

Interações entre galáxias e evolução morfológica

aula 24 e 26/junho

Mo, van den Bosch & White "Galaxy Formation and Evolution", caps. 12, 13.5, 13.6

Interações entre galáxias

- No cenário hierárquico de formação de estruturas, as galáxias e seus halos de matéria escura frequentemente interagem com outras galáxias/halos.
- cada halo passa por tipicamente 3 major mergers (razão entre a massa dos progenitores maior do que 1/3) (Li et al. 2007)
- High speed encounters:
 - a velocidade de "encontro" (não há colisão) é muito maior do que a dispersão de velocidade do sistema perturbado
 - tem um papel importante em galaxy clusters ($\sigma_{\text{cluster}} \sim 1000\text{km/s}$)
 - o encontro "aquece" o sistema causando expansão e eventual perda de massa

Tidal Stripping

- em um caso mais geral, um encontro sem colisão provoca perda de massa além do Tidal Radius

$$r_t = (m/2M)^{1/3}R$$

- Tidal streams: uma galáxia satélite orbitando um sistema massivo

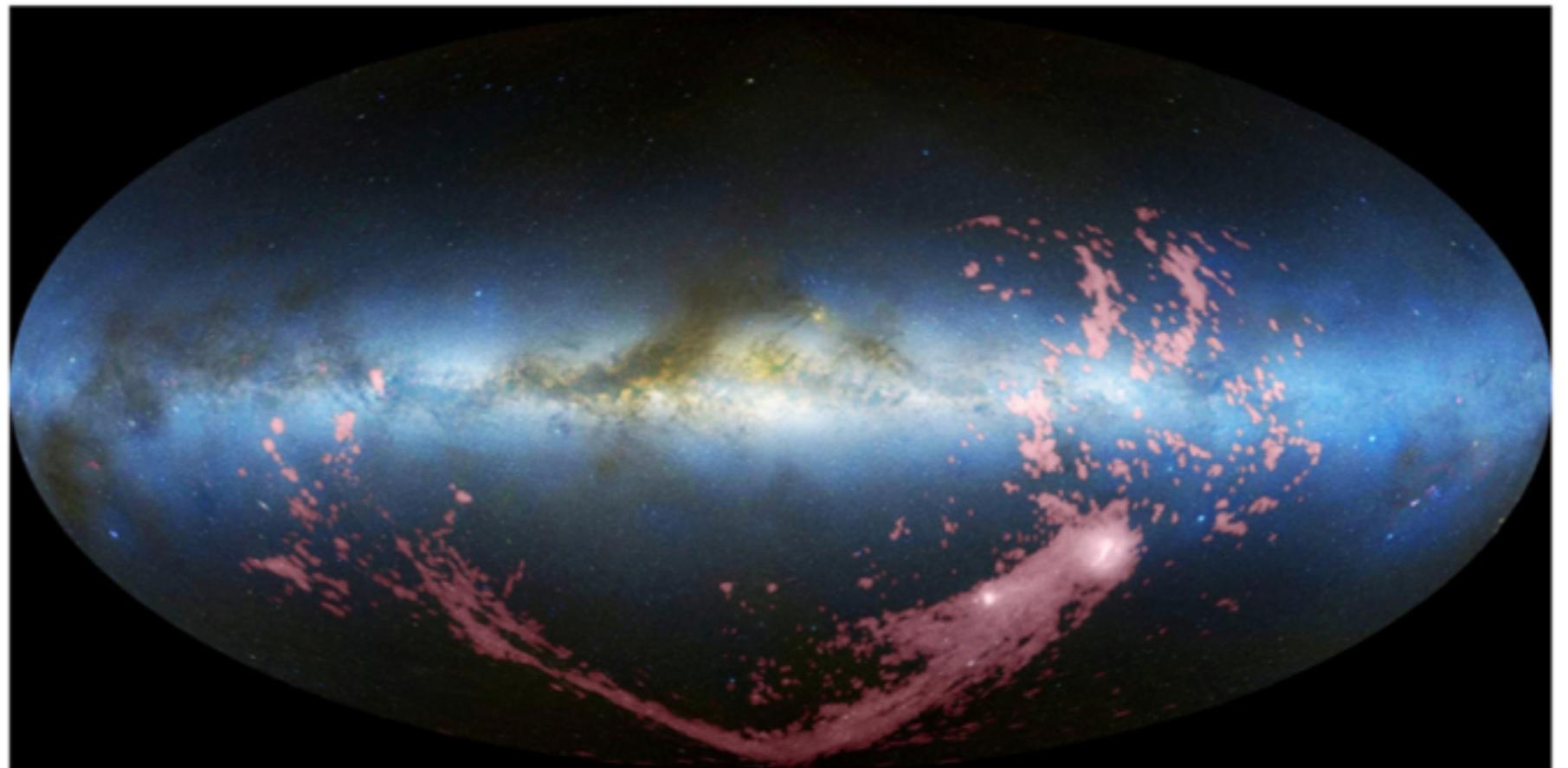
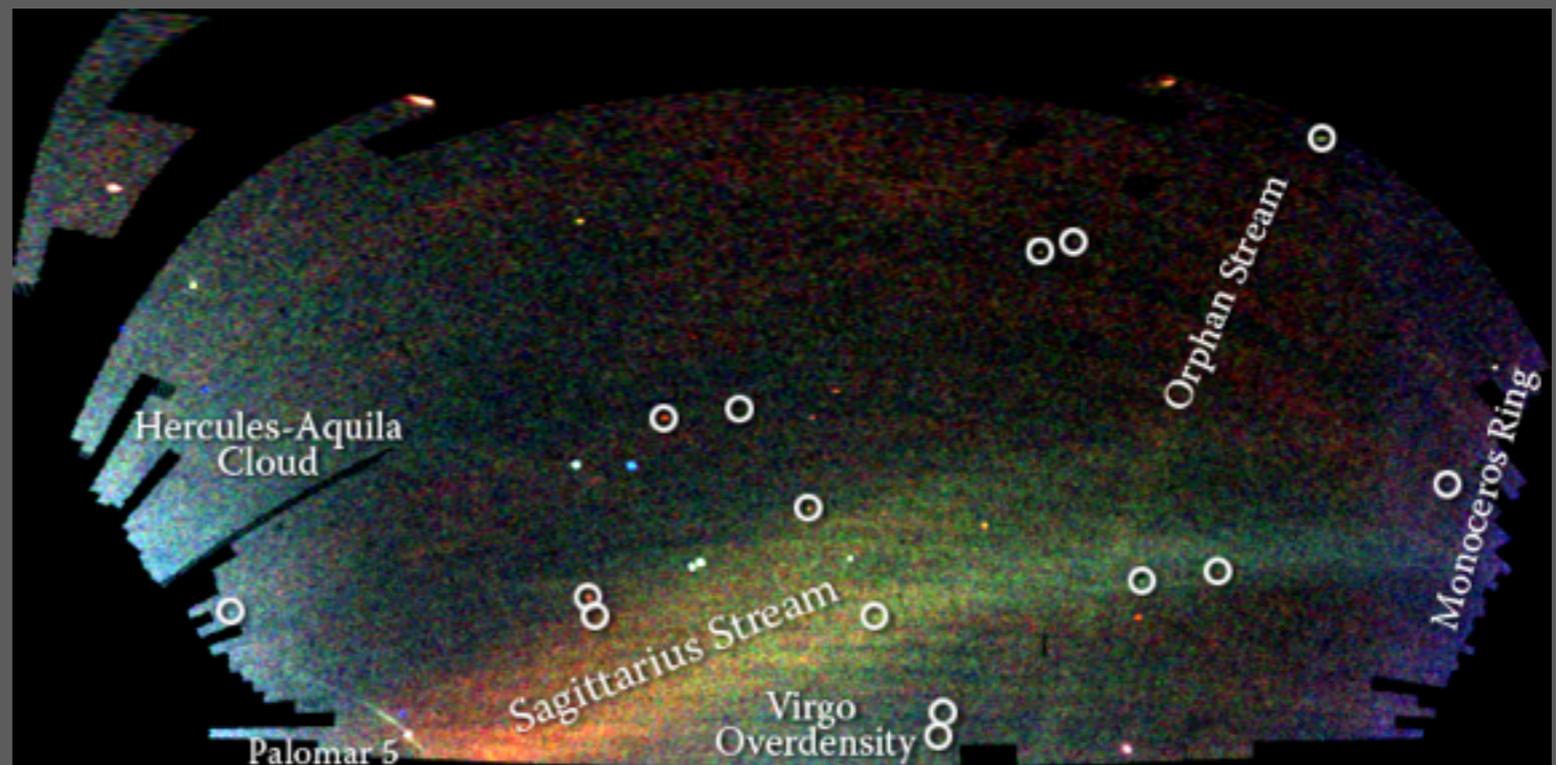


