



Universidade Federal do ABC

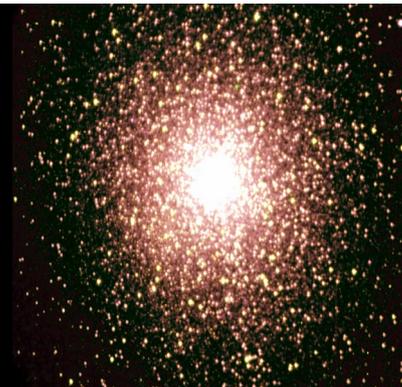
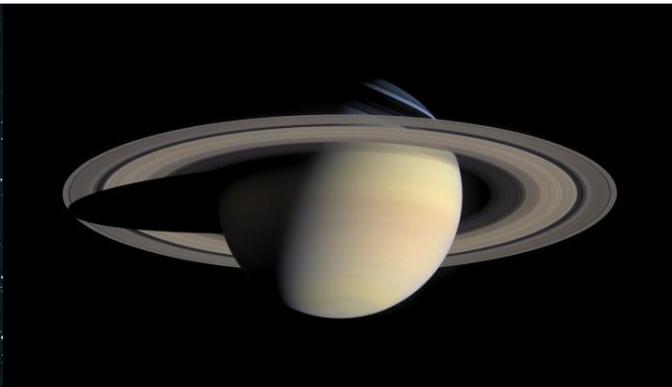
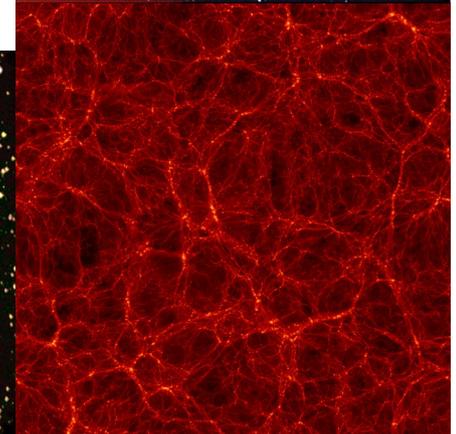
Noções de Astronomia e Cosmologia

12. Galáxias: Zoologia

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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



Galáxias

Immanuel Kant,
século XVIII:
Se a **Via Láctea** tem
tamanho limitado, então
talvez as “**nebulosas
elípticas**” no céu sejam
sistemas discos como o
nosso, “**Universos ilhas**”.

Na época, qualquer objeto
flocoso no céu era
chamado de nebulosa.



Galáxias

O catálogo de 103 a 110 “nebulosas” de

Messier continha:

- **nebulosas gasosas:**

M1, M42, ...

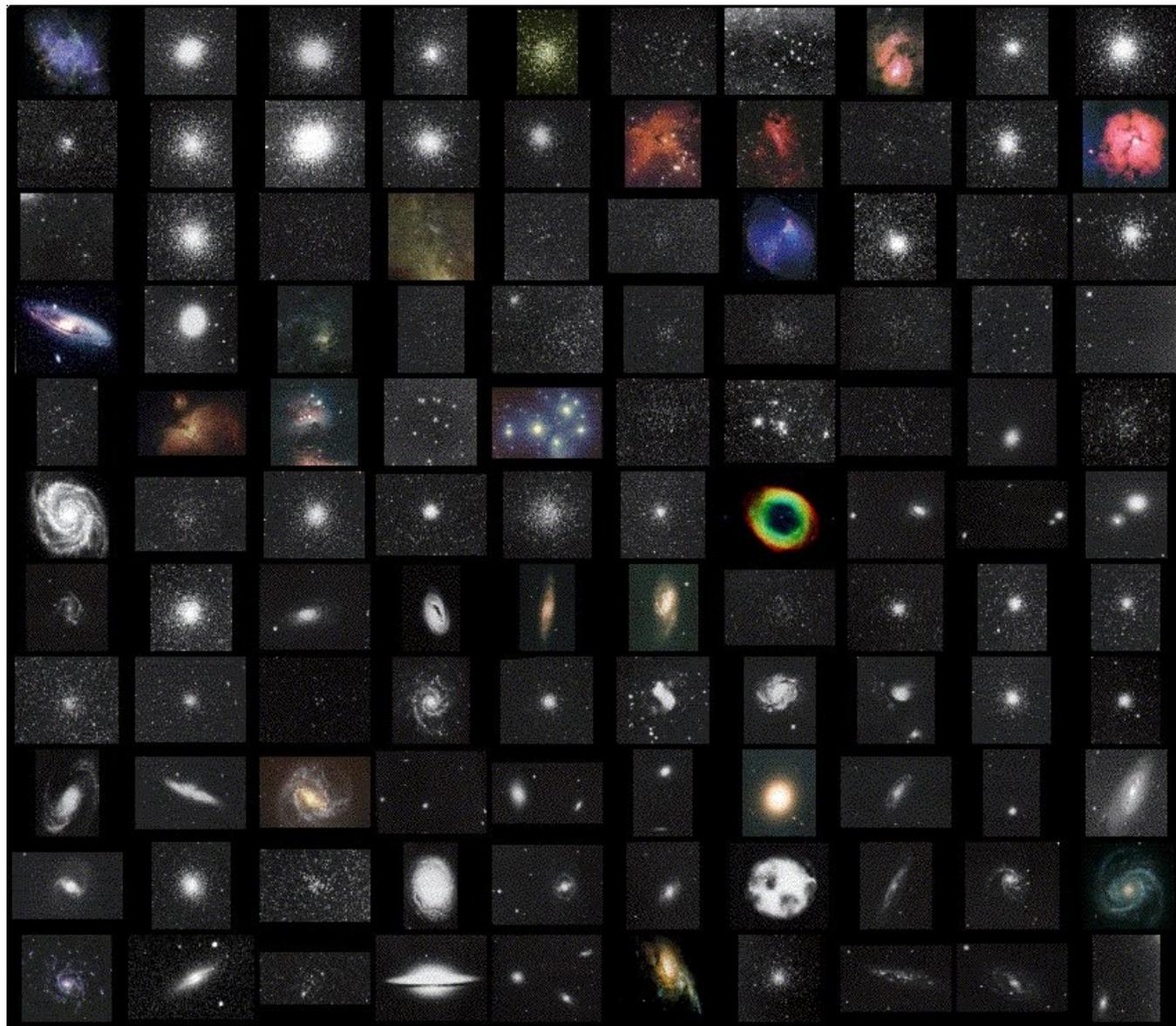
- **aglomerados estelares:** M3, M45, ...

- objetos de natureza até então

desconhecida:

M31, M51, M81,

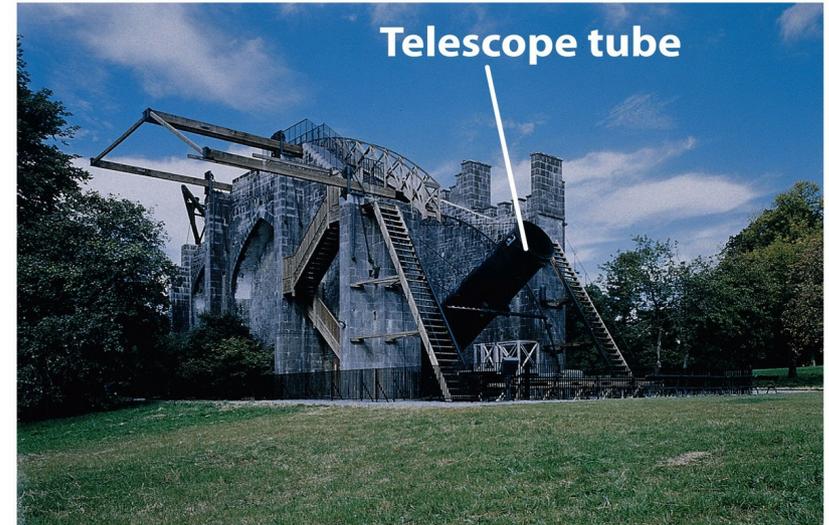
Outros catálogos similares foram compilados nos anos seguintes, i. e. o New General Catalog (NGC).



Galáxias

Em 1845, **William Parsons**, usando o então maior telescópio do mundo (1.8 m), o Leviathan, observou pela primeira vez **estruturas espirais** em algumas das **nebulosas**, e que estas nebulosas espirais têm espectros similares a estrelas.

Em 1912, **Vesto Slipher** conseguiu evidenciar, medindo o efeito Doppler em algumas linhas espectrais, que estas **nebulosas espirais** estão **girando**.



Rosse's "Leviathan of Parsonstown"



M51 as viewed through the "Leviathan"
galáxia do Rodamoinho

Galáxias

O grande Debate Shapley-Curtis (1920)



Harlow Shapley

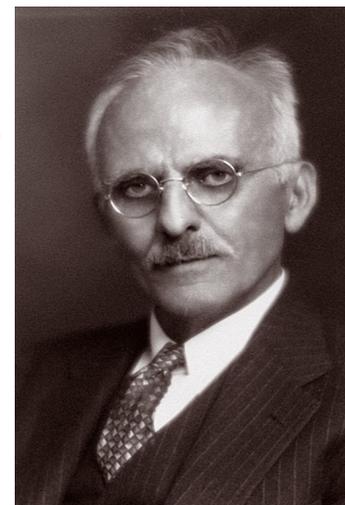
(o mesmo que usou aglomerados globulares para (super-)estimar a distância até o Centro da Via Láctea (20 kpc), => aula anterior):

Nebulosas Espirais são **membros** da **nossa Galáxia**.

