capricórnio, longe dos centros urbanos, sem poluição luminosa em uma noite sem nuvens. São cerca de 22h30 e você pode identificar quatro galáxias. A primeira é a Via Láctea, a galáxia na qual nos encontramos, estendendo-se como um grande círculo cortando a esfera celeste. Sua aparência é nebulosa e irregular, com regiões mais claras e regiões mais escuras.

As duas outras galáxias aparecem muito menores no céu: são as Nuvens de Magalhães, a Pequena e a Grande. Elas são observadas aproximadamente na direção do Polo Sul Celeste como duas nebulosas que acompanham o movimento aparente diário da esfera celeste.

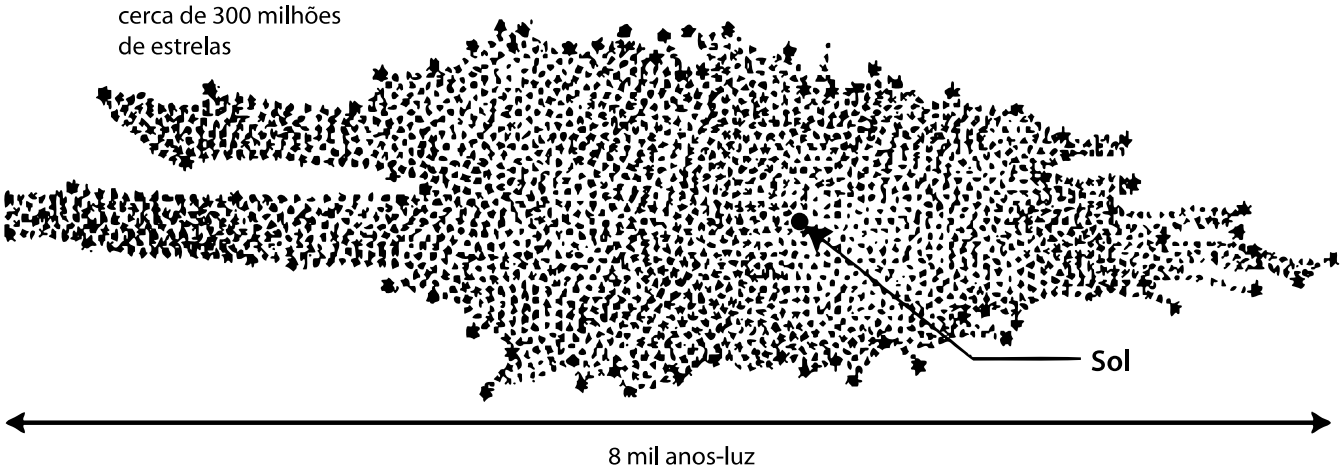
Finalmente, a quarta galáxia visível está na direção oposta, próxima do horizonte na direção entre o Norte e o Nordeste. É a galáxia da constelação de Andrômeda, difícil de ser observada a olho nu.

Essas galáxias têm em comum o aspecto nebuloso que lhes valeu o nome de nebulosas até a década de 1930. Essa aparência nebulosa ou leitosa é resultado do brilho de bilhões (e mesmo trilhões) de estrelas quando não podemos vê-las separadamente, isto é, resolve-las. Devido à dificuldade em medir grandes distâncias extragalácticas por muito tempo se cogitou que as galáxias seriam nebulosas da Via Láctea.

Galáxias são associações ligadas pela gravitação compostas de estrelas, gás e poeira interestelar, e de matéria escura. Enquanto estrelas, gás e poeira podem ser observados pela luz emitida ou absorvida, a presença de matéria escura é deduzida por métodos indiretos: por exemplo, pela observação do movimento das estrelas ou do gás em uma galáxia.

As galáxias apresentam formas e tamanhos diversos. Há galáxias com trilhões de estrelas e outras somando apenas dezenas de milhões de estrelas. Existem galáxias com forma achatada como um disco (caso da Via Láctea) e outras praticamente esféricas. Comparadas com a dimensão do Sistema Solar, as galáxias são gigantescas, tão grandes que a probabilidade de uma colisão de duas de suas estrelas é praticamente nula.

As galáxias se distribuem pelo Universo como ilhas em um imenso oceano, formando em geral "arquipélagos", ou seja, grupos reunindo de alguns poucos objetos a milhares deles. Vivemos em um universo de galáxias.



3- Mapa da Via Láctea, com a posição do Sol próxima do centro Galáctico, feito por William e Carolina Herschel em 1785.

9.2 Descoberta das galáxias e da Via Láctea

As galáxias tiveram sua natureza reconhecida apenas nos anos 20 do século passado. Até então, eram identificadas apenas como "nebulosas" e suas dimensões, entre outras características, eram ignoradas. Poucos objetos de aparência difusa eram conhecidos na Antiguidade e o primeiro registro documentado da galáxia de Andrômeda foi feita em 964 pelo astrônomo persa Abd-al-Rahman al-Sufi (903-986) em seu "Tratado sobre as estrelas fixas". A Grande Nuvem de Magalhães também é mencionada por al-Sufi, que a descreve como uma "nuvem" (chamada por ele de al-Bakr) visível no sul da península arábica.

Com a introdução do telescópio para fins astronômicos por Galileu, em 1609, as nebulosas começam a ser descobertas em número cada vez maior. O próprio Galileu foi o primeiro a reconhecer que a Via Láctea é composta por um vasto número de estrelas, a maior parte deles aparentemente fracas, que resolveu com seu pequeno telescópio. Em 1612, em seguida às primeiras observações de Galileu, o astrônomo alemão Simon Mayr (1573-1624) redescobriu a nebulosa de Andrômeda com o uso de telescópio. Em 1716 o astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742) fez uma revisão das observações e descobertas então recentes, discutindo a misteriosa natureza das "manchas luminosas e nebulosas" do céu.

Na metade do século 18, o astrônomo inglês Thomas Wright (1711-1786) sugeriu que as estrelas na Via Láctea se distribuem como uma casca esférica e que as misteriosas nebulosas seriam sistemas semelhantes à Via Láctea. Essa ideia foi abraçada pelo filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) que, em 1755, discutiu a ideia de "universos-ilha" para descrever sistemas como a Via Láctea.

As galáxias eram então confundidas com as nebulosas (gás interestelar que brilha graças à luz das estrelas próximas) presentes nos catálogos do francês Charles Messier e do inglês (nascido na Alemanha) William Herschel elaborados no século 18, onde eram identificadas algumas "nebulosas". William Herschel (1738-1822) junto com sua irmã Carolina, fez o primeiro mapa da Via Láctea baseado em contagens de estrelas.

Durante a década de 1840, William Parson (Lord Rosse 1800-1867) construiu na Irlanda o que foi o maior telescópio do mundo por mais de meio século, com 1,83 metro de diâmetro. Com esse

4- Esquerda: desenho feito por Lord Rosse de sua observação da galáxia M51. Direita: fotografia da mesma galáxia feita no Monte Palomar.

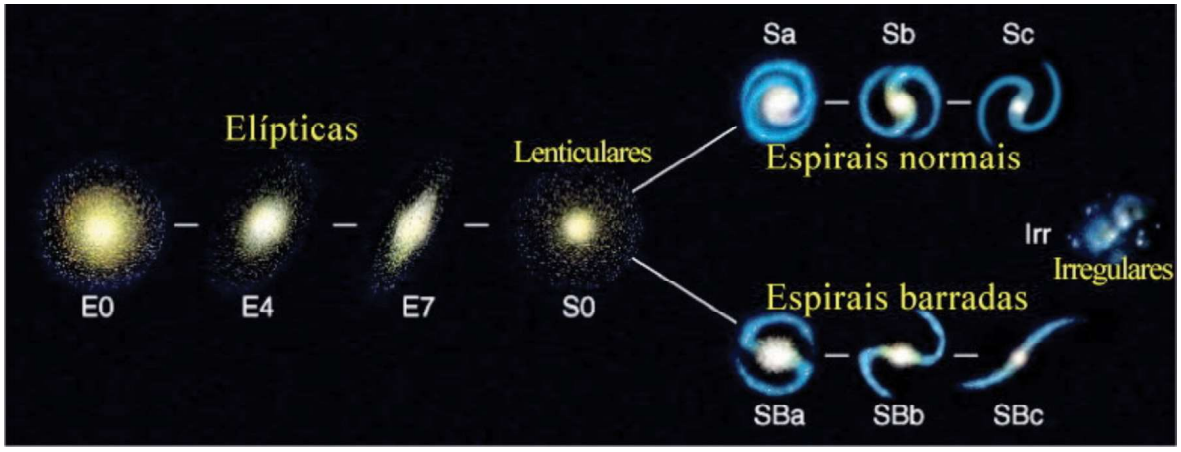
instrumento, Lord Rosse pôde distinguir os braços espirais em algumas nebulosas. Essas observações aumentaram ainda mais o mistério sobre as nebulosas, incluindo sua origem e natureza. Os braços espirais sugerem movimento circular e isso levou alguns astrônomos da época a pensar que essas estruturas seriam sistemas planetários em formação.

Em 1920, existiam duas correntes de pensamento em relação às "nebulosas". Uma, defendida pelo astrônomo norte-americano Harlow Shapley (1885-1972), propunha que a Via Láctea era muito grande, com o Sol localizado longe do centro e todas as nebulosas estariam contidas nela. A outra corrente, defendida pelo astrônomo também norte-americano Herber Curtis (1872-1942), propunha uma Via Láctea pequena, o Sol no centro e as nebulosas espirais e elípticas seriam "universos-ilhas", semelhantes à Via Láctea. Apesar de nenhuma dessas teorias estar completamente correta, esse debate é considerado por muitos astrônomos como o início da astrofísica extragaláctica moderna. O grande problema, e o que de certa forma gerou esse debate, foi a dificuldade da determinação de distâncias.

Em meados da década de 1920 o astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1989-1953) mediu a distância de algumas nebulosas mais próximas e constatou que estão realmente distantes, exteriores à Via Láctea. Para isso Hubble se baseou no trabalho da astrônoma norte-americana Henrietta Leavitt (1868-1921) quem descobriu a relação entre o período de pulsação e a magnitude absoluta das estrelas variáveis Cefeidas. Usando o telescópio recém-inaugurado de Monte Wilson, com 2,5 metros de diâmetro, Hubble resolveu estrelas Cefeidas nas galáxias vizinhas e mediu seus períodos de pulsação para determinar suas distâncias.

Em 1929, Hubble mostrou que o Universo está em expansão e as galáxias se afastam umas das outras com velocidade proporcional à distância em que se encontram. Se as galáxias estão se afastando hoje, então, no passado estavam mais próximas. Levando esse raciocínio ao extremo, chega-se à hipótese do Big Bang, situação em que toda a matéria estaria concentrada em um ponto, há cerca de 14 bilhões de anos.

Hoje ainda existem várias questões em aberto na astrofísica de galáxias, principalmente ligadas à formação e evolução desses objetos.



5- O sistema de classificação de Hubble se aplica às galáxias brilhantes e próximas (até cerca de seis bilhões de anos-luz), pois eram estas as galáxias que podiam ser observadas até a década de 1930.

9.3 Forma das galáxias

As galáxias apresentam formas, cores e tamanhos variados. Um dos grandes feitos da astronomia extragaláctica, nas décadas de 1920 e 1930, foi a concepção por Edwin Hubble de um sistema de classificação galáctica baseado na morfologia. O objetivo de um sistema de classificação é ordenar a informação para melhor compreender a natureza dos objetos de estudo.

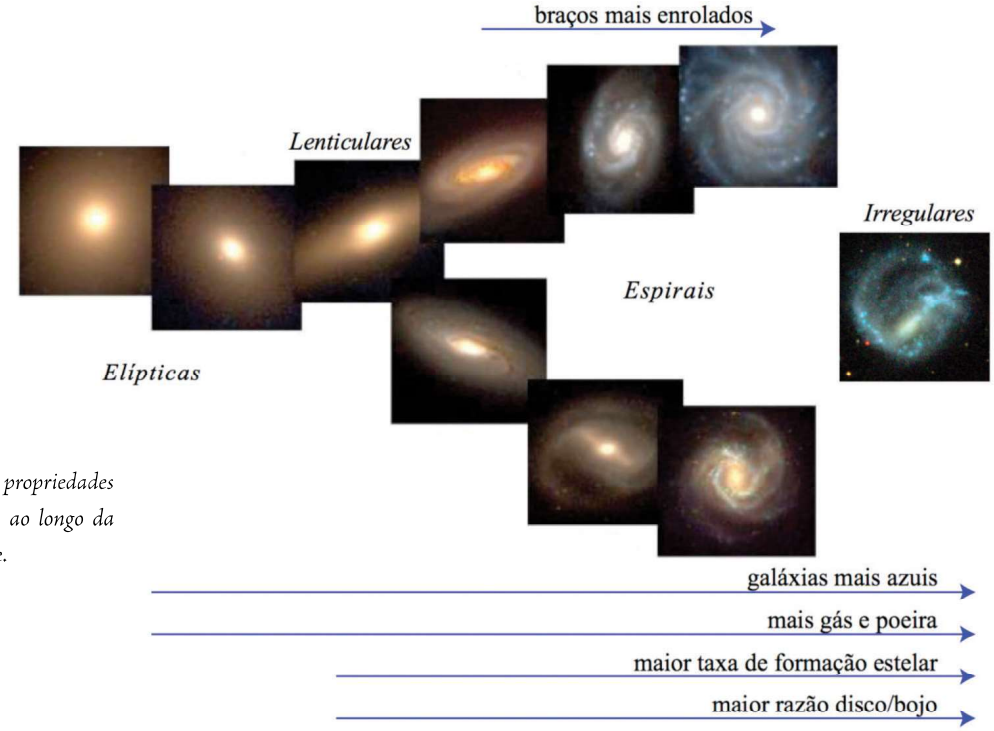
O primeiro sistema de classificação morfológico de nebulosas é de 1908, proposto pelo astrônomo alemão Maximilian Wolf (1863-1932). Posteriormente, Joseph B. Reynolds simplificou esse sistema definindo apenas sete classes morfológicas relacionadas à importância da concentração central de luz em relação à extensão da nebulosa. Ambos os sistemas não distinguiam galáxias de nebulosas de nossa própria Galáxia.

