



Universidade Federal do ABC

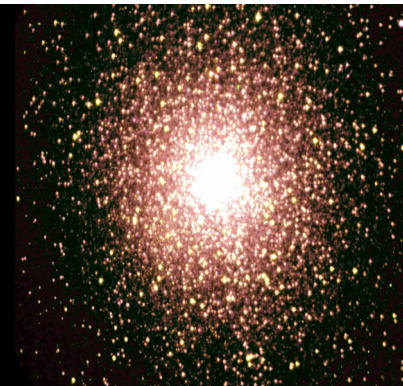
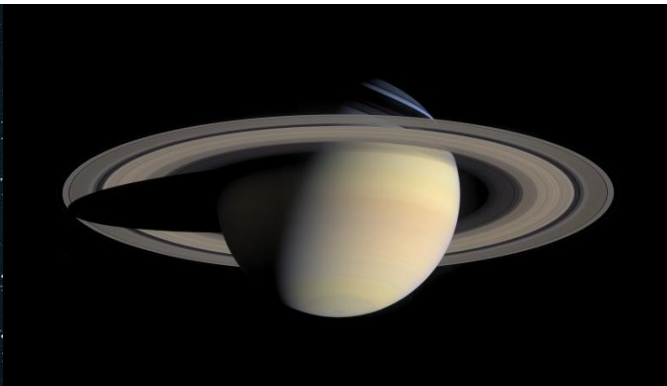
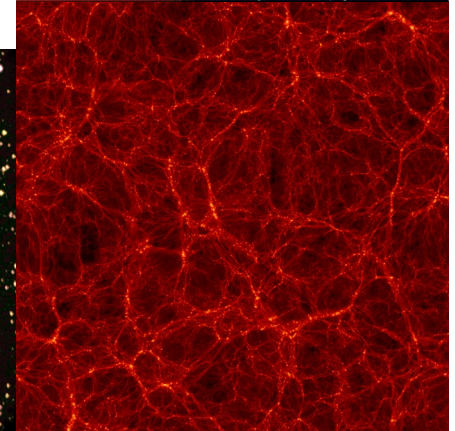
Noções de Astronomia e Cosmologia

13. Galáxias II: Formação e Evolução

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Astro.html>



Como explicar as Formação e Evolução desta variedade de galáxias?



Formação e Evolução de Galáxias

Ao contrário de estrelas, **galáxias** têm **tamanhos consideráveis** em comparação às **distâncias** entre elas, da ordem de 1:100.

=> Nada de
“Universos Ilhas”

Será que as **interações** entre **galáxias** são importantes para as suas **formação** e **evolução**?

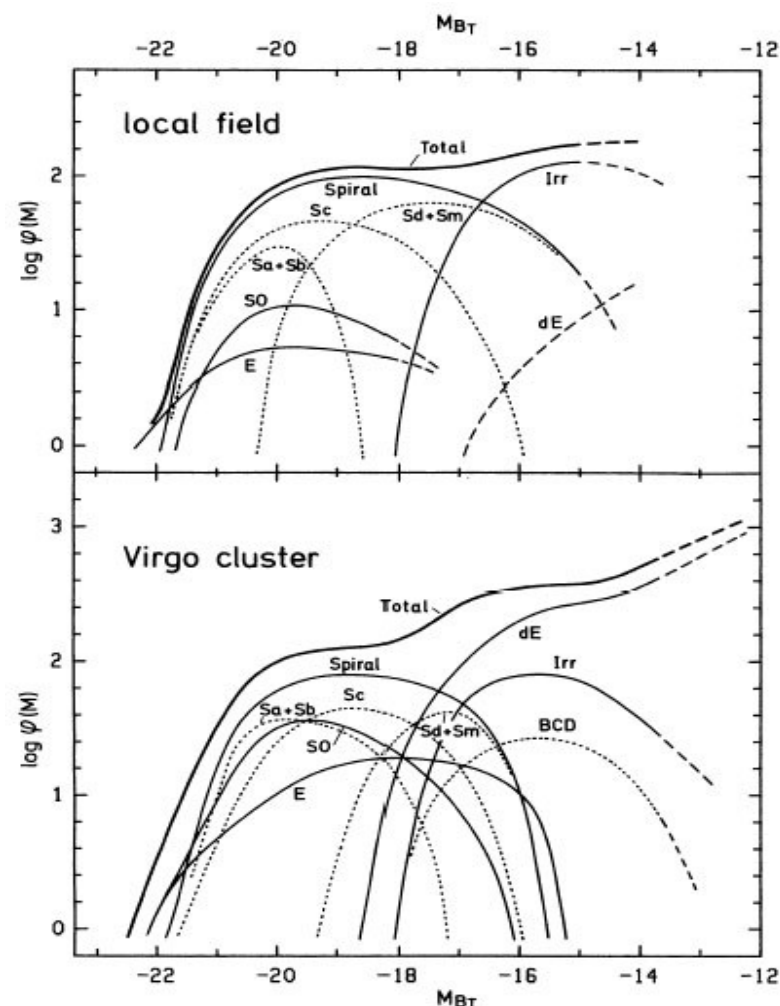


Formação e Evolução de Galáxias

Dicas para a importância de interações entre galáxias

- A **relação morfologia-densidade**:
Elípticas são mais frequentes
em **ambientes densos**
(com maior densidade
de galáxias).

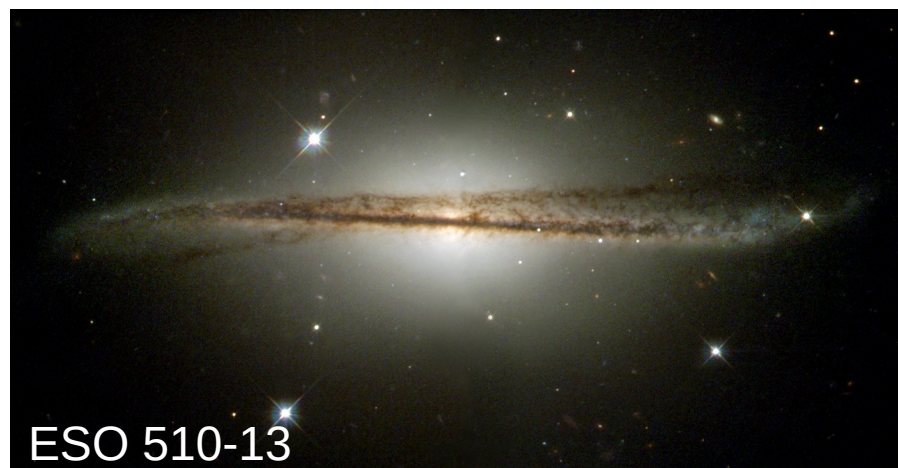
=> A **interação** entre **galáxias**
deve favorecer a **formação**
de **elípticas**.



Formação e Evolução de Galáxias

Dicas para a importância de interações entre galáxias

Observações do **gás HI** mostram, que pelo menos metade das **galáxias discos** têm **deformações** (*warps*) nos seus **discos** (lembrem da deformação no disco da Via Láctea?), consequência de **interações** com **galáxias satélites**.



Formação e Evolução de Galáxias

Dicas para a importância de interações entre galáxias

Elípticas frequentemente têm **cascas concêntricas**, possivelmente as **frentes de ondas** causadas por **galáxias pequenas** que “**caíram**” dentro da **galáxia**.



NGC 3923

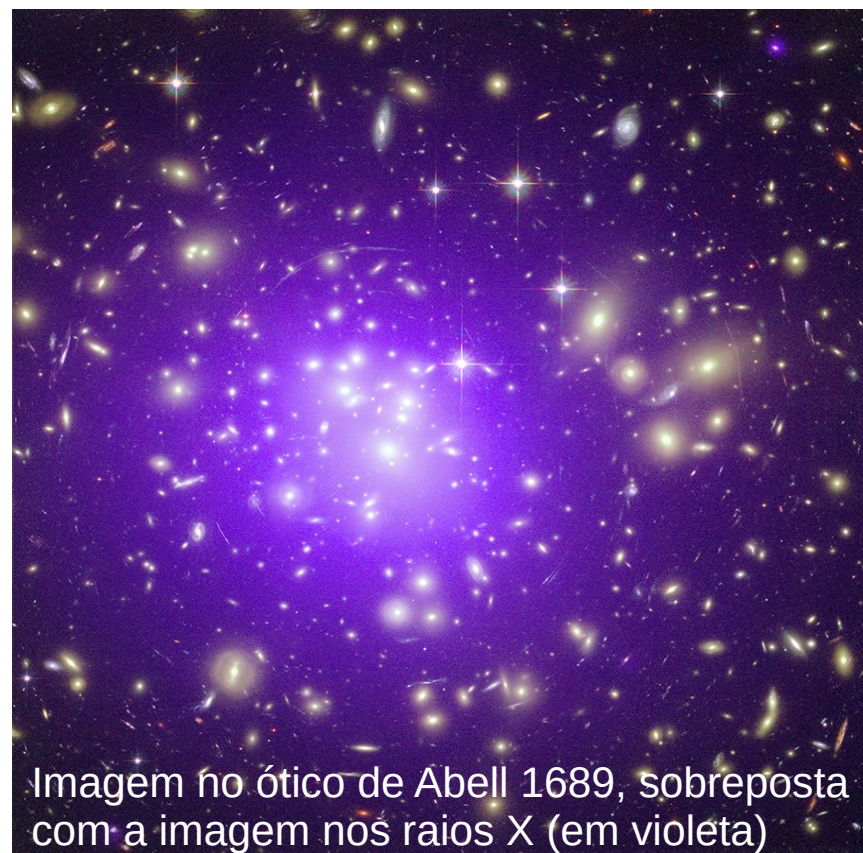
Formação e Evolução de Galáxias

Dicas para a importância de interações entre galáxias

Em **aglomerados ricos** de **galáxias**, boa parte do espaço intergaláctico é ocupado por **gás quente**, observável nos **raios X**.

Este gás tem **massa maior** que as **estrelas** das galáxias.

São **interações gravitacionais** entre as **galáxias** que tiraram o gás das **galáxias individuais**.



Formação e Evolução de Galáxias

Dicas para a importância de interações entre galáxias

E a mais convincente:

Galáxias em **interação**
estão sendo **observadas**.

=> precisamos saber mais
sobre as **interações** entre
galáxias para entender as
suas **formação** e **evolução**.



As Antenas



Os Camundongos

The Mice • Interacting Galaxies NGC 4676
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, H. Ford (JHU), G. Illingworth (UCSC/LO), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI) and the ACS Science Team • STScI-PRC02-11d

Interações entre Galáxias

Fricção Dinâmica

O que acontece, quando **galáxias colidem**?

Como as **estrelas** nas galáxias são muito **pequenas comparadas** às **distâncias** entre elas, as **galáxias** podem se **atravessar** sem **nenhuma colisão** entre **estrelas**.

A **interação** é pela força **gravitacional** por um processo chamado **fricção dinâmica**.

Interações entre Galáxias

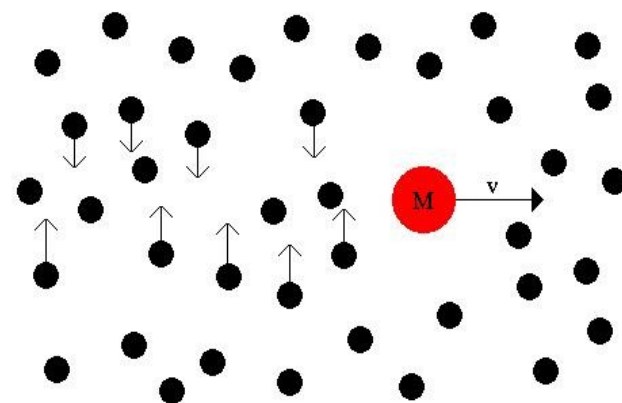
Fricção Dinâmica

Supondo um objeto (uma **galáxia anã** ou um **aglomerado**) de massa M passando com velocidade v_M pelo “**mar**” de **estrelas** de densidade ρ de uma **galáxia maior**.

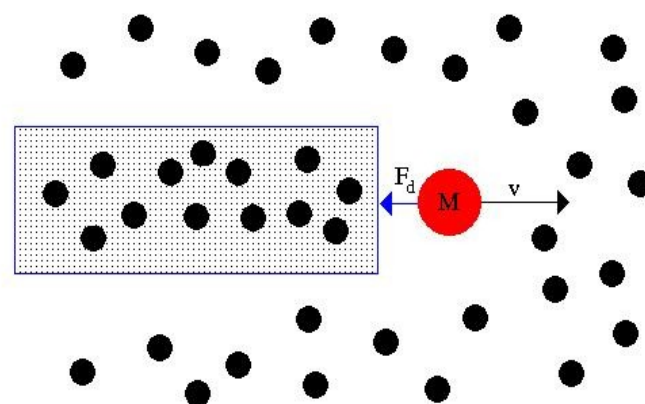
M **atrai** as **estrelas**, que se **aglomeram atrás** dele e **puxam-no** pra **trás**, com força F_d .

=> O movimento de M é **freiado**, por isto o nome de **fricção**.

consider a mass, M , moving through a uniform sea of stars. Stars in the wake are displaced inward.



this results in an enhanced region of density behind the mass, with a drag force, F_d known as dynamical friction



Interações entre Galáxias

Fricção Dinâmica

$$F_d = C \cdot G^2 M^2 \rho / v_M^2,$$

Um fator GM vem da **força** gravitacional aplicada por M nas **estrelas**, o **outro** (e o fator ρ) vem da **força** aplicada pelas **estrelas** em M .

Um fator v_M^{-1} vem da **duração** da **atração** aplicada por M nas **estrelas** (quanto mais rapidamente M passou pelo mar de estrelas, tanto menos tempo ele teve pra atração), o **outro** vem da **duração** da **força** aplicada pelas **estrelas** em M .

C é uma constante sem dimensão que depende da dispersão de velocidades das estrelas no objeto de massa M (varia de 23 a 160).

Interações entre Galáxias

Fricção Dinâmica

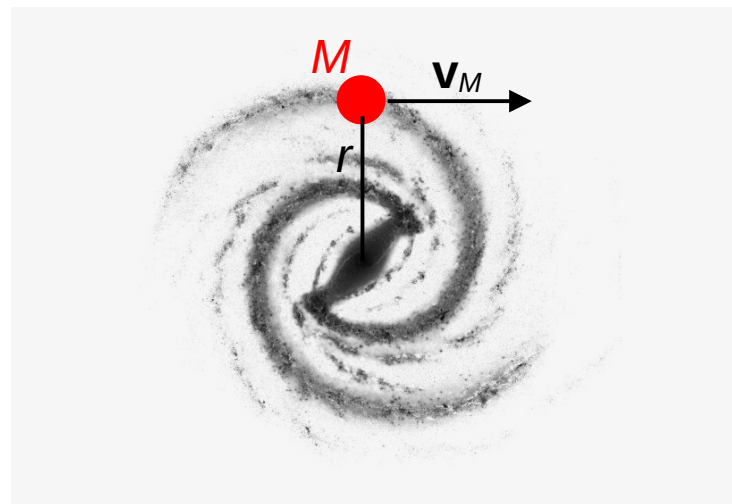
Supondo que o objeto de massa M seja uma **galáxia satélite** ou um **aglomerado globular** da **galáxia grande**, a sua **velocidade** é justamente a **velocidade** de **rotação** na sua distância do centro da galáxia grande

aula Via Láctea: $\rho(r) = \frac{v(r)^2}{4\pi G r^2}$

$$\Rightarrow v_M = \text{const.} = v(r) = \sqrt{4\pi G \rho(r) \cdot r}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow F_d &= C \cdot G^2 M^2 \rho(r) / v_M^2 \\ &= C \cdot G^2 M^2 \rho(r) / 4\pi G \rho(r) \cdot r^2 \\ &= C \cdot G M^2 / 4\pi r^2,\end{aligned}$$

pode-se calcular o **tempo** t_c que ele leva para “**cair**” (espiralar) de r_i para o **centro** da **galáxia grande**:



Interações entre Galáxias

Fricção Dinâmica

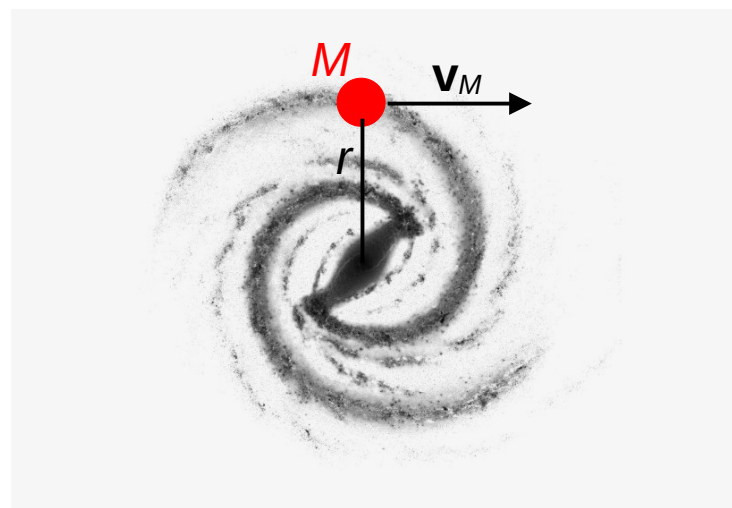
Momento angular de M ($\mathbf{r} \perp \mathbf{v}_M$): $L = r v_M M$

=> torque aplicado em M :

$$\begin{aligned} \tau &= dL/dt \stackrel{v_M = \text{const.}}{=} M v_M dr/dt \\ &= -r F_d = -r C GM^2/4\pi r^2 \end{aligned}$$

$\mathbf{r} \perp \mathbf{v}_M \parallel -\mathbf{F}_d$

$$\Rightarrow r dr = -CGM/4\pi v_M \cdot dt$$



Integrando do momento inicial ($t = 0, r = r_i$) até o final ($t = t_c, r = 0$):

$$\begin{aligned} \int_{r_i}^0 r dr &= -CGM/4\pi v_M \int_0^{t_c} dt \Rightarrow -r_i^2/2 = -CGM/4\pi v_M t_c \\ \Rightarrow t_c &= 2\pi v_M r_i^2 / CGM \end{aligned}$$

Interações entre Galáxias

Fricção Dinâmica

Tempo t_c que a galáxia satélite ou o aglomerado globular de massa M leva para “**cair**” (espiralar) de r_i para o **centro** da **galáxia grande**:

$$t_c = 2\pi V_M r_i^2 / CGM.$$

=> Satélites **maiores** espiralam **mais rapidamente** para dentro.