Heber Doust Curtis

(acreditando no modelo da Via Láctea com diâmetro de 16 kpc e o Sol no centro de Kapteyn):

Nebulosas Espirais são objetos **similar** à **Via Láctea**, e se encontram **separadas** desta. Elas são os “Universos Ilhas” de Kant.



Galáxias

Em 1923, **Edwin Hubble** detectou **Cefeidas** (estrelas variáveis => aula sobre estrelas) nas **Nebulosas** de **Andrômeda**, M31, e Triângulo, M33, e, usando a relação período-luminosidade destas estrelas, conseguiu determinar a **distância** até M31 e M33.



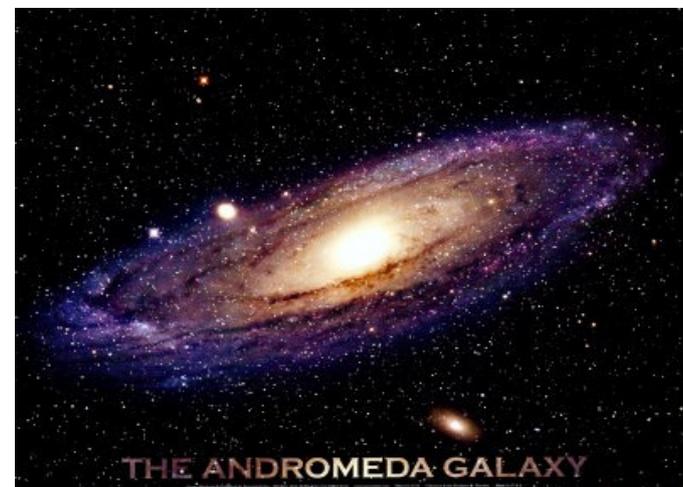
Ele encontrou que **nebulosas espirais** se encontram **fora** da **Via Láctea**, e são objetos **similares** a esta.

=> **Nascimento** da **Astronomia ExtraGaláctica**.

Galáxias

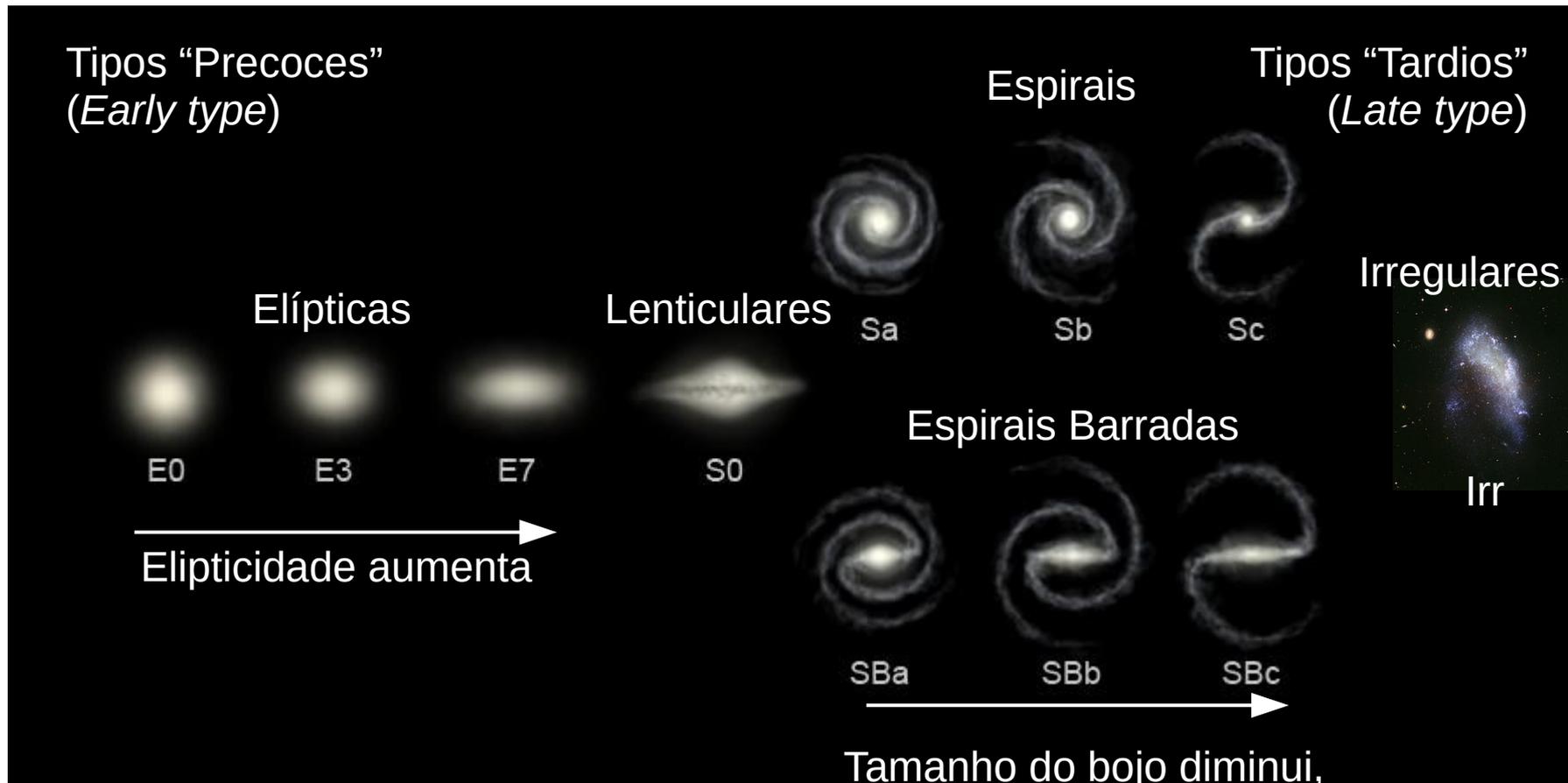
Galáxias são conjuntos de 10^7 a 10^{14} **estrelas**, outros **corpos celestes** (planetas, anãs marrons, estágios finais de estrelas, ...), **gás**, **poeira**, talvez um **Buraco Negro Supermaciço** e **Matéria Escura**, similares à Via Láctea.

A palavra vem do **grego galaxias** (γαλαξίας), “leitoso”, em uma referência à **Via Láctea**.

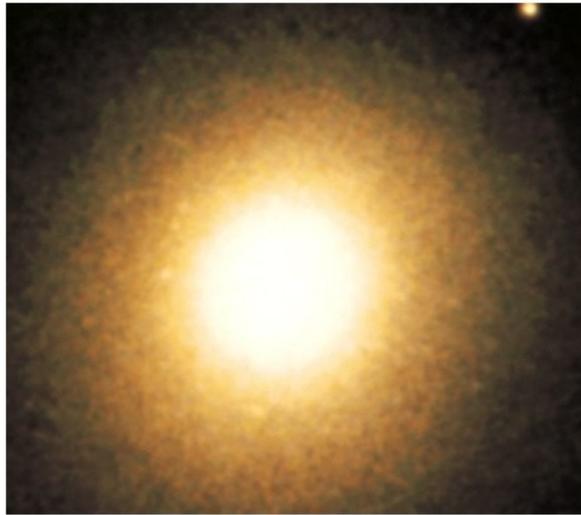


A Sequência de Hubble

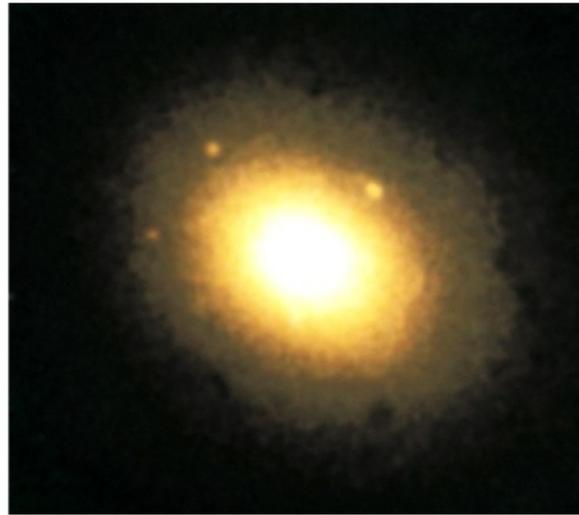
1926, Hubble: Sistema de **Classificação morfológica** de galáxias



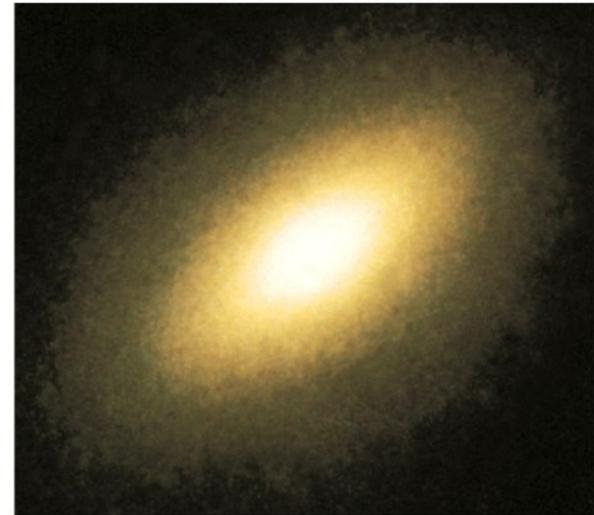
A Sequência de Hubble: Galáxias Elípticas



(a) E0 (M105)



(b) E3 (NGC 4365)



(c) E6 (NGC 3377)

Figure 24-7

Universe, Eighth Edition

© 2008 W.H. Freeman and Company

Classificados pela **elipticidade**: tipo $E(10\varepsilon)$, onde $\varepsilon \equiv 1 - \beta/\alpha$, α e β são os **semi-eixos aparentes** (projetados) maior e menor.