Edwin Hubble foi o primeiro a propor um sistema de classificação exclusivo para galáxias em 1926 e aperfeiçoado em 1936 em seu famoso livro *The realm of nebulae*. O sistema de classificação de Hubble, usado até agora, divide as galáxias em quatro tipos morfológicos: elípticas, espirais (normais e barradas), lenticulares e irregulares. Devido à sua representação gráfica, esta classificação é conhecida como sistema de diapasão.

Em analogia com a nomenclatura da classificação estelar, as galáxias elípticas e lenticulares foram chamadas por Hubble de "tipo precoce" (em inglês, *early type*) enquanto que as galáxias espirais e irregulares são de "tipo tardio" (em inglês *late type*). Essa nomenclatura foi inicialmente relacionada por alguns astrônomos como sendo uma sequência evolutiva: as galáxias se formariam com morfologia elíptica e evoluiriam para morfologia espiral e irregular. Mas essa evolução não ocorre, ainda que a terminologia "precoce/tardio" continue a ser usada.

As galáxias elípticas têm aparência de um esferoide (em geral como uma esfera achatada) sem estruturas notáveis, algo como uma enorme bola de estrelas, mas tão distante que não podemos distinguir as estrelas individualmente. As elípticas são classificadas segundo o grau de achatamento: as galáxias com aparência esférica são as E0 e as galáxias mais achatadas, com forma semelhante a um charuto, são as E7. Galáxias elípticas mais achatadas que E7 são dinamicamente instáveis e extremamente raras.

Galáxias espirais são muito mais achatadas que as elípticas, com a maior parte das estrelas distribuídas como em um disco fino. Na região central as estrelas estão em um arranjo mais esférico,



6- Variação das propriedades globais das galáxias ao longo da sequência de Hubble.

geralmente semelhante a uma minigaláxia elíptica; esse é o bojo da galáxia. No disco das galáxias espirais, nota-se a presença de uma estrutura que lembra braços saindo do bojo. São esses braços que desenham uma espiral no disco, responsáveis pelo nome deste tipo de galáxia.

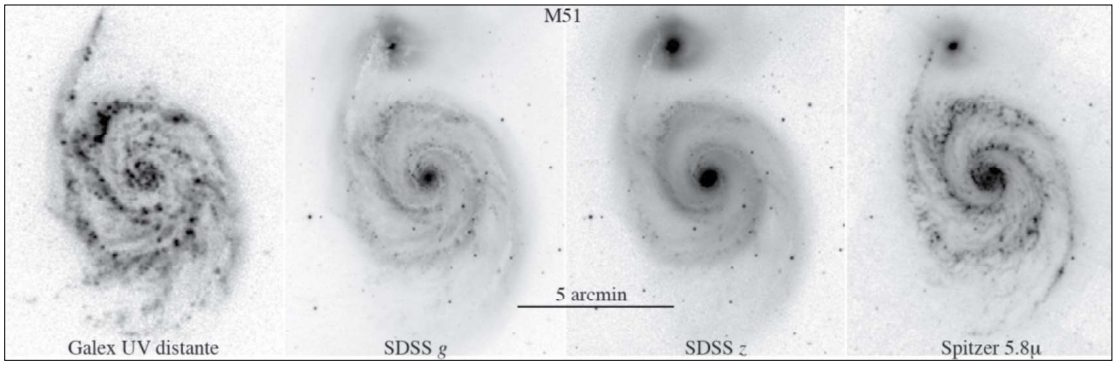
As galáxias espirais são subdivididas em duas classes: as normais e as barradas (estas ganham um B no nome). Nas galáxias espirais barradas, os braços espirais começam no final de uma distribuição de estrelas que se assemelha a uma barra no centro da galáxia. Nas espirais normais, os braços começam próximos da região central, o bojo. O sistema de classificação é tal que as Sa ou SBa são as galáxias com os braços mais enrolados e com os bojos mais brilhantes. As Sc ou SBc são aquelas com os braços mais abertos e com os menores bojos.

Existe uma classe intermediaria de galáxias, que apresentam um pequeno disco e um grande bojo, mas não mostram evidência de braços. São as galáxias chamadas lenticulares. Elas parecem uma galáxia elíptica imersa em um disco estelar. As galáxias lenticulares também têm a mesma cor das elípticas, razão de serem facilmente confundidas com essas, especialmente quando distantes.

Por fim, as galáxias que não se enquadram em nenhuma dos três tipos descritos são classificadas como irregulares. Essas galáxias têm formas arbitrárias, sem apresentar um eixo de simetria. As Nuvens de Magalhães, observadas do hemisfério Sul, são exemplos de galáxias irregulares, vizinhas à Via Láctea.

Embora a classificação morfológica de Hubble tenha sido vista erroneamente como uma sequência evolutiva das galáxias, é muito importante, pois várias propriedades físicas se alteram sistematicamente ao longo desse diagrama:

- Razão "massa (luminosidade) do bojo/massa do disco" – as elípticas são praticamente apenas bojo (discos muito fracos eventualmente são detectados); as galáxias irregulares não contêm bojo;
- Razão "massa do gás/massa das estrelas" – essa razão é pequena nas elípticas e maior nas espirais e irregulares;
- Variação da cor – as elípticas e lenticulares são mais avermelhadas enquanto as espirais e irregulares são mais azuladas;
- Taxa de formação estelar – aumenta das elípticas para as irregulares.



7- Mudança da aparência de uma galáxia quando vista em diferentes filtros espectrais. Da esquerda para a direita: ultravioleta, visível, infravermelho próximo, infravermelho médio. Note que no ultravioleta, a galáxia anã acima de M51 não aparece, pois não tem estrelas massivas.

Propriedade	Espirais	Elípticas/Lenticulares	Irregulares
Massa (sol)	$10^9 – 10^{12}$	$10^7 – 10^{13}$	$10^8 – 10^{11}$
Diâmetro (kpc)	5 – 30	1 – 1000	1 – 10
Luminosidade (sol)	$10^8 – 10^{11}$	$10^6 – 10^{12}$	$10^7 – 10^9$
Pop. Estelar	jovem e velha	velha	jovem
Tipo Espectral	A à K	G à K	A à F
Gás	Bastante	muito pouco	bastante
Poeira	Bastante	muito pouca	depende
Cor	azulada no disco amarelada/vermelha no bojo	amarelada/vermelha	azulada

Tabela 1- Resumo das propriedades das galáxias da sequência de Hubble.

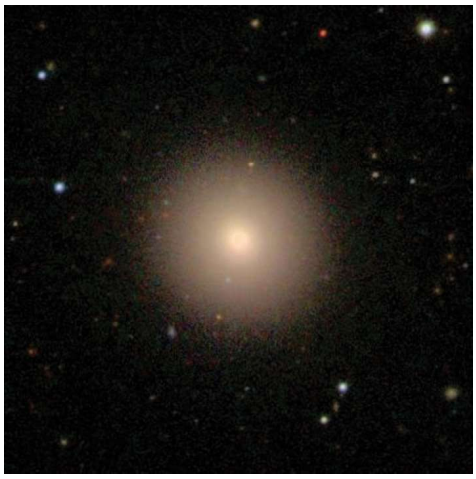
Em nossa vizinhança, dentro de 1 ou 2 bilhões de anos-luz, cerca de 70% das galáxias brilhantes são espirais: 10% são elípticas, 14% lenticulares e 6% irregulares. Essa distribuição morfológica depende de vários fatores como densidade do ambiente onde contamos as galáxias, distância das galáxias e banda fotométrica em que as observamos. Por exemplo, a grandes distâncias (além de 10 bilhões de anos-luz) a fração de galáxias irregulares é muito maior, enquanto nos grandes grupos de galáxias encontramos muitas elípticas e poucas espirais.

Essas porcentagens não levam em conta as galáxias anãs, dificilmente observadas a grandes distâncias. Considerando as anãs, concluímos que são as mais abundantes no Universo.

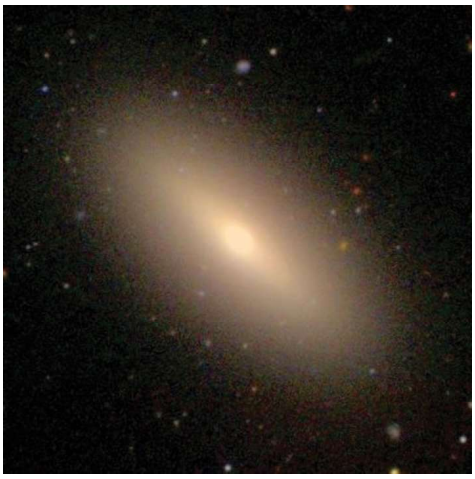
O sistema de classificação inicial de Hubble evoluiu com o tempo e novas propostas surgiram. O sistema proposto pelo astrônomo francês Gérard de Vaucouleurs (1918-1975) em 1959 é um exemplo disso, levando em conta a presença de anéis, barras e braços espirais.

A classificação morfológica esbarra em várias dificuldades. Não existe um método analítico, objetivo e automático para classificação morfológica, apesar dos avanços desde os anos 1990. Geralmente, a classificação morfológica é feita visualmente pelo pesquisador ou então métodos indiretos são utilizados como, por exemplo, deduzir a morfologia de uma galáxia pelo estudo da variação radial do brilho, indo do centro para a borda.

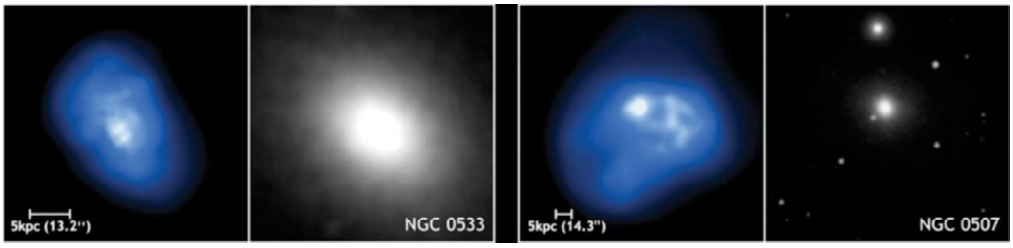
A morfologia das galáxias também depende da banda espectral em que é observada: uma galáxia que pareça, digamos, espiral Sb na banda V poderá parecer como irregular quando observada no ultravioleta. É que no ultravioleta observamos estrelas jovens de alta massa que emitem muita radiação. No infravermelho médio, observamos a emissão da poeira, aquecida pela luz das estrelas e/ou do núcleo da galáxia.



8- Galáxia E0, NGC 5198 (imagem do SDSS).



Galáxia E6, NGC 4564 (imagem do SDSS).



9- Imagens feitas em raios X (satélite Chandra, em tons de azul) e no óptico (Digital Sky Survey, DSS, em tons de cinza) de galáxias elípticas. No caso de NGC 0507 (à direita) a imagem de raios X é muito mais extensa que a imagem óptica.

Devido à diminuição do brilho superficial e do diâmetro aparente em grandes distâncias, é difícil distinguir claramente tipos morfológicos como, por exemplo, uma lenticular de uma Sa ou elíptica.

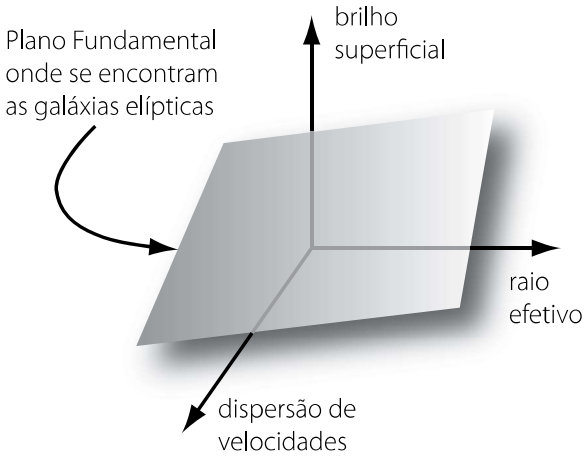
9.3.1 Galáxias Elípticas

Galáxias elípticas são objetos com distribuição regular de luminosidade, sem estruturas óbvias e com população estelar predominantemente velha. Essas galáxias contêm pouco gás e poeira no meio interestelar. As maiores galáxias luminosas do Universo, que podem ser dez ou mais vezes luminosas que a Via Láctea, são elípticas. Em contraposição, muitas das galáxias anãs também são elípticas.