Sendo a **idade** da **galáxia** $t_{\max}$, podemos estimar a **distância máxima** $r_{\max}$ de “**captura**” de galáxias satélites ou aglomerados de massa M :

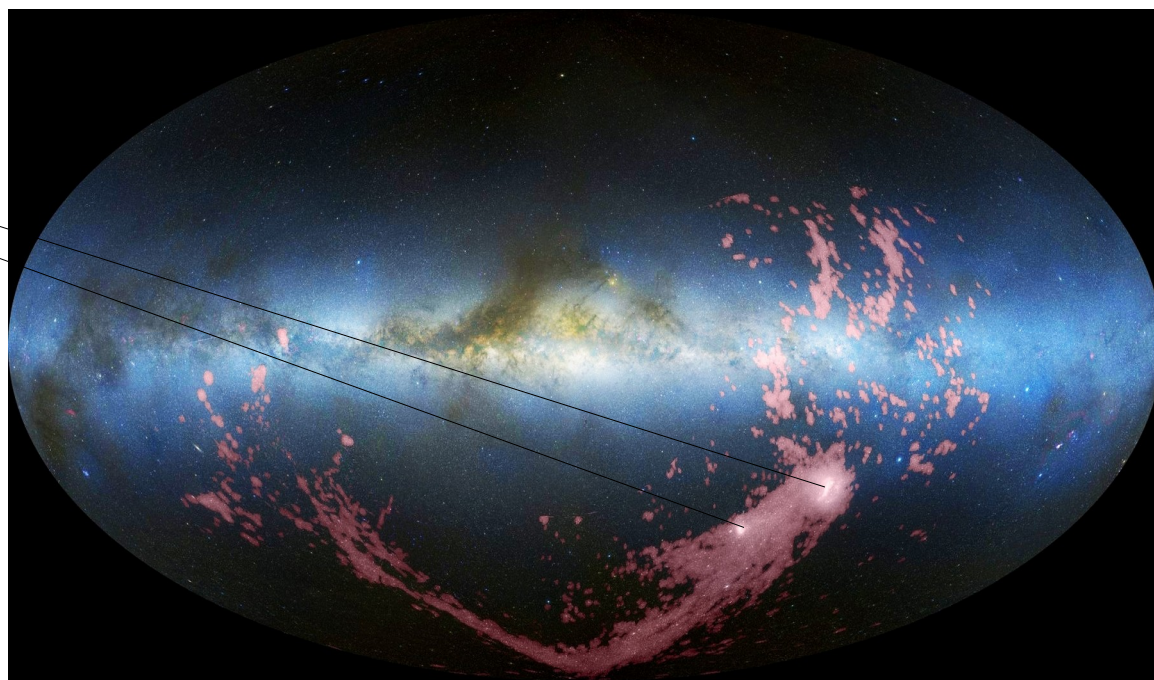
$$r_{\max} = \sqrt{t_{\max} CGM / 2\pi V_M}.$$

Interações entre Galáxias

Fusões de galáxias

No caso da **Via Láctea** isto está acontecendo com as **Nuvens de Magalhães**.

Elas estarão **incorporadas** na nossa **Galáxia** em alguns bi. anos,



Em cor de rosa: a **corrente magellânica**, **gás** que foi **arrancado** das **Nuvens de Magalhães** pela interação entre elas e com a Via Láctea, e onde se encontram várias galáxias anãs.

Interações entre Galáxias

Fusões de galáxias



e já aconteceu com
a galáxia anã
Canis Major,

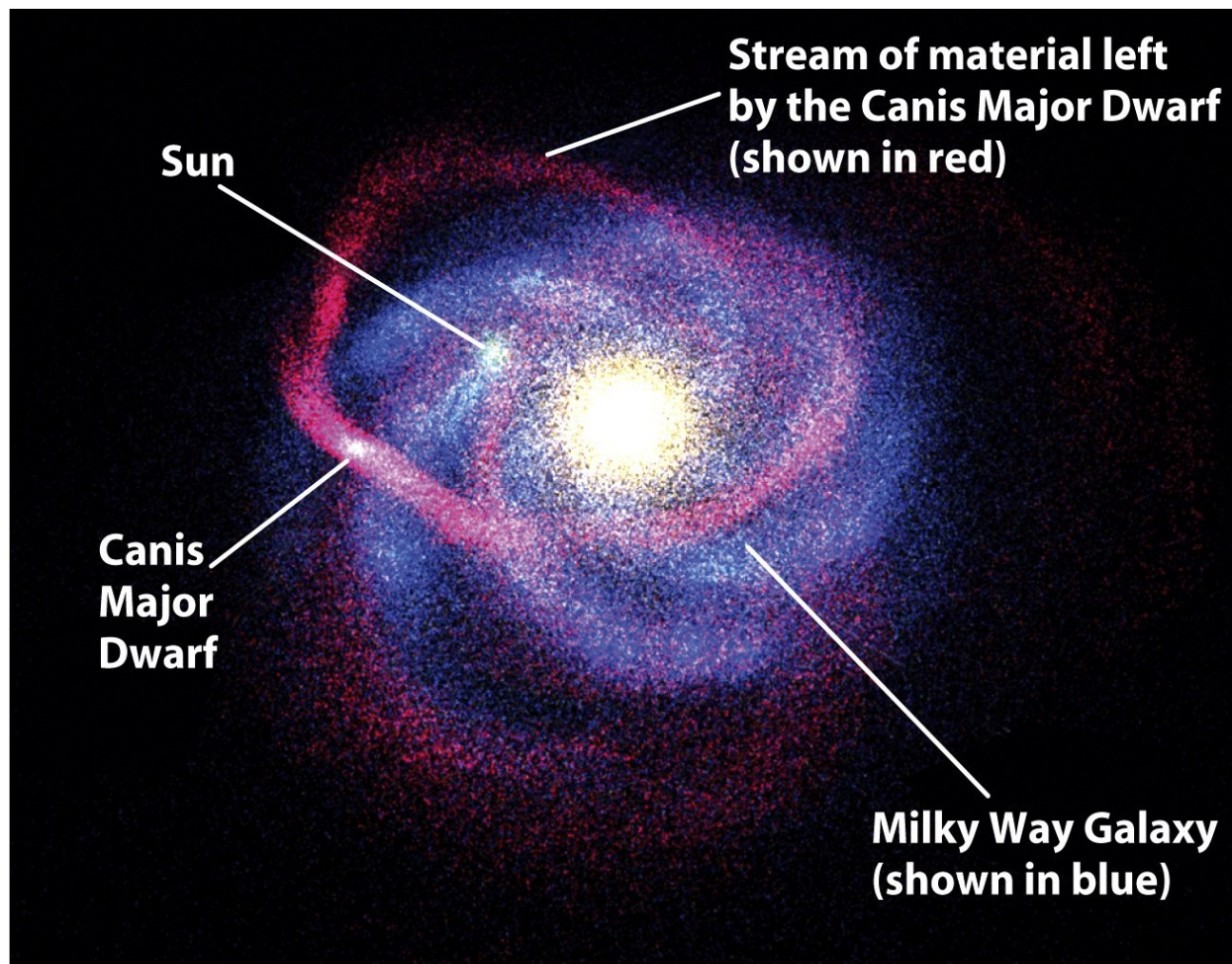


Figure 24-20
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Interações entre Galáxias

Fusões de galáxias

e com a galáxia tipo dSph de **Sagitário**, que se encontra atrás do Bojo, e é visível só no infravermelho.

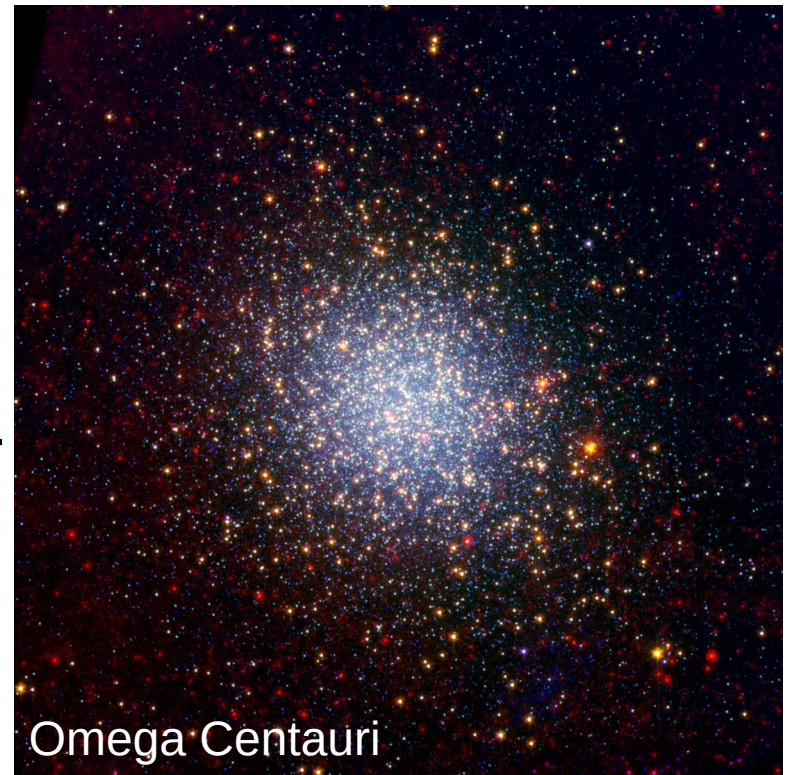


O Bojo Galáctico com a galáxia de Sagitário

Interações entre Galáxias

Fusões de galáxias

Alguns **aglomerados globulares** são provavelmente **restantes** de **galáxias anãs capturadas** pela nossa **Galáxia**, como p. e. **Omega Centauri** (ω Cen), um aglomerado conhecido por ter **populações estelares múltiplas**.

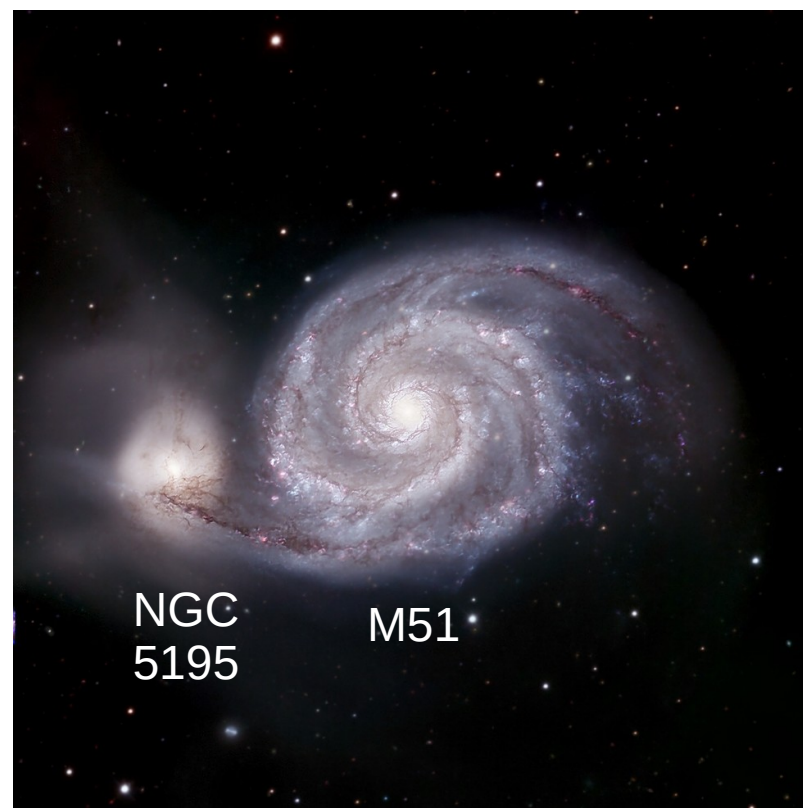


Interações entre Galáxias

Fusões de galáxias

De fato, galáxias grandes “devoram” **várias** galáxias anãs durante suas evoluções.

Estas fusões, ingl. **Mergers**, são importantes nas **formação** e **evolução** de galáxias.



Interações entre Galáxias

Encontros Rápidos

Se duas galáxias **colidem** com **velocidade muito alta**, as estrelas **não** têm tempo para alterar **suas posições** (afinal, a fricção dinâmica é proporcional a v_M^{-2}).

=> Elas se atravessam **sem freiar** muito uma a outra.

Porém, as estrelas ganharam um pequeno **empurrão**.

=> As galáxias **aumentaram** as suas **energias cinéticas internas** K .

=> As galáxias **sairam** do **equilíbrio virial**.

Interações entre Galáxias

Encontros Rápidos

Como serão as **energias cinética interna, gravitacional potencial e total** depois de **reganhar o equilíbrio?**

Antes do encontro: $\langle K \rangle_i$, $\langle U \rangle_i = -2\langle K \rangle_i$, $E_i = \langle K \rangle_i + \langle U \rangle_i = -\langle K \rangle_i$

logo depois do encontro:

$\langle K \rangle = \langle K \rangle_i + \Delta K$, $\langle U \rangle = -2\langle K \rangle_i$, $E = \langle K \rangle + \langle U \rangle = -\langle K \rangle_i + \Delta K$

Após reganhar o equilíbrio: $E_f = E = -\langle K \rangle_i + \Delta K$,

$\langle K \rangle_f = -E_f = \langle K \rangle_i - \Delta K$, $\langle U \rangle_f = 2E_f = -2\langle K \rangle_i + 2\Delta K = \langle U \rangle_i + 2\Delta K$

=> A **energia cinética interna diminuiu** por ΔK , e a **gravitacional potencial aumentou** por $2\Delta K$.

Interações entre Galáxias

Encontros Rápidos

Qual a **consequência** desta **energia potencial aumentada**?

- A galáxia **aumenta** de **tamanho**, ou
- **Material** é **expulso**, como na galáxia da Roda de Carruagem:
Uma das galáxias à direita atrevessou a à esquerda, tal que esta expulsou material em forma de anel de 46 kpc de diâmetro, onde ocorre formação estelar.