Figure 9. Magellanic Stream and Clouds in H I (red) with an optical all-sky image (blue, white, and brown; Mellinger 2009) in Aitoff projection with the direction to the Galactic center at the center.

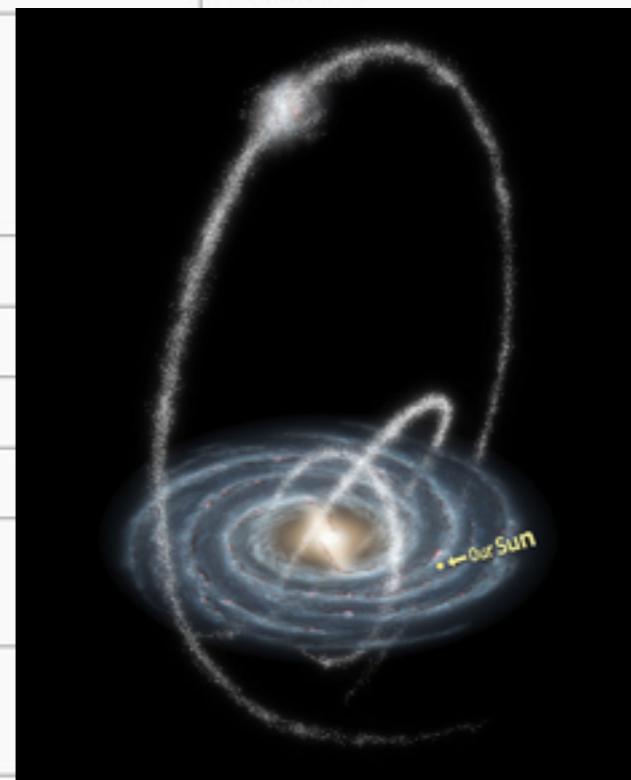
Tidal Streams

- Podem ser usados para inferir:
 - o potencial gravitacional do sistema hospedeiro
 - estudar a história de formação hierárquica do halo da Galáxia (recentemente se tornou um campo de pesquisa ativo, ver Helmi 2008)

A map of stars in the outer regions of the Milky Way Galaxy, derived from the SDSS images of the northern sky, shown in a Mercator-like projection. The color indicates the distance of the stars, while the intensity indicates the density of stars on the sky.



Name	Origin	Mass (Solar masses)	Length (light years)	Composition	Discovery year
Arcturus stream	Defunct dwarf galaxy	Unknown	Unknown	Old stars deficient in heavy elements	1971 ^[2]
Cetus Polar Stream	Defunct dwarf galaxy	Unknown	Unknown	Old stars	2009 ^[3]
Magellanic Stream	Large and Small Magellanic Clouds	200 million	1 million	Hydrogen gas	1972
Sagittarius Stream	Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy	100 million	1 million	Wide variety of stars	1994
Helmi stream	Defunct dwarf galaxy	10 to 100 million	Several complete loops around the Milky Way	Old stars deficient in heavy elements	1999
Palomar 5 stream	Globular cluster Palomar 5	5,000	30,000	Old stars	2001
Virgo stream	Defunct dwarf galaxy		30,000		2001
Monoceros ring	Canis Major dwarf galaxy	100 million	200,000	Intermediate-age stars	2002
Anticenter stream	Defunct dwarf galaxy	Unknown	30,000	Old stars	2006
NGC 5466 stream					
45 Degree Tidal Stream	Globular cluster NGC 5466	10,000	60,000		2006 ^[4]
Orphan stream	Unknown (hence its name)	Unknown ^[5]	20,000		2006
Acheron stream	Globular cluster				2007 ^{[4][6]}
Cocytus stream	Globular cluster				2007 ^{[4][6]}
Lethe stream	Globular cluster				2007 ^[6]
Styx stream	Defunct dwarf galaxy (Possibly Boötes III (dwarf galaxy))				2007 ^{[4][6]}
Bootes III stream	Embedded in, & possible progenitor of Styx stream				2007 ^{[4][6]}
Aquarius Stream	Defunct dwarf galaxy	Unknown	30,000	Old stars	2010



Tidal Tails

- "Tails" são observados em mergers de galáxias disco
- As caudas são finas porque originaram-se de discos frios; mergers de sistemas dinamicamente quentes não produzem caudas