O achatamento observado, principalmente nas elípticas de maior massa, não é devido à sua rotação, mas sim à anisotropia da distribuição de velocidade das estrelas que as integram: na direção do eixo maior as estrelas se movem com maior velocidade (em média) que ao longo do eixo menor. As estrelas em uma grande galáxia elíptica se movem em direções aleatórias, situação muito diferente das galáxias espirais, onde as estrelas do disco se movem principalmente de maneira ordenada ao redor do centro galáctico.

Existem galáxias elípticas quase tão pequenas quanto os maiores aglomerados globulares da Via Láctea, com galáxias elípticas mais de dez vezes maiores que a nossa galáxia. A massa das galáxias elípticas é deduzida a partir de observações do movimento das estrelas, medido pelo efeito Doppler de linhas espectrais. Para as maiores galáxias, com mais de um trilhão de vezes a massa do Sol, observações da emissão de raios X proveniente do gás muito quente (aproximadamente um milhão de graus) distribuído em um halo em torno da galáxia, permitem avaliar a sua massa.

As galáxias elípticas apresentam em geral uma população estelar velha. Para a grande maioria, o último evento importante de formação estelar se deu há mais de dez bilhões de anos. Isto é o



10- Plano fundamental das galáxias elípticas.

que dá o tom avermelhado nestas galáxias quando temos uma imagem feita em cores verdadeiras (isto é, as cores que veríamos).

As galáxias elípticas apresentam certas relações entre seus parâmetros fundamentais – que caracterizam sua luminosidade, a velocidade das estrelas, como seu brilho varia do centro para a borda da galáxia – chamadas relações de escala. Essas relações, além de úteis para determinação da distância de galáxias elípticas, dão importantes pistas sobre os processos de formação e evolução galácticos.

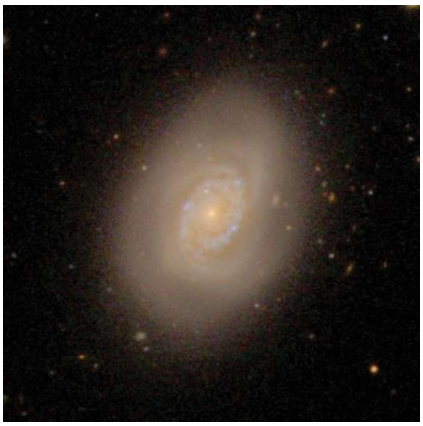
Os astrônomos norte-americanos Sandra Faber e Robert Jackson descobriram em 1976 que a luminosidade total das galáxias elípticas se correlaciona com a dispersão central (centro da galáxia) de velocidade, seguindo uma relação em que a luminosidade é proporcional à velocidade típica das estrelas na galáxia elevada à quarta potência. Essa é uma relação amplamente utilizada na determinação de distâncias uma vez que a medida da dispersão de velocidades não depende da distância do objeto.

Outra relação importante é a chamada relação proposta pelo astrônomo norte-americano John Kormendy entre o raio efetivo (o raio dentro do qual observamos a metade da luminosidade total da galáxia) e o brilho superficial. A relação dita de Kormendy é, na realidade, a projeção de uma relação mais importante conhecida como Plano Fundamental das Galáxias Elípticas, descoberta independentemente em 1987 por dois grupos de astrônomos. Quando definimos um espaço onde as coordenadas são o raio efetivo, o brilho superficial médio e a dispersão de velocidades central, as galáxias elípticas não preenchem todo o espaço, mas estão confinadas em uma fina superfície, o Plano Fundamental. A figura 10 ilustra o Plano Fundamental das galáxias elípticas.

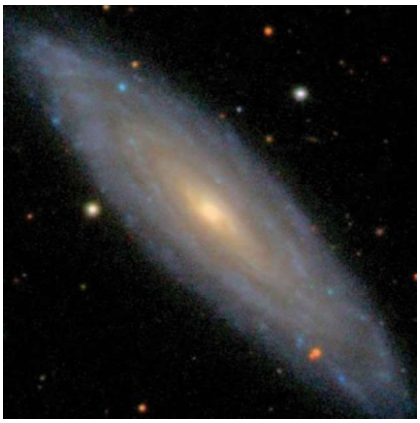
Esta relação é consequência destas galáxias estarem em equilíbrio dinâmico e ela nos dá informações sobre a variação da quantidade de matéria escura nestes objetos.

9.3.2 Galáxias Espirais

Galáxias espirais, como o nome sugere, têm grande parte de sua luminosidade distribuída segundo uma forma espiral, como braços saindo da região central. A Via Láctea, como a galáxia de Andrômeda, são exemplos de espirais. Em linhas gerais, as galáxias espirais têm parte da matéria, principalmente estrelas e gás e poeira, distribuída na forma de um disco achatado, onde se encontram os

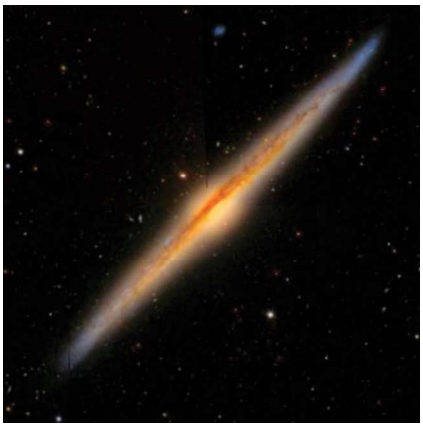


NGC 4580, espiral de tipo Sa

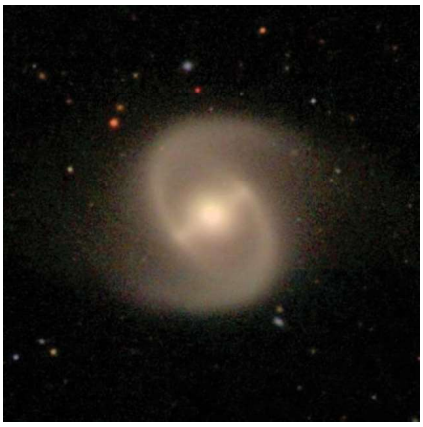


NGC 4185, espiral de tipo Sb

NGC3180, Espiral de tipo Sc



NGC4565, Espiral Sb, vista de perfil



NGC 4440, Espiral barrada de tipo SBa

M 95, Espiral barrada de tipo SBb

12- Tipos morfológicos de galáxias.

braços espirais. Além disso, existem duas componentes esferoidais superpostas ao disco: um bojo central relativamente denso e um halo extenso, cujos centros coincidem com o centro do disco.

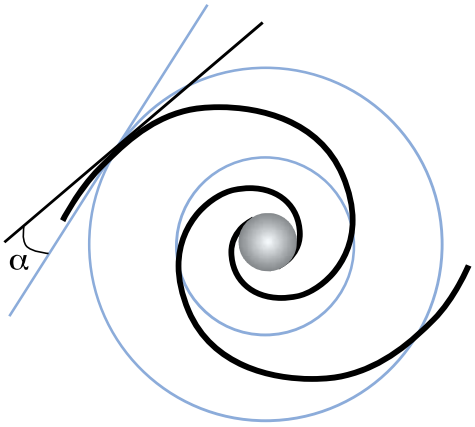
Estima-se que cerca de um terço das galáxias espirais têm uma barra bem visível que passa pela região central. A barra é uma estrutura composta do mesmo material do disco (principalmente estrelas e gás) que cruza o bojo da galáxia. Tem esse nome devido a sua aparência vista de face, parecendo uma barra no meio da galáxia. Nas galáxias vistas de perfil é mais difícil detectar uma barra, mas podemos deduzir sua presença quando a forma do bojo lembra um amendoim.

Os braços podem iniciar no bojo ou nas extremidades da barra; em galáxias que têm distribuição em forma de anel nas regiões centrais, os braços aparecem a partir desse anel. A luminosidade das galáxias espirais está na faixa entre 100 milhões e 100 bilhões de vezes a luminosidade solar.

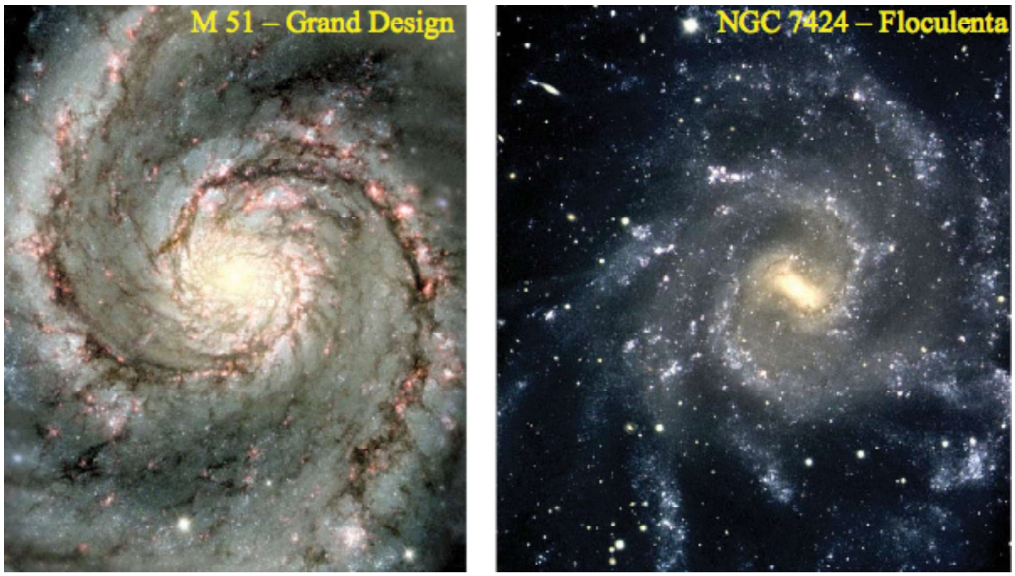
As galáxias espirais são subdivididas em quatro tipos (a, b, c, d) e tipos intermediários como ab, bc, cd. Uma forma de determinar o tipo da galáxia espiral é medir a razão de luminosidade do bojo sobre a luminosidade do disco. Esta quantidade chamada "razão bojo/disco" diminui das Sa para as Sd:

$Sa > 0{,}50$; $Sb \approx 0{,}45$; $Sbc \approx 0{,}32$; $Sc \approx 0{,}15$; $Sd \approx 0{,}10$

Em outras palavras, em uma galáxia Sd o bojo tem apenas 10% da luminosidade do disco enquanto que em uma Sa este número atinge 50% ou mais.



13- Como é medido o ângulo de abertura dos braços espirais de uma galáxia. Este ângulo pode, em princípio, ser pedido em qualquer ponto do braço.



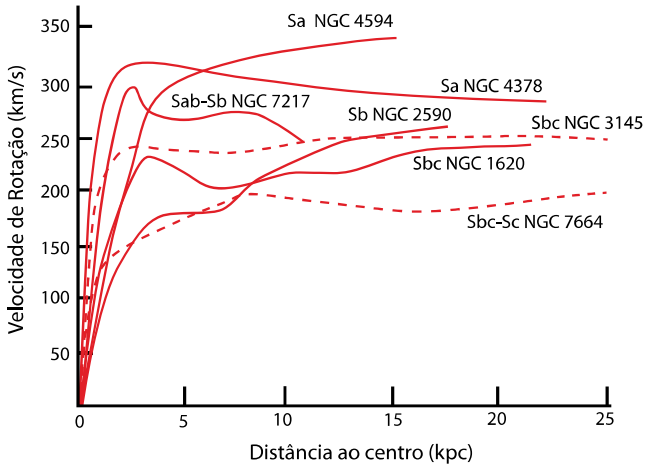
14- Exemplos de galáxias Grand Design e Floculenta.

Outra forma de classificar as espirais é medindo o ângulo de abertura dos braços espirais. Este ângulo é formado pelo braço da galáxia e um círculo que passa a mesma distância radial, como mostra a figura 13.

O ângulo de abertura aumenta ao longo da sequência de Hubble: Sa ≈ 7°, Sb ≈ 13°, Sc ≈ 17°, aproximadamente.

Os braços das galáxias espirais podem ter um desenho muito bem definido e simétrico. As galáxias que exibem braços assim são chamadas *Grand Design*. Apenas cerca de 10% das espirais são *Grand Design*. Em contraposição, existem galáxias com braços mal definidos, chamadas floculentas. Os casos intermediários são de galáxias com braços múltiplos ou que se bifurcam.

Como observado no capítulo anterior, os braços espirais em galáxias são perturbações que se propagam no disco galáctico mais ou menos como ondas que se propagam no mar. Os braços mais bem definidos devem ser resultado de perturbações mais intensas, que fornecem energia para os braços. De fato, as galáxias *Grand Design* apresentam uma forte tendência a estar próximas de outra galáxia (em geral menor) que seria a responsável pela perturbação e formação de braços bem definidos.