Galáxia Roda de Carruagem

Interações entre Galáxias

Galáxias *Starburst*

Um possível resultado de interações entre galáxias são galáxias *starburst*, galáxias com uma taxa de formação estelar extremamente alta, de 10 a 300 $M_{\odot}$ /ano.

Esta pode ocorrer no núcleo, ou no disco inteiro, provocado pelo colapso deste por ter tido removido quase todo momento angular pela interação violenta com uma outra galáxia.



Interações entre Galáxias

Galáxias *Starburst*

Na imagem: M82, uma galáxia passando por um **período** de **formação estelar** nos 400 pc internos desde 10^7 a 10^8 anos atrás.

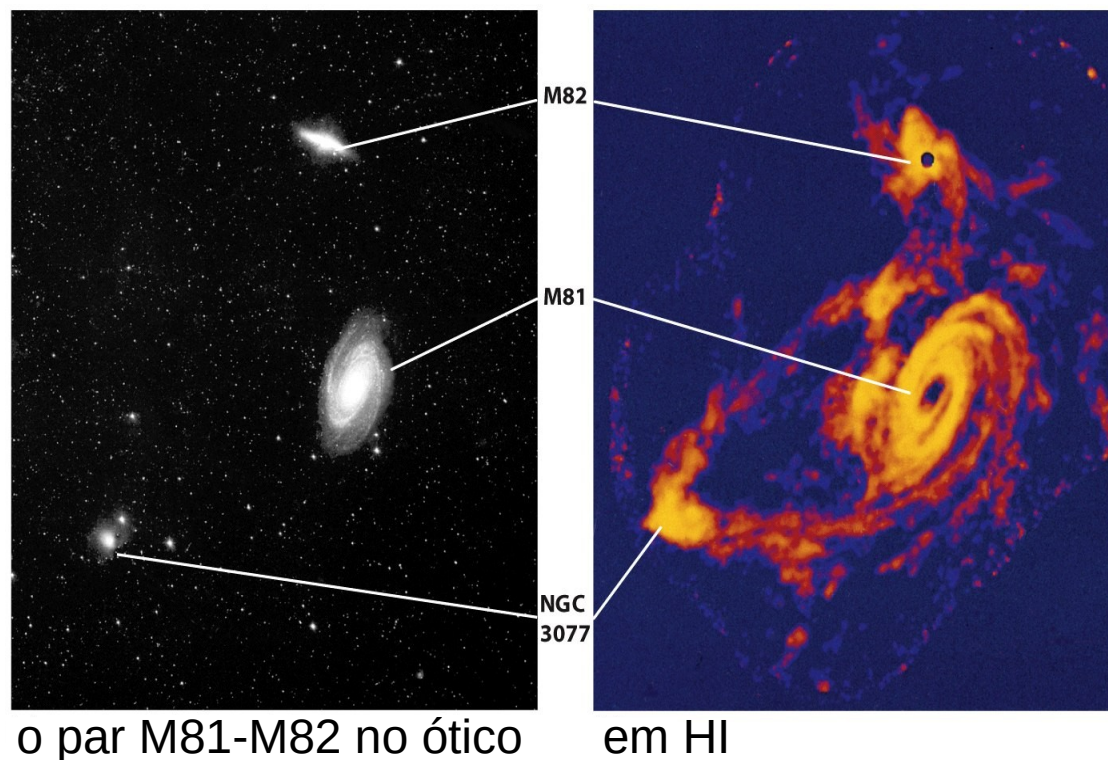
Choques de **supernovas** **expulsaram** mais de $10^7 M_{\odot}$ de **gás** do disco.



Interações entre Galáxias

Galáxias *Starburst*

Esta atividade pode ter sido **iniciada** por **forças** de **maré** com **M81**, a ~ 36 kpc de M82, e ligada a M82 por uma **ponte** de **gás** de **hidrogênio neutro** (uma terceira galáxia, NGC 3077, também está envolvida na interação).



Interações entre Galáxias

Tidal Stripping, “Remoção de material por forças de maré”

Como **galáxias não** são **pontiformes**, elas sofrem **forças de maré** no campo gravitacional de outras galáxias.

Num sistema de duas galáxias, o **potencial gravitacional** tem **estrutura similar** àquele em **estrelas binárias**, só que ele se **deforma** mais (já que as galáxias também se deformam).

A **distância** do **centro** de uma **galáxia** até o **ponto langrangiano interno** (L_1) é chamado ***tidal radius*** (“raio de maré”(??)) da galáxia.

Se uma galáxia **ultrapassa** seu ***tidal radius***, ele **perde material** pra outra galáxia. => ***Tidal Stripping***, o análogo galáctico de uma estrela ultrapassando seu lóbulo de Roche (=> aula Binárias / Estágios Finais).

Interações entre Galáxias

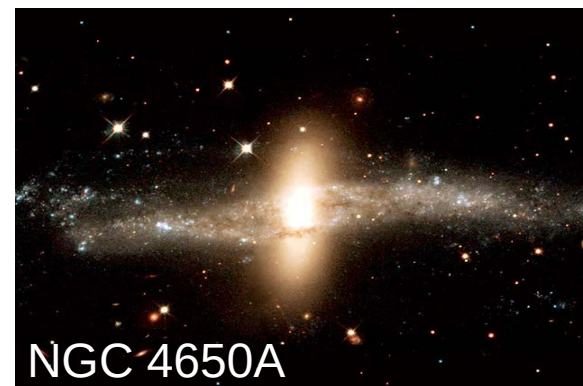
Tidal Stripping

Tidal Stripping é provavelmente a causa da **corrente magellânica**,

dos **anéis** em **galáxias de anéis polares**, como em NGC 4650A, uma galáxia S0 com anel polar,

e das **faixas de poeira** em **galáxias elípticas de faixas de poeira**, como em NGC 5128.

Como estes componentes **orbitam** as galáxias em **grandes distâncias**, elas ajudam a **determinar** as **massas** dos **halos** de **Matéria Escura** destas galáxias.



Interações entre Galáxias

Ram-Pressure Stripping

Uma outra maneira de **tirar** o **gás** de uma **galáxia** é por **choques** com **gás intergaláctico**, processo chamado *Ram-Pressure Stripping*.

Os astrônomos acreditam, que muitas **galáxias elípticas** perderam seu gás deste jeito.

Interações entre Galáxias

Simulações de N corpos

Na prática, **interações** entre **galáxias** são **complexas** demais para serem calculadas **analiticamente**, já que galáxias consistem de **milhões** de **estrelas**, mais **gás**, **poeira**, **Matéria Escura** e talvez um **Buraco Negro Supermaciço**.

Analiticamente, só dá para resolver o problema do sistema de dois corpos.

=> recorrer a **métodos numéricos**:

começar com um número de **massas pontiformes**, cada uma com sua **velocidade inicial**, e usar a **lei da gravitação** e a **segunda lei de Newton** para calcular o **movimento** de cada uma em pequenos passos de tempo.

Isto é feito por **computadores**.

Interações entre Galáxias

Simulações de N corpos

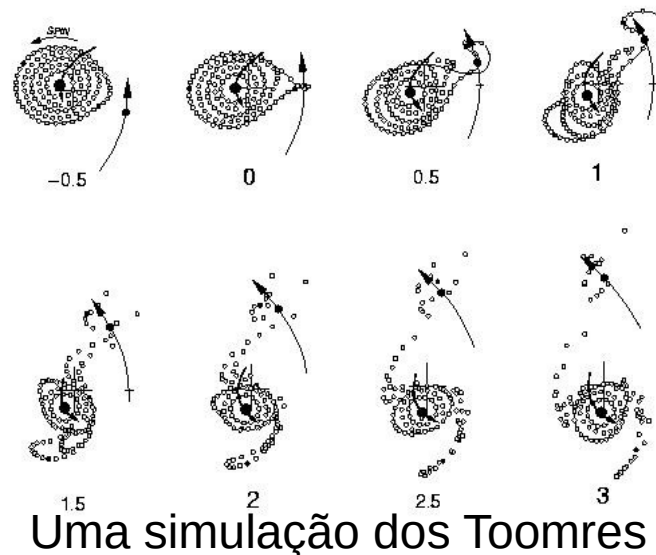
Uma das primeiras simulações foi feita pelos irmãos Toomre em 1972.

Os Toomres modelaram **duas galáxias**, consistindo de **núcleos** e **discos** de **~50 “estrelas”**.

Só calcularam as **forças** aplicadas pelos **núcleos** nas **estrelas**.

Conseguiram **reproduzir** alguns **sistemas**, como M51 e as Antenas.

Também conseguiram mostrar, que galáxias **irregulares** (i.e. M82) são resultado de **interações gravitacionais**.



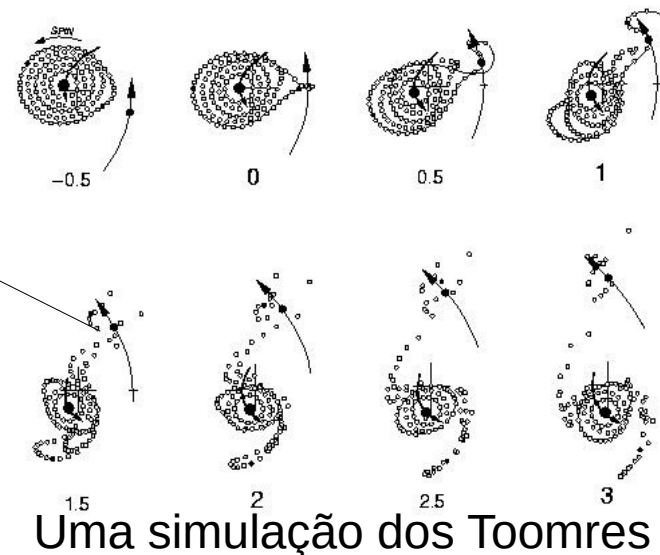
Interações entre Galáxias

Simulações de N corpos

Tidal Tails (“Caudas de maré”(?))
são, em geral, os resultados
de **ressonâncias**:

São as estrelas que **orbitaram** suas
galáxias com a **mesma velocidade**
angular que a **outra galáxia**.

=> Elas **viajaram** por um tempo **junto** com
a outra galáxia, e sofreram **força** aplicada
por esta por um bom **tempo**.



As Antenas simuladas pelos
Toomres e na realidade

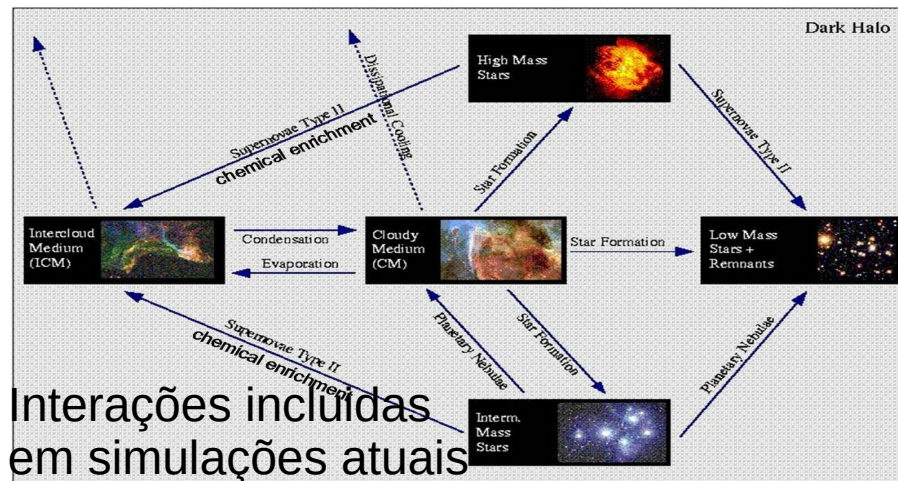
Interações entre Galáxias

Simulações de N corpos

Simulações mais modernas incluem muito mais “estrelas” (algumas 100 000), gás, poeira e Matéria Escura.

Elas levam em conta um monte de **interações** entre as **várias** **componentes**.

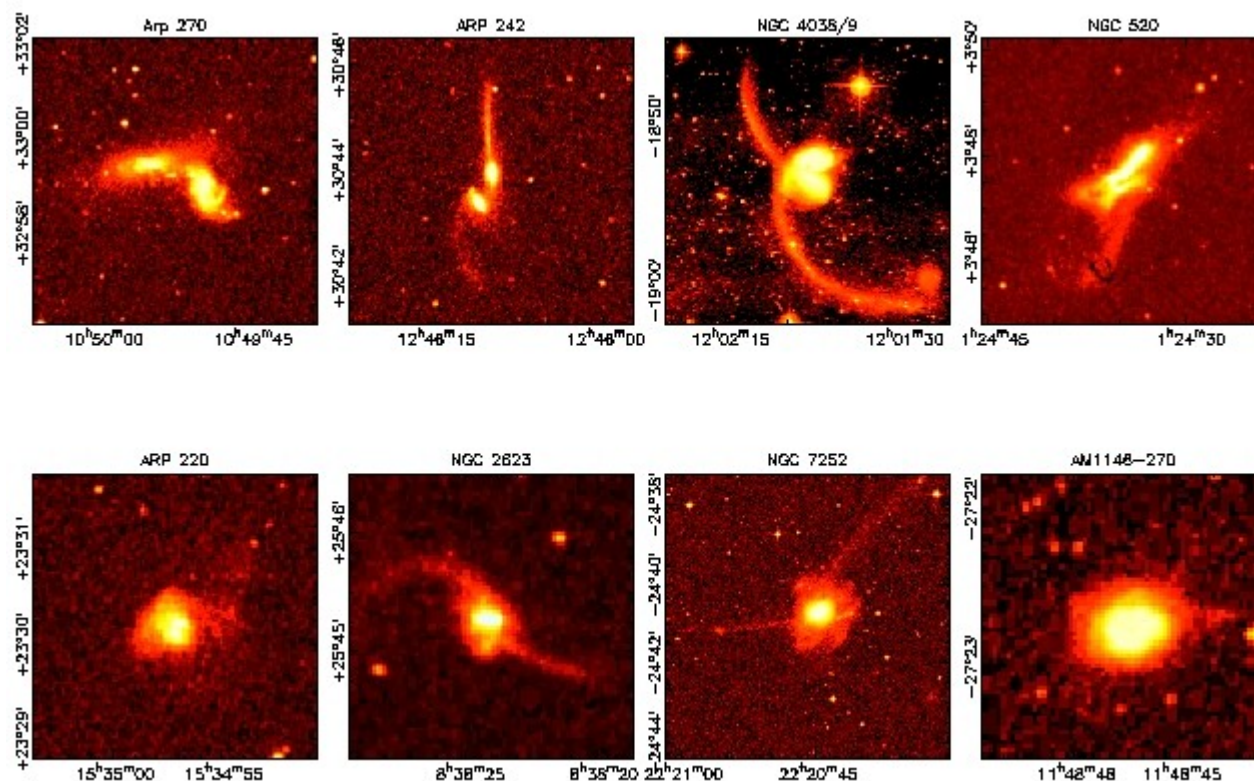
Entre outros resultados, estas simulações mostram, que **halos de Matéria Escura reduzem o tempo** que leva uma **fusão de galáxias**.



Interações entre Galáxias

Simulações de N corpos

Com frequência,
simulações de
fusões de **galáxias**
dão em **elípticas**.



Formação e Evolução de Galáxias

Quais as Massas das Nuvens Protogalácticas?

Depende das **escalas** de **tempo** para **queda livre**, t_{ff} ($\Rightarrow$ Formação Est.), e para **resfriamento** por **radiação**, t_{cool} .

$t_{\text{cool}} < t_{\text{ff}} \Rightarrow$ **colapso rápido**, isotérmico

$t_{\text{cool}} > t_{\text{ff}} \Rightarrow$ colapso adiabático $\Rightarrow$ aquecimento

$\Rightarrow$ aumento da pressão interna $\Rightarrow$ **o colapso para**

Pode-se calcular ($\Rightarrow$ livro; É basicamente o cálculo da massa de Jeans, onde t_{cool} depende de maneira complicada das temperatura e massa da nuvem), que o **colapso** é **possível** para nuvens de 10^8 a $10^{12} M_{\odot}$.

$10^8 M_{\odot}$: as **menores galáxias elípticas anãs**.

$10^{12} M_{\odot}$: as **maiores galáxias espirais**.