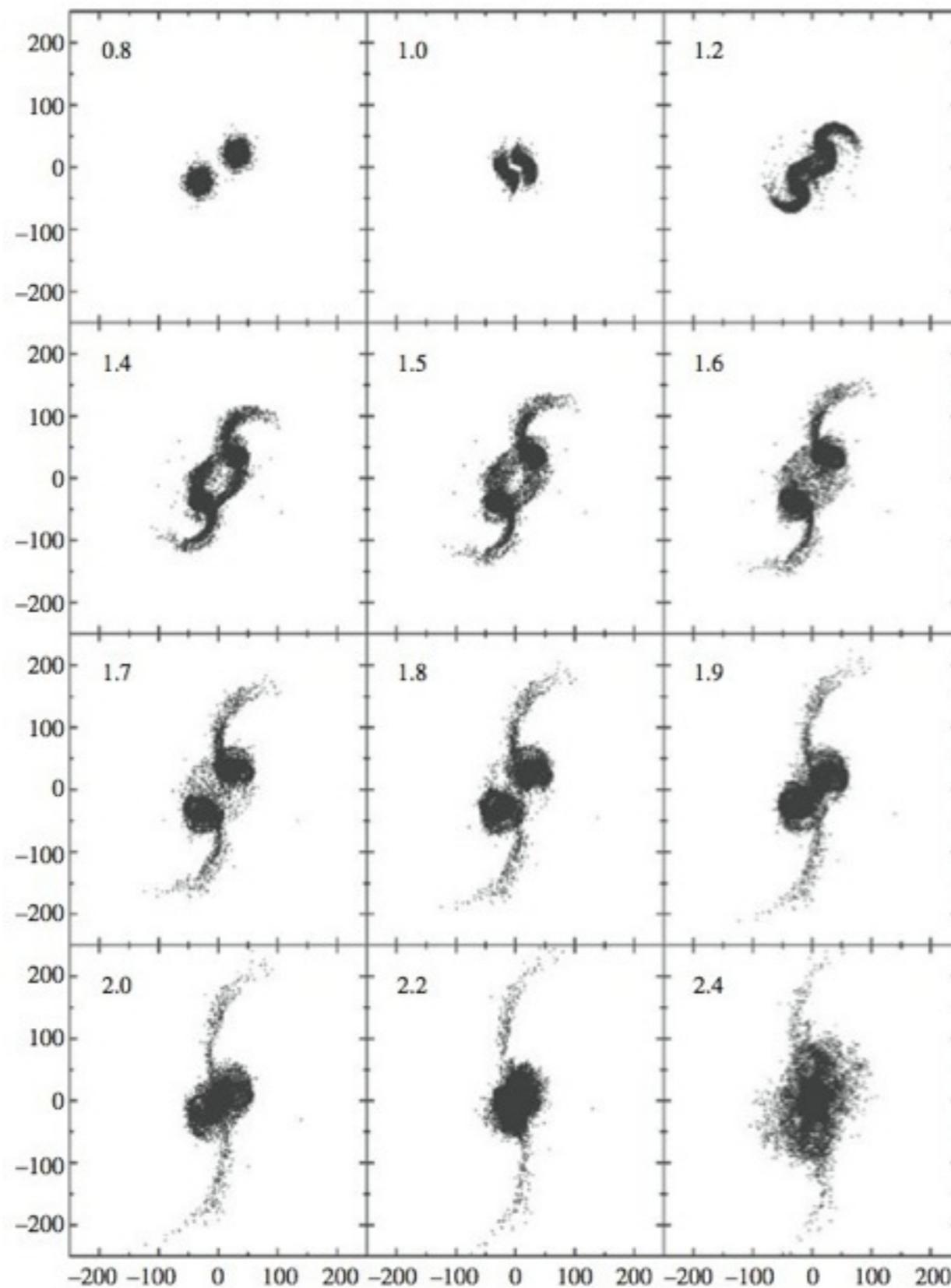


Fig. 12.2. Snapshots that show the time evolution of a numerical N -body simulation of a prograde merger between two disk galaxies that are embedded in dark matter halos. The snapshots show the disk particles ('stars') only, and clearly reveal the formation of two prominent tidal tails. The length units labeling the axes are given in h^{-1} kpc, and the numbers in the upper left corner of each panel indicate the elapsed time since the start of the simulation in units of $9.8 \times 10^8 h^{-1}$ yr. [Adapted from [Springel & White \(1999\)](#)]

Fricção dinâmica (Dynamical Friction)

- Quando um objeto de massa M se move dentro de um grande sistema não-colisional cujas partículas constituintes (field particles) tem massa $m \ll M$.
- Força de arrasto (drag force) transfere energia e momento de M para as partículas do campo
- Faz com que um objeto orbitando dentro de um sistema a perder energia e momento angular: a órbita decai com o tempo (orbital decay), transportando-o ao centro do poço de potencial e causando segregação de massa.

M "perturba" o campo causando um aumento de densidade na "cauda". Esse aumento de densidade exerce uma força gravitacional que diminui a velocidade de M.

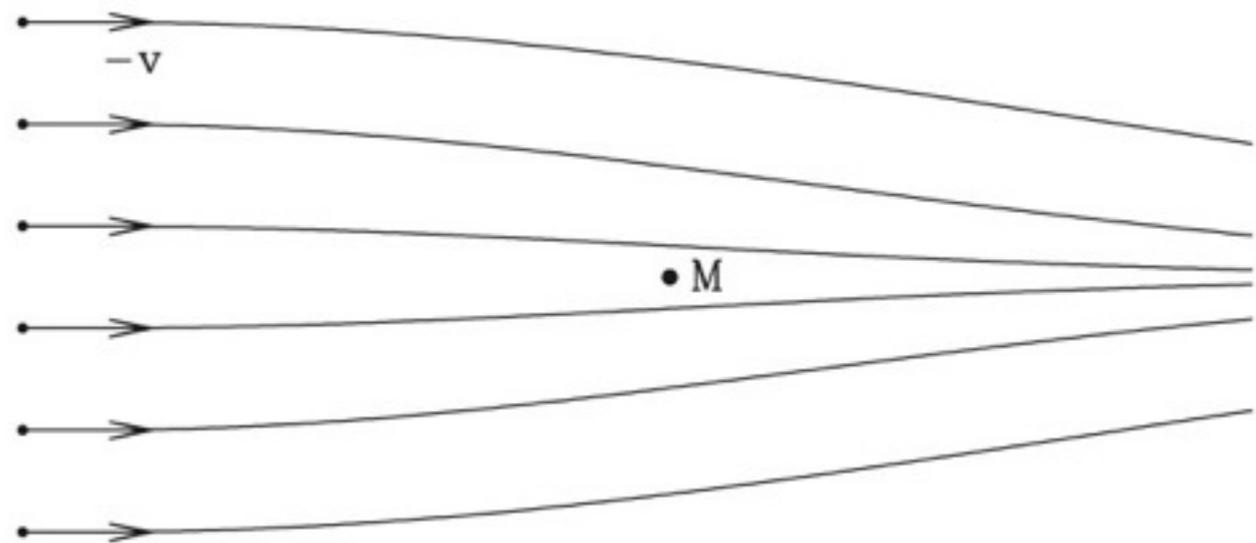


Fig. 12.3. As a massive object M moves through a sea of particles, the particles passing by are accelerated towards the object. As a result, the particle number density behind the object is higher than that in front of it, and the net effect is a drag force (dynamical friction) on the object.