15- Curva de rotação para diversas galáxias. Note que a velocidade aumenta rapidamente próximo do centro (distância ao centro pequena) e, depois, as curvas se mantêm mais ou menos planas.

9.4 Curvas de rotação

Galáxias espirais têm uma rotação importante, com praticamente todas as estrelas do disco girando na mesma direção. O Sol, por exemplo, orbita o centro Galáctico a cerca de 200 km/s, completando uma volta em aproximadamente 250 milhões de anos.

Mas galáxias não giram como um disco de DVD, isto é, como um corpo rígido. O disco galáctico tem uma rotação chamada diferencial: a distâncias variadas do centro o tempo que uma estrela leva para completar uma volta completa é diferente. O gráfico que relaciona a posição de uma estrela e sua velocidade de rotação em torno do centro galáctico é chamado Curva de Rotação (figura15).

As curvas de rotação permitem aos astrônomos determinar a massa de uma galáxia. Por exemplo, nas partes externas das galáxias, onde a curva de rotação é plana, indica que a massa aumenta com a distância ao centro de forma linear.

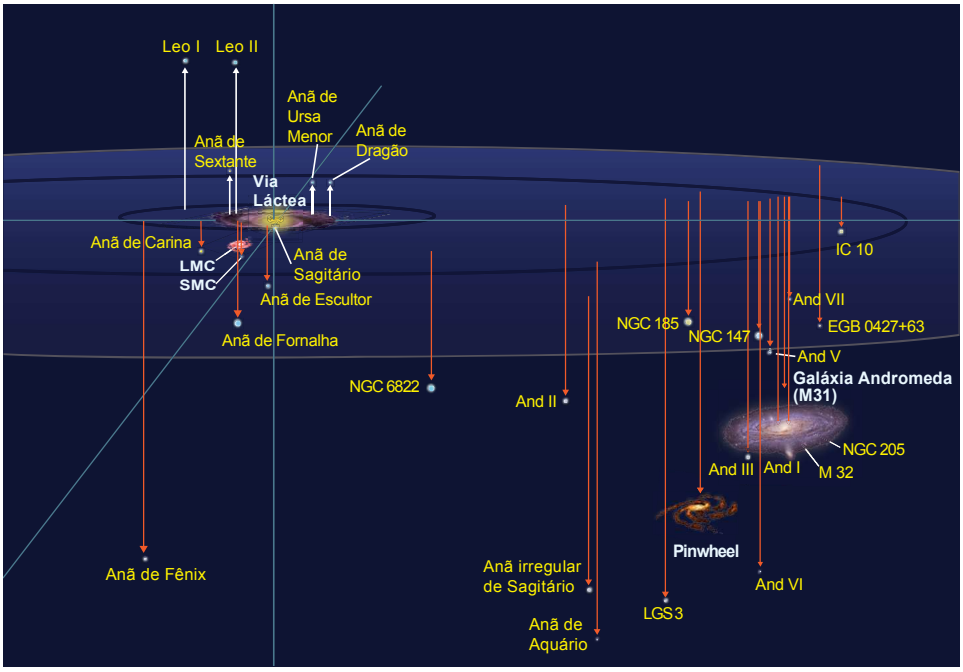
Por outro lado, como já visto, a luminosidade diminui para fora das galáxias. E aqui aparece uma contradição: enquanto a quantidade de massa aumenta, a quantidade de estrelas diminui. Isso indica que existe uma grande quantidade de matéria nas galáxias que não podemos observar, a matéria escura. Na realidade, a maior parte da massa das galáxias está nessa forma misteriosa e ainda desconhecida de matéria escura.

9.5 Distribuição em grande escala

A distribuição de matéria no Universo é uma questão posta desde a Antiguidade, pois está diretamente relacionada às questões cosmológicas: como surgiu o Universo, como se dá sua evolução, onde estamos.

Em 1931, o engenheiro norte-americano Karl Jansky (1905-1950) abriu uma nova janela com a descoberta de emissão rádio extragaláctica. Dois anos mais tarde, o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974) deduziu a existência da matéria em grande quantidade no aglomerado de galáxias na constelação de Coma Berenice.

No final dos anos 1970, foi descoberta grande quantidade de matéria escura nos halos de galáxias espirais. Essa descoberta mostra que a matéria "convencional" é uma pequena fração de toda a maté-



16- Representação tridimensional do Grupo Local de galáxias. Note como o Grupo Local tem duas concentrações de galáxias, uma em volta de M31 e outra em torno da nossa galáxia.

ria do Universo. Em 1986 foi feito o primeiro mapa tridimensional de uma grande fatia do Universo, mostrando que em grande escala as galáxias se organizam em filamentos com pelo menos dezenas de milhões de parsecs.

A observação de supernovas extragalácticas permitiu, em 1998, constatar que o Universo está em expansão acelerada. Essa aceleração é interpretada como efeito da pressão negativa da também desconhecida energia escura, responsável por cerca de 70% de toda a energia do Universo. Esse assunto será discutido no próximo capítulo.

O estudo da distribuição de matéria no Universo se dá principalmente pela análise da distribuição de galáxias em grande escala. Mais recentemente, a partir da década de 1990, outras técnicas surgiram, baseadas em outros tipos de observação ou objetos: as irregularidades da radiação cósmica de fundo, lentes gravitacionais, procura de grupos de galáxias usando raios X ou micro-ondas etc.

As galáxias tendem a se agrupar e podemos supor que toda a matéria do universo (incluindo a matéria escura) se comporte assim. Se as galáxias forem um bom traçador de toda a matéria, podemos estudar a estrutura do Universo pelas observações de galáxias.

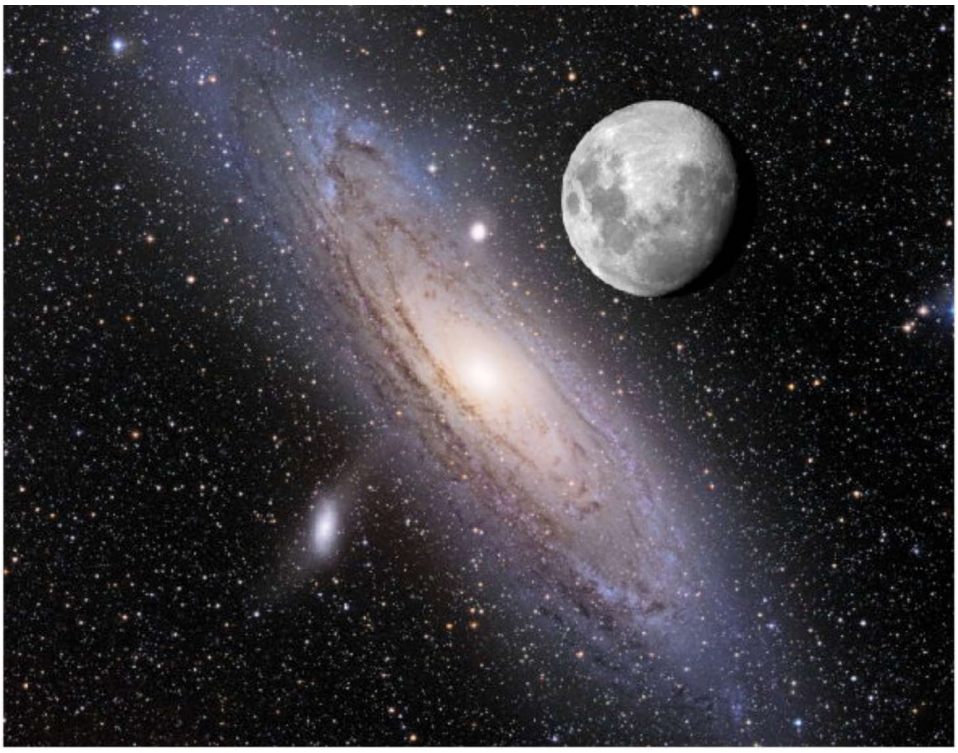
9.5.1 Distribuição de galáxias: Grupo Local

A maioria das galáxias no Universo vive em grupos e a Via Láctea é parte dessa maioria. A Via Láctea se encontra em um modesto grupo que conta com cerca de 40 galáxias conhecidas, em uma região com 8 milhões de anos-luz de diâmetro.

O Grupo Local contém duas galáxias espirais gigantes, a Via Láctea e a galáxia de Andrômeda, também conhecida como M31 (objeto de número 31 no catálogo de Charles Messier). Elas são as maiores galáxias do Grupo Local. Em terceiro lugar vem a galáxia M33, galáxia do Triângulo também conhecida como Catavento devido a aparência de seus braços.

Praticamente toda a massa do Grupo Local, estimada em cerca de 2×10^{12} massas solares, está concentrada nestas duas grandes espirais. M33 tem menos de um décimo da massa da Via Láctea e se somarmos a massa de todas as outras 38 galáxias conhecidas não chegamos nem a 10% da massa do Grupo Local.

O Grupo Local se divide em dois pequenos subgrupos: o da Via Láctea e o de M31. A maioria das galáxias está ligada a uma ou outra espiral gigante. A galáxia espiral do triângulo é satélite de M31.



15- Esquerda: Galáxia de Andrômeda. Uma imagem da Lua foi colocada ao lado de M31 para dar uma ideia do seu tamanho aparente no céu. A olho nu, em uma noite muito favorável, pode-se observar a parte central do bojo como uma fraca nebulosidade no céu. Direita: galáxia do triangulo, M33.

16- Esquerda: Imagem do telescópio Espacial Hubble da galáxia anã irregular de Sagitário (SagDIG), localizada a 3,5 milhões de anos-luz, descoberta em 1977. Direita: Galáxia anã de Cetus (constelação da Baleia), a 2,8 milhões de anos-luz, descoberta em 1999.

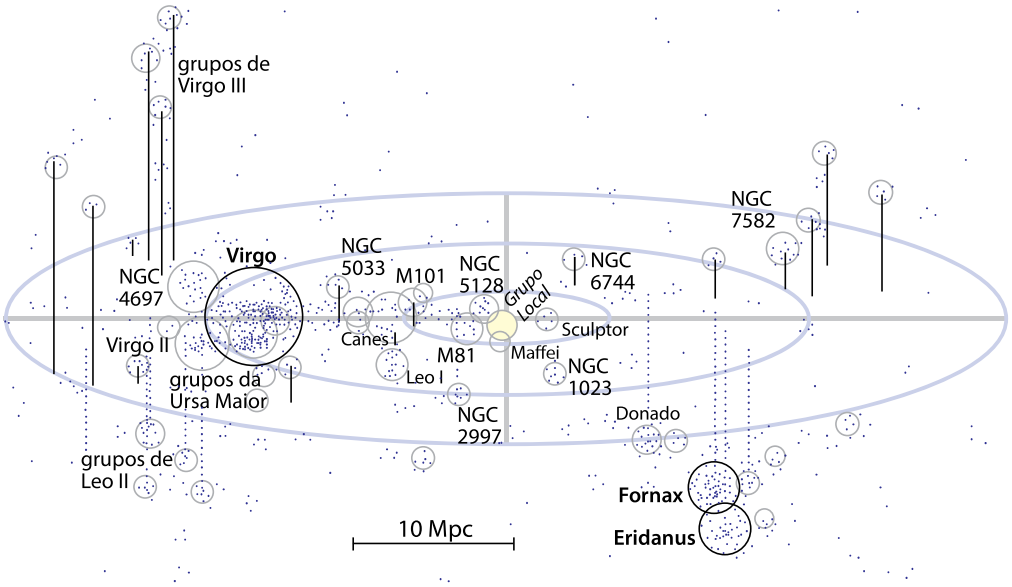
17- Esquerda: Imagem do HST do Sexteto de Seyfert. Apesar do nome, há apenas quatro galáxias brilhantes neste grupo compacto, sendo que uma está longe, atrás do grupo e outra na realidade é matéria arrancada devido a uma colisão de galáxias. Direita: imagem em cores "verdadeiras" no infravermelho feita pelo satélite Spitzer do grupo Quinteto de Stefan. Este grupo compacto tem quatro galáxias, a quinta é uma galáxia que esta longe, na frente do grupo.

18- Esquerda: Aglomerado de Coma, a cerca de 330 milhões de anos-luz, contém milhares de galáxias brilhantes. No centro vemos duas galáxias elípticas gigantes, cada uma delas mais de dez vezes mais luminosa que a Via Láctea. A estrela brilhante que aparece nesta imagem é da nossa galáxia. Direita: aglomerado muito rico Abell 1689, a 2,5 bilhões de anos-luz. Este é um dos aglomerados de maior massa conhecido.

O número de galáxias descobertas no Grupo Local tem aumentado desde a primeira década do século 21. Até 1944, apenas 11 galáxias eram conhecidas e, desde 1999, outras dez foram encontradas. Possivelmente ainda existem muito mais galáxias anãs discretamente passeando pelo Grupo Local. Algumas galáxias do Grupo Local, especialmente as que estão sendo descobertas nos últimos anos, são tão tênues que mal é possível distingui-las das estrelas da Via Láctea.