Só galáxias elípticas gigantes e cDs têm massas maiores.

Formação e Evolução de Galáxias

A Função de Formação Estelar

Um bom modelo deve explicar a **função de formação estelar** da galáxia estudada:

$$B(M, t) dM dt = \Psi(t)\xi(M) dM dt,$$

onde $B(M, t) dM dt$ é o **número de estrelas** por **volume** com **massas** no intervalo de M a $M+dM$ formadas no intervalo de tempo de t a $t+dt$,

$\Psi(t)$ é a **taxa de formação estelar** em função do **tempo**, e $\xi(M)$ é a **função de massa inicial** (=> aula Formação Estelar).

Atualmente, a Via Láctea forma 2 a 3 estrelas por ano.

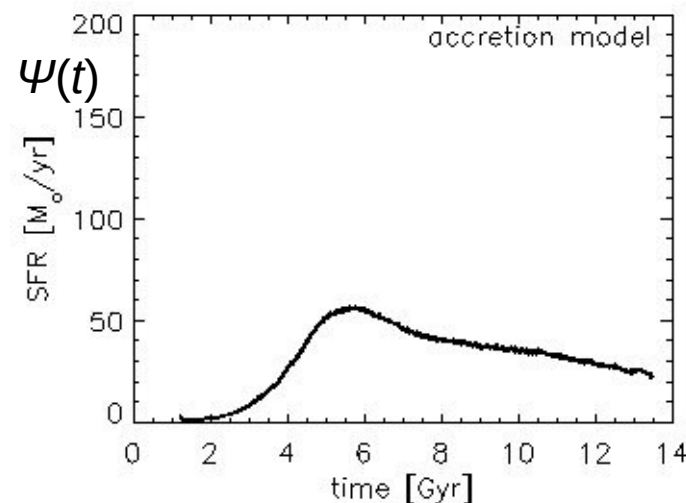
Formação e Evolução de Galáxias

A Função de Formação Estelar

Para a **Via Láctea** foram sugeridas **várias funções** para descrever a **taxa de formação estelar**:

- **constante** (independente do tempo)
- **exponencialmente decrescente**
- **proporcional** a alguma **potência** da **densidade** no **Disco**

Modelos mais sofisticados sugerem uma **taxa contínua** com um **pico** em algum momento.

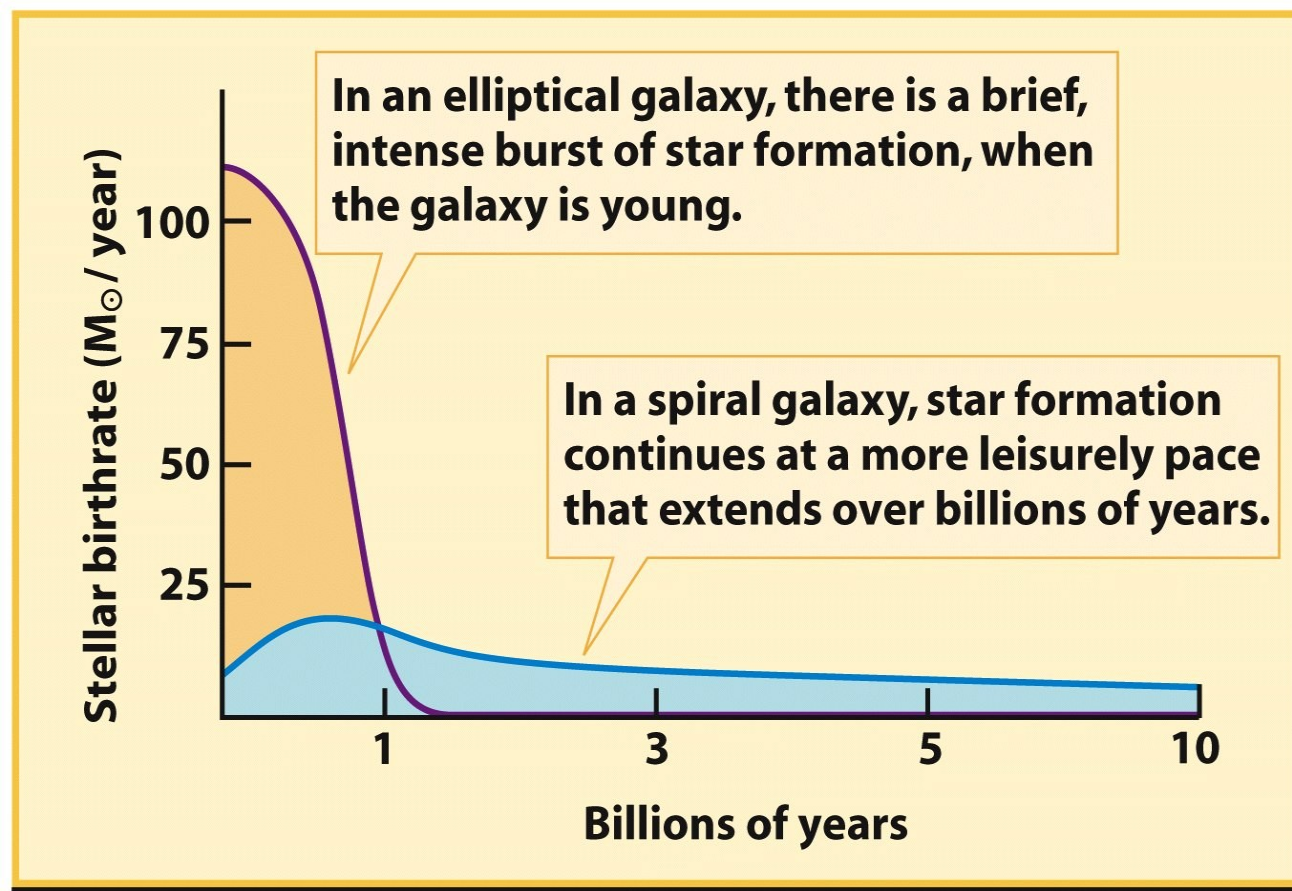


Taxa de formação estelar da Via Láctea segundo o modelo de Samland et al., 2001

Formação e Evolução de Galáxias

A Função de Formação Estelar

Em **galáxias elípticas**, as estrelas devem ter sido **formadas** na época da **formação** da galáxia.



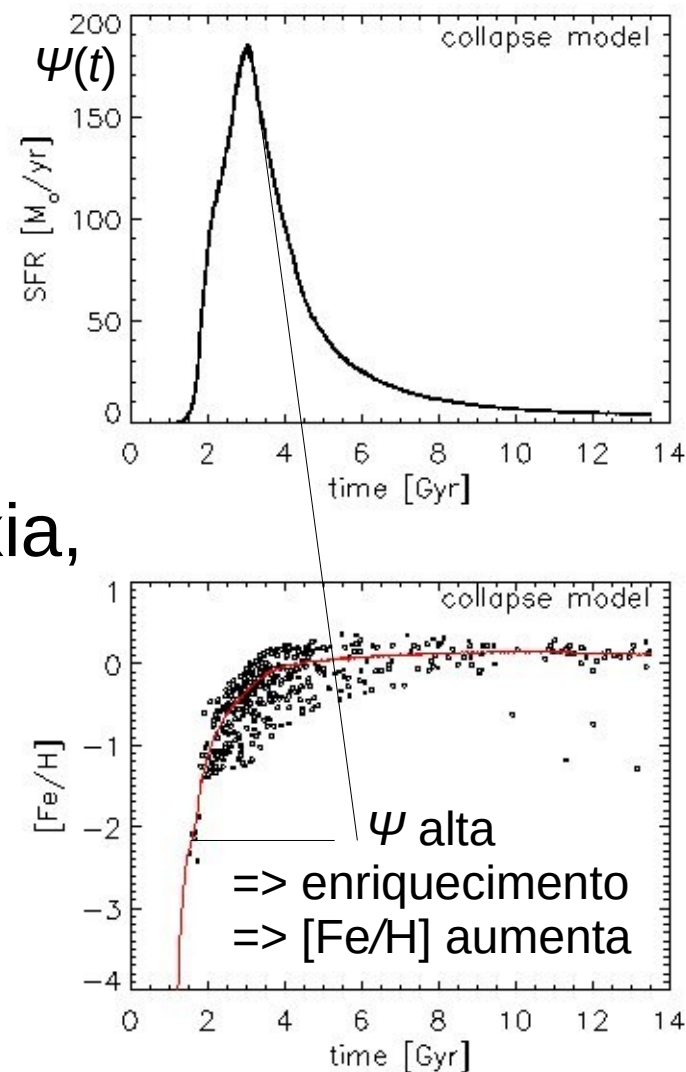
The stellar birthrate in galaxies

Formação e Evolução de Galáxias

Modelos *closed box* (caixa fechada)

Modelos que supõem, que **toda a matéria** da **galáxia** estava lá **desde o começo** se chamam *closed box*.

Supondo uma função taxa de formação estelar $\Psi(t)$ **dada**, dá pra **calcular** a **evolução química** da galáxia, já que o montante de gás na galáxia em cada instante é dado pelo montante inicial menos aquele que foi transformado em estrelas, e o enriquecimento é dado por $\Psi(t)$.



Formação e Evolução de Galáxias

Modelos *closed box*

Modelos *closed box* **prevêem** uma **fração mais alta** de estrelas de **baixa metalicidade** para a Via Láctea, do que **observada**, olhando para estrelas tipo F e G (~25 % em lugar de 2 %), fato chamado **problema de Anãs G**.

2 saídas:

- O gás já tinha **metalicidade** mais **alta** desde o **começo**.
Mas: De onde veio este gás já enriquecido?
O que houve das estrelas que fizeram este enriquecimento?
=> **Não** muito **provável**.

Formação e Evolução de Galáxias

Modelos *closed box*

- No **início**, quando **Z** era **baixa**, tinha muito **menos gás** e foram **formadas** muito **menos estrelas**, do que **previsto** pelos modelos *closed box*, e as **demaís estrelas** foram **formadas** mais **tarde**, por **gás** chegando na galáxia **depois** que se misturou com o gás já enriquecido da galáxia.

=> a hipótese *closed box* é **errada**.

=> **Modelos** de **formação** e **evolução galáctica** têm que levar em conta **material entrando** e **saindo** da **galáxia**, ou até **fusões** de galáxias, como também sugerido pelas observações mencionadas no começo da aula.

Formação e Evolução de Galáxias

E como se formou a **Via Láctea**, afinal?

O Modelo de Colapso de Eggen, Lynden-Bell e Sandage (ELS, 1962)

Modelo **closed box** baseado na **correlação** entre **cinemática**, **idade** e **metalicidade** das **estrelas**:

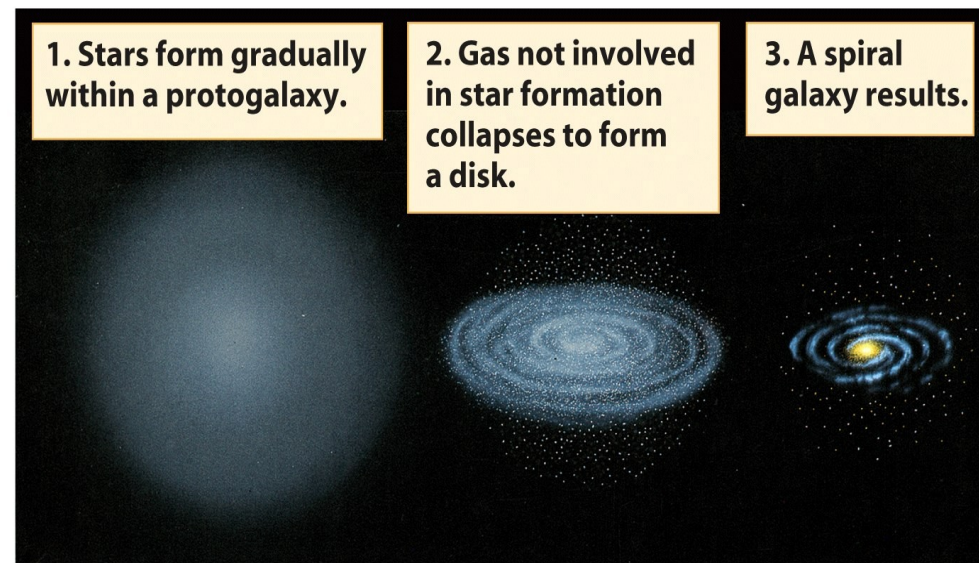
- Estrelas **pobres** em **metais** (Pop II) têm **órbitas** com grandes **componentes verticais** (perp. ao disco) e **excentricidades** (Halo Estelar) e são **velhas**.
- Estrelas **ricas** em **metais** (Pop I) têm **órbitas** quase **circulares** no **plano** da Galáxia (Disco Estelar) e são mais **jovens**.

Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo de Colapso ELS

Colapso rápido da nuvem protoGaláctica:

1. As primeiras estrelas se formam ainda na “queda”
=> hoje velhas,
metalicidades baixas,
órbitas “radiais” => Halo



Formation of a spiral galaxy

Enquanto isto, elas enriquecem o meio interestelar, que continua caindo.

2. o gás que sobra e foi enriquecido chega na parte central e forma um disco, por causa do seu momento angular.

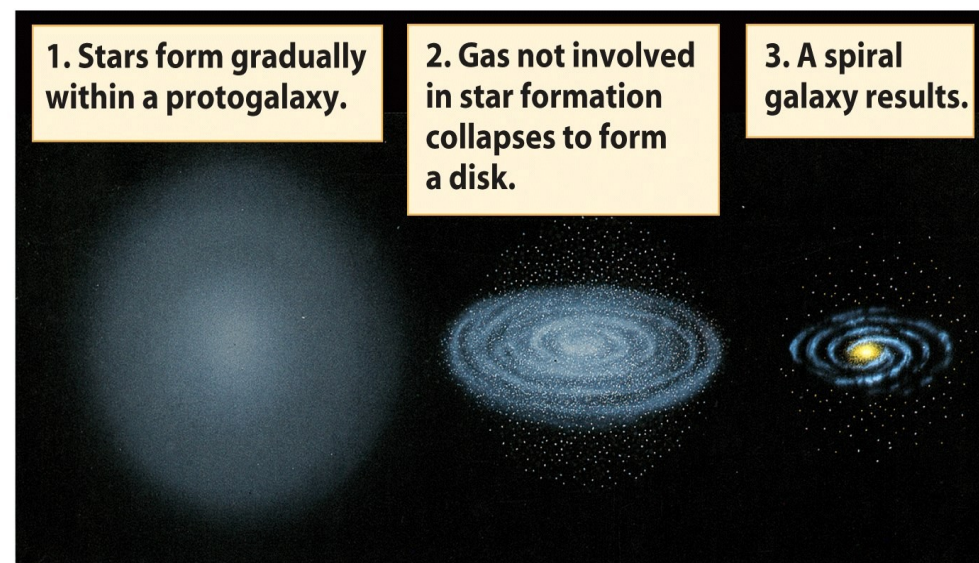
Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo de Colapso ELS

3. Neste **disco** se formam **novas estrelas**.

=> mais **jovens**,
metallicidades altas,
órbitas circulares
=> **Disco Estelar**

O **gás** que **resta** forma o
atual **disco** de **gás** e **poeira**.



Formation of a spiral galaxy

Um cenário destes é chamado **top-down** por formar as estruturas “de cima pra baixo”, as **maiores primeiro**, etc.

Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo de Colapso ELS

Problemas do modelo:

- Não explica o Bojo

=> pode ser **remediado** supondo uma **região** inicialmente **mais densa** no **centro** da nuvem protoGaláctica

=> Esta parte **colapsou primeiro** e formou as **primeiras estrelas** que **enriqueceram rapidamente** o **gás** no **centro**, e possibilitaram a **formação** das **estrelas velhas** de **alta metalicidade** do Bojo.

- O **Halo**, sendo formado da mesma nuvem que o disco, teria um **momento angular** não-zero também, o que **não é observado**.

Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo de Colapso ELS

Problemas do modelo:

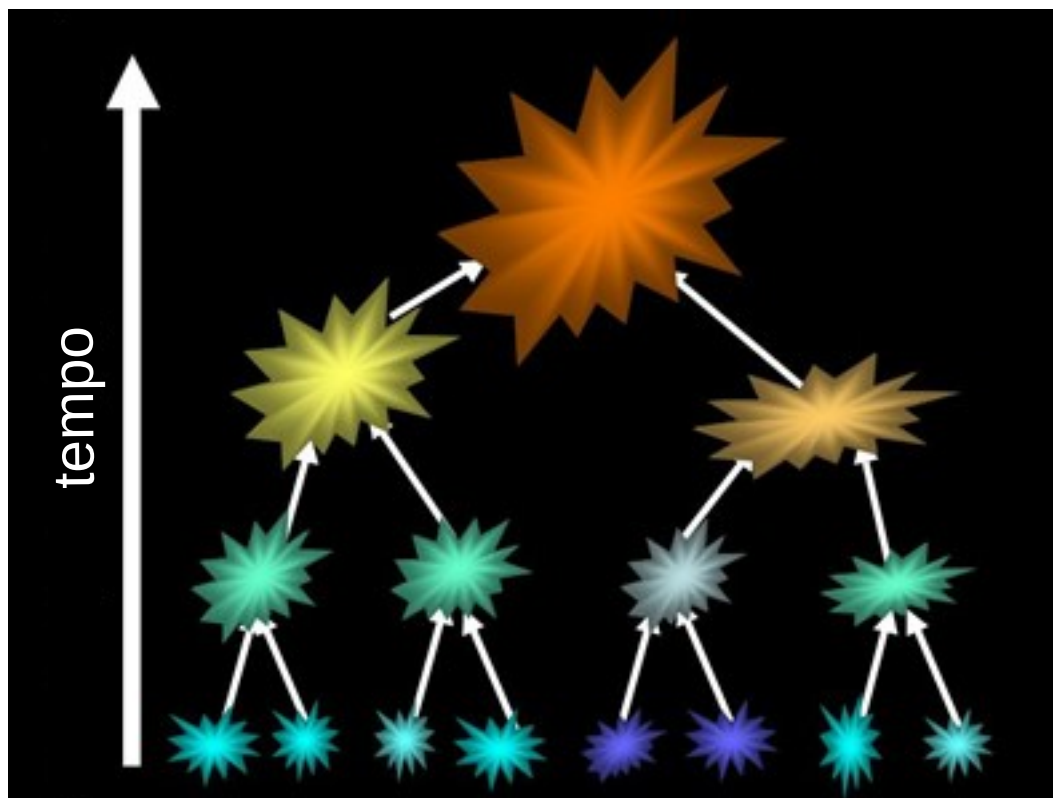
- As idades do Halo e do Disco não batem:
A nuvem levaria só $t_{\text{ff}} = (3\pi/32 \cdot 1/G\rho_0)^{1/2} \approx 200 \text{ Myr}$
(=> aula Formação Estelar) para colapsar e formar o Disco,
mas as estrelas mais velhas do Disco são 1 a 5 Gyr mais
novas que aquelas do Halo.
Tentativa de salvar o modelo ELS: colapso não-queda-livre
(adiabático + ondas de choque de Supernovas)
=> Não atrasa o colapso suficientemente
 - Dificuldades em explicar as metalicidades de
Aglomerados Globulares.
 - Não explica o Disco Espesso.
- => Hoje considerado simples demais.

Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões, Searle e Zinn (1978)

É o modelo **mais aceito** hoje.

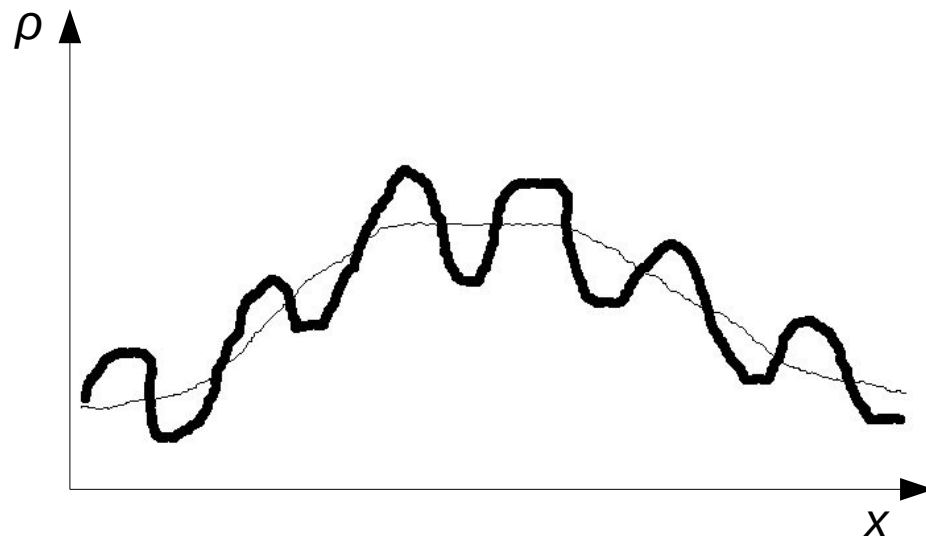
As **estruturas menores** se formam **primeiro**, e depois **fusionam** para formar as **estruturas maiores**, “de baixo pra cima”, ou ***bottom-up***.



Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

- Logo depois do *Big Bang* ($\Rightarrow$ aulas Cosmologia) houve **flutuações de densidade** grandes i. e. $10^{12} M_{\odot}$, com **flutuações menores** sobrepostas, na maioria de 10^6 a $10^8 M_{\odot}$.

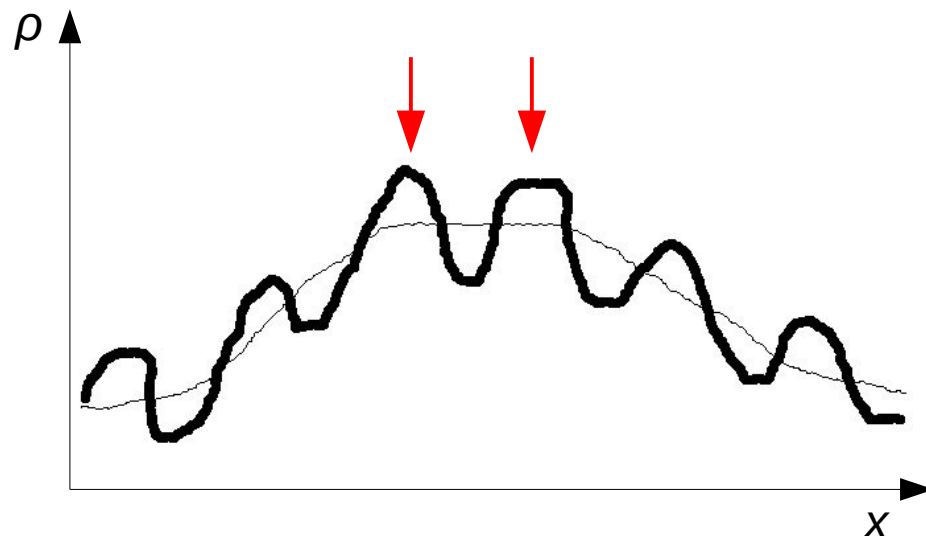


- Estas se **contraíram**, **formando estrelas** e, às vezes, **Aglomerados Globulares**
 $\Rightarrow$ **fragmentos proto-galácticos**,
praticamente **galáxias anãs**.

Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

- Aqueles no **centro** da **flutuação grande** eram **mais densas**, e se **desenvolveram** mais **rapidamente**
=> **maiores** e com **maior metalicidade**.
=> Proto-**Bojo**.



Formação e Evolução de Galáxias

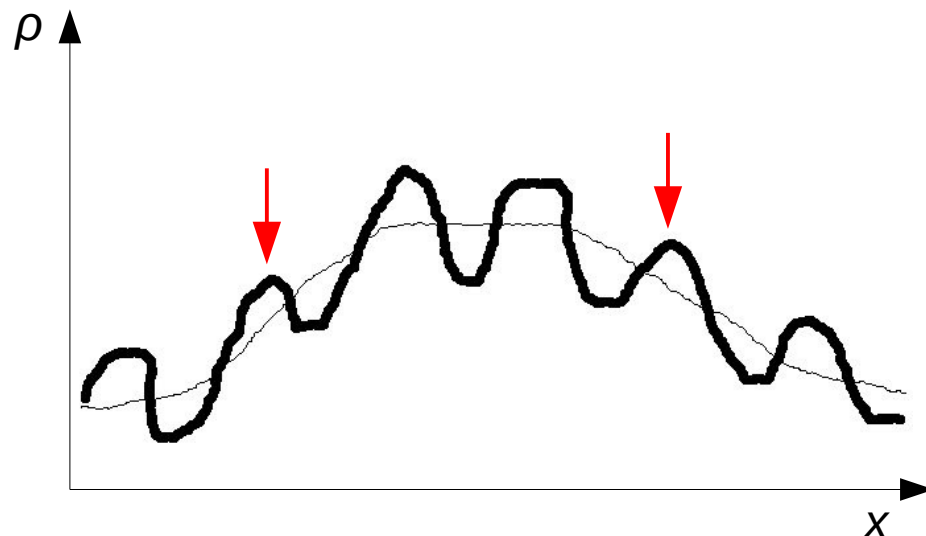
O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

- Alguns **afastados** eram **menores** e tinham **metalidades** mais **baixas**, estes foram **atraídos** direção **centro**, os **maiores** mais **rapidamente**, já que o tempo de captura t_c é prop. M^{-1} .

Foram **disrompidos** por **forças** de **maré** no caminho => As **estrelas** do **Halo**.

Uns 10 % dos **Aglomerados Globulares** nestes fragmentos **sobreviveram**.

=> os **Aglomerados Globulares** do **Halo**.



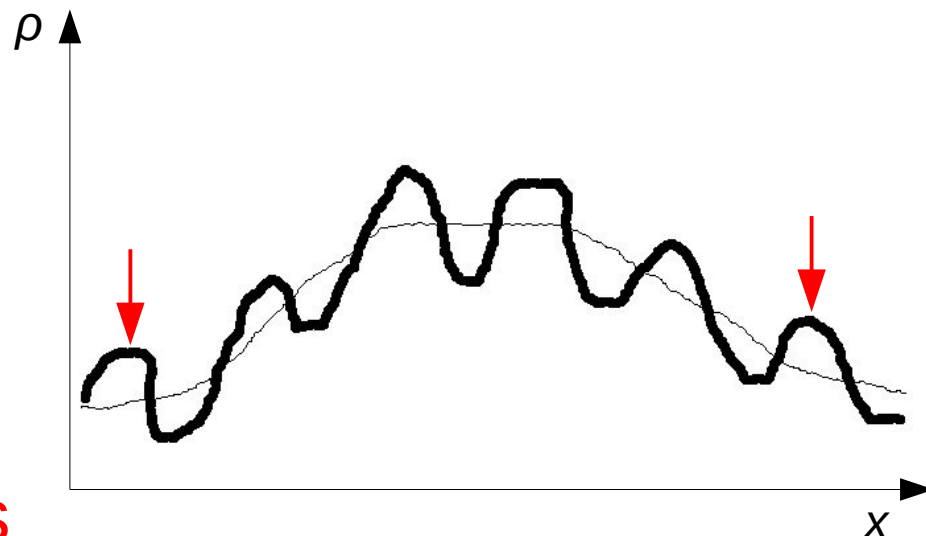
Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

- Os fragmentos **mais afastados** e de **menor massa** sobrevivem até hoje, **compondo** as atuais **galáxias satélites** da Via Láctea.

Algum dia serão **incorporados** na Galáxia ($\Rightarrow$ Nuvens de Magalhães, galáxia de Sagitário, etc.).

- Fragmentos **longe** de qualquer sobre-densidade maior talvez **sobreviverão** “por sempre” como **galáxias anãs**.



Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

- O **gás** dos **fragmentos disrompidos** caiu pro centro e, tendo um **momento angular** por causa de **torques** de **nuvens protogalácticas**, formou um **disco**.

Devido à **temperatura** de 10^6 K este disco manteve uma **espessura** da ordem de 1 kpc.

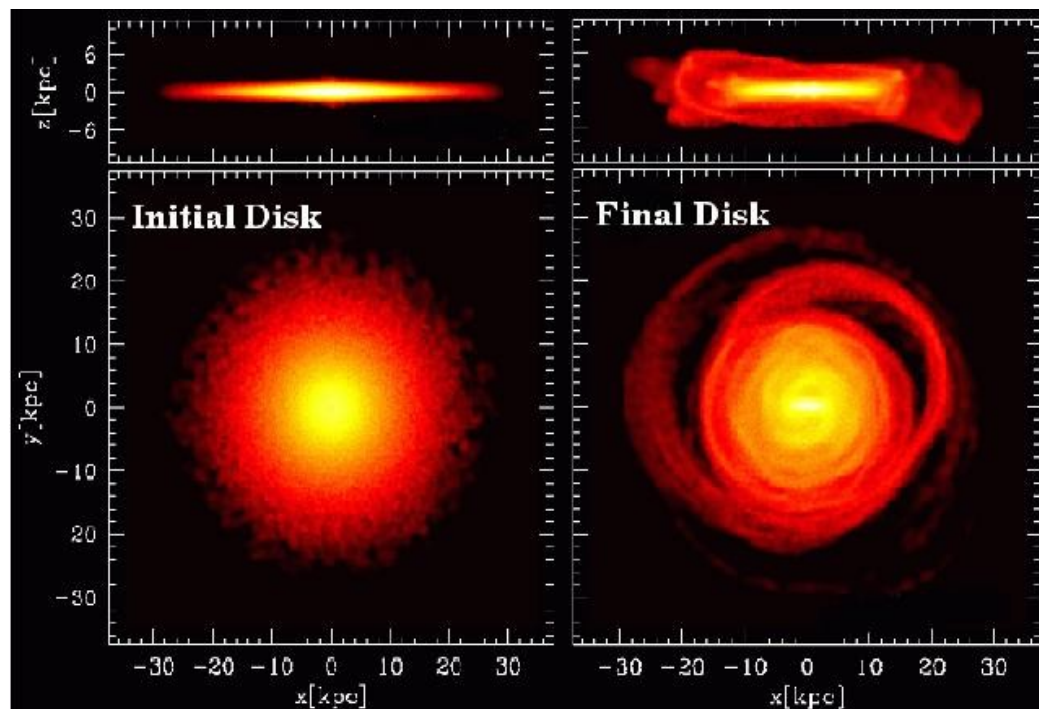
Dentro deste disco, algumas **nuvens** conseguiram **resfriar** e **formar estrelas**. Esta formação estelar **enriqueceu** o resto do **gás**, e sua **radiação** manteve o resto do gás a 10^6 K por um tempo.

=> **Disco Espesso**

Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

Uma teoria alternativa para a formação do **Disco Espesso** é, que ele foi **formado** na **posição** do **disco fino**, e foi “**inflado**” por um **aumento** de **temperatura** causado pela **fusão** com um **fragmento proto-galáctico** uns 10 Gyr atrás.



Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

- Depois de formado o Disco Espesso, o **gás** que **sobrou**, ainda mais **enriquecido**, se sentou no **plano** com escala de altura ~ 600 pc.

Inicialmente, este disco **auto-manteve** esta **espessura**: partes que **resfriavam** se **contraíam**, começavam a **formar estrelas**, se **re-esquentavam** e **re-espandiam**.

Com o tempo, a **densidade** do gás **diminuiu**, a **formação estelar** também **diminuiu**, e o **disco** se **reduziu** a 350 pc.

=> **Disco Fino**

- Finalmente, o gás que sobrou se **resfriou** ainda **mais**, se **contraíndo** para um disco de ~ 100 pc, o atual **Disco** de **gás** e **poeira**.

Formação e Evolução de Galáxias

O Modelo Hierárquico de Fusões (exemplo Via Láctea)

A presença de **estrelas jovens** no **Bojo** também pode ser explicado pelo **modelo hierárquico**.

Em **fusões recentes** com **galáxias satélites** ricas em **gás**, este gás se **sentou** no disco e no **centro**, formando **novas estrelas**. Aparentemente, a **Barra** central da Galáxia tem seu **papel** na **migração** de **material** pro **centro**.

O modelo ainda **prevê** um **gradiente** de **metalicidade** no **Disco**, como **observado** (=> aula Via Láctea).

=> A **Via Láctea** parece ser uma **fusão** de um montão de **galáxias anãs**.

Ponto em aberto: Não sabemos detalhes de como se formaram e onde estão as primeiras estrelas (população III) e galáxias.