Não se encontra galáxias mais elípticas que E7.

! A elipticidade aparente não necessariamente revela a forma de uma galáxia, já que ela depende da orientação dela em relação à linha de visada.

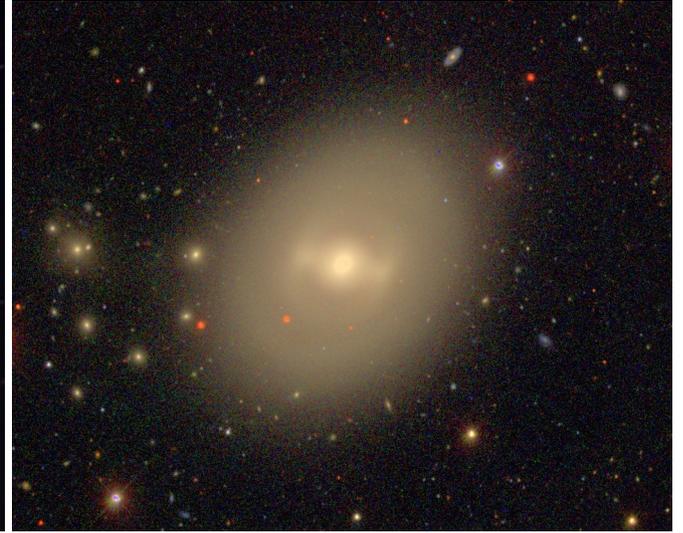
A Sequência de Hubble: Galáxias Lenticulares



NGC 2787, tipo S0



NGC 5866, tipo S0



NGC 936, tipo SB0

Galáxias **lenticulares**, S0, são tipos **intermediários** entre **elípticas** e **espirais**.

Elas tem **bojos enormes** e **discos fracos** sem estrutura, e **conteúdo estelar** similar às **elípticas**, pouca ou **nenhuma formação estelar**.

Elas podem ter **barras**: tipo SB0.

A Sequência de Hubble: Galáxias Espirais



(a) Sa (NGC 1357)



(b) Sb (M81)



(c) Sc (NGC 4321)

Figure 24-5

Universe, Eighth Edition

© 2008 W. H. Freeman and Company

$L_{\text{Bojo}}/L_{\text{Disco}}$ **cai** de 0.3 a 0.05 de Sa a Sc.

O **ângulo de abertura** dos braços espirais **aumenta** de 6° a 18° .

A distribuição de estrelas nos braços fica menos suave.
Tipos intermediários se chamam Sab e Sbc.

A Sequência de Hubble: Galáxias Espirais Barradas



(a) SBa (NGC 4650)



(b) SBb (M83)



(c) SBc (NGC 1365)

Figure 24-6
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

A mesma coisa com **barras**.

Dois terços das galáxias espirais são barradas.

A **Via Láctea** é provavelmente uma galáxia tipo **SBbc**.

A Sequência de Hubble: Galáxias Irregulares



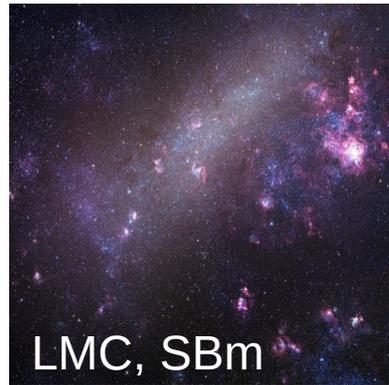
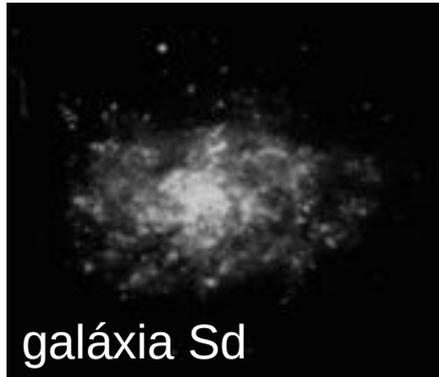
Irr I: ainda uma **dica** de **estrutura organizada**

Irr II: estrutura **totalmente desorganizada**

Irregulares costumam ser **pequenas**, ricas em **gás** e de **baixa metalicidade**.

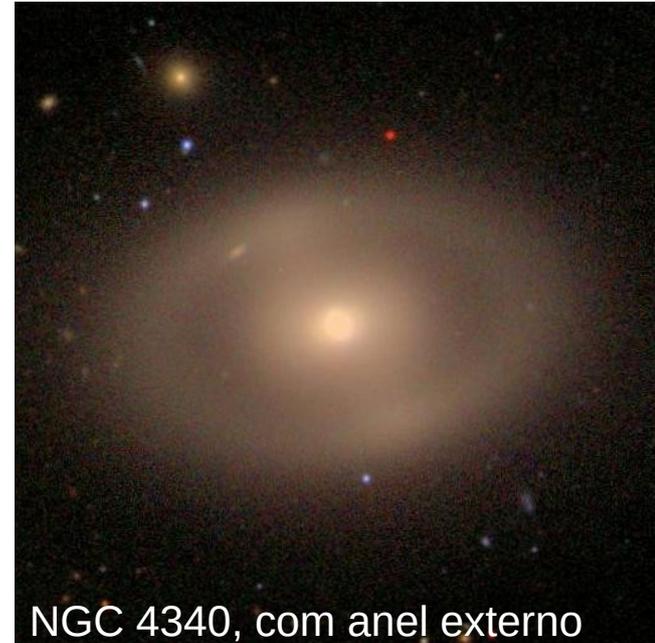
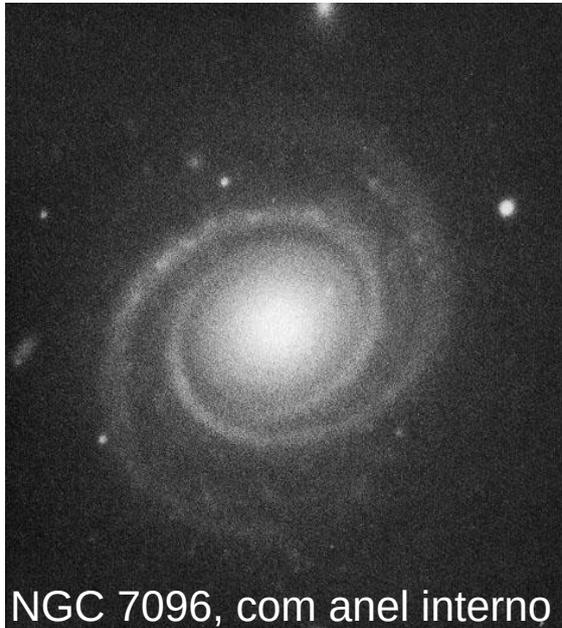
Geralmente elas são **associadas** a **galáxias maiores**.

Adições à Sequência de Hubble



Gerard **de Vaucouleurs** substituiu os tipos Irr I e Irr II por dois novos tipos **espirais**, Sd/SBd e Sm/SBm (“espirais magellânicas”), e dois **irregulares**, Im (“irregulares magellânicas”), e Ir (“verdadeiramente irregulares”).

Adições à Sequência de Hubble



Sidney van den Bergh introduziu novos tipos, levando em conta quão bem definidos são os braços espirais (“classe de luminosidade” I a V), se os braços vão até o centro da galaxia, (s) e a existência de anéis internos ou externos (r, R).

Adições à Sequência de Hubble

Coisas
para
levar
em
conside-
ração

Classificação morfológica

- Baseada no óptico (banda B ou V).
- Galáxias brilhantes.
- Galáxias relativamente próximas.
- 20% Elípticas;
75% Espirais;
5% Irregulares.
- A grande maioria
das galáxias
são anãs.
- Forma
(morfologia)
depende do
filtro de
observação.



Galáxias: Morfologia

A sequência de Hubble com suas adições é uma classificação a **olho**, sujeita ao **juízo subjetivo** de quem faz a classificação.

Uma **ferramenta** para um tratamento mais **objetivo** de uma **imagem** de uma **galáxia** são as **isofotas**, curvas de **luminosidade superficial**, μ (unidades mag/arcsec²), **constante**.

Note, que a luminosidade superficial **não depende** da **distância**.