9.5.2 Grupos Compactos

Nem todos os grupos são como o Grupo Local. Alguns são extremamente compactos, onde as galáxias quase se acotovelam. Esses grupos compactos são relativamente raros, mas muito interessantes pois fenômenos ligados a interações fortes entre as galáxias podem ser observados.



19- O Superaglomerado local, com o Grupo Local no centro e o aglomerado de Virgo a esquerda.

9.5.3 Aglomerados de Galáxias

Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas em (ou quase) equilíbrio no Universo. Dentro de um volume com diâmetro de 20 milhões de anos-luz podemos encontrar milhares de galáxias. A massa total de um aglomerado varia entre 10^{14} e 10^{15} massas solares. Esses interessantes objetos são relativamente raros, apenas cerca de 7% das galáxias pertencem a aglomerados.

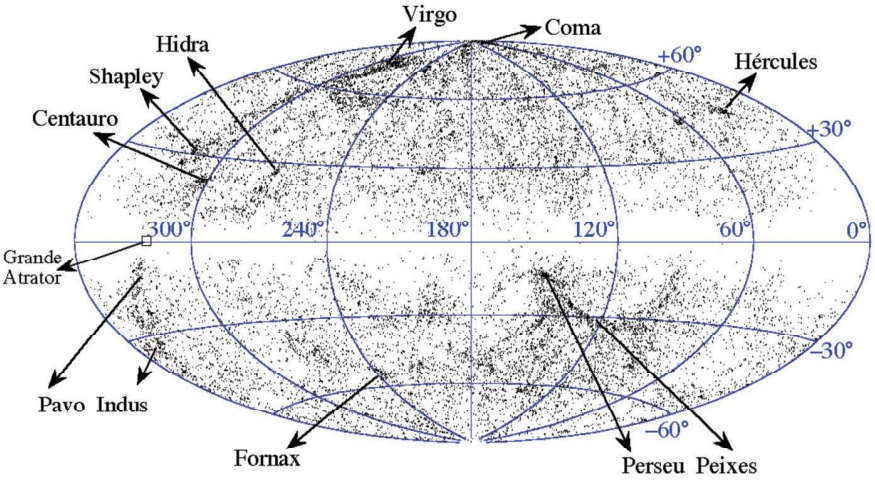
Dois aglomerados de galáxias foram percebidos ainda no século 18: o aglomerado de Virgem, pelo astrônomo francês Charles Messier (1730-1817) e o Aglomerado de Coma por William Herschel. Isso não ocorreu por acaso, pois o aglomerado de Virgem é o mais próximo, a 55 milhões de anos-luz, enquanto o de Coma é o mais rico dentro do volume que chamamos de universo local (volume encerrado em um raio de um bilhão de anos-luz). Entre 1958 e 1989, o astrônomo norte-americano George Abell (1927-1983) e colaboradores fizeram um catálogo com mais de quatro mil aglomerados ricos de galáxias, que ainda hoje é muito utilizado.

Aglomerados de galáxias reúnem três componentes básicas. A mais conhecida e, historicamente a primeira observada, são as próprias galáxias do aglomerado. Ao contrário de ambientes mais rarefeitos, fora dos grupos, a maioria das galáxias em aglomerados são elípticas e lenticulares, ou seja, galáxias avermelhadas que não produzem mais estrelas. A soma da massa de todas as galáxias não passa de 2 ou 3% da massa total do aglomerado.

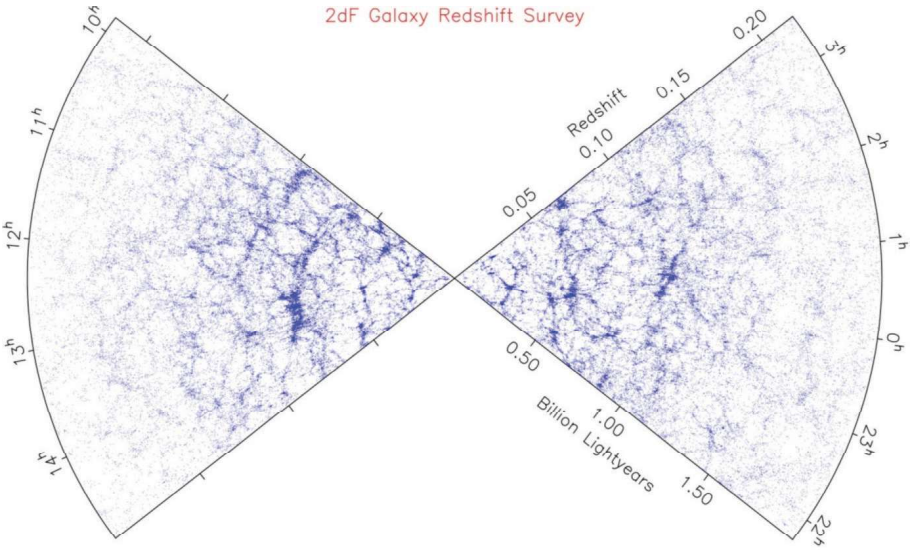
Há mais coisas em aglomerados que nossos olhos podem ver. Na final da década de 1960 foi descoberta uma grande quantidade de gás entre as galáxias dos aglomerados. Esse gás, quente e muito rarefeito, emite raios X. Todo este gás intra-aglomerado é responsável por 12 a 15% da massa total dos aglomerados.

A temperatura do gás intra-aglomerado é superior à do núcleo do Sol, variando tipicamente entre 20 a 120 milhões de graus. Já a densidade do gás é da ordem de um átomo por litro. Para se ter uma ideia, a atmosfera na cidade de São Paulo (750 metros acima do nível do mar) tem 2×1.022 moléculas por litro, e entre as estrelas, na vizinhança solar, a densidade varia entre 10.000 e 100.000 átomos por litro.

Se toda a massa da matéria "normal" em aglomerados for somada, isto é a matéria composta por prótons e nêutrons, notamos que a conta não fecha e falta ainda uma terceira componente. Essa com-



20- Distribuição no céu das 23 mil galáxias mais brilhantes. Podemos notar a inomogeneidade da distribuição. As estruturas mais proeminentes estão marcadas na figura. Na faixa horizontal, que corta a esfera celeste em duas metades, praticamente não há galáxias observadas. Essa faixa corresponde à região obscurecida pela Via Láctea, que dificulta muito a visão de objetos extragalácticos.



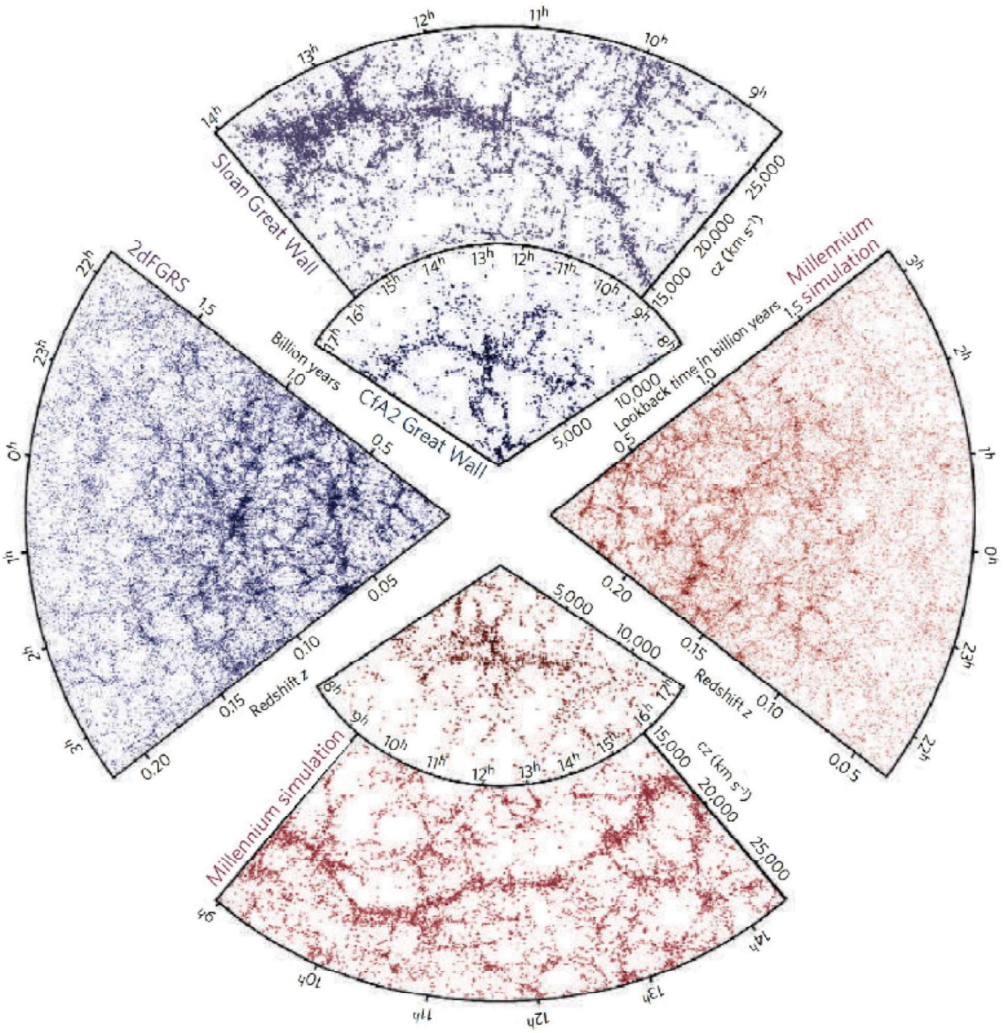
21- Distribuição de mais de 100 mil galáxias em duas fatias opostas do universo. Nós estamos no vértice central dos dois cones (Fonte: Programa Anglo-Australiano Two-Degree Field Galaxy Redshift).

ponente invisível, ou a "massa faltante" como já foi chamada no passado, foi detectada por Fritz Zwicky nos anos 1930. Ele e, posteriormente, outros astrônomos, chegaram à conclusão de que havia muito mais massa na forma de matéria escura, responsável por cerca de 85% da matéria do aglomerado.

9.5.4 Superaglomerados

Aglomerados de galáxias podem perturbar o movimento das galáxias e dos grupos de galáxias nas suas proximidades. O aglomerado de Virgem, por exemplo, atrai o Grupo Local. Por essa razão dizemos que o nosso grupo de galáxias é parte do Superaglomerado Local, dominado pelo aglomerado de Virgem e composto por várias dezenas de pequenos grupos, semelhantes ao Grupo Local.

Os superaglomerados são objetos em formação, ainda longe de uma situação de equilíbrio. Tipicamente os superaglomerados têm dimensão de 100 milhões de anos-luz e massas entre 10^{16} e 10^{17} massas solares. Alguns dos superaglomerados mais próximos são o de Perseus-Peixes, Shapley e Hidra-Centauro.



22- Comparação entre a distribuição observada (gráficos com pontos azuis) e prevista (gráficos com pontos vermelhos) de galáxias no universo. Em escalas superiores a 30 milhões de anos-luz, a semelhança destas distribuições é notável.

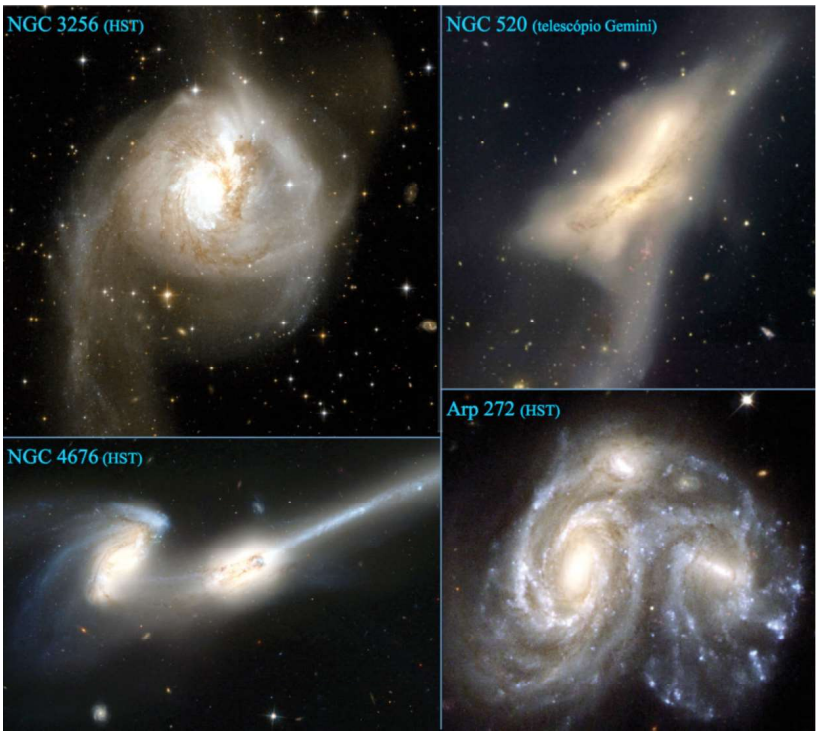
9.5.5 Estrutura em grande escala

A matéria não se distribui de forma homogênea em todas as escalas. Quando observamos o universo local, em um raio de um bilhão de anos-luz, notamos que as galáxias tendem a se agrupar. Em escalas menores estão os grupos e aglomerados de galáxias e, em escalas maiores, os superaglomerados e os filamentos cósmicos, também chamados de "muros". Os maiores muros conhecidos têm até 700 milhões de anos-luz de extensão. Mapas como o mostrado na figura 30 nos dão uma ideia da distribuição de galáxias projetada no céu, isto é, a distribuição bidimensional.