Galáxias Espirais

E a **estrutura espiral**?

Não pode ser simples, dada a **variação** de **tipos** de **espirais**, e até do **número** de **braços** (M51 tem 2, a Via Láctea, 4).

Espirais “*Grand Design*”

(10 % das espirais conhecidas) têm 2 braços simétricos e bem definidos

60 % têm braços múltiplos, e

espirais floculentas (~30 %) não possuem braços bem definidos em distâncias angulares grandes

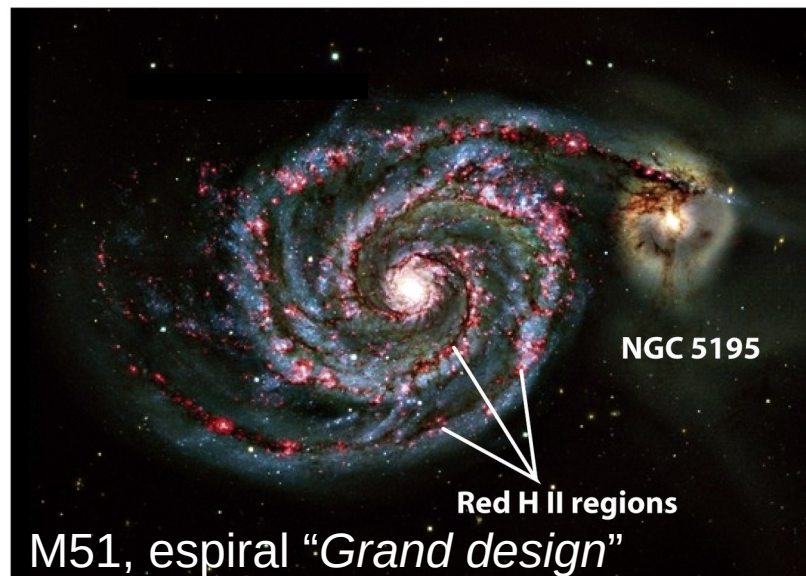


Figure 24-2
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company



Galáxias Espirais

E a **estrutura espiral**?

Já sabemos (aula Via Láctea) que os braços espirais são regiões de **formação estelar** devido a ligeiras **sobredensidades**.

=> Explicar as **sobredensidades**.

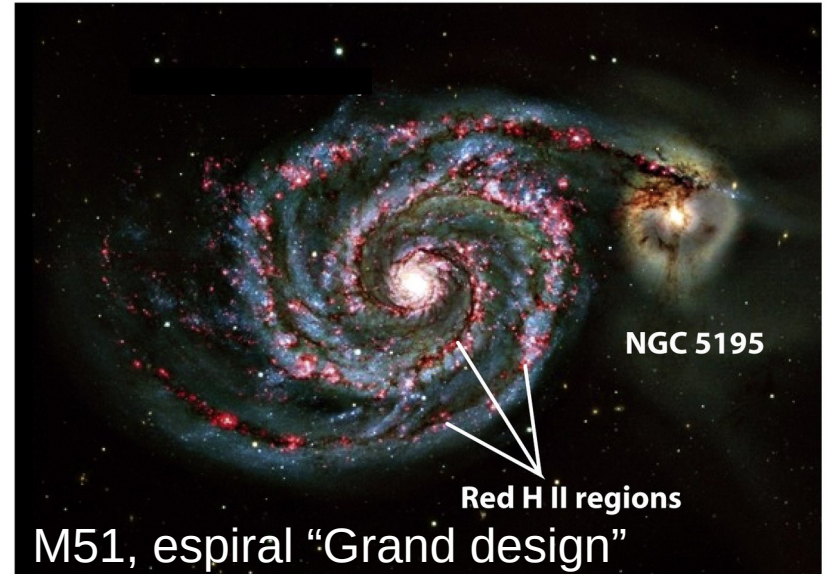


Figure 24-2
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company



Estrutura Espiral

Explicação intuitiva:

A **sobredensidade** surge por acaso (alguma perturbação do disco), e depois **gira** junto com a **rotação** das **estrelas** e do **gás**.

Problema: Os braços ficariam muito **enrolados** após **poucas órbitas** (algumas 100 Myr).

=> Os braços **não** viajam junto com estrelas e gás.

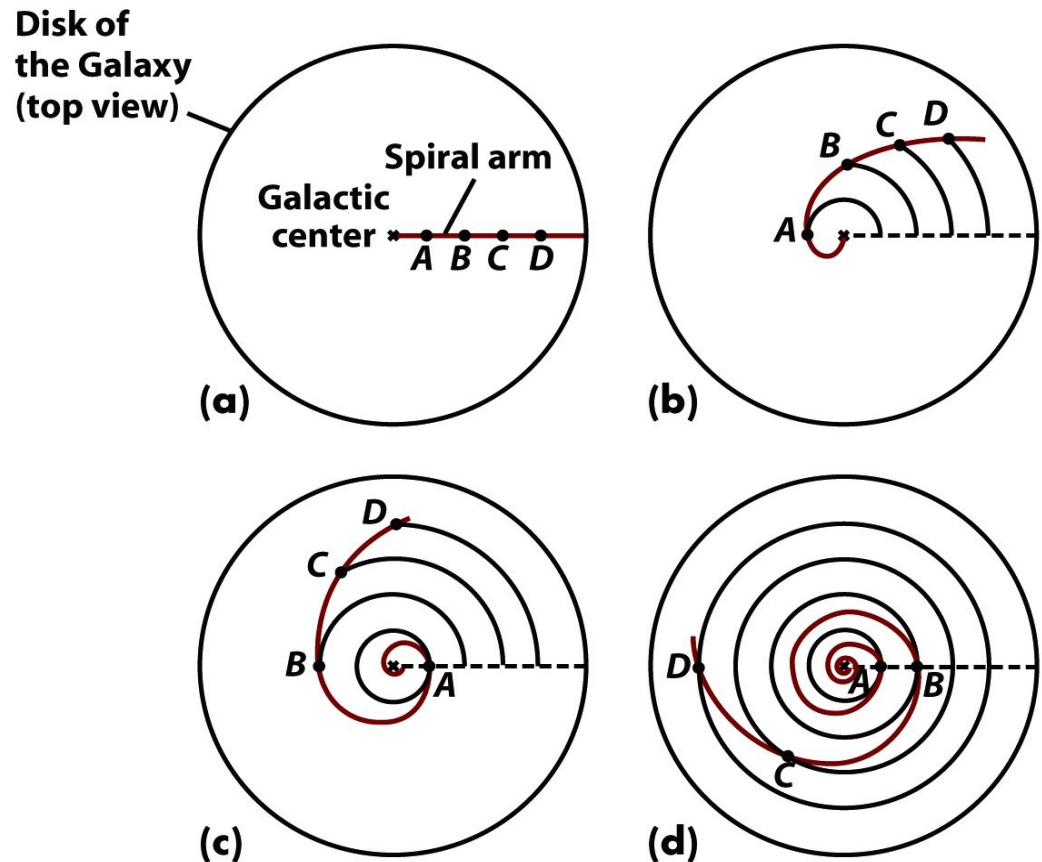


Figure 23-21
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Estrutura Espiral

Na região mais **central**, as **estrelas** giram **mais rapidamente**, do que os braços.

Na região mais **externa** os **braços** giram **mais rapidamente**, do que as estrelas.

A distância galactocêntrica, naquela os **braços** e as **estrelas** giram com a **mesma velocidade** é chamada **Raio de Corrotação**. No caso da Via Láctea, o Sol fica perto do raio de corrotação (~ 10 kpc).

Na maioria das galáxias espirais, a maior parte do **disco visível** se encontra **dentro** do raio de corrotação, i. e. as **estrelas** giram **mais rapidamente**, do que os braços.

Braços Espirais

Observações confirmam isto: As **constituintes** mais **velhas** dos **braços** (i.e. estrelas O e B) ficam mais pra **frente**, e as mais **novas** (regiões HII) pra **trás**.

=> A **rotação** das galáxias é mais **rápida** que a **velocidade** dos **braços** (na maior parte do disco visível).

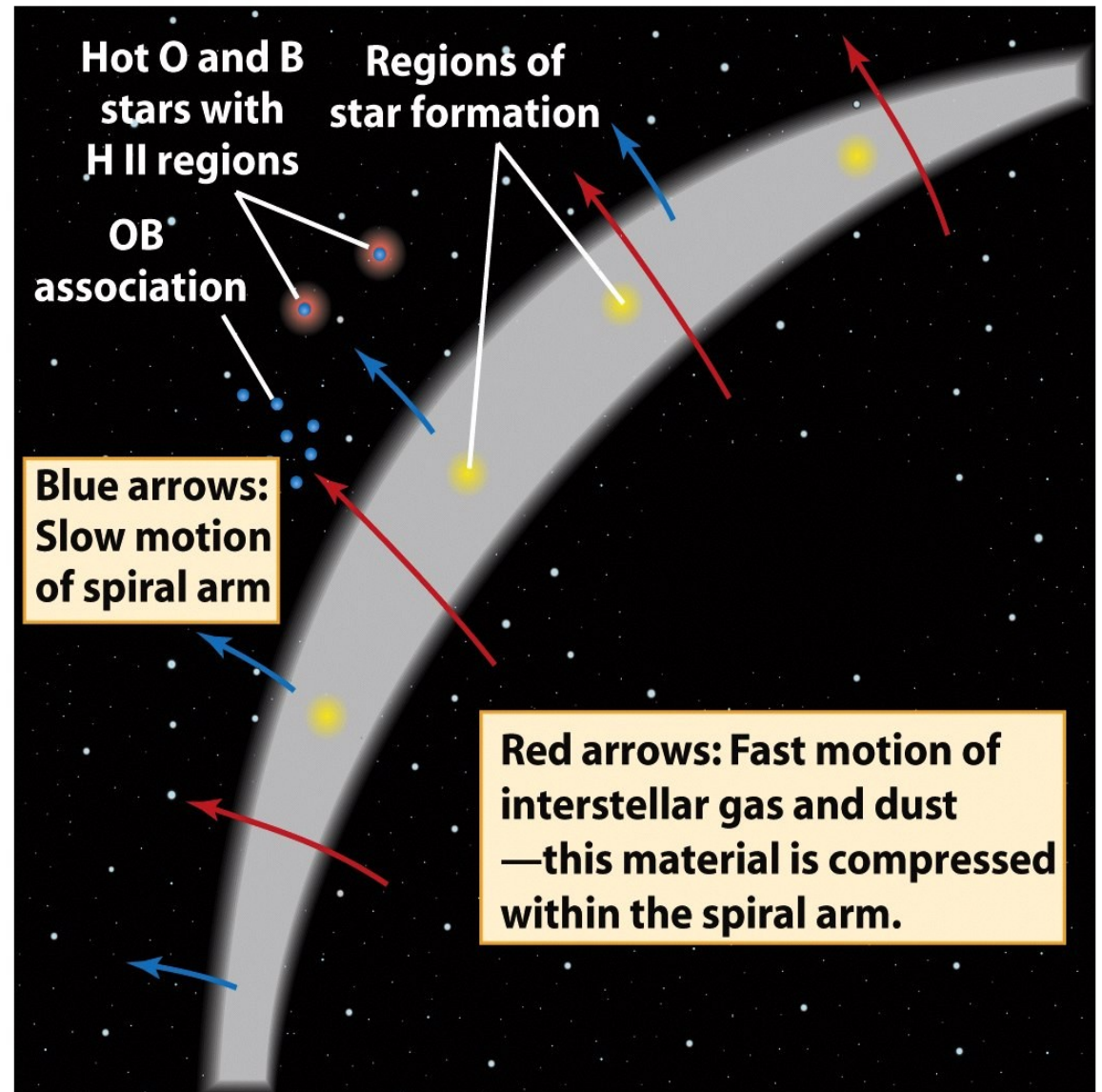


Figure 23-23
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Braços Espirais

A teoria de ondas quase-estacionárias de densidade de Lin-Shu (década de 1960) explica os braços assim:

A primeira sobredensidade surge por acaso.

Quando gás do disco chega na sobredensidade, ele é comprimido e já começa a formar estrelas antes de chegar na parte mais densa.

As estrelas O e B têm vidas curtas e morrem já antes de deixar as sobredensidades.

As estrelas com vidas mais longas e menos brilhantes continuam a viagem e compõem o disco estelar.

Braços Espirais

O material que a formação estelar deixou pra trás (nebulosas planetares, restos de Supernovas) mantém a sobredensidade onde ela estava, similar a um engarrafamento na rodovia (na minha opinião em contradição com o princípio de inércia).

Explica várias coisas:

- A posição das estrelas O e B e das regiões H II,
 - Evita o problema de “enrolação”,
- mas não é fácil encontrar mecanismos que estabelecem e mantêm a onda sobredensa.

Braços Espirais

Uma tentativa envolve calcular as **órbitas** das **estrelas** na **galáxia** (p.e. do Sol na Via Láctea):

Igual como planetas no Sistema Solar, as **órbitas** das **estrelas** na **Galáxia** também podem **desviar** de **círculos perfeitos**.

O **campo gravitacional** da **Galáxia** na região do **disco** é mais **complexo** que aquele de uma massa concentrada (como, p. e. no Sistema Solar).

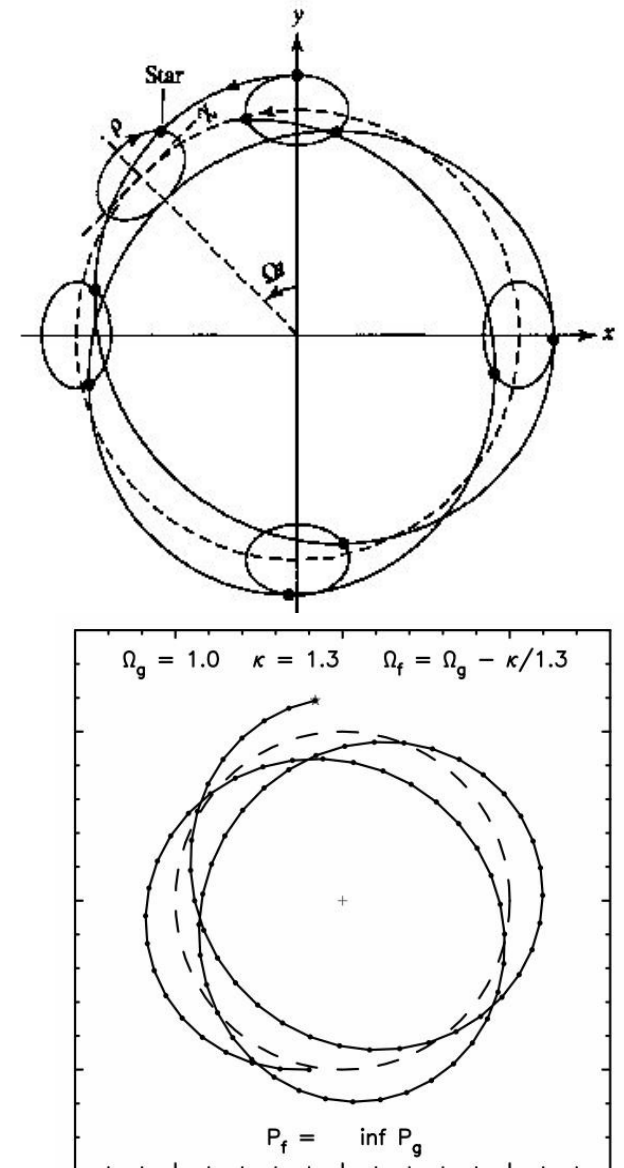
A parte **radial não** é prop. r^{-2} ($\Rightarrow$ curva de rotação), e existe um **componente “vertical”** devido ao **disco**.

Braços Espirais

Pode-se calcular (facinho, 8 páginas no livro) que, neste **campo gravitacional**, o **componente** no **plano** do **disco** do **movimento** de uma **estrela**, quando não-circular, não é elíptico, mas uma **combinação** de um **movimento circular** com um **movimento elíptico** em **torno** do **ponto** fazendo o **movimento circular**, ou seja, **epicíclico**!

O que é errado para planetas no Sistema Solar, pode ser certo em outros casos.