Mergers

E_{orb} (the orbital energy per unit mass)

$$\hat{E} \equiv \frac{E_{\text{orb}}}{(1/2)\langle v^2 \rangle}$$

L (the orbital angular momentum per unit mass)

$$\hat{L} \equiv \frac{L}{\langle v^2 \rangle^{1/2} r_{\text{med}}}$$

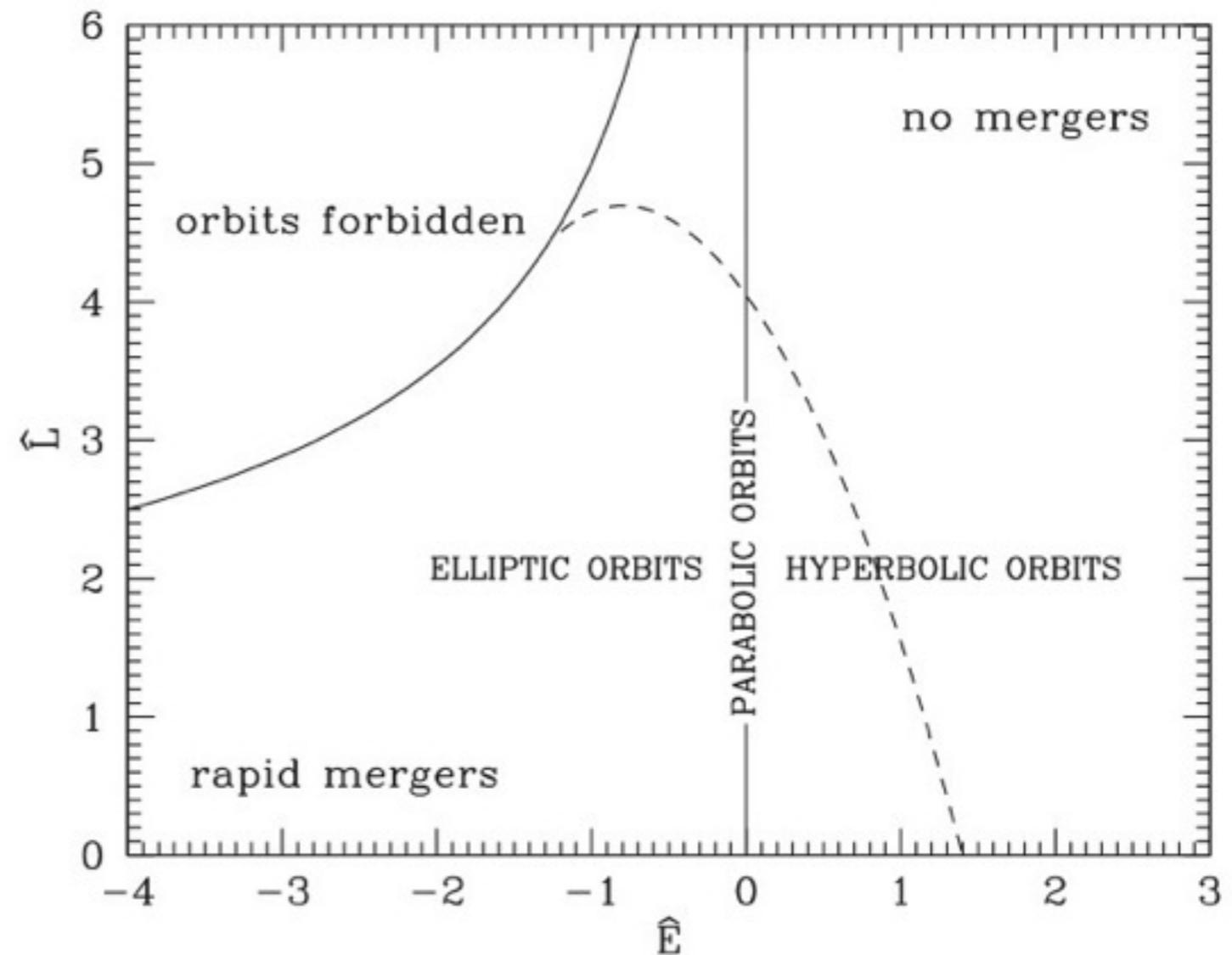


Fig. 12.4. Merging criteria for two spherical galaxies with the same mass. Orbits in the upper-left region are forbidden, because for a given orbital energy the largest possible angular momentum is that of a circular orbit (indicated by the solid curve). Encounters with orbital energy and/or angular momentum that are too high cannot lead to a merger. Mildly hyperbolic orbits can lead to a merger if the orbital angular momentum is sufficiently low. Mergers occur within a few galaxy dynamical times of first pericentric passage for encounters lying below and to the left of the dashed line. [After Binney & Tremaine (1987)]

Mergers

- Quando a energia orbital é suficientemente baixa, um encontro próximo (close encounter) entre dois sistemas pode levar a uma fusão
- Mergers são efetivos quando $\hat{E} \lesssim 1$
 - => sistemas com dispersão de velocidades menor ou comparável às velocidades internas das galáxias
- Quando dois sistemas tem um encontro, os halos de matéria escura podem se fundir em um novo halo mesmo que as galáxias continuem orbitando uma a outra: as 2 galáxias orbitam um halo em comum até que fricção dinâmica e interações de maré tenham removido energia orbital suficiente para que elas se fundam.

Mergers

- Mergers são eficientes em grupos de galáxias, mas não em aglomerados ricos (exceção à galáxia central)
- a primeira simulação 3D auto-consistente do encontro de galáxias foi apresentada em White (1978, 1979).
- desde então, diversas simulações de N-corpos mostram que o encontro de galáxias disco de massas semelhantes resultam em um sistema muito semelhante às galáxias elípticas (propriedades estruturais).
- as simulações indicam que a estrutura do remanescente depende de 4 propriedades principais:
 1. **a razão de massa dos progenitores** $q \equiv M_1/M_2$: se $q < \sim 4$ ($> \sim$) se fala de um minor (major) merger. Em major merger relaxação violenta tem um papel importante e o remanescente não tem pouca semelhança com seus progenitores.

Mergers

- 2. morfologia dos progenitores (discos ou esferóides):** discos são frágeis principalmente quando q é pequeno. Discos que acretam satélites podem sobreviver ao "merger" mas com espessamento do disco. Mergers de 2 discos tendem a criar tidal tails.
- 3. a fração de massa dos progenitores:** ao contrário de estrelas e matéria escura, gás responde a forças de pressão e pode perder energia por radiative cooling e desenvolver ondas de choque; mergers entre sistemas ricos em gás (wet mergers) podem ter um resultado bastante diferente de mergers entre sistemas pobres em gás (dry mergers)
- 4. propriedades orbitais:** a energia orbital e momento angular dos progenitores determinam se o merger irá ocorrer e também tem impacto no resultado do merger, por exemplo, a orientação relativa entre os spins dos progenitores é um fator importante para determinar o surgimento de tidal tails.