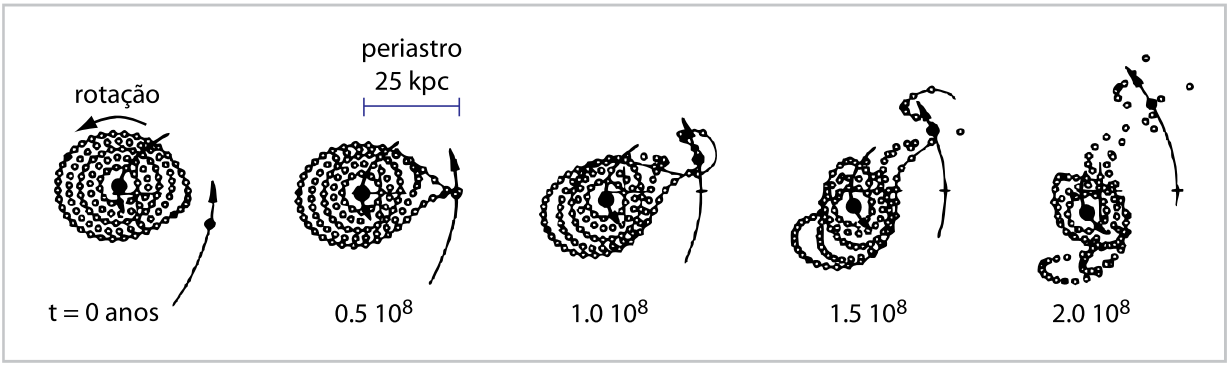
Um grande progresso para a compreensão da distribuição da matéria no Universo ocorreu quando, a partir de meados da década de 1980, o avanço tecnológico permitiu medir a distância de um grande número de galáxias simultaneamente. Com isso foi possível fazer uma espécie de tomografia do Universo e estudar a distribuição de matéria em três dimensões.

A estrutura do Universo é semelhante a uma esponja com grandes furos ou a um emaranhado de teias. Entre os grandes filamentos cósmicos traçados pelas galáxias existem regiões enormes, os "vazios cósmicos", com centenas de milhões de anos-luz e praticamente sem galáxias

A distribuição de matéria no Universo se compara bem com a distribuição prevista a partir de modelos de evolução cosmológica, calculada com a ajuda de simulações numéricas. Nessas simula-



23- Exemplos de galáxias com aparência morfológica peculiar. Estas galáxias, especialmente se observadas por instrumentos menos potentes, poderiam ser classificadas como galáxias irregulares. Nestas imagens, feitas com o telescópio espacial ou com o telescópio Gemini de 8m de diâmetro, podemos notar que cada objeto se trata do encontro de duas galáxias.



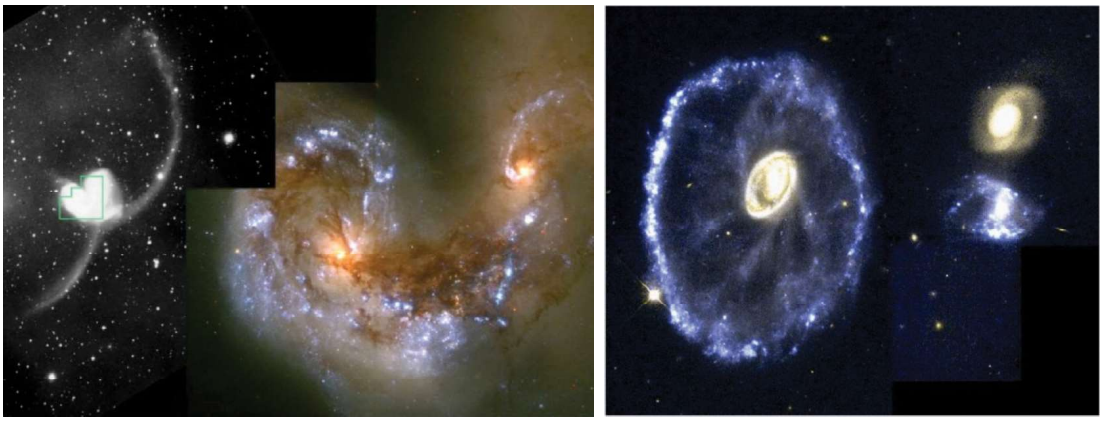
24- Resultado da simulação de um encontro entre duas galáxias feita pelos irmãos Toomre.

ções o Universo é representado por uma grande quantidade de pontos – que podem ultrapassar 10 bilhões de partículas – e a trajetória de cada ponto é computada ao longo da história de 14 bilhões de anos da idade cósmica. Esses cálculos levam meses para serem elaborados nos mais potentes computadores e o resultado é semelhante às observações, indicando que os modelos utilizados parecem descrever bem a Natureza.

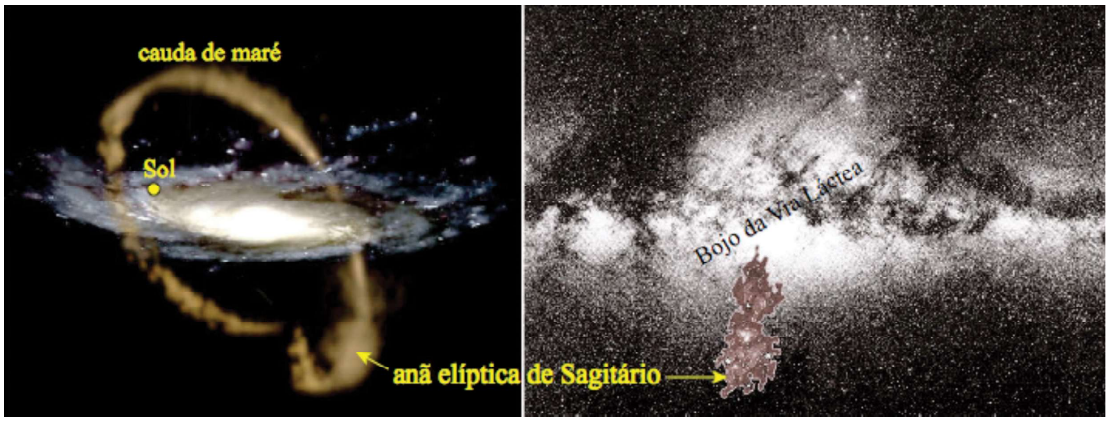
9.6 Galáxias peculiares: colisões galácticas

A maioria das galáxias brilhantes apresenta morfologia relativamente regular e apenas uma pequena fração exibe formas peculiares, não se encaixando na classificação morfológica de Hubble.

A partir dos anos 1970 ficou claro que as galáxias não são animais cósmicos que vivem tranquilamente, separadas uma das outras. Ao contrário, pelo fato de a maioria das galáxias permanecerem em associações (pares, grupos, aglomerados), as colisões ou passagens próximas de uma galáxia por outra não são raras.



25- Esquerda: colisão das galáxias NGC 4038 e 4039, conhecida como Antena. As "antenas" são também chamadas "caudas de maré", pois são produzidas por efeito de maré quando duas galáxias se aproximam uma da outra. Direita: Galáxia "Roda de Carruagem" e junto com duas galáxias anãs. A morfologia desta galáxia é explicada por uma colisão frontal de uma galáxia espiral com uma galáxia anã.



26- Esquerda: simulação da colisão entre o disco da Via Láctea e a galáxia anã de Sagitário (SagDEG). Direita: posição das estrelas que pertencem à SagDEG. A partir do nosso ponto de vista, esta galáxia anã se encontra atrás do bojo da Via Láctea.

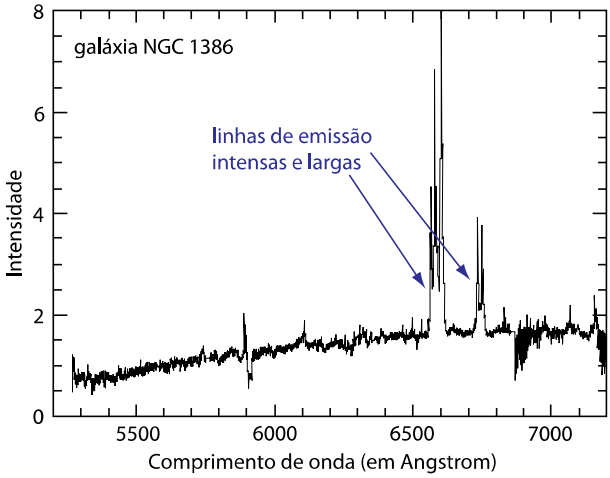
Em 1972, os irmãos Toomre (Alar e Juri) mostraram que a passagem de uma galáxia próxima de outra, sem haver colisão propriamente dita, resulta na deformação de ambas.

Com o tempo, o avanço dos computadores e das técnicas de simulação numérica, ficou claro que esses encontros entre galáxias têm um papel importante na moldagem da forma que observamos nesses objetos. Também foi constatado que as colisões de galáxias ricas em gás, como as espirais, produzem um surto de formação estelar, o que dá um tom mais azulado às galáxias.

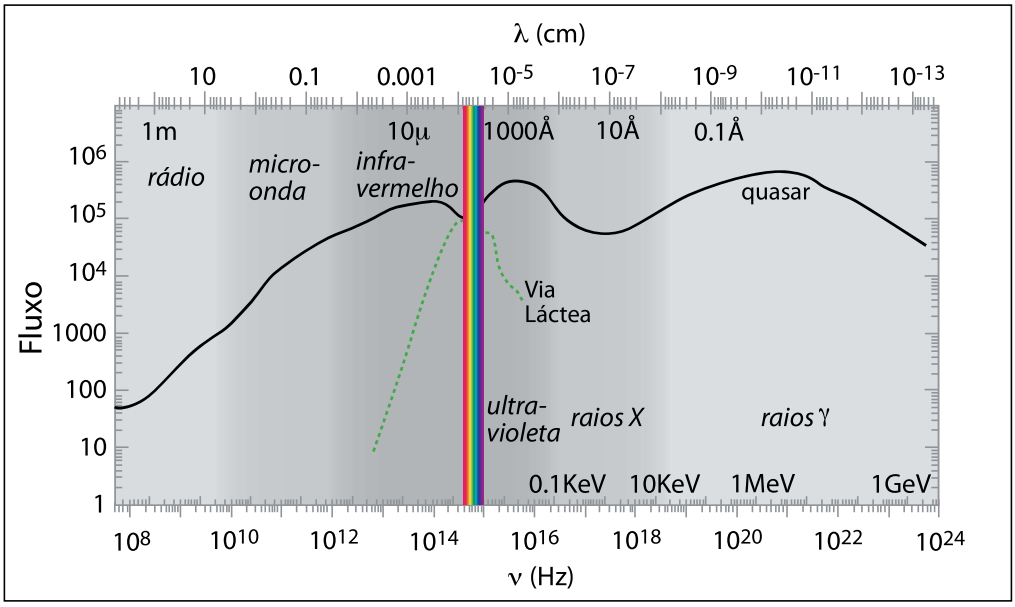
A Via Láctea também sofre colisões, mas nos últimos bilhões de anos nenhuma delas foi tão espetacular como as vistas na figura 26. Descoberta em 1994, alguns anos depois foi constatado que a galáxia elíptica anã da constelação do Sagitário estaria sendo "canibalizada" pela Via Láctea. Este é um processo que leva centenas de milhões de anos e resulta de várias colisões sucessivas. Posteriormente, a galáxia anã é completamente desintegrada e suas estrelas, gás e poeira se misturam com o material da Via Láctea.

As Nuvens de Magalhães, galáxias satélites que orbitam a Via Láctea, também serão "canibalizadas" em alguns bilhões de anos.

A colisão mais espetacular da Via Láctea deve ocorrer em 3 ou 4 bilhões de anos em um encontro quase frontal com a galáxia de Andrômeda. Atualmente, a galáxia de Andrômeda se dirige em direção à Via Láctea à uma velocidade de 120 km/s (432 mil km/h ou 0,4 anos-luz por milênio) e ela ainda tem que percorrer mais de 2,2 milhões de anos-luz. O resultado dessa colisão será, após centenas de milhões de anos, a formação de uma galáxia elíptica gigante.



27- Espectro de uma galáxia peculiar, com atividade no núcleo revelada pelas linhas de emissão intensas.



28- Comparação entre a distribuição de energia em função do comprimento de onda de um quasar e da Via Láctea.