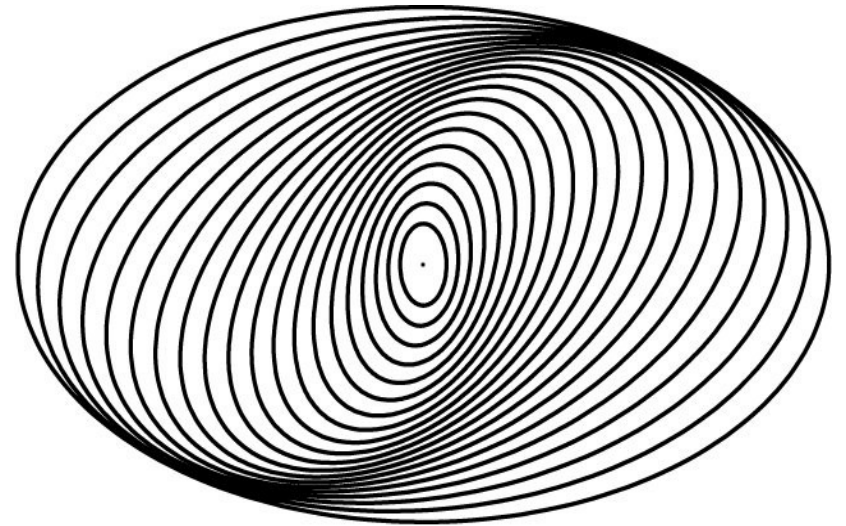
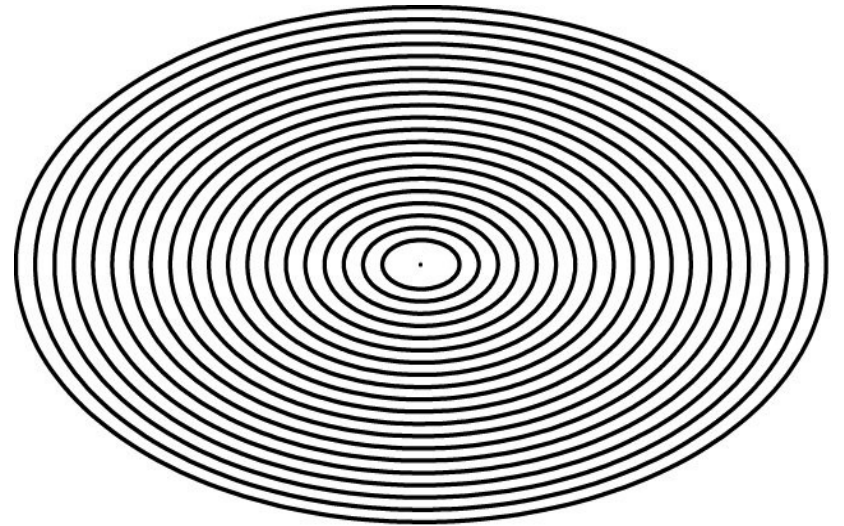
O resultado é uma órbita em forma de **rosetta**.



Braços Espirais

Escolhendo um **sistema** de **coordenadas** que **gira** junto com um **centro** de **epiciclo**, as **estrelas** que terão a **mesma velocidade rotacional** se encontram em **elipses** (por quê ???).

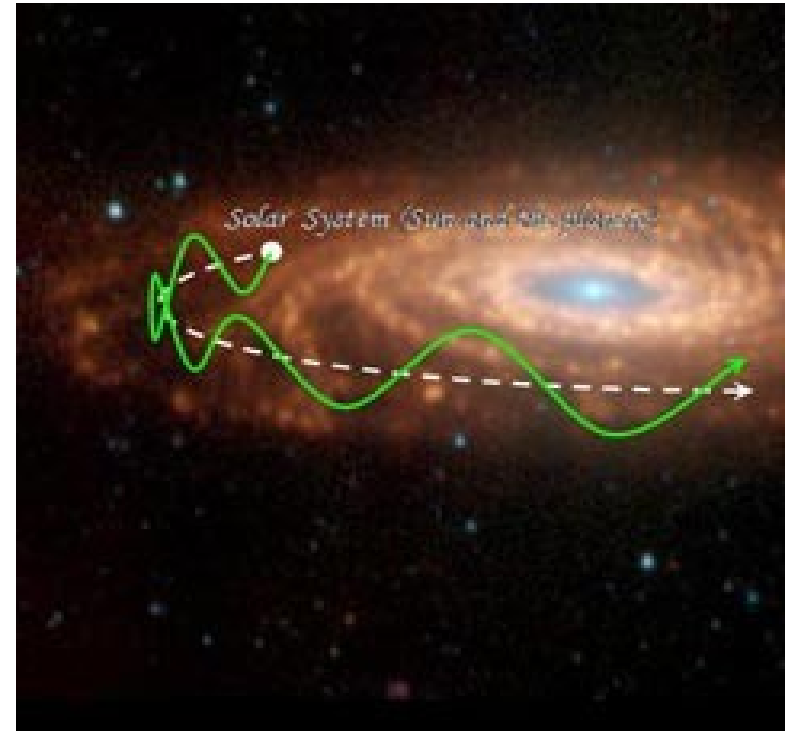
Neste sistema de coordenadas **elipses de estrelas giram juntos**, causando, com o tempo, **sobredensidades** em forma de **braços espirais**.



Braços Espirais

Sobreposto ao movimento epicíclico no plano do disco, o movimento das estrelas pode ainda ter um componente perpendicular ao plano. p. e. o Sol na Galáxia.

Este componente é oscilatório.



Braços Espirais

A Teoria de Mueller e Arnett da **formação estelar auto-propagante estocástica** é bem mais simples:

A **sobredensidade** se **propaga** por **ondas** de **choque** causadas pelas **Supernovas** nas **regiões** de **formação estelar**.

Numa **sobredensidade** há **formação estelar**, logo explodem **Supernovas**, as **ondas de choque** destas **Supernovas** comprimem o material ao lado, causando uma **sobredensidade** lá, etc.

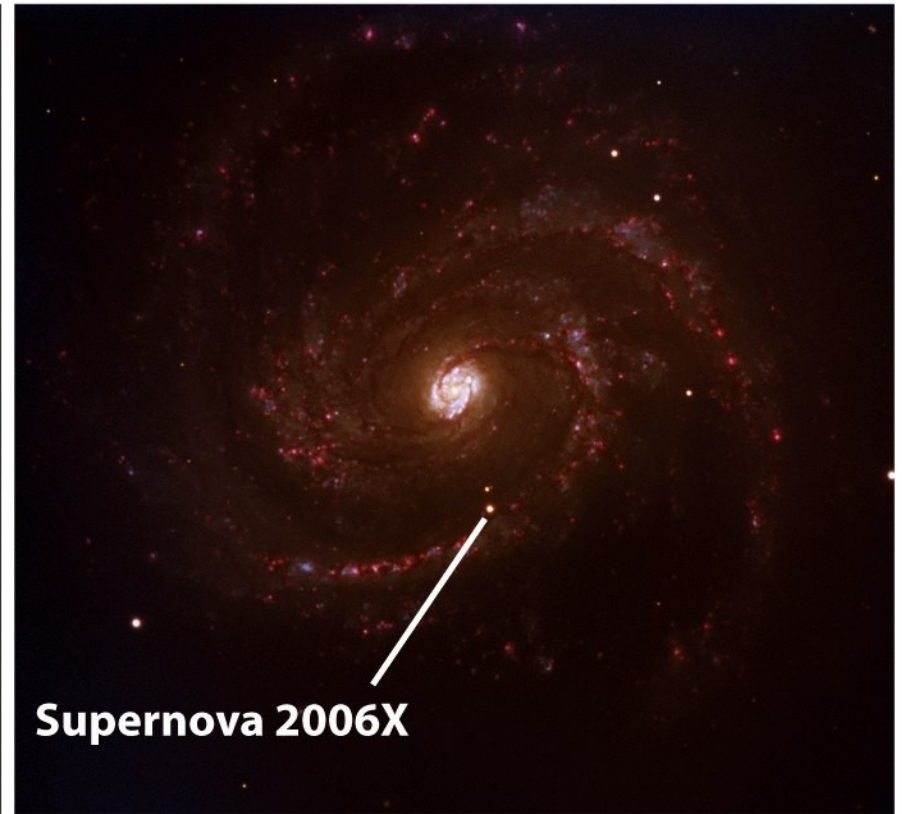
Na verdade, **todas** as **teorias** têm seus **problemas**. Talvez é necessário **melhorar uma**, ou **combinar várias**.

Braços Espirais

Pelo menos sabemos, que **Supernovas** realmente **acontecem** dentro ou perto de **braços espirais**.



(a) M100 in March 2002

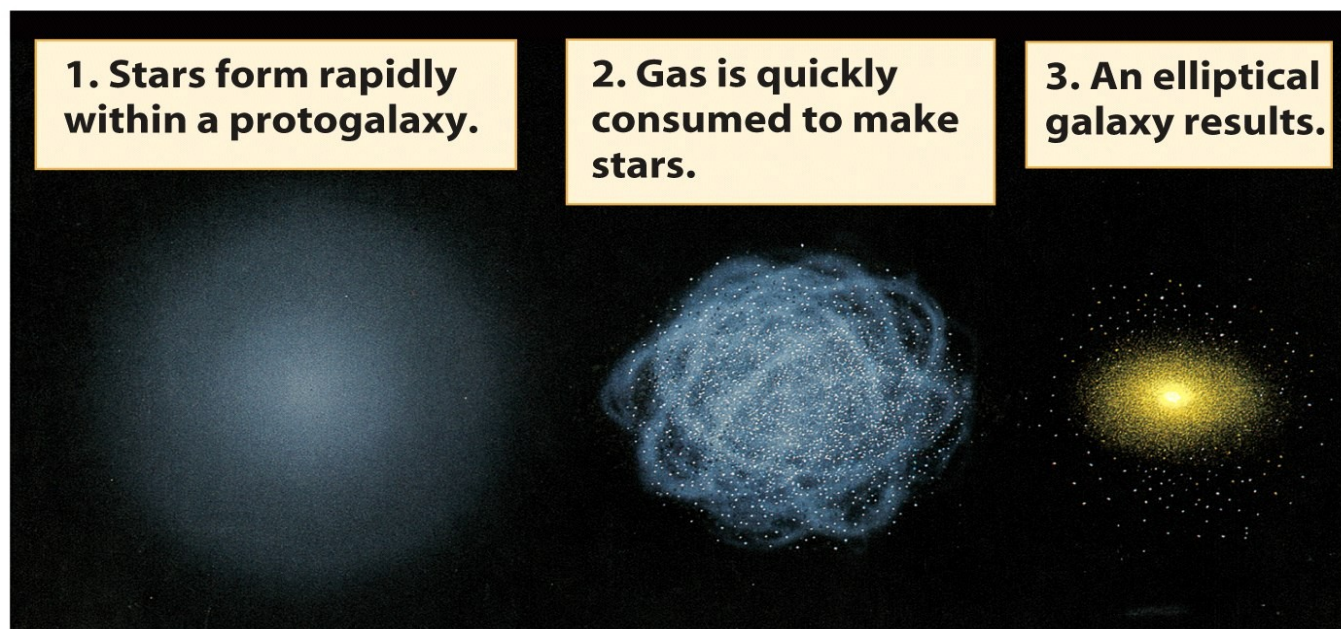


(b) M100 in February 2006, showing Supernova 2006X

Formação e Evolução de Galáxias

Galáxias Elípticas

Muitas **elípticas** foram provavelmente formadas num **colapso similar** àquele das **espirais**, só que **sem gás sobrando** para formar um **disco**.



Formation of an elliptical galaxy

Figure 24-34b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

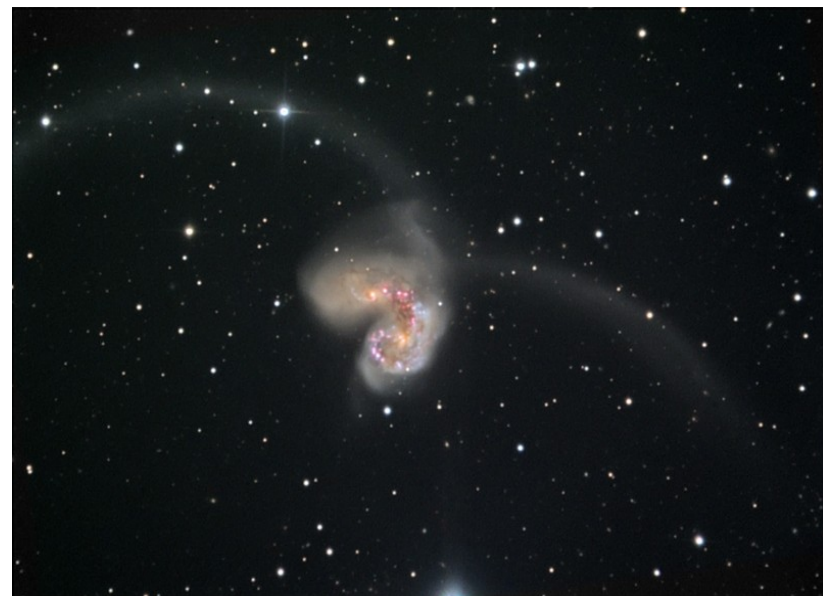
Isto explica as suas **baixas metalicidades** e a **falta de gás**. Como mencionado, as que têm gás provavelmente o adquiriram posteriormente.

Formação e Evolução de Galáxias

Galáxias Elípticas

Porém, **elípticas gigantes** são provavelmente resultados de **fusões** de **galáxias espirais**, como mostram **simulações** de N corpos.

No processo, os **discos** são **destruídos** e o **gás, expulso**.



Problema: A **densidade** de **aglomerados globulares** é **maior** em **elípticas gigantes** que em **espirais**.

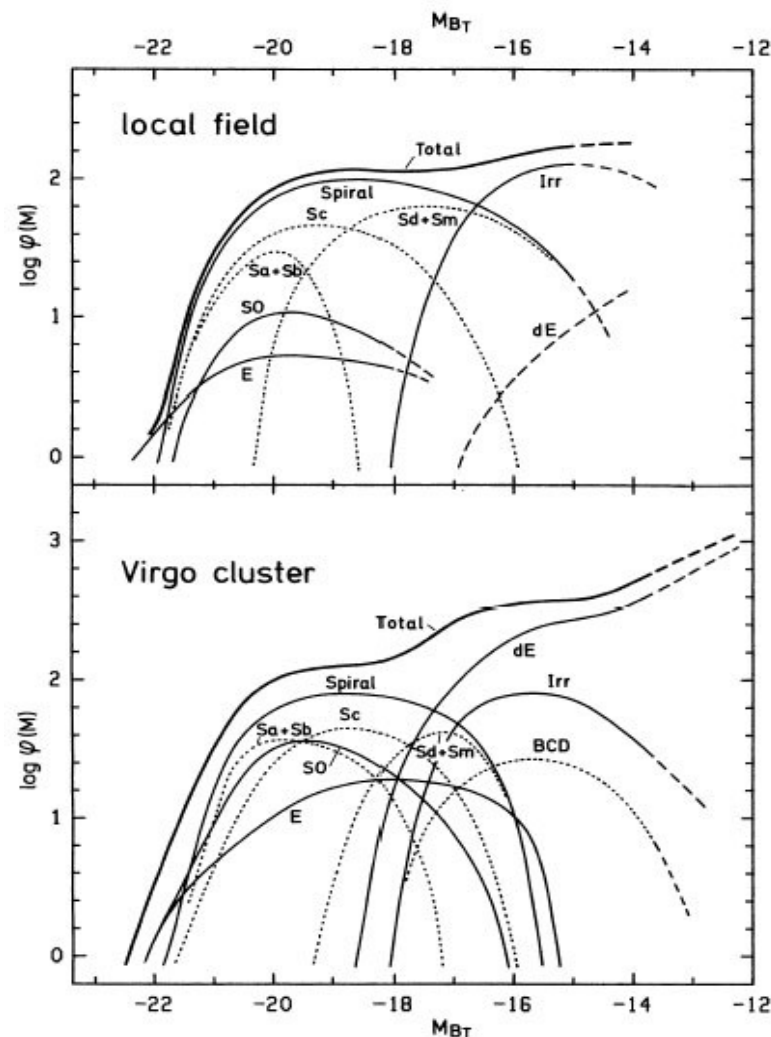
Aglomerados são **formados** na **fusão**?