Aquecimento de discos por merger

- discos aquecem quando acretam significativas quantidades de massa
- a existência de um disco fino na Galáxia implica que esta não sofreu minor merger nos últimos Ganos.
- o aquecimento associado a acreção de satélites é atualmente um potencial problema para o modelo hierárquico de formação de estruturas
- pelo paradigma CDM atual, halos de matéria escura contém vários subhalos (com ou sem galáxias satélites) que causam aquecimento (espessamento) dos discos
- como então discos finos são tão comuns no Universo local? Gás é eficiente em esfriar rapidamente os discos após o merger?
- Purcell et al., 2009; Robertson et al., 2006; Moster et al., 2009

Mergers, Starbursts e AGNs

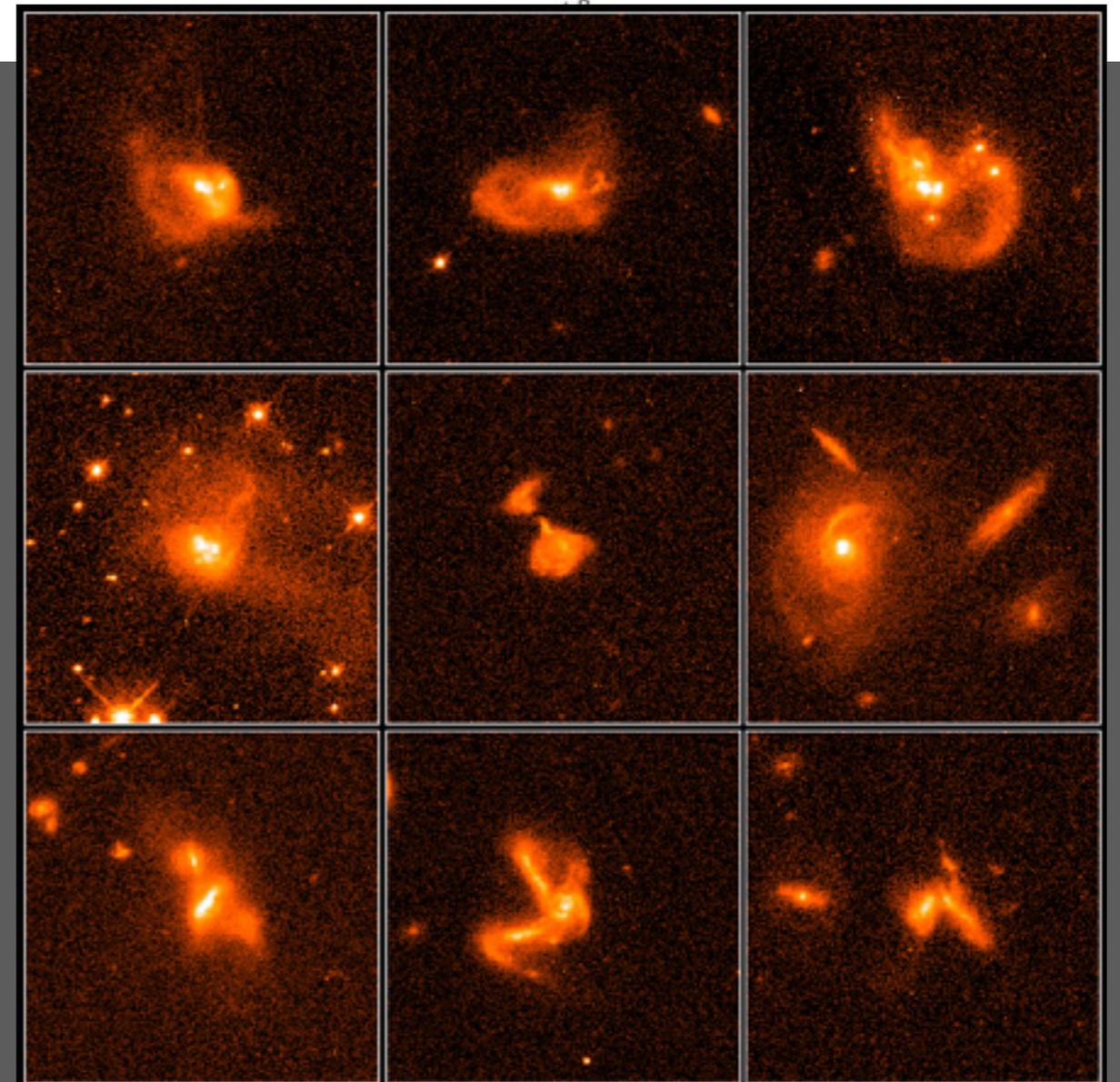
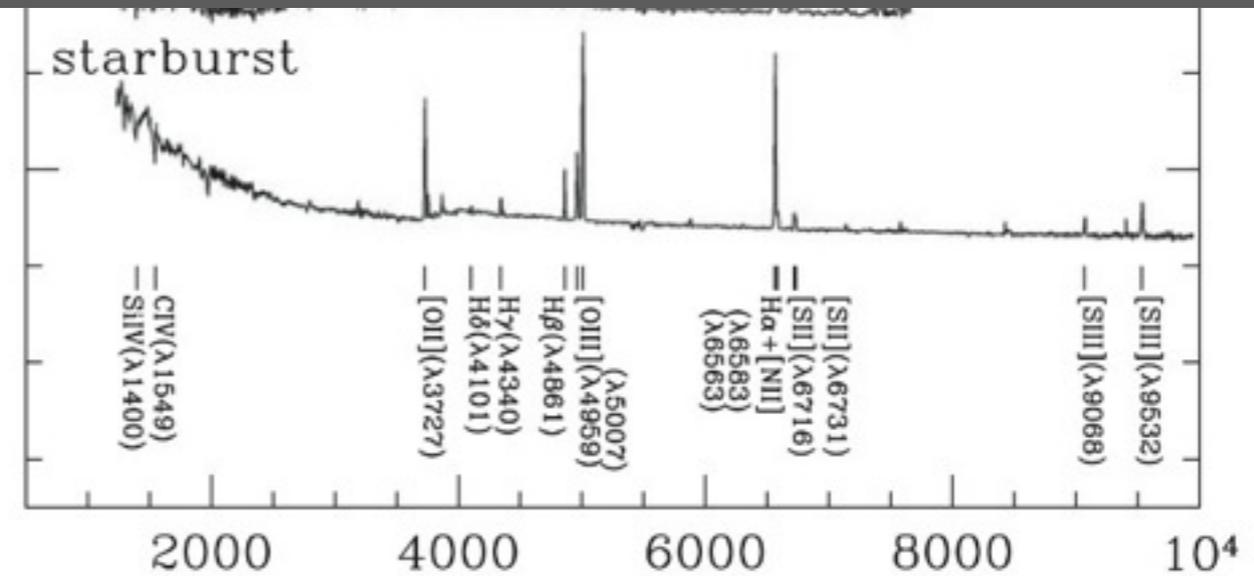
- importante aspecto de wet mergers é que eles podem disparar nuclear starbursts e atividade AGN
- simulações numéricas mostram que os discos ricos em gás em um encontro se tornam altamente instáveis e desenvolvem **barras**.
- gás e estrelas não tem a mesma resposta às forças de maré e as barras gasosas ou estelares geralmente estão em fases diferentes
- a diferença de fase dá origem a torques que removem momento angular do gás
- como resultado, o gás migra para o centro do sistema onde forma uma alta concentração de gás na galáxia remanescente ao merger

Mergers, Starbursts e AGNs

- a densidade superficial do gás pode ser várias ordens de magnitude superior a uma densidade de gás típica de galáxias disco não perturbadas => pode levar a altas taxas de formação estelar => nuclear starburst
- questões em aberto:
 - qual fração das estrelas formadas hoje foram induzidas por mergers? (Somerville et al., 2001)
 - qual o papel do feedback em regular e terminar o starburst e atividade AGN? (Springel et al., 2005).
- <https://www.youtube.com/watch?v=XYyYIOwdVcw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=ws2V-Sv8-GQ>
- https://www.youtube.com/watch?v=_FlGiqPdbx8