9.6.1 Galáxias ativas, radiogaláxias e quasares

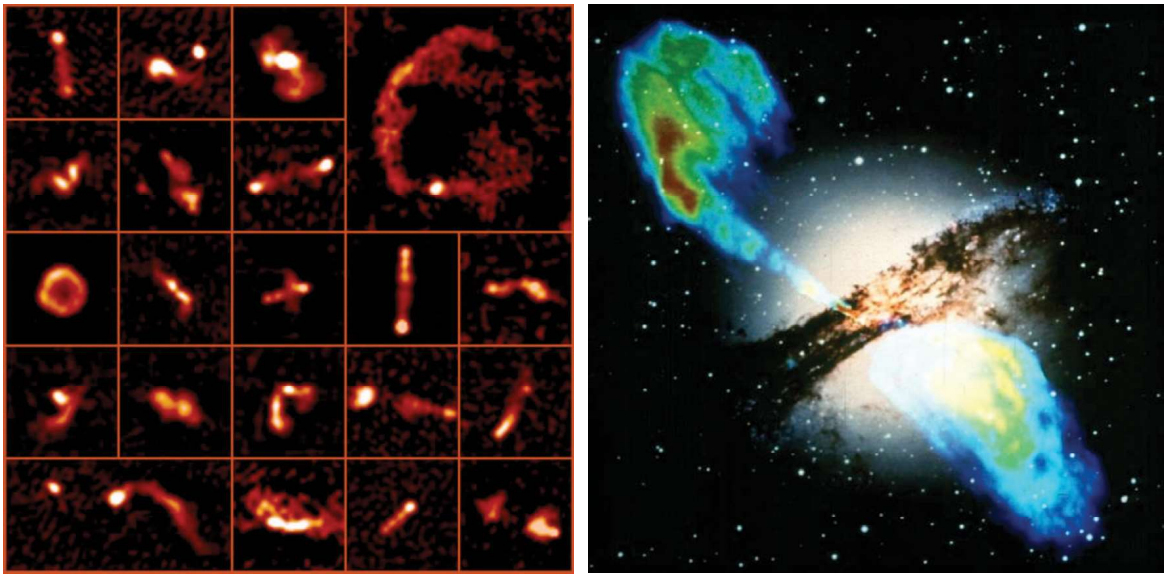
No início do século 20 alguns astrônomos notaram que o espectro de certas nebulosas espirais é peculiar, apresentando linhas de emissão intensas e largas. Essas nebulosas foram reconhecidas mais tarde como galáxias, mas a peculiaridade do espectro permaneceu intrigante. A aparência dessas galáxias parecia normal, exceto por um núcleo um pouco mais brilhante que a média. Em 1943, Carl K. Seyfert astrônomo norte-americano (1911-1960) voltou a se interessar por galáxias peculiares com linhas de emissão fortes e largas – esses objetos foram reconhecidos, posteriormente, como galáxias de núcleo ativo chamadas "galáxias Seyfert".

As galáxias Seyfert são identificadas e classificadas pelo seu espectro óptico: quando as linhas do espectro de hidrogênio são muito largas, são chamadas de Tipo I; quando esss linhas são mais estreitas são de Tipo II. Nos anos 1980 foi descoberto que essa dicotomia está ligada à geometria e estrutura destes objetos.

Em 1962 foi descoberto o primeiro quasar (do inglês *quasi-stellar radio source*, ou fonte rádio quase-estelar), um objeto distante, compacto e extremamente energético. Nas imagens ópticas (visíveis), o quasar parece uma estrela qualquer e, por essa razão, foi chamado de "radioestrela" antes do nome quasar se consolidar.

(a) (b) (c)

29- Imagens de quasares feitas com o telescópio espacial Hubble (HST), mostrando a galáxia hospedeira. Em vários casos constatou-se que a galáxia com um quasar interagia com uma vizinha. Apenas com imagens de ótima qualidade pode-se distinguir a galáxia de seu quasar, caso contrário o quasar literalmente ofusca a galáxia.



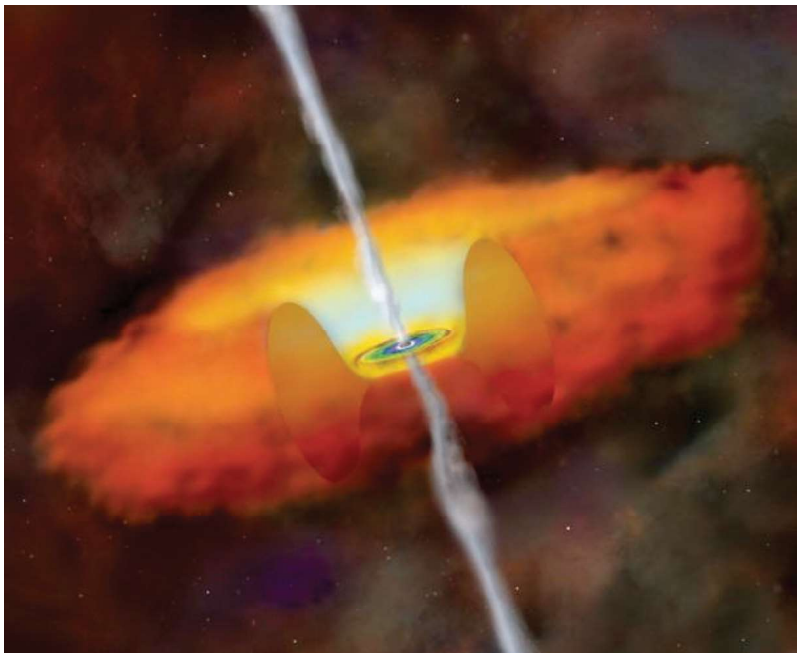
30- Esquerda: seleção de algumas radiogaláxias observadas pelo VLA. Observamos uma fauna de formas muito variadas. Direita: a radiogaláxia Centauro A (NGC 5128) está praticamente no nosso quintal cósmico, a cerca de 12 milhões de anos-luz. Nesta imagem composta está superposta uma imagem colorida da emissão rádio sobre uma imagem óptica. A faixa escura que corta a galáxia pela metade é devida à poeira.

Os quasares chamaram muito a atenção dos astrônomos por duas razões. A primeira é pela aparência estelar: um simples ponto no céu. A segunda, por serem objetos muito distantes. A distância em si era curiosa, mas não necessariamente surpreendente. Mas, levando em conta o brilho aparente dos quasares a essas distâncias enormes concluiu-se que esses objetos são as mais poderosas fontes de energia do Universo. Um quasar emite tanta energia quanto uma galáxia como a nossa, ou seja, como muitos bilhões de sóis.

Mas não é apenas na luz visível que os quasares são brilhantes. Ao contrário, eles brilham mais em outros comprimentos de onda como infravermelho e ultravioleta.

Com o telescópio espacial Hubble foi possível obter imagens detalhadas de quasares e se constatou que essas criaturas cósmicas vivem no núcleo de galáxias. Os quasares são, na realidade, semelhante às galáxias estudadas por Seyfert em 1943, mas em versão muito mais poderosa.

Em contrapartida, depois dos anos 1930, sobretudo após a Segunda Guerra Mundial, a radioastronomia floresceu e permitiu a descoberta de uma nova classe de objetos: as radiogaláxias. Elas são objetos muito extensos com uma intensa emissão em ondas de rádio (daí o nome). Elas



31- O modelo unificado de núcleos ativos tem os seguintes ingredientes: um buraco negro supermassivo central, um disco de acreção com matéria que gira e cai no buraco negro, um toro molecular (objeto geométrico com a mesma forma de um pneu ou uma rosquinha) com grande quantidade de poeira e moléculas. Em 10% dos casos, um jato bipolar de partículas relativísticas ejetadas de uma região próxima à superfície do buraco negro central . Essa superfície é a da esfera com raio equivalente ao Raio de Schwartzchild, que define o "horizonte de eventos" – região de onde nada pode escapar de um buraco negro, nem mesmo a luz (crédito da imagem: NASA/CXC/M. Weiss).

apresentam diversas morfologias, mas têm algo em comum: a fonte de energia da emissão rádio está no núcleo da galáxia hospedeira.

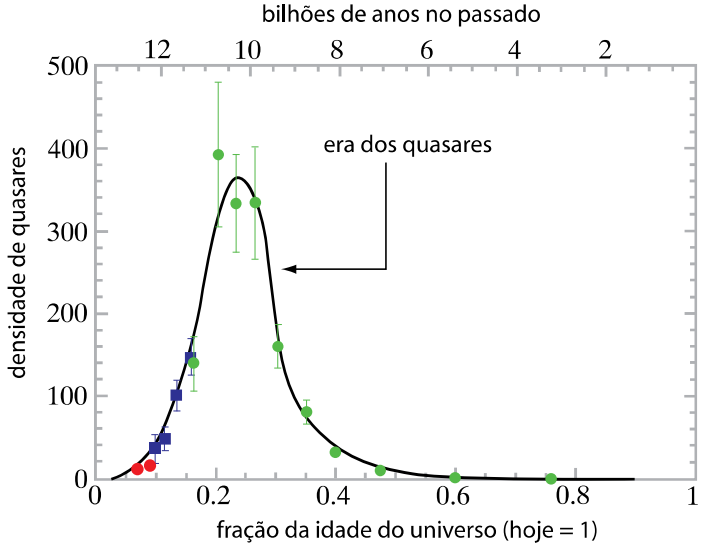
A região que produz a energia de um quasar não pode ser resolvida, mesmo com o telescópio espacial. Assim, a aparência delas continua parecida com uma estrela. Mas logo depois que foram descobertos, percebeu-se que a intensidade do brilho dessas fontes varia com o tempo, aumentando e diminuindo. O período de variação de uma fonte está relacionado a seu tamanho: quanto maior a fonte, maior o tempo necessário para ocorrer uma variação na sua luminosidade.

Assim, medindo-se o período de variação de um quasar é possível deduzir seu tamanho. Uma variação de algumas horas significa que a fonte deve ter um tamanho de algumas unidades astronômicas. Em outras palavras, um quasar emite tanta energia quanto uma galáxia inteira, mas essa energia é produzida em um volume menor que o do Sistema Solar.

O mecanismo capaz de liberar tamanha quantidade de energia é a queda de matéria em um buraco negro supermassivo. Um buraco negro de 100 milhões de massas solares alimentado por uma massa solar por ano produz 100 trilhões de vezes mais energia que o Sol e isso por centenas de milhões de anos! No fundo, a conversão de energia potencial gravitacional em radiação é mais eficiente que a produção de energia por fusão nuclear.

Galáxias de núcleo ativo, os quasares e as radiogaláxias não passam da manifestação do mesmo fenômeno, mas visto por um ângulo diferente e com intensidade intrínseca distinta. É o chamado modelo unificado de núcleos ativos de galáxias, que amadureceu durante a década de 1980. No coração desse modelo está o motor que produz a energia observada nos quasares.

Quando observamos o "motor" do núcleo ativo "por cima", isto é, na direção da vertical do toro (pneu) molecular, temos uma visão desobstruída do disco de acreção. Neste caso, o objeto parecerá um Blasar (tipo de quasar com variabilidade de luminosidade muito intensa e rápida). Com um pouco mais de inclinação, o próprio disco de acreção obstrui um pouco a região mais próxima do buraco negro; nesta situação, o objeto nos parecerá como um quasar ou, se for menos intenso, como uma galáxia Seyfert de tipo I. Aumentando mais ainda a inclinação de observação, o toro molecular passa a impedir uma visão clara do disco de acreção; agora o objeto parecerá uma Seyfert de tipo II. Se houver emissão de partículas relativísticas do núcleo, elas irão interagir com o campo magnético e emitir ondas de rádio. Nesta condição, o objeto é visto como uma radiogaláxia (figura 30).



32- Houve uma época no passado, há cerca de dez bilhões de anos atrás, em que o número de quasares era muito maior do que hoje. Este período, que durou cerca de dois bilhões de anos, caracteriza a Era do Quasares.

O "motor" dos quasares precisa de combustível, o material do meio interestelar que mergulha no buraco negro. Posteriormente este combustível termina, o estoque de gás disponível se esgota, então o núcleo central ativo se "apaga". Foi descoberto nas últimas décadas que todas as galáxias brilhantes próximas da Via Láctea têm um buraco negro supermassivo central. Mas, na maioria dos casos, esse buraco negro está dormente, sem o combustível necessário para transformá-lo no agente motor de um quasar.

O "motor" pode ser religado, por exemplo, se uma galáxia com um buraco negro supermassivo canibaliza outra rica em gás. Atualmente esse processo deve ser raro, pois não observamos quasares próximos. Mas pode ter sido frequente no passado, quando os objetos estavam mais próximos entre si.

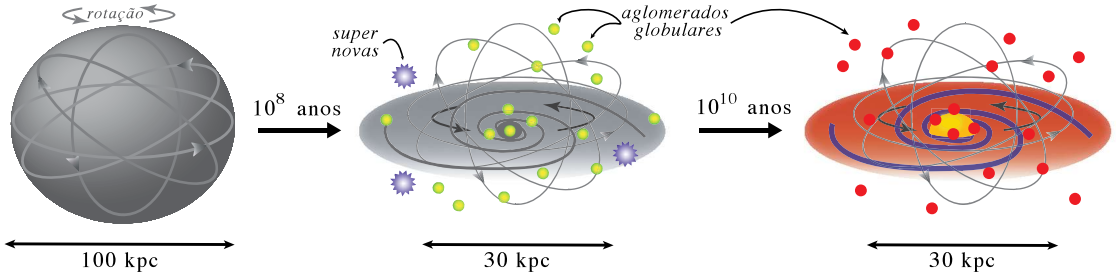
9.7 Formação de galáxias

A formação de objetos no Universo, de estrelas a aglomerados de galáxias, decorre da instabilidade gravitacional. Regiões com massa acima de um valor crítico não se mantêm em equilíbrio e colapsam, isto é, toda a matéria daquela região cai em direção ao centro de massa.

Em 1962, os astrofísicos Ollin Eggen, Donald Lynden-Bell e Allan Sandage propuseram um cenário de formação para a Via Láctea, que foi aplicado às galáxias em geral: o "colapso monolítico". Nesse cenário, as galáxias se formam a partir do colapso gravitacional de uma grande massa de gás. Durante a queda da matéria, uma parte do gás forma estrelas e aglomerados globulares. Se a massa de gás tiver alguma rotação, ela aumenta à medida que a nuvem colapsa e compõe um disco onde, gradualmente, as estrelas vão se formando ao longo do tempo.

Mas esse cenário não pode explicar algumas propriedades e observações de galáxias como, por exemplo, a quantidade de metais nos aglomerados globulares. Atualmente o cenário mais aceito de formação de galáxias é o chamado modelo hierárquico: primeiro formam-se as menores galáxias, pouco maiores que aglomerados globulares. E elas vão se fundindo para construir galáxias cada vez maiores. Essa concepção se enquadra bem às observações e previsões teóricas dos modelos cosmológicos mais aceitos.

Ainda assim, para se entender as propriedades das galáxias, inclindo a Via Láctea, além do mecanismo de formação é preciso levar em conta a evolução desses objetos. Nas últimas décadas tem



33- Modelo monolítico, onde as galáxias se formam pelo colapso de uma nuvem de gás primordial.

ficado claro que processos evolutivos lentos, chamados globalmente de "evolução secular" têm papel importante para dar a forma e aparência observada nas galáxias.

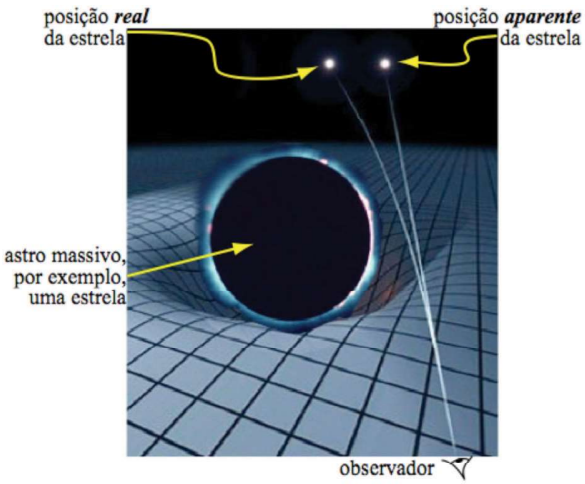
9.8 Lentes gravitacionais

Quando lançamos uma pedra para cima, obviamente ela sobe e, depois, cai. Se lançarmos com mais força, a pedra vai mais longe antes de retornar. Se imaginarmos que poderíamos lançar a pedra de forma que ela deixasse nossas mãos com mais de 11,2 km/s (um pouco mais de 40 mil km/h), ela não cairia de volta e entraria em órbita em torno da Terra. Foi fazendo essa analogia com a luz que surgiu a primeira ideia de um buraco negro.

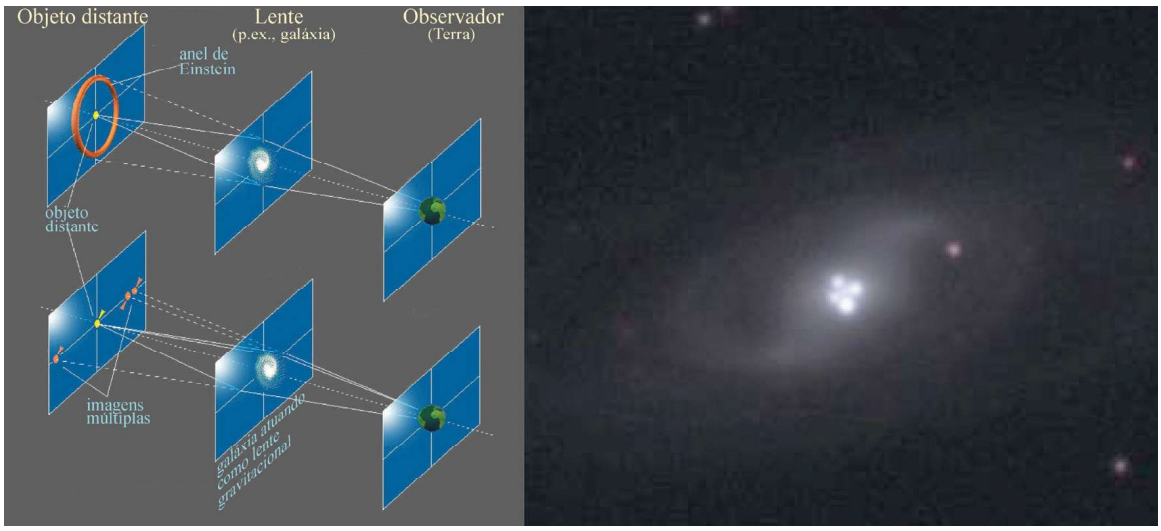
Em 1704, o próprio Isaac Newton cogitou o possível efeito da gravitação sobre a luz. A influência da gravitação sobre a luz (na verdade qualquer radiação eletromagnética como ondas de rádio ou raios X) só foi esclarecida em 1915, com a teoria da gravitação de Einstein (também chamada "teoria da relatividade geral"). Basicamente, matéria e energia deformam o espaço-tempo e isso determina a trajetória da matéria e radiação.

Espaço-tempo é o sistema de coordenadas utilizado na relatividade especial e geral de Einstein. O tempo e o espaço tridimensional são concebidos em conjunto, como uma única grandeza de quatro dimensões. Um ponto no espaço-tempo pode ser designado como um "acontecimento". Cada acontecimento tem quatro coordenadas: três de espaço (x, y, z) e uma de tempo (t). Uma característica desse sistema de coordenadas é a impossibilidade de algo mover-se no espaço, mas não no tempo. O contrário é possível, algo que esteja em repouso no espaço sempre estará em movimento no tempo. Portanto, na geometria espaço-tempo, tudo está em movimento.

Outra característica desse sistema é a deformação que o espaço-tempo sofre na presença de massa. Quanto maior a massa, maior a deformação do espaço-tempo nas vizinhanças dela. Assim, a luz que se propaga em linha reta em um espaço curvo descreverá uma curva. Daqui brotou a expectativa de que a luz das estrelas pudesse ter sua trajetória alterada quando passasse próxima a um corpo massivo, como por exemplo, o Sol. De fato, isso foi constatado durante o eclipse solar de 29 de maio de 1919, na cidade de Sobral, no Ceará, por uma equipe de astrônomos ingleses. A deflexão da tra-



34- Mudança da trajetória da luz devido a presença de um corpo massivo. Para um observador, a posição aparente do astro é alterada. Este desvio pode ser observado durante um eclipse total do Sol.



35- Esquerda: um corpo celeste como uma galáxia ou um aglomerado de galáxias atua como uma lente gravitacional, deformando a imagem de galáxias longínquas ou produzindo imagens múltiplas do mesmo objeto distante. Direita: imagens múltiplas de um Quasar distante, Q2237+0305, produzida por uma galáxia atuando como uma lente gravitacional (imagem de J.Rhoads, S.Malhotra, I.Dell'Antonio (NOAO)/WIYN/NOAO/NSF).

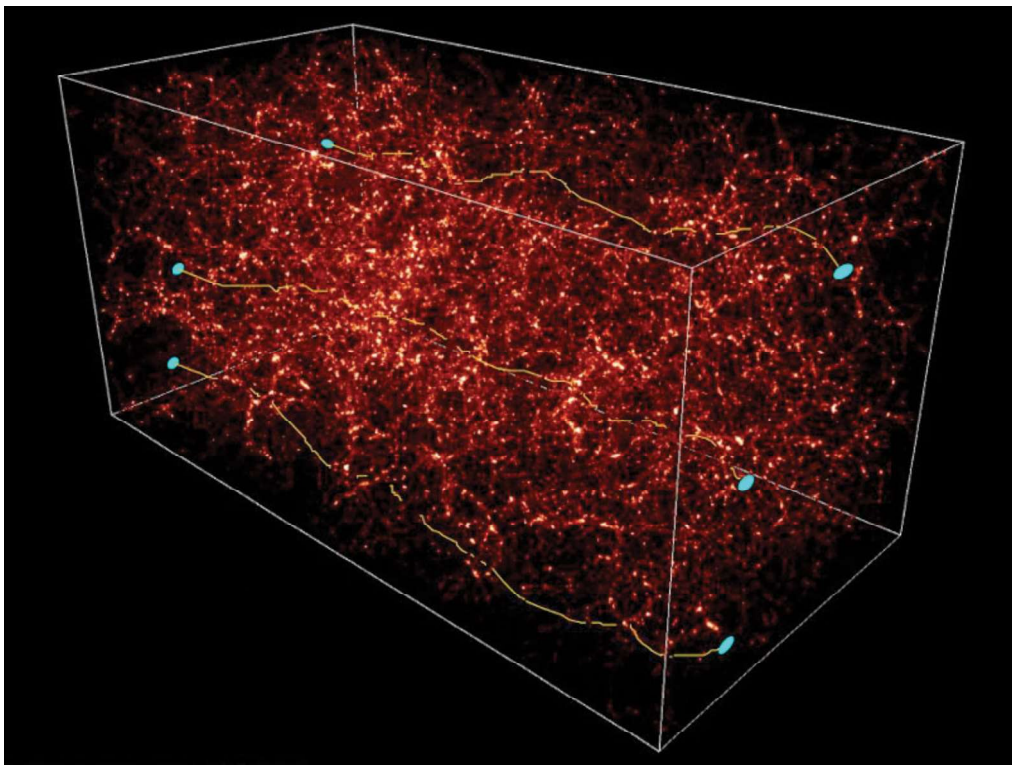
jetória da luz de uma estrela rasante ao bordo solar foi de 1,80 segundo de arco, muito próximo de 1,75, o valor teórico previsto por Einstein.

Esse mesmo fenômeno ocorre quando a luz de um objeto distante, digamos um quasar, passa pelas proximidades de uma galáxia ou um aglomerado gdalactico. Neste caso quando há quase um alinhamento entre o quasar distante, a galáxia e nós, a galáxia atua como "uma lente" convergindo a luz e produzindo um anel em torno da galáxia, conhecido como anel de Einstein.

No caso de não haver alinhamento, ou se a "lente" for assimétrica, ao invés de um anel, observamos imagens múltiplas do objeto distante, como mostra a figura 46. Casos ainda mais espetaculares ocorrem quando a lente gravitacional é formada por um aglomerado de galáxias. Neste caso observamos arcos gravitacionais, que são imagens de galáxias distantes deformadas em forma de arco.

A observação desses arcos e imagens múltiplas permite determinar a massa total das lentes gravitacionais, isto é, das galáxias ou aglomerados que deformam as imagens dos objetos distantes. A observação de arcos gravitacionais confirma a determinação de que cerca de 85% da massa em aglomerados de galáxias é composta por matéria escura. Nos próximos anos os astrônomos esperam mapear a distribuição de matéria escura fora dos aglomerados galácticos analisando o efeito gravitacional em uma grande quantidade de galáxias e quasares distantes.

36- Imagens dos aglomerado Abell 1689 e Abell 2218 feitas com o telescópio espacial Hubble onde podemos observar dezenas de arcos gravitacionais.



37- A trajetória da luz de galáxias distantes é afetada pela teia cósmica de filamentos de matéria escura. Estudando a imagem destas galáxias distantes (em azul nesta figura) poderemos mapear a distribuição de matéria no universo (em vermelho aqui). Ilustração feita por Stephane Colombi e colaboradores do IAP, França.

Capítulo 10

Cosmologia

Gastão B. Lima Neto

10.1 Introdução
10.2 Breve histórico de modelos cosmológicos
10.3 Paradoxo de Olbers
10.4 A Expansão do universo
10.5 A teoria do Big Bang
10.6 Solução do paradoxo de Olbers e o tamanho do Universo
10.7 Base teórica da cosmologia e o principio cosmológico
10.8 História do Universo
- *Aniquilação da antimatéria*
- *Bariogênese*
- *Nucleossíntese primordial*
- *Fim da era da radiação*
- *Recombinação e radiação cósmica de fundo*
- *Idade das trevas*
- *Formação das primeiras estrelas e quasares*
- *A era da energia escura*
- *Futuro do Universo*

10.9 Composição do Universo: o lado escuro do Universo
10.10 Antes do Big Bang?