Ou sobram de **galáxias** **anãs capturadas**?

Formação e Evolução de Galáxias

Galáxias Elípticas

Um argumento a **favor** da hipótese de **elípticas** serem resultados de **fusões** é a **relação morfologia-densidade**, ou seja, o fato que **elípticas** são mais **frequentes** em **ambientes densos** ($\Rightarrow$ aula anterior).



Formação e Evolução de Galáxias

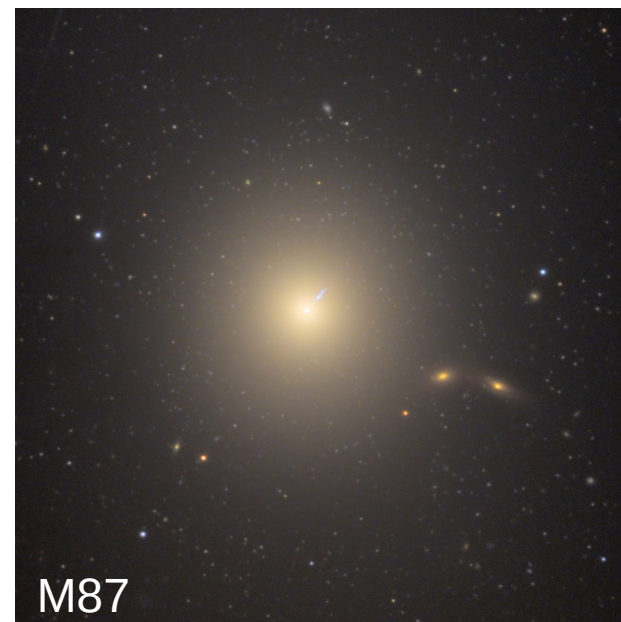
Galáxias cDs

O auge de fusões de galáxias devem ser as galáxias cD, galáxias gigantes nos centros de Aglomerados de galáxias com tamanhos de até 1 Mpc e centenas de vezes a massa da Via Láctea.

Muitas têm núcleos múltiplos que se orbitam com ~ 1000 km/s, velocidade muito mais alta que a das estrelas, ~ 300 km/s.

Como mencionado, há gás intergaláctico se estendendo por toda a região central de Aglomerados.

Deve ser o resultado de fusões de muitas galáxias.



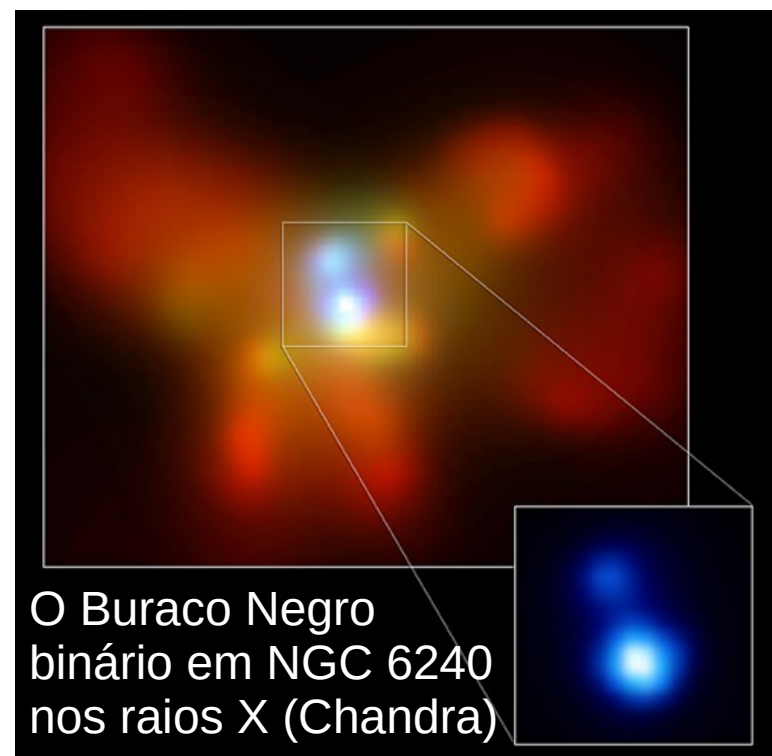
Formação e Evolução de Galáxias

Buracos Negros Binários

Em **fusões** de **galáxias grandes** é inevitável se formar um **Buraco Negro Supermaciço Binário**.

Os **Buracos Negros** centrais das galáxias envolvidas **migram** para o **centro** da nova **galáxia** por **fricção dinâmica**.

Em NGC 6240, os dois Buracos Negros se encontram numa distância de ~ 1 kpc um do outro.



O Buraco Negro binário em NGC 6240 nos raios X (Chandra)

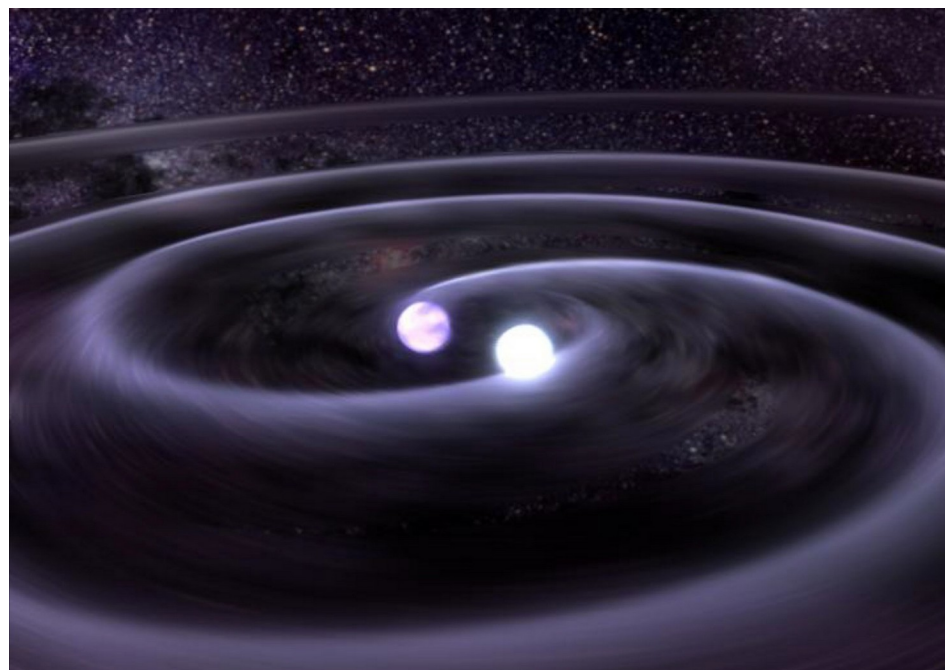
Formação e Evolução de Galáxias

Buracos Negros Binários

Quando os **Buracos Negros** chegam muito **pertos**, eles se **orbitam** e **emitem ondas gravitacionais**, assim **perdendo momento angular** e **espiralando** ainda mais para o **centro de massa**.

No final há uma **fusão** de **Buracos Negros**, resultando em uma **Buraco Negro** ainda **maior**.

Acredita-se que foram **formados** desta maneira os **Buracos Negros centrais** de **galáxias gigantes**.



Formação e Evolução de Galáxias

O Efeito Butcher-Oemler

Butcher e Oemler observaram, que em dois **Aglomerados** de **galáxias** muito **distantes**, as **galáxias** eram mais **azuis** (após aplicar a correção K).

Já que a **luz** levou **muito tempo** para chegar em nós, vemos estes aglomerados como eram no **passado distante**.

=> No **passado**, as **galáxias** eram mais **azuis**.

=> **Corroboração** do nosso modelo, naquele as **galáxias** formaram mais estrelas no **passado**.

A **relação morfologia-densidade** também **evoluiu**:

No **passado** tinha mais **galáxias espirais**, também em **concordância** com o **modelo hierárquico**.

Formação e Evolução de Galáxias

Formação de Galáxias no Universo Jovem

A imagem mais **distante**, quer dizer mais **antiga**, de **galáxias** que tínhamos à disposição até faz pouco é o

Hubble eXtreme Deep Field, que totaliza mais que 23 dias de tempo de exposição do HST, mostrando algumas **galáxias** como eram **400 a 800 Myr** após o *Big Bang*.

Elas tinham **aparências** bem **diferentes** das **galáxias** atuais.

Deve se tratar de **fragmentos proto-galácticas**.



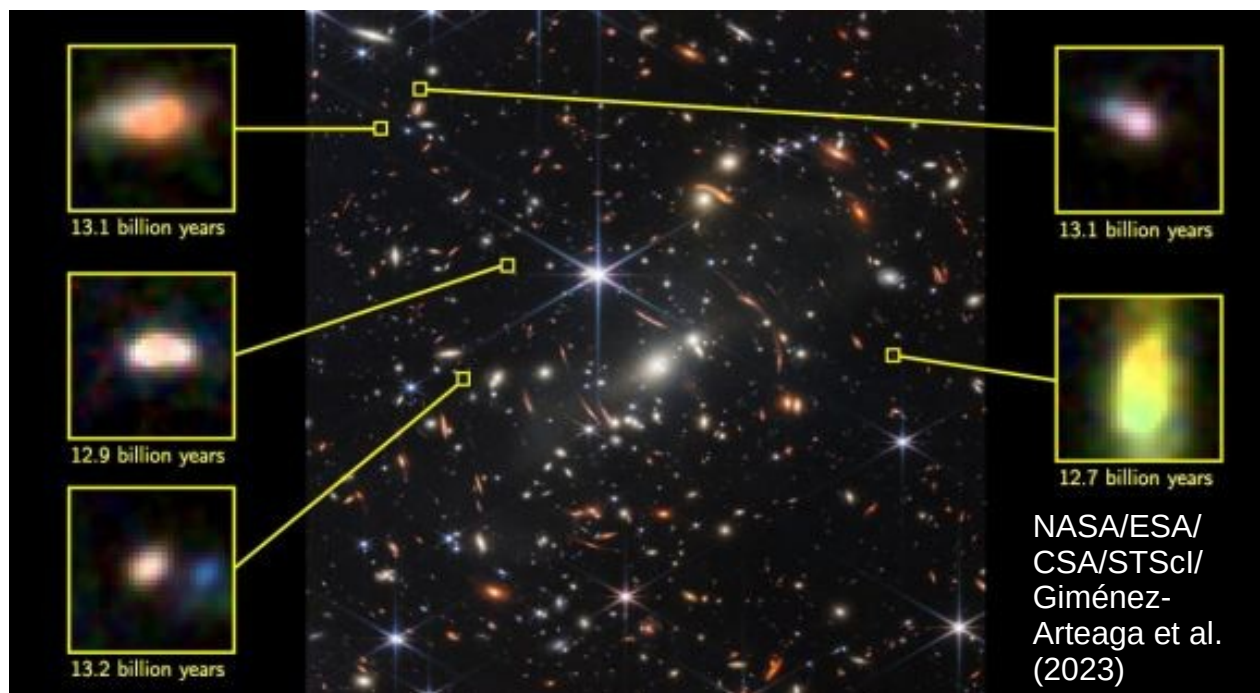
Formação e Evolução de Galáxias

Formação de Galáxias no Universo Jovem: Problema

Galáxias massivas em alto *redshift*

O *James Webb Space Telescope* detectou, em uma das suas primeiras imagens, galáxias com *redshifts* 7-10, que parecem ter massas altas demais para baterem com o cenário *bottom-up*.

Mas ainda é cedo para dizer, se realmente é um problema; pode ser um erro na determinação dos *redshifts*, que foram estimadas pela fotometria, e não medidas a partir de linhas espectrais.



Formação e Evolução de Galáxias

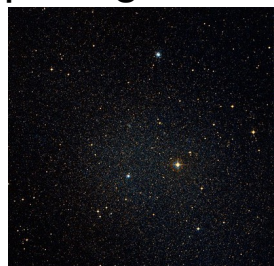
Resumo

Afinal, o que **determina**, que **tipo** de **galáxia** é **formada** é:

- a **massa** da sobredensidade protogaláctica
- as **escalas** de **tempo** de **queda livre** e de **resfriamento**
- a **eficiência** da **formação estelar** (se sobra gás ou não)
- o **ambiente** (interações com outras galáxias, transferência de momento angular, fusões, ...).

Esquema Simplificado

Fragmentos
protogalacticos



isolados



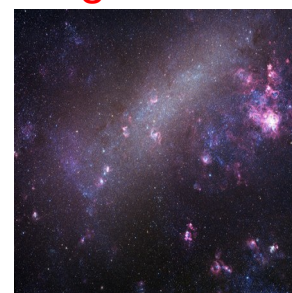
dE / dSph



perturbados por outra galáxia



Irreg. / BCDs



Fusões com
gás sobrando



Espirais



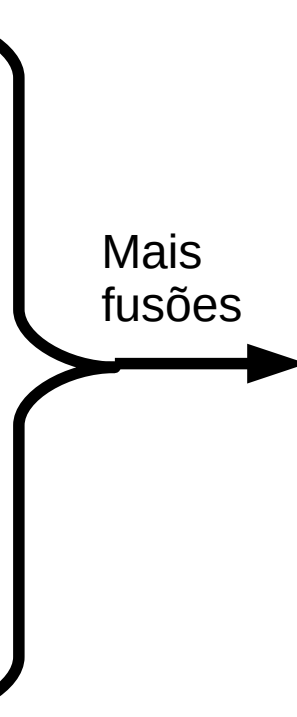
Fusões sem
gás sobrando



Elípticas



Mais
fusões



Elípticas
gigantes
ou cDs

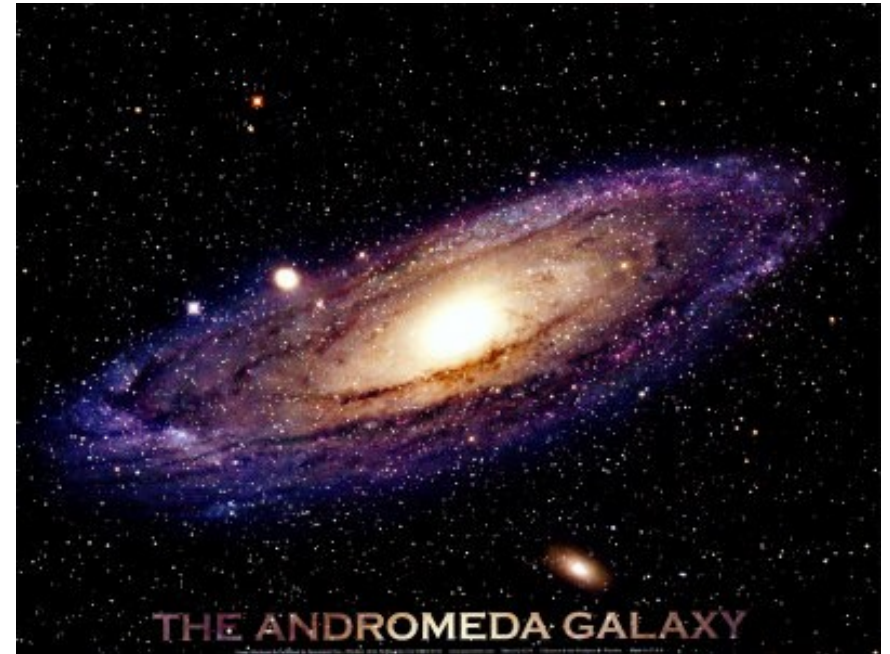


O Futuro da Galáxia

Medindo o **espectro** da galáxia de **Andrômeda** encontramos um deslocamento para comprimentos de onda mais curtos, um **blueshift**, das linhas espectrais.

=> **Efeito Doppler**

=> **Andrômeda** está se **aproximando** da **Via Láctea** com 120 km/s.



O Futuro da Galáxia

=> Em uns 4 bi. anos, as duas **maiores galáxias** do **Grupo Local colidirão**, formando uma **galáxia elíptica gigante**, “Lactômeda”.

Algum tempo depois, Triângulo se juntará também.

O **Sistema Solar** vai provavelmente parar mais **longe** do **centro** da nova galáxia, ou será **expulso** (mas não necessariamente desfeito).



Impressão artística (e não muito realista) da colisão VL-M31 vista da Terra.



Universidade Federal do ABC

Noções de Astronomia e Cosmologia

FIM PRA HOJE