Isofotas de galáxias elípticas

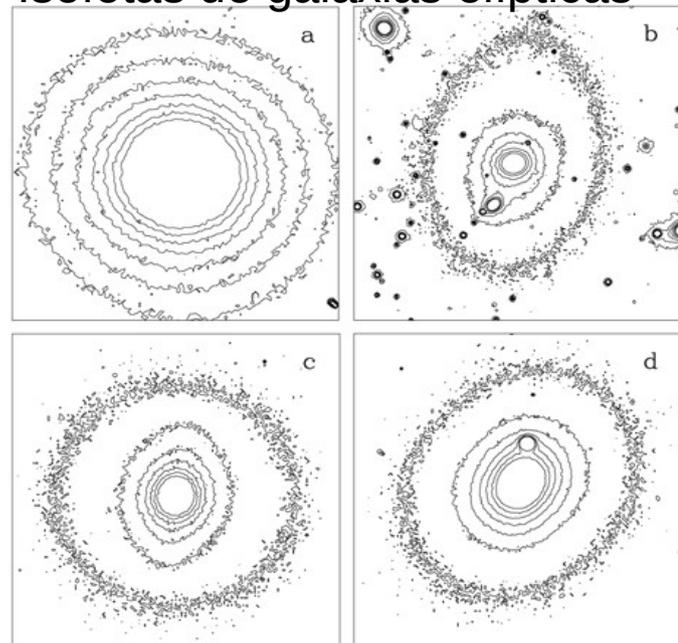


Fig 6.1 (R. de Jong) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

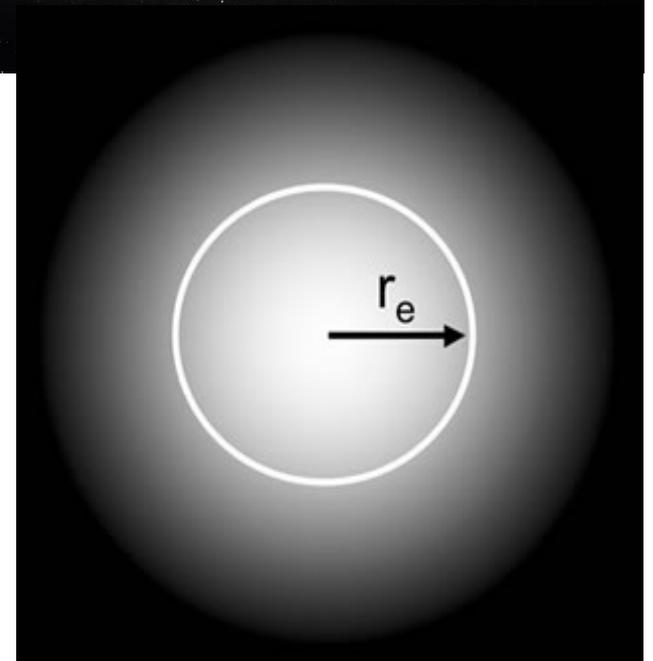
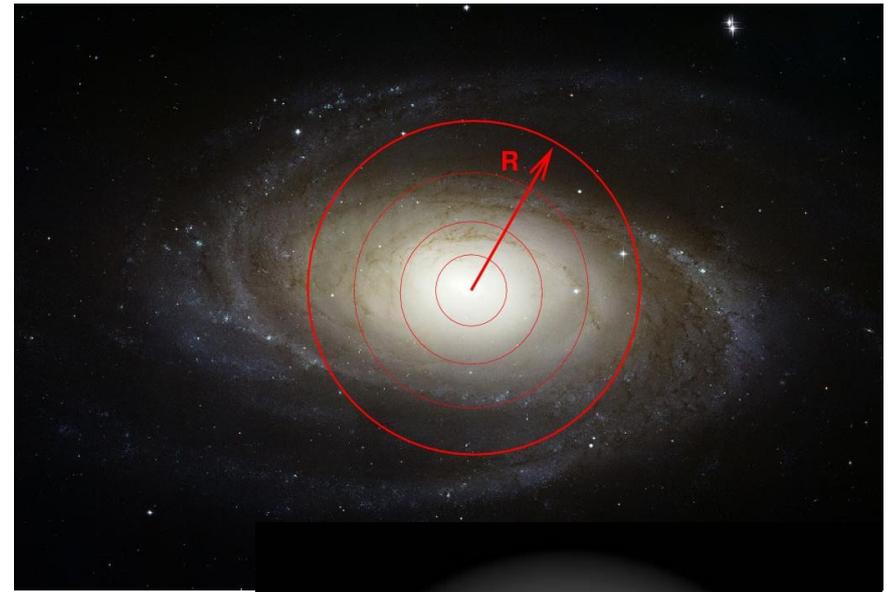
Galáxias: Morfologia

Um problema para definir o **raio** de uma galáxia é o fato que **não** existe uma **borda nítida**.

O **raio de Holmberg** r_H é definido como o **semi-eixo maior** da isofota de $\mu_H = 26.5 \text{ mag/arcsec}^2$ na banda B .

O **raio efetivo** r_e é o raio que envolve **metade da luz** da galáxia.

Estas definições funcionam relativamente bem até para distribuições achatadas de luz.



Galáxias Espirais e Irregulares

São as galáxias chamadas **tardias** por Hubble.
Ocorre **formação estelar** em galáxias destes tipos.

Algumas **características:**

Espirais

	Sa	Sb	Sc
M_B	-17 to -23	-17 to -23	-16 to -22
$M (M_\odot)$	10^9 - 10^{12}	10^9 - 10^{12}	10^9 - 10^{12}
$\langle L_{\text{bulge}}/L_{\text{total}} \rangle_B$	0.3	0.13	0.05
Diameter (D_{25} , kpc)	5-100	5-100	5-100
$\langle M/L_B \rangle (M_\odot/L_\odot)$	6.2 ± 0.6	4.5 ± 0.4	2.6 ± 0.2
$\langle V_{\text{max}} \rangle (km s^{-1})$	299	222	175
V_{max} range ($km s^{-1}$)	163-367	144-330	99-304
pitch angle	$\sim 6^\circ$	$\sim 12^\circ$	$\sim 18^\circ$
$\langle B - V \rangle$	0.75	0.64	0.52
$\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle$	0.04	0.08	0.16
$\langle M_{H_2}/M_{H I} \rangle$	2.2 ± 0.6 (Sab)	1.8 ± 0.3	0.73 ± 0.13
$\langle S_N \rangle$	1.2 ± 0.2	1.2 ± 0.2	0.5 ± 0.2

Irregulares

	Sd/Sm	Im/Ir
M_B	-15 to -20	-13 to -18
$M (M_\odot)$	10^8 - 10^{10}	10^8 - 10^{10}
Diameter (D_{25} , kpc)	0.5-50	0.5-50
$\langle M/L_B \rangle (M_\odot/L_\odot)$	~ 1	~ 1
V_{max} range ($km s^{-1}$)	80-120	50-70
$\langle B - V \rangle$	0.47	0.37
$\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle$	0.25 (Scd)	0.5-0.9
$\langle M_{H_2}/M_{H I} \rangle$	0.03-0.3	~ 0
$\langle S_N \rangle$	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.2

Galáxias Espirais

O perfil de luminosidade superficial dos **bojos** de galáxias espirais segue o perfil de **de Vaucouleurs**:

$$\mu(r) = \mu_e + 8.3268 \cdot [(r/r_e)^{1/4} - 1],$$

igual como o bojo da Via Láctea,

e o perfil dos **discos** é **exponencial**:

$$\mu(r) = \mu_0 + 1.09 \cdot (r/h_r),$$

também igual como na Via Láctea.

Galáxias Espirais e Irregulares

Similar como na Via Láctea, pode-se medir as **curvas de rotação** de outras galáxias, medindo o **efeito Doppler** em pontos no seu **eixo maior**.

Encontra-se:

- Quanto **maior** a **luminosidade** (na banda B), L_B , da galáxia, tanto mais **rapidamente** a **velocidade sobe**, e tanto **maior** é a **velocidade máxima**, V_{\max} .
- Para galáxias com o **mesmo** L_B , espirais de tipo **precoce** (S_a) têm **V_{\max} maiores**.
- Quanto mais **precoce**, tanto mais **rapidamente** a **velocidade sobe**.

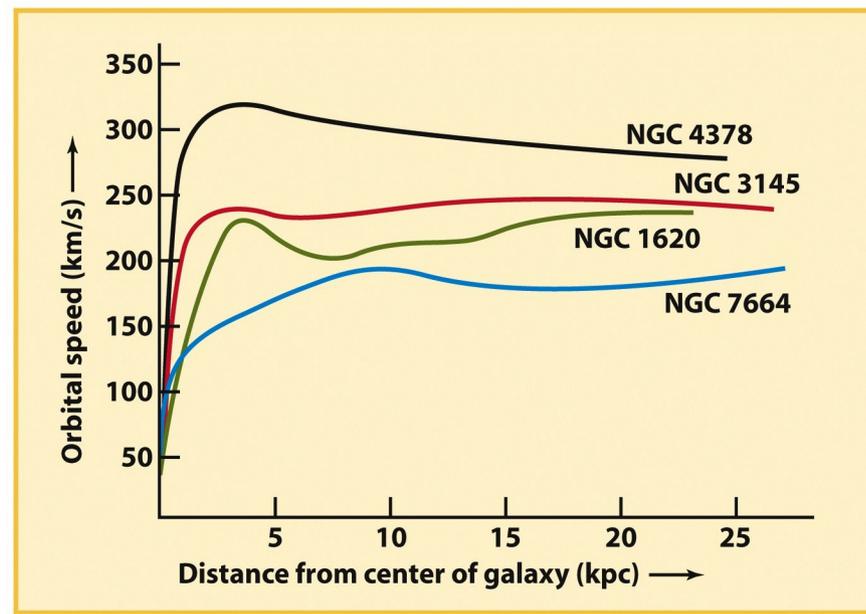


Figure 24-29
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Galáxias Espirais e Irregulares

Em geral, todas têm forma similar àquela da Via Láctea, com velocidades praticamente **constantes**.

Velocidades máximas médias para amostras de galáxias do tipo:

Sa: $\langle v_{\max} \rangle = 299 \text{ km/s}$

Sb: $\langle v_{\max} \rangle = 222 \text{ km/s} \sim v_{\max, \text{VL}} \sim v_{\odot}$

Sc: $\langle v_{\max} \rangle = 175 \text{ km/s}$

Para Sds e irregulares, v_{\max} varia de 50 a 70 km/s

=> Provavelmente é preciso de **momento angular** para formar **braços espirais** regulares.

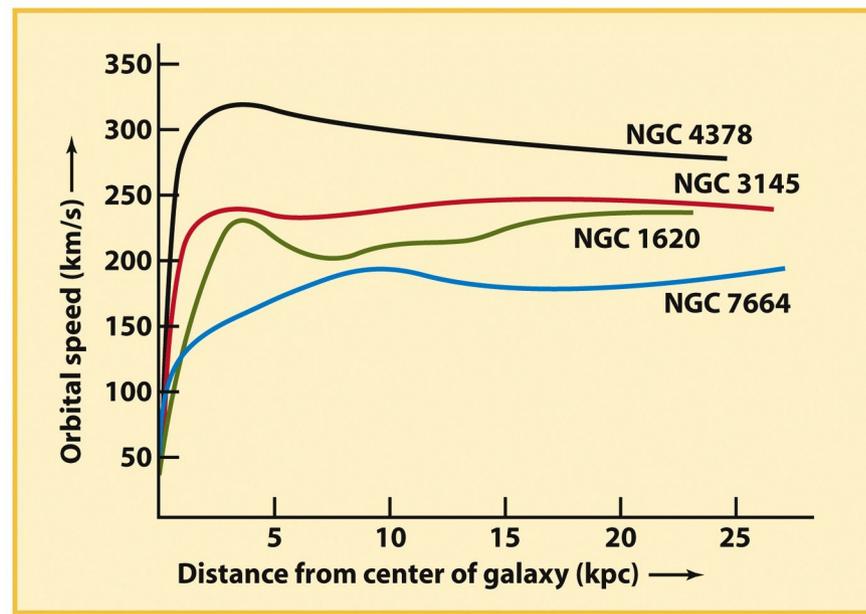


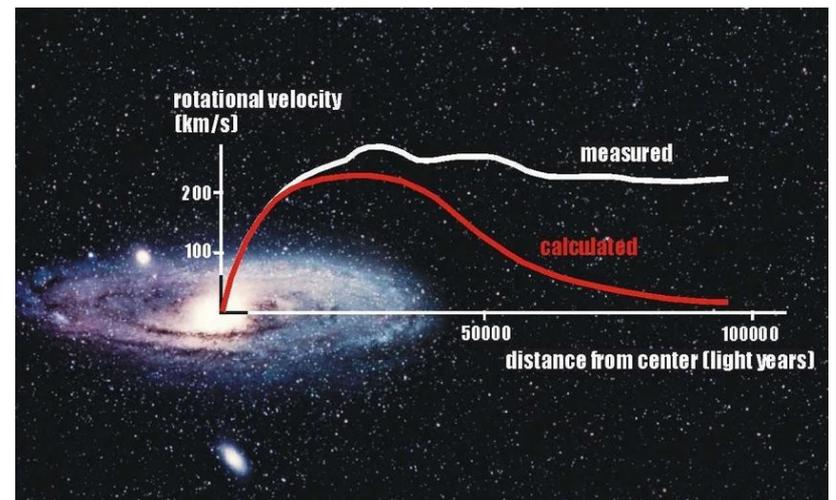
Figure 24-29
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

Galáxias Espirais e Irregulares

Igual como na nossa Galáxia, a forma praticamente **constante** destas **curvas de rotação** significa, que estas galáxias também devem ter um **Halo** de **Matéria Escura**.



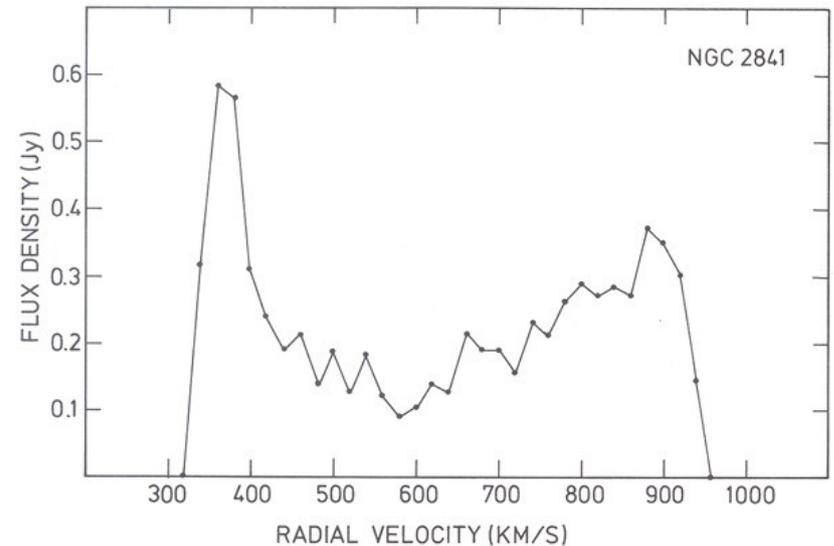
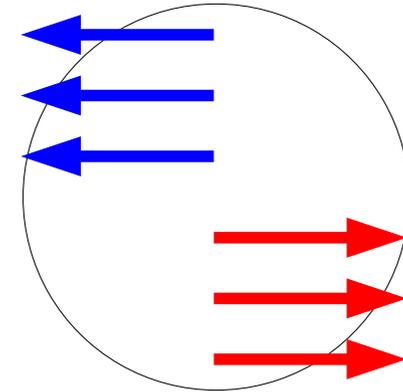
Conclusão tirada pela primeira vez em 1970 por **Vera Rubin** analisando a curva de rotação da **galáxia** de **Andrômeda**.



Galáxias Espirais Espirais e Irregulares

O grande montante de **gás** e **estrelas aproximando-se** a nós, e **afastando-se** de nós com a **mesma velocidade**, V_{\max} , causa um **pico duplo** no perfil de uma **linha espectral** no espectro **integrado** (medida sobre toda a galáxia).

=> Medindo só o **perfil** de uma **linha** do espectro **integrado** nos dá V_{\max} .



Perfil da linha de 21 cm em NGC 2841

Galáxias Espirais

A Relação Tully-Fisher

Como mencionado, quanto **maior** é a **luminosidade** L_B de uma galáxia espiral, tanto **maior** é v_{\max} , já que a **massa** é **maior**.

Esta relação, chamada **relação Tully-Fisher** é especialmente bem definida **separando** as galáxias por **tipo** de **Hubble**:

$$M_B = -9.95 \cdot \log_{10} v_{\max}[\text{km/s}] + 3.15 \text{ (para galáxias tipo Sa)}$$

$$M_B = -10.2 \cdot \log_{10} v_{\max}[\text{km/s}] + 2.71 \text{ (Sb)}$$

$$M_B = -11.0 \cdot \log_{10} v_{\max}[\text{km/s}] + 3.31 \text{ (Sc)}$$

=> **medindo** v_{\max} (pelo perfil de uma linha espectral) de uma **galáxia espiral** de tipo morfológico conhecido, conseguimos determinar a **luminosidade** e, medindo m_B , a sua **distância**.

(Exercício: Mostre, que a inclinação de ~ -10 significa, que $L_B \sim \text{prop. } v_{\max}^4$)

Galáxias Espirais

Relação Raio-Luminosidade

A **luminosidade** de uma galáxia espiral de **Sa** a **Sc** **aumenta** com o seu **raio** (lógico, ela é maior), independente do tipo de Hubble:

$$\log_{10} R_{25}[\text{kpc}] = -0.249 \cdot M_B - 4.00,$$

onde R_{25} é o raio correspondendo à isofota de 25 mag/arcsec² em B em kpc, similar ao raio de Holmberg, mas com outra luminosidade superficial “de corte”.

Galáxias Espirais

Relação Massa-Luminosidade

Usando que $M = v_{\max}^2 \cdot R/G$ (aula Via Láctea), podemos combinar a relação Tully-Fisher com a relação raio-luminosidade para obter as **relações massa-luminosidade** para espirais tipo Sa, Sb e Sc:

$$M/L_B = (6.2 \pm 0.6) \cdot (M/L_B)_{\odot} \text{ (para Sa)}$$

$$M/L_B = (4.5 \pm 0.4) \cdot (M/L_B)_{\odot} \text{ (para Sb)}$$

$$M/L_B = (2.6 \pm 0.2) \cdot (M/L_B)_{\odot} \text{ (para Sc)}$$

Galáxias Espirais e Irregulares

Em geral, seguindo a sequência de Hubble de precoce para tardio, de Sa para Ir, a taxa de formação estelar relativa aumenta. Ironicamente, isto significa que a fração de estrelas precoces (O e B), aumenta.

=> As cores ficam mais azuis.

=> A fração da massa total em gás e poeira aumenta.

=> A emissão em H II aumenta.

=> A fração de hidrogênio em moléculas diminui.

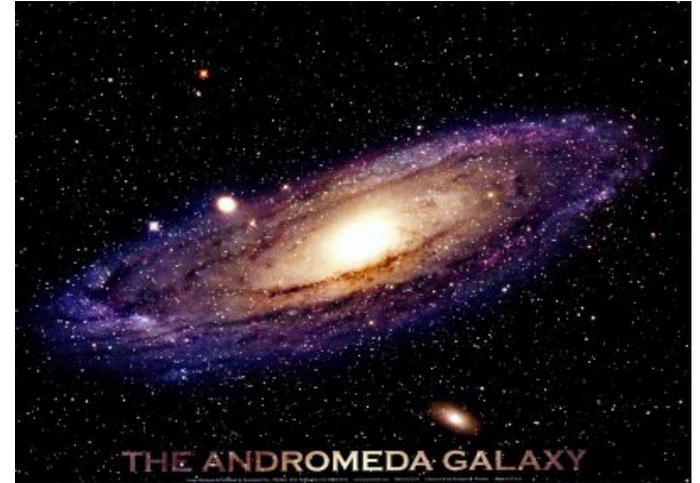
=> A frequência específica de aglomerados globulares, S_N , diminui.

Para valores quantitativas, veja a tabela alguns slides atrás.

Galáxias Espirais

Gradientes de Metalicidade e Cor

Igual como a **Via Láctea**, outras **galáxias espirais** também têm **gradientes** em **metalicidade**, no sentido que ela é mais **alta** perto do **bojo** (=> aula Via Láctea).



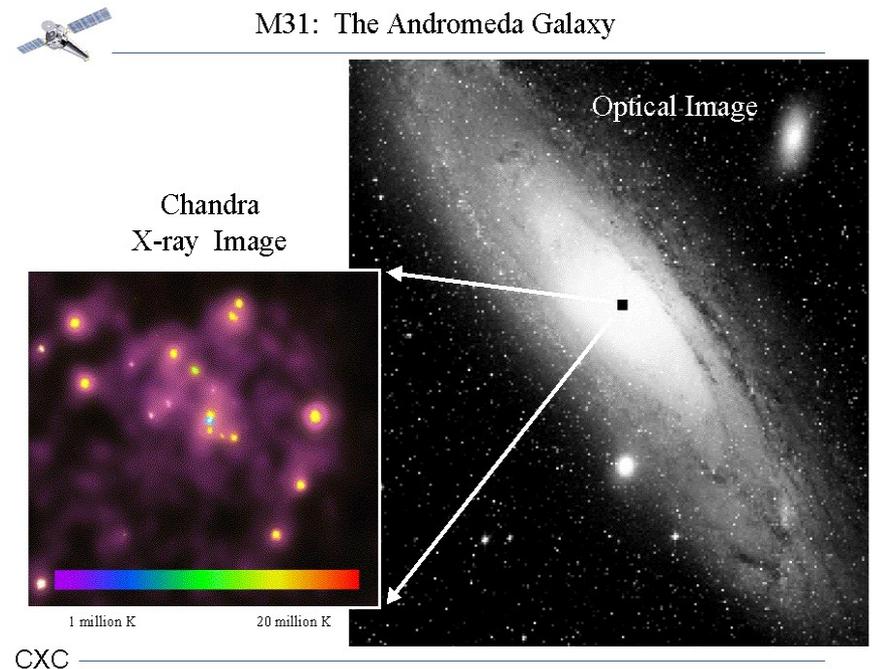
Como estrelas de **alta metalicidade** são mais **vermelhas** que estrelas de baixa metalicidade da mesma massa, e a **formação estelar** atualmente ocorre predominantemente nos **braços espirais**, estas galáxias também têm **gradientes** de **cor**, as partes **externas** sendo mais **azuis**.

Galáxias Espirais

Buracos Negros Supermaciços

Medindo as **velocidades** de **estrelas** e **gás** nas **regiões centrais** de **galáxias discos**, e/ou procurando assinaturas de **radiação** gerada na **acrecção** de material por massas altas e compactas, encontra-se que **muitas** delas devem ter **massas altas** e “escuras” nos seus núcleos, igual à **Via Láctea**, **Buracos Negros Supermaciços**.

Ex. O Buraco Negro Central da Galáxia de Andrômeda deve ter uma massa de $1.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$.

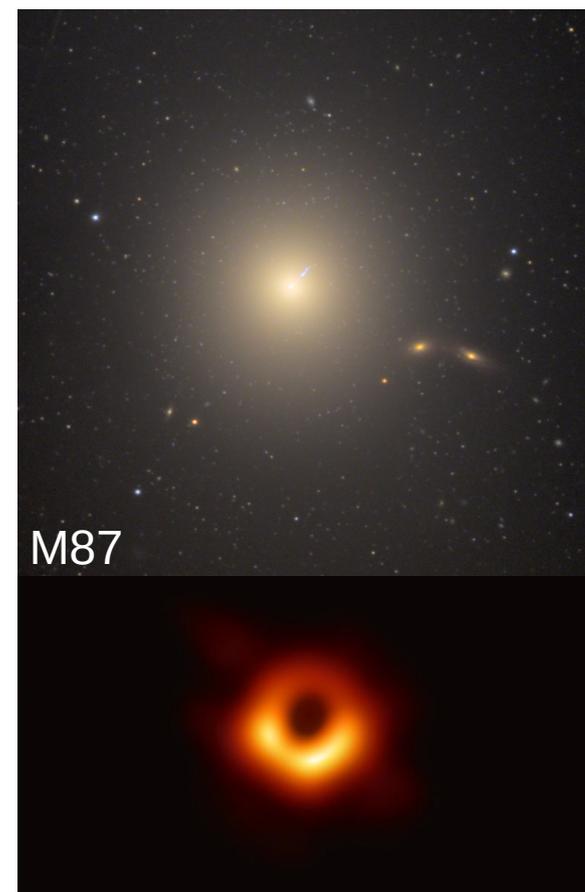


Galáxias Espirais e Elípticas

Buracos Negros Supermaciços

Buracos Negros Supermaciços são encontrados não apenas em galáxias tipo tardio, mas também em **elípticas gigantes** como M87 (Buraco Negro de $\sim 6.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$).

Ouviremos mais sobre esta galáxia, este Buraco Negro e esta foto, publicada em 2019, mais tarde nesta aula e nas duas próximas (galáxias II e AGNs).



O Buraco Negro central de M87 (melhor: o disco de acreção em torno do BN)

Galáxias Espirais e Elípticas

Buracos Negros Supermaciços

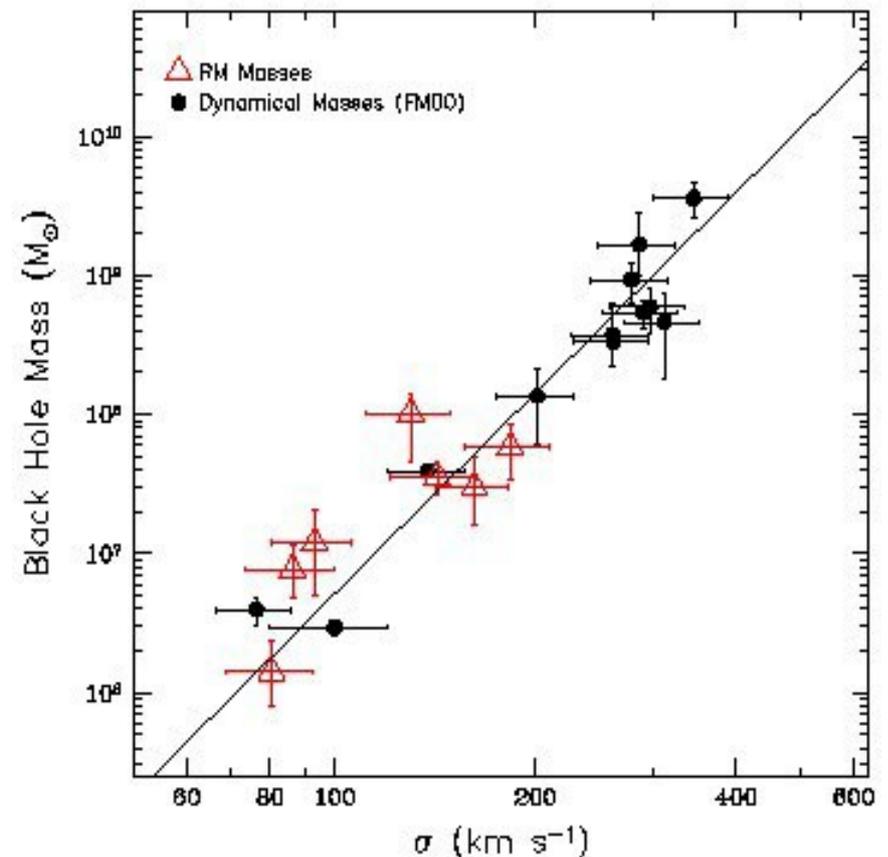
É interessante que a **massa** do **Buraco Negro** central parece correlatar com a **dispersão de velocidade** σ das estrelas na galáxia inteira (**elípticas**) ou no bojo (**espirais**), que é uma medida pra **massa total** da/o galáxia/bojo:

$$M_{\text{bh}} = \alpha \cdot (\sigma/\sigma_0)^\beta, \text{ onde}$$

$$\alpha = 1.66 \cdot 10^8 M_\odot,$$

$$\sigma_0 = 200 \text{ km/s e}$$

$$\beta = 4.86.$$



Galáxias Elípticas

Classes Morfológicas

Elípticas vêm em uma **grande variação** de **tipos** e **tamanhos**:

- **Galáxias cD** (*central Dominant*) são **enormes** (até 1 Mpc) e raras e encontram-se nos **centros** de **Aglomerados** de **galáxias**.
Têm **altas luminosidades superficiais** no **centro**, e **envoltórios** grandes e **difusos**.



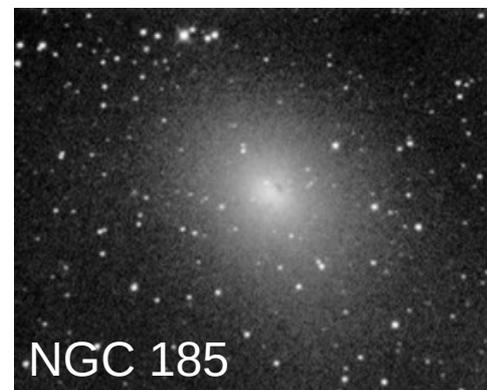
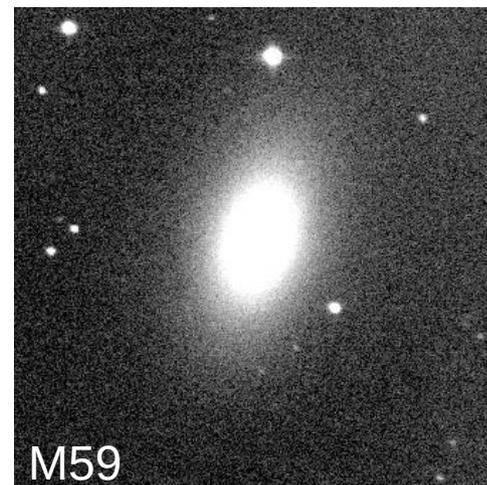
M87 = Virgo A

Possuem milhares de **aglomerados globulares**,
e **altas razões massa-luz**
=> quantidades grandes de **Matéria Escura**.

Galáxias Elípticas

Classes Morfológicas

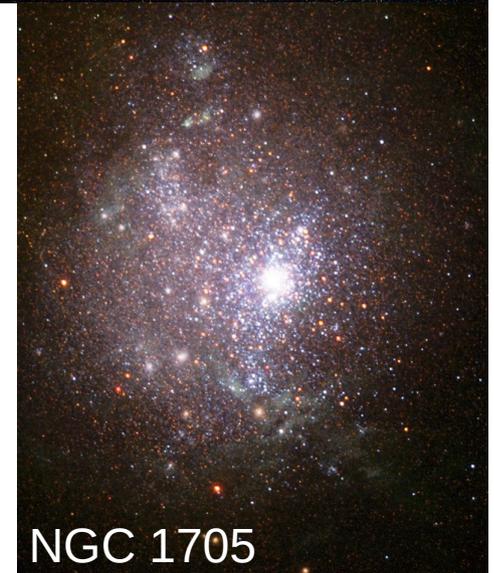
- **Elípticas Normais** (E0 a E7) são objetos centralmente concentrados com **luminosidades centrais altas**. Incluem as Elípticas Gigantes (gE), intermediárias (E), e compactas (cE). Às vezes, **lenticulares** (S0) são incluídas.
- **Elípticas Anãs** (dE) são **pequenas** (1 a 10 kpc), têm **massas** e **densidades menores** que as elípticas normais, e **metallicidades baixas**.



Galáxias Elípticas

Classes Morfológicas

- Galáxias Anãs Esferoidais (dSph) têm **massas** e **densidades** extremamente **baixas**. Só podem ser detectadas na vizinhança da Via Láctea.
- Galáxias Anãs Compactas Azúis (BCD) são **pequenas** e **azúis**, o que indica **formação estelar**.
Contêm um montão de **gás**.
A combinação formação estelar e gás causa fortes **linhas de emissão**.
Talvez seriam melhor classificadas como irregulares.



Galáxias Elípticas e Lenticulares

Algumas características de Elípticas Grandes/Lenticulares:

	cD	E	S0/SB0
M_B	-22 to -25	-15 to -23	-17 to -22
$M (M_\odot)$	10^{13} - 10^{14}	10^8 - 10^{13}	10^{10} - 10^{12}
Diameter (D_{25} , kpc)	300-1000	1-200	10-100
$\langle M/L_B \rangle (M_\odot/L_\odot)$	> 100	10-100	~ 10
$\langle S_N \rangle$	~ 15	~ 5	~ 5

Algumas características de Elípticas Anãs:

	dE	dSph	BCD
M_B	-13 to -19	-8 to -15	-14 to -17
$M (M_\odot)$	10^7 - 10^9	10^7 - 10^8	~ 10^9
Diameter (D_{25} , kpc)	1-10	0.1-0.5	< 3
$\langle M/L_B \rangle (M_\odot/L_\odot)$	~ 10	5-100	0.1-10
$\langle S_N \rangle$	4.8 ± 1.0	—	—

Galáxias Elípticas

A distribuição da Luz das cDs e elípticas normais segue o perfil de **de Vaucouleurs**:

$$\mu(r) = \mu_e + 8.3268 \cdot [(r/r_e)^{1/4} - 1],$$

igual como os bojos das galáxias espirais.

Reduzindo a massa, o perfil vira gradualmente **exponencial**, especialmente no caso de dEs e dSphs.

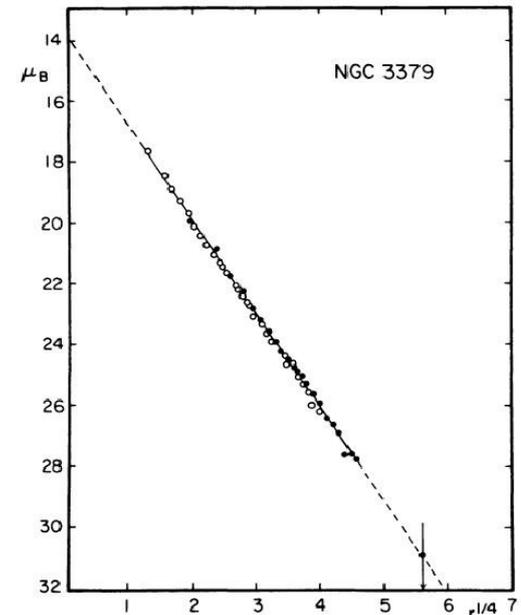


FIG. 2.—Mean E-W luminosity profile of NGC 3379 derived from McDonald photoelectric data. ●, Pe 4 data with 90 cm reflector; ○, Pe 1 data (M + P) with 2 m reflector. Note close agreement with $r^{1/4}$ law.

Galáxias Elípticas

Poeira e gás

Por muito tempo acharam que elípticas (tirando as BCD) não têm gás nem poeira.

De fato, as de menor massa, as **dEs** e **dSphs**, **não** conseguem segurar **gás** e **poeira**.

Porém, maioria das **elípticas normais** contêm gás, mas menos que as espirais, e metade contém bastante **poeira**, até em quantidade considerável.

É intrigante que frequentemente, esta poeira está **girando** em **outra direção** que as **estrelas**.

=> adquirida depois da formação



Uma elíptica com faixa da gás.

Galáxias Elípticas e Lenticulares

O conteúdo “metálico” de elípticas **aumenta** com a **luminosidade**.

(maior $L \Rightarrow$ maiores massa e densidade
 \Rightarrow formação estelar e enriquecimento mais rápidos).

Elas também têm **gradientes** de **metalicidade**, de $d\log_{10} Z/d\log_{10} r \approx -0.13$, o que implica em **gradientes** de **cores**, as regiões **centrais** sendo mais **vermelhas**.

O mesmo vale para **lenticulares**, e estas têm **discos** mais **azuis** que os seus **bojos**.

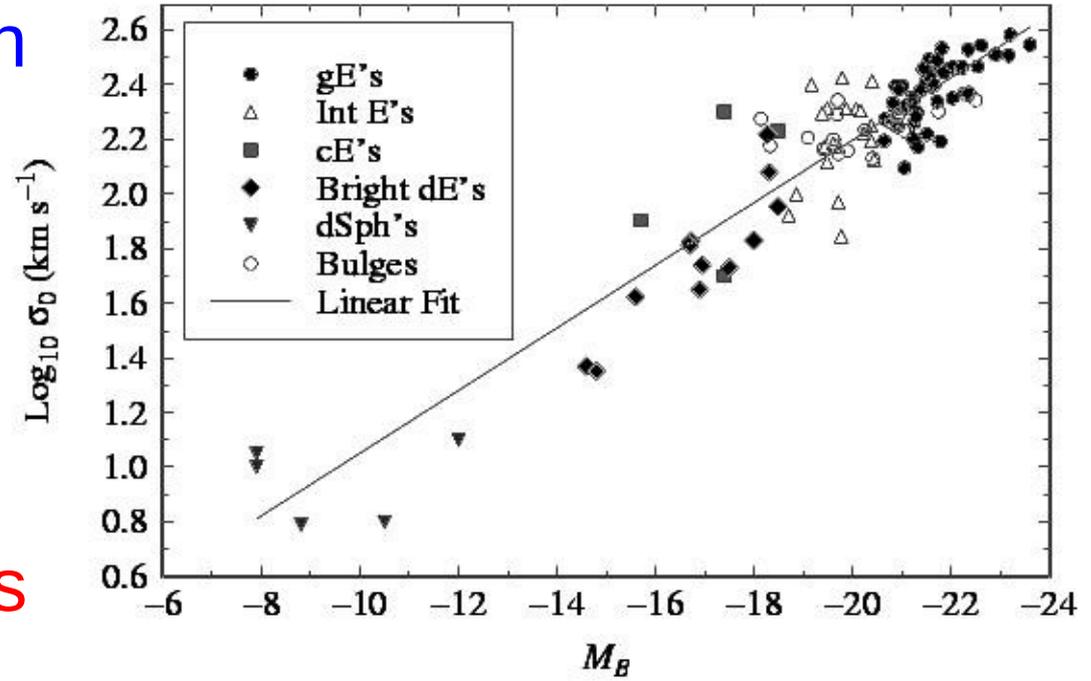
Galáxias Elípticas

A Relação Faber-Jackson

É o **equivalente** à relação **Tully-Fisher** (quanto maior v_{\max} , tanto maior L) para **elípticas**, só que as estrelas em elípticas têm **distribuições de velocidades** (e, então perfis de linhas espectrais) em forma de **sino**, com **dispersão de velocidades** σ_0 .

$\Rightarrow L \text{ prop. } \sigma_0^4$, ou $\log_{10} \sigma_0 = 0.1 \cdot M_B + \text{const.}$

A relação Faber-Jackson também serve para medir **distâncias** até galáxias elípticas.



Galáxias Elípticas

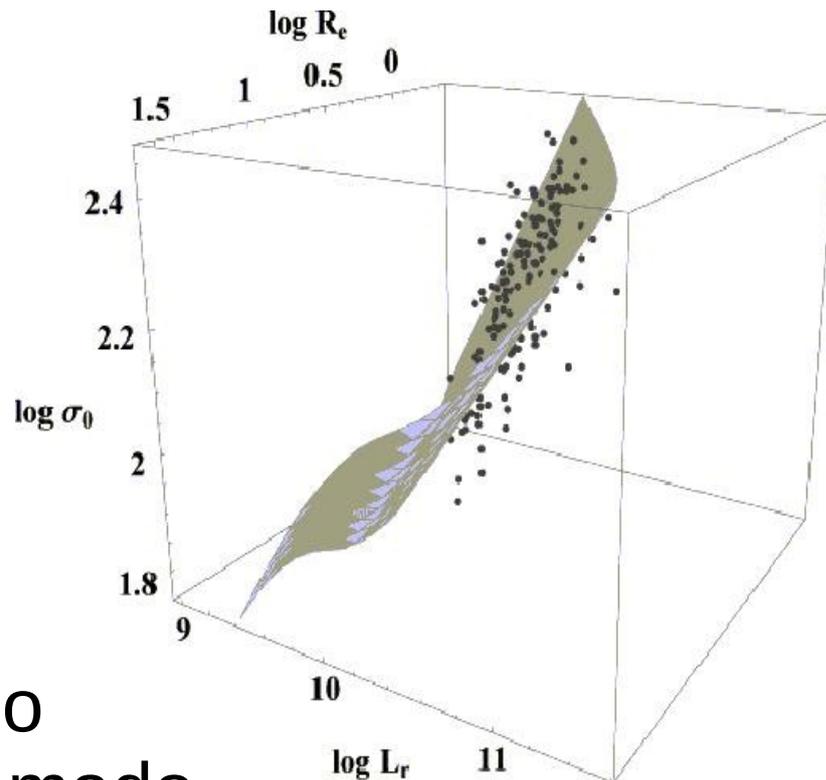
O Plano Fundamental

Para **diminuir** o **espalhamento** da relação Faber-Jackson, colocaram outro parâmetro na equação, o **raio efetivo**, e encontraram a seguinte **relação**:

$$L \text{ prop. } \sigma_0^{2.65} \cdot r_e^{0.65}.$$

Esta equação define um plano no espaço $\log L - \log \sigma_0 - \log r_e$, chamado **plano fundamental** das **galáxias elípticas**.

O fato que todas as elípticas se encontram neste plano parece implicar algo sobre a **formação** destes sistemas (mais ainda sabem, o que).



Galáxias Elípticas

Rotação

Ao contrário de galáxias discos, **elípticas não têm eixos de rotação preferidos**, as **velocidades rotacionais** sendo bem **menores** que as **dispersões de velocidades** das **estrelas**.

A **forma** de uma elíptica é **sustentada** por **pressão** (ao contrário de sustentada por rotação), quer dizer pelas **dispersões de velocidades** nas direções x , y e z .

Como quase **não** há **fricção** num sistema de **estrelas** entre si, a galáxia **não colapsa** como fazem nuvens de gás.

Galáxias Elípticas

Elípticas “Boxy” vs. “Disky”

A segunda vista, há **variações** na **razão** entre a **velocidade rotacional** e a **dispersão de velocidades**, causando **variações** na **forma** exata das elípticas:

- As **Boxy** tem **razões** $v_{\text{rot}}:\sigma_0$ **menores**, o que causa formas mais **retangulares** ou até “de amendoim”.
- As com **razões** $v_{\text{rot}}:\sigma_0$ **maiores**, chamadas **Disky** têm formas mais parecidas com **discos**.

FIGURE 3. — Distribution of the ellipticity classes for all observed elliptical galaxies.

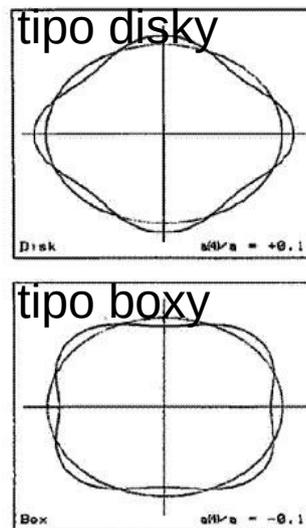


FIGURE 5. — Schematic drawing illustrating isophotes with $a(4)/a = +0.1$ and $a(4)/a = -0.1$.

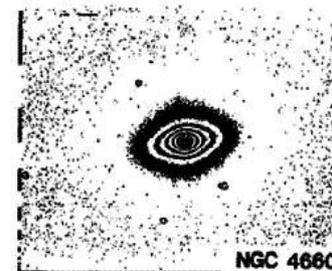


FIGURE 6. — R-image of NGC 4660, an elliptical galaxy with a disk-component in the isophotes ($a(4)/a \sim +0.03$).

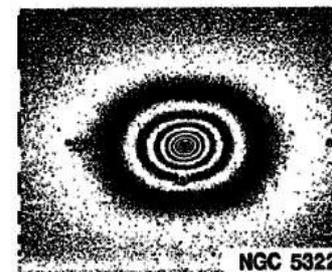


FIGURE 7. — R-image of NGC 5322, an elliptical galaxy with box-shaped isophotes ($a(4)/a \sim -0.01$).

Examples for boxy and disk isophotes from Bender et al. (1988)

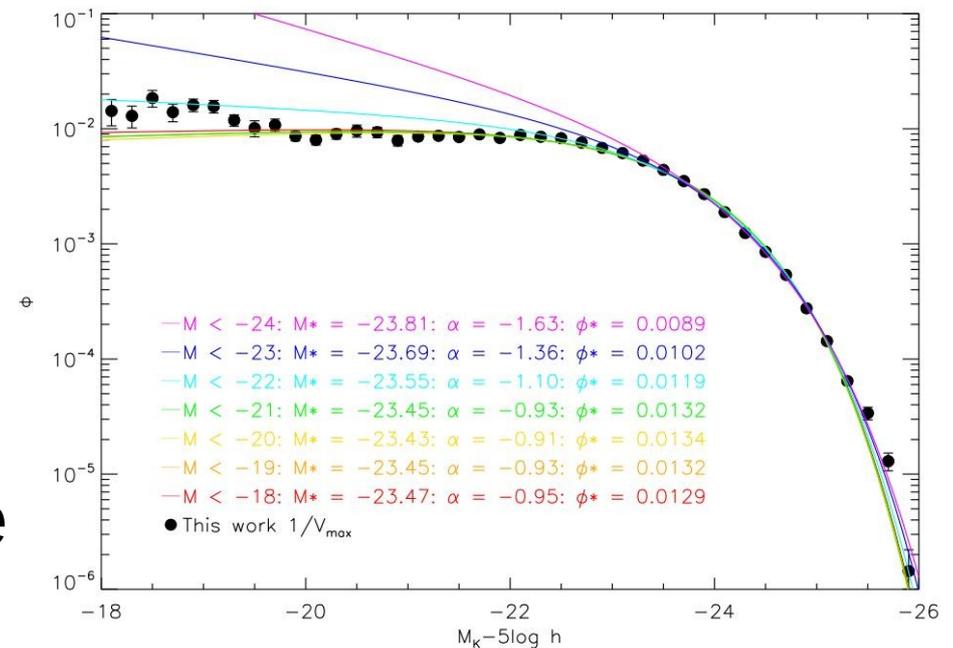
A Função de Schechter

Quantas galáxias de um dado tipo de Hubble existem, em função das suas luminosidades/magnitudes absolutas?

Paul Schechter fez um ajuste a contagens de galáxias em função das suas luminosidades, e chegou na função:

$$\Phi(L)dL \sim L^\alpha e^{-L/L^*} dL, \text{ ou } \Phi(M)dM \sim 10^{-0.4(\alpha+1)M} \cdot \exp(-10^{0.4(M^*-M)}) dM,$$

onde $\Phi(L)dL$ resp. $\Phi(M)dM$ é o número de galáxias no intervalo dL resp. dM , L^* e M^* são os valores, onde acontece o “joelho” da curva, e α parametriza a inclinação da curva.



A Função de Schechter

$$\Phi(L)dL \sim L^\alpha e^{-L/L^*} dL, \text{ ou}$$

$$\Phi(M)dM \sim 10^{-0.4(\alpha+1)M} \cdot \exp(-10^{0.4(M^*-M)}) dM,$$

L^* resp. M^* e α não são constantes.