Nuclear starburst

- Sistemas com taxas de formação estelar 10 a 100x mais alta do que a da Galáxia => escalas de formação de $\sim 10^8$ anos
- a região de formação é geralmente confinada aos 1kpc centrais
- quando não estão fortemente obscurecidos por poeira, a maior parte da emissão é no UV
- na maior parte dos casos os fótons UV são absorvidos e reemitidos no IV distante => LIRGs e ULIRGs (L_{IV} maior que 10^{11} ou $10^{12} L_{sun}$)



Ultraluminous Infrared Galaxies HST • WFPC2

NASA and K. Borne (Raytheon ITSS and NASA Goddard Space Flight Center), H. Bushouse (STScI), L. Colina (Instituto de Fisica de Cantabria, Spain) and R. Lucas (STScI)

Formação de bojos

- Bojos massivos (S0 e Sa) compartilham muitas das propriedades de elípticas de luminosidade intermediária $-20.5 < M_B \leq -18.5$: são achatados por rotação, os perfis de brilho superficial obedecem as mesmas relações, e apresentam as mesmas relações cor-magnitude, metalicidade-luminosidade, plano fundamental e massa do buraco negro central com dispersão de velocidades.
- Esse acúmulo de evidências indica que os dois sistemas se formaram de modo semelhante: merger de progenitores ricos em gás. A diferença está se o disco consegue sobreviver ou crescer com acreção de massa após o merger.
- Bojos menos massivos tem perfil de brilho semelhantes a discos, são mais achatados, apresentam formato boxy ou peanut => pseudo-bojos
- um último processo que pode influenciar é a acreção de galáxias satélite e aglomerados globulares (fricção dinâmica) e portanto podem ter uma origem semelhante aos dos discos espessos

Bojos

- Kormendy & Kennicutt, 2004
- pseudo-bojos: formados inteiramente a partir do disco por processos de evolução secular
- boxy-peanut shape, perfis de brilho superficial exponenciais, dominados por rotação, mais achatados
- bojos clássicos: acredita-se que se formem de modo semelhante a galáxias elípticas



Evolução secular

- a presença de instabilidade globais (barras, braços espirais) faz com que a distribuição de massa e momento angular de galáxias disco evolua lentamente com o tempo
- estudos recentes mostram que evolução secular tem um papel importante na evolução de galáxias disco
 - implica que as propriedades estruturais do disco podem estar mais relacionadas a processos evolucionários internos do que às propriedades dos seus respectivos halos de matéria escura
 - os processos pelos quais isso acontece ainda não são bem compreendidos, mas os principais mecanismos em ação são resonance coupling, presença de gás (efeitos hidrodinâmicos), bending instability (direção vertical, peanut shape), formação de bojos

Transformação morfológicas de galáxias em clusters

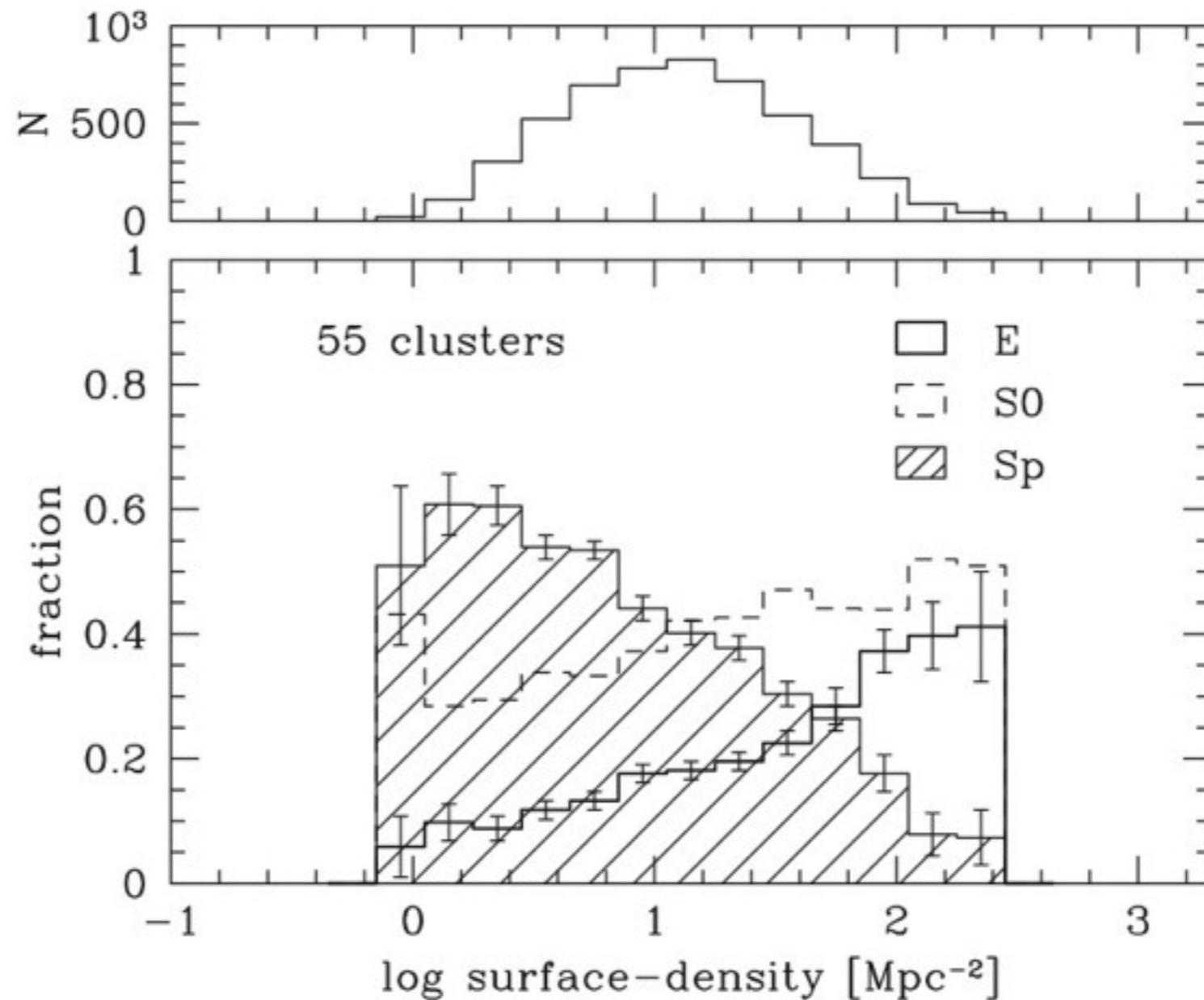
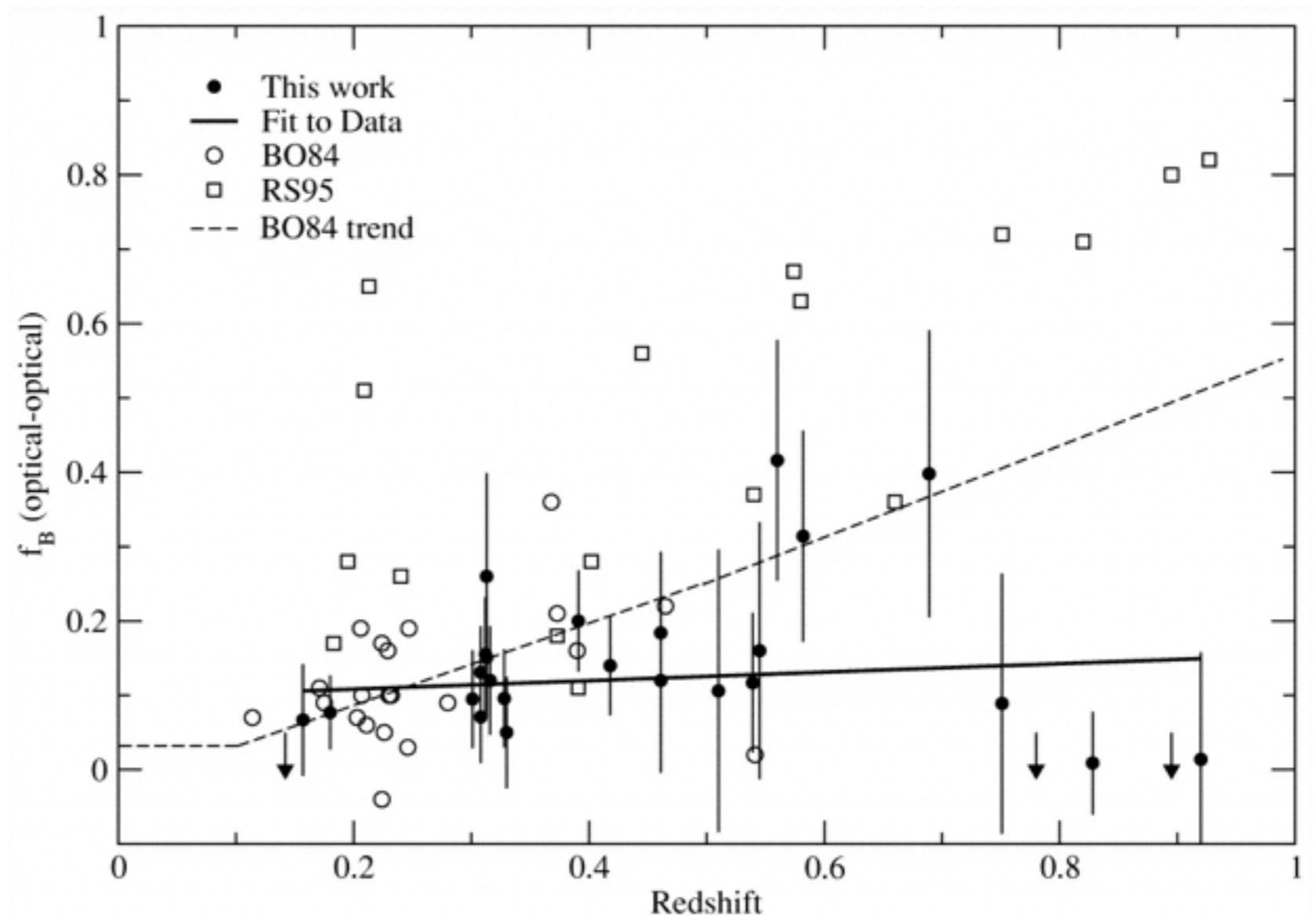


Fig. 2.29. The morphology–density relation, which shows the fractions of galaxies of individual morphological types as functions of galaxy surface number density. The lower panel shows such relations for 55 clusters, while the upper panel shows the number of galaxies in each density bin. [After Dressler (1980a)]

Butcher-Oemler effect

- a parte central dos aglomerados de galáxias em redshifts intermediários ($z \sim 0.3$) tem uma maior fração de galáxias azuis



Transformação de galáxias em clusters

- Ambientes densos contêm uma maior fração de galáxias classificadas como early-type, são na média mais vermelhas, com menos gás, taxas de formação estelar mais baixas
- isso sugere algum tipo de transformação late -> early type; star forming -> passive quando a galáxia entra ou se torna parte de um ambiente mais denso
- grosso modo, galáxias em clusters podem ser afetadas pelo ambiente de três modos:
 - interações de maré com outras galáxias do cluster e com o poço de potencial do aglomerado
 - fricção dinâmica, que provoca um lento "cair" da galáxia ao centro do aglomerado
 - interações com o meio intracluster (ICM)

Galaxy Harassment

- a velocidade típica de uma galáxia em um aglomerado é da ordem da dispersão de velocidade do aglomerado, portanto muito maior do que a dispersão de velocidade interna da galáxia
- isso caracteriza que a maioria dos encontros é do tipo "high speed encounter"
- a galáxia é "aquecida" -> expande -> se torna menos ligada gravitacionalmente -> mais vulnerável a perda de massa em outros encontros e por efeitos de maré
- galaxy harassment é o efeito cumulativo de vários encontros de alto velocidade
- harassment não altera o perfil $r^{1/4}$ de galáxias elípticas (Aguilar & White 1986)
- discos podem ser quase totalmente destruídos em 1 ou 2 passagens pelo aglomerado (Farouki & Shapiro 1981), principalmente espirais Sc-Sd (Moore et al. 1998).

Galaxy Harassment

- Discos remanescentes são aquecidos, e podem se transformar em uma componente esferoidal parecida com dwarf ellipticals.
- Consistente com o efeito Butcher & Oemler (1978) (aglomerados em $z \sim 0.3$ contém maiores frações de galáxias azuis do que aglomerados em $z \sim 0$)
- Inconsistente com a observação de que a maioria das dwarf ellipticals tem rotação baixa ou nula (simulações prevêm que os esferoides remanescentes manteriam alta rotação)
- tem pouco impacto morfológico em espirais mais compactas como Sa-Sb (mas podem causar instabilidades e aquecer os discos).
- combinado com ram-pressure stripping, potencialmente transforma Sc-Sd em S0.

Ram pressure stripping

- Pressão exercida sobre um corpo que se move dentro de um fluido, causando uma força de arrasto $P = \rho v^2$
- no caso de galáxias, o fluido é o meio intracluster (gás quente)
- se a pressão for suficientemente forte, pode retirar o gás interno da galáxia e impedindo formação estelar
- ram pressure é invocado para explicar porque galáxias em aglomerados revelam um deficit de galáxias ricas em gás com formação estelar recente
- pode transformar algumas espirais em lenticulares, mas ainda há debates há respeito porque simulações indicam que nem todo o gás pode ser retirado por esse processo.

Estrangulação

- Tanto por efeitos de maré quanto ram pressure, espera-se que a maior parte do gás seja retirado das galáxias quando estas são acretadas em ambientes densos
- Isso causa um decline gradual da formação estelar conforme o “combustível” acaba, o que é conhecido por “**estrangulação**”.
- Consistente com as evidências de que as taxas de formação estelar em galáxias do campo são várias vezes maiores do que em galáxias semelhantes em aglomerados.
- A maioria dos modelos de evolução de galáxias de hoje incluem a estrangulação que, em comparação com mergers, consegue reproduzir a maioria das relações entre taxa de formação estelar e morfologia com massa estelar e ambiente.
- No entanto, algum fine-tuning nas prescrições ainda é necessária para reproduzir as cores observadas (over-quenching; Kimm et al. 2009; Font et al. 2008; McCarthy et al. 2008)

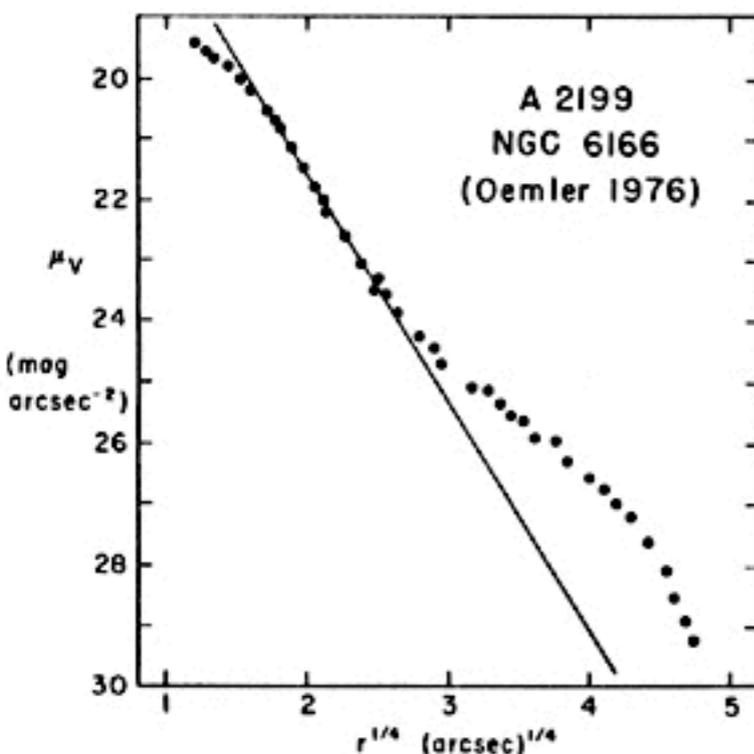
Canibalismo galáctico

- Em aglomerados a taxa de mergers é baixa devido às altas velocidades dos encontros
- Uma importante exceção refere-se a galáxia central do aglomerado
- devido a fricção dinâmica, as galáxias perdem energia e momento e espiralam para o centro do potencial
- **canibalismo galáctico** é o nome dado ao processo no qual a galáxia central do aglomerado acreta satélites que chegam ao centro do potencial. Efeitos:
 - crescimento de massa da galáxia central
 - depleção de galáxias satélites massivas, para as quais o tempo de fricção dinâmico é menor, aumentando a diferença de magnitude entre a galáxia mais brilhante e a segunda mais brilhante

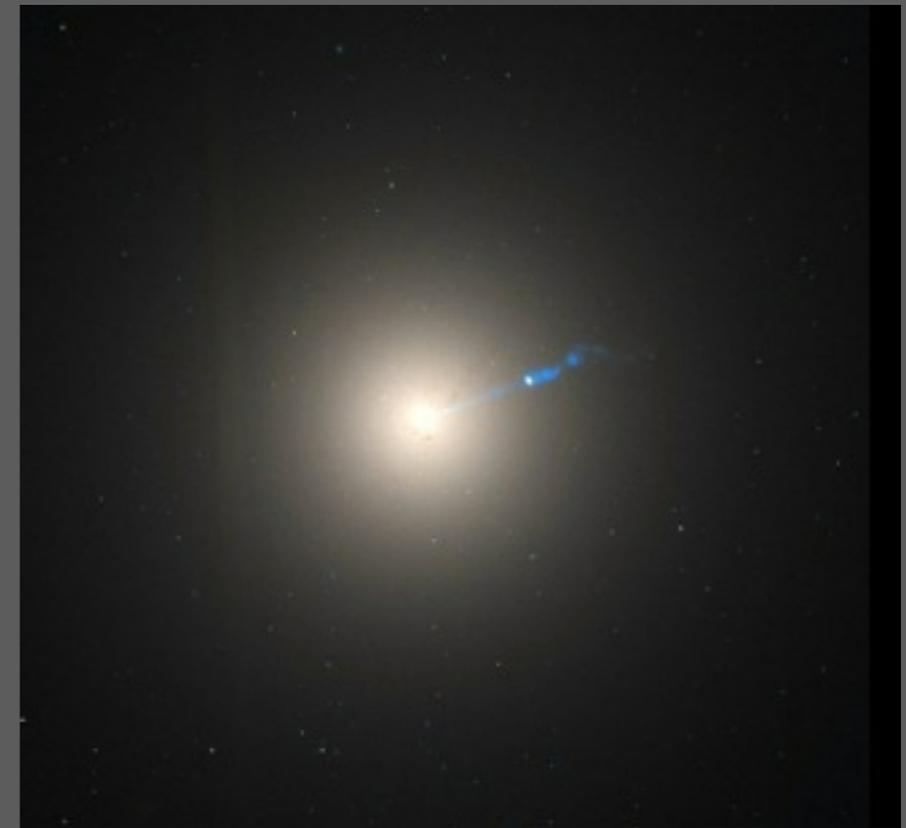
$$\Delta M_{12}$$

Galáxias cD

- galáxias elípticas gigantes com halo estendido, e frequentemente com vários cores (cD de classificação de Yerkes = supergigante difusa)
- Contribui sozinha para 1 - 7% da massa bariônica do aglomerado
- 10^7 pc de diâmetro (?)



Brightness profile of the cD galaxy NGC 6166. The straight line is the adopted $r^{1/4}$ -law fit. The outermost measured point is at a radius of 460 kpc.



M87: Galáxia central do aglomerado de Virgo



NGC1275: Perseus A

Formação de anãs elípticas

- É tentador imaginar que o cenário de formação é o mesmo de elípticas maiores, apenas com progenitores de menores massas.
- mas a previsão deste cenário é de que as dE deveriam ser mais comuns em halos de baixa massa, ser menos concentradas do que elípticas maiores, e ter rotação. Todas essas previsões estão em amplo desacordo com os dados observacionais.
- Três cenários de formação de dE e dSph
 1. gas stripping transforma dlrr em dE/dSph (ram pressure): mas não explica a falta de rotação desses sistemas e a frequência de aglomerados globulares.
 2. galaxy harassment transforma S em dE/dSph: as progenitores poderiam ser as galáxias Butcher-Oemler; mas apresenta os mesmos problemas que o cenário 1.
 3. tidal stripping transforma E em dE/dSph: mas isso implicaria que as metalicidade e M_{BH} seriam as mesmas das E, o que está em claro desacordo com as observações.
- então???