

ATENÇÃO: esses resumos visam a **auxiliar** o estudo de cada capítulo, enfatizando os principais pontos levantados em cada trecho do livro *Extragalactic Astronomy and Cosmology: an Introduction*, de Peter Schneider. **De forma alguma** esses resumos podem **substituir** a leitura e estudo do livro, o qual é muito mais completo.

Capítulo 6 – Resumo

Galáxias não se distribuem no espaço de forma homogênea, pelo menos em escalas até uns 100Mpc. Elas se aglomeram, formando grupo, aglomerados e superaglomerados de galáxias. Mapas da distribuição de galáxias do volume local projetada no céu são mostrados nas figuras 6.1 e 6.2.

Nossa Galáxia pertence a um grupo contendo várias dezenas de galáxias, chamado de Grupo Local.

Não há uma distinção física clara entre grupos e aglomerados. Essas aglomerações formam um contínuo em termos de volume ocupado, número de membros (ao que chamamos de riqueza do sistema), massa, etc. Uma linha divisória, arbitrária, é classificar como grupos os sistemas que contêm até 50 membros localizados num raio de 1.5 Mpc. Exemplos de um grupo (na verdade um grupo compacto) e de um aglomerado são dados na figura 6.3. Mas note que o número de membros de um sistema vai depender da profundidade da imagem usada para identificá-los. Imagens mais fundas detectam objetos mais tênues e, portanto, mais objetos.

Um trabalho clássico de catalogação de aglomerados de galáxias foi feito por Abell e colaboradores. Eles inspecionaram visualmente placas fotográficas no óptico. Atribuíram magnitudes e tamanhos às galáxias e identificaram como aglomerados os sistemas que continham pelo menos 50 galáxias com magnitude entre m_3 e m_3+2 num raio projetado na placa fotográfica de $1.7\text{arcmin}/z$, onde z é o desvio para o vermelho e m_3 aqui corresponde à magnitude aparente da terceira galáxia mais brilhante do sistema. Este último foi medido a olho, assumindo-se que a décima galáxia mais brilhante de cada sistema é uma vela padrão, ou seja, tem a mesma luminosidade em todos os casos ($M_{10} = \text{cte}$, portanto, de forma que $m_{10} = M_{10} + 5\log(d/\text{pc}) - 5$, é uma medida da distância).

O catálogo Abell é usado ainda hoje, apesar de ter sido construído visualmente. Há vários problemas que afetam um catálogo com essas características. Um deles é causado por efeitos de projeção. Dois grupos numa mesma linha de visada, sobrepostos, podem satisfazer o critério de Abell, mesmo se considerados isoladamente não o façam. Similarmente, aglomerados podem passar despercebidos em meio a flutuações nas contagens de galáxias em escalas de alguns minutos de arco, as quais podem ser significativas. As estimativas de magnitude e redshift são apenas aproximadas, dado o

método usado para determinar essas grandezas.

Os catálogos Abell (além do original, que cobre apenas o Hemisfério Norte equatorial, houve catálogos complementares e uma extensão para o Hemisfério Sul equatorial) listam informações como as coordenadas, classe de riqueza (com base no número de membros), classe de distância (com base em m_{10}), entre outras (ver tabelas 6.2 e 6.3).

O Grupo Local

O Grupo Local tem duas galáxias maiores, que são a nossa Galáxia e a galáxia M31, Andrômeda. Há uma 3a espiral, M33, mas de massa menor do que as duas primeiras. Os demais membros do Grupo Local são galáxias de baixa luminosidade e massa, em sua maioria objetos que orbitam em torno de M31 ou da Galáxia. A maioria são galáxias dE ou dSph, de bem baixa massa. Algumas são Irr, sendo que a LMC é a de maior massa dentre estes satélites. Há também o caso de M32, que é uma elíptica compacta. Note que a lista de satélites da Galáxia e de M31 dada pelo livro (Tabela 6.1) está muito desatualizada, pois muitos outros exemplares vêm sendo descobertos nos últimos 10-15 anos.

Como a Via-Láctea e M31 são os membros dominantes do Grupo Local e estão atraindo-se mutuamente (M31 é uma das poucas galáxias que têm velocidade de aproximação a nós), podemos presumir que a dinâmica interna do GL é dominada pela gravidade dessas duas espirais massivas. Com base na velocidade e distância atuais entre ambas e usando dinâmica gravitacional com conservação de energia mecânica, podemos então estimar a massa do GL. Isso é o que o livro faz na subseção 6.1.2, chegando à conclusão de que há mais massa no GL do que a soma das massas luminosas de seus membros. Outro resultado que leva à expectativa de que, na escala do GL ($\sim 1\text{Mpc}$), existe muita matéria escura.

Função de luminosidade

Dentre as propriedades de grupos e aglomerados que podemos analisar estão, além da riqueza, a sua função de luminosidade, a qual descreve como os membros se distribuem em L , e a morfologia do sistema. A parametrização mais comum para a função de luminosidade, $\Phi(L)$, é a função de Schechter (ver seção 3.7 e eq 3.38). Esta é uma exponencial para $L \gg L_*$, onde L_* é um valor característico de luminosidade. Para baixas luminosidades, $L \ll L_*$, a função se comporta como uma lei de potência, com índice α . Galáxias de aglomerados também seguem uma função de Schechter, com L_* similar entre os aglomerados. Mas o valor de α varia bastante, sendo afetado pela contaminação de galáxias de campo e pela profundidade amostral em cada caso.

Uma outra característica de aglomerados e grupos é a presença de galáxias centrais dominantes, cDs, que são Es muito luminosas que se situam no centro desses sistemas.

As CDs têm várias características que as distinguem das demais Es luminosas, como um envelope na forma de uma lei de potência, que se estende por mais de 100 de kpc, núcleos múltiplos, além de um sistema muito rico de aglomerados globulares.

Em termos de sua aparência ou morfologia, a principal diferenciação que podemos fazer entre aglomerados de galáxias é entre os regulares e os irregulares. A forma como as galáxias se distribuem se correlaciona com outras propriedades. Os aglomerados regulares, como o nome sugere, não apresentam subestruturas muito claras, e têm uma maior densidade central de galáxias que os irregulares. Além disso, eles têm uma fração muito maior de galáxias Es do que se vê no campo, tendem a ser mais ricos do que os irregulares, e comumente possuem uma CD no seu centro. Todas essas características dos regulares sugere que são aglomerados próximos do equilíbrio dinâmico (em que o potencial gravitacional é estacionário), ou seja, que passaram pelo processo de relaxação violento num sistema de muitos corpos.

Distribuição espacial de galáxias em aglomerados

Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas em equilíbrio (ou próximo dele) no Universo. Não houve tempo para estruturas ainda maiores, como superaglomerados, atingirem equilíbrio dinâmico. Sua distribuição espacial de matéria, em parte delineada pelas galáxias, é portanto de interesse para nossa compreensão de como evoluem as estruturas no cosmos. Podemos então contar galáxias em função da distância ao centro do aglomerado a que pertencem e ajustar perfis que quantificam esta distribuição. Atualmente, é muito comum usar um perfil de Navarro-Frenk-White (NFW), o qual resulta para a distribuição da matéria escura em simulações de N-corpos cosmológicas.

Outras formas mais simples incluem uma esfera isotérmica, com ou sem singularidade, e um modelo de King. Esses modelos são apresentados na subseção 6.2.4. Em particular, uma esfera isotérmica é um sistema em que a dispersão de velocidades não varia com o raio. Como em teoria clássica de gases, a velocidade quadrática típica de uma partícula dentro do sistema é proporcional à sua temperatura, podemos dizer que, neste caso, a temperatura cinética das galáxias também não varia com R, daí o nome. Uma esfera isotérmica singular (SIS) é uma solução simples para a eq de equilíbrio dinâmico no caso de uma esfera isotérmica, a qual é dada pela eq. 6.13. O perfil de densidade de uma SIS é dado por 6.14. Note que a densidade tende a infinito no centro, daí o nome.

As esferas isotérmicas têm uma massa nominalmente infinita, pois a integral do perfil de densidade diverge. Isso é resultado do fato de que a distribuição de velocidades das galáxias segue a distribuição de Maxwell, com temperatura sempre a mesma, em qualquer raio. A distribuição de Maxwell prevê uma cauda de valores muito altos de velocidade, o que faz na prática com que a velocidade de escape, mesmo de pontos muito distantes do centro do sistema, seja sempre a mesma e muito alta. A imposição de um

corte nessa cauda da distribuição de velocidades leva a um perfil de King. As distribuições espacial e projetada associadas a este modelo são dadas por 6.16 e 6.17, respectivamente.

Se aglomerados são sistemas em equilíbrio, então eles são virializados, de forma que podemos aplicar o teorema do virial para determinar sua massa total a partir de estimativas da velocidade típica interna (a dispersão de velocidades entre suas galáxias membro) e do seu raio característico. O fato de que o tempo para uma galáxia típica cruzar de ponta a ponta um aglomerado ser relativamente curto (comparado com o tempo de Hubble, por exemplo) indica que aglomerados, de fato, já tiveram tempo de entrar em equilíbrio.

Estimativas de massa virial de aglomerados indicam valores bem maiores do que a soma das massas de suas galáxias membro. Isso se reflete, por exemplo, no valor da razão entre a massa total (obtida dinamicamente) e a luminosidade total de um aglomerado. Essa razão M/L é muito maior do que a obtida para uma galáxia early-type típica.

Relaxação de 2 corpos e fricção dinâmica

O processo de atingir o equilíbrio dinâmico envolve a relaxação de muitos corpos, processo a que chamamos de relaxação violenta. Há outros processos importantes, como a relaxação de 2 corpos, processo pelo qual o potencial sentido por uma partícula é alterado pela interação dois a dois, com outras partículas. A escala de tempo da relaxação de 2 corpos é mais longa do que a de N corpos.

Outro processo importante, também descrito no livro, é o de fricção dinâmica. Neste processo, uma partícula de maior massa sofre a frenagem orbital, com perda de energia mecânica orbital. Essa frenagem se dá pela interação com as partículas de menor massa, que formam uma distribuição que tende a se concentrar na parte posterior da órbita da partícula de maior massa. As órbitas de galáxias de alta massa num aglomerado, portanto, tendem a decair e elas tendem a se situar mais perto do centro. O mesmo pode acontecer com aglomerados globulares ou galáxias satélites de Via-Láctea ao orbitarem relativamente perto do bojo, onde a densidade de estrelas de campo é mais alta. A eq. 6.29 mostra que a aceleração de frenagem aumenta com a massa da partícula sofrendo a fricção, decresce com a sua velocidade e aumenta com a densidade das partículas de fundo. Uma ilustração do efeito de fricção dinâmica é mostrada pela figura 6.9.

A subseção 6.2.7 trata da existência de estrelas no meio intra-aglomerado, não associadas a nenhuma galáxia membro. Estrelas são observadas individualmente em aglomerados próximos, como Virgo. Nos mais distantes, é detectado um fundo difuso no interior de alguns aglomerados, com um brilho superficial de 30 mag/arcsec^2 , o que corresponde a algo com menos de um milésimo do brilho do céu noturno, sem Lua e nos melhores sítios astronômicos!

Gás quente e emissão de raios-X

Mas muito mais importantes dinamicamente do que as estrelas é o gás quente que permeia o meio intra-aglomerado. Este gás, na forma de partículas carregadas com $T \sim 10^8 \text{K}$, emite radiação Bremsstrahlung em raios-X e contém mais massa do que aquela acumulada nas galáxias do aglomerado. Esse gás não é detectado em raios-X em todos os aglomerados, mas é comum nos mais ricos, sendo que a luminosidade em raios-X se correlaciona com a luminosidade óptica do aglomerado.

Grupos de galáxias

Grupos de galáxias necessariamente têm menos membros do que os aglomerados Abell. São portanto sistemas de menor massa, dispersão de velocidades e luminosidade. A dispersão de velocidades típica num grupo é da ordem de 300 km/s, enquanto que em aglomerados ricos ela pode ser de 1000 km/s ou maior. Há uma subclasse dos grupos que são os grupos compactos de Hickson. Aproximadamente 100 deles foram identificados ainda na década de 1980, como associações contendo poucos membros, mas situados bem próximos uns dos outros. A maioria desse grupos foi confirmada posteriormente como um sistema físico de galáxias à mesma distância. Muitos dessas galáxias membro de grupos de Hickson apresentam sinais de interação, como caudas de maré, braços espirais distorcidos, entre outras perturbações.

Assim como aglomerados, grupos mais ricos também em geral emitem raios-X. Eles também têm determinações de massa dinâmica maior do que a massa luminosa, novamente uma indicação de matéria escura. Imagens de grupos de Hickson são mostradas na figura 6.10.

Relação morfologia-densidade-raio

A fração de galáxias de um dado tipo morfológico varia fortemente com a densidade local de galáxias. Em aglomerados, principalmente nas regiões centrais de aglomerados regulares, predominam galáxias Es e S0. Já no campo, em regiões de densidade de galáxias típicas, a maioria das galáxias é do tipo disco. A essa variação da morfologia com a densidade local de galáxias chamamos de relação morfologia-densidade. Note que essa relação não estabelece apenas uma dicotomia entre aglomerados e campo no que diz respeito ao tipo morfológico mais comum em cada caso. A relação morfologia-densidade nos diz que dentro de um aglomerado, por exemplo, podemos esperar uma variação na frequência de galáxias em função da morfologia. Tal relação também inclui grupos de galáxias, indicando que grupos compactos, por exemplo, têm uma alta prevalência de galáxias early-type. A figura 6.11, no painel esquerdo, mostra claramente a relação morfologia-densidade. O painel direito mostra que a frequência de um dado tipo morfológico é também função da distância ao centro do aglomerado, expresso em raios viriais.

Como a forma de uma galáxia, principalmente se ela for distante, nem sempre é definida de maneira não-ambígua (braços espirais ou discos podem ser difíceis de detectar, por exemplo), uma alternativa é estudar a influência do ambiente nas cores típicas. Usando dados do SDSS, é possível mostrar que a fração de galáxias do ramo vermelho (ver subseção 3.7.2) aumenta com a densidade local de galáxias. Mas esta fração também aumenta com a luminosidade da galáxia. Ou seja, galáxias mais comuns em ambientes densos são luminosas e dominadas por população estelar velha. Um processo que pode explicar essa prevalência de galáxias vermelhas e luminosas em ambientes densos é o de fusão. Em especial, numa fusão *seca* participam duas galáxias sem gás e poeira, o que significa que não há formação estelar resultante do próprio processo de fusão, fazendo com que o produto seja uma galáxia luminosa e vermelha.

A paulatina diminuição de galáxias espirais com a densidade pode estar atestando a influência de outros processos, além da fusão (a qual exige densidades altas), como por exemplo a remoção do gás das espirais pela pressão do meio intra-aglomerado, resultando em galáxias S0, por exemplo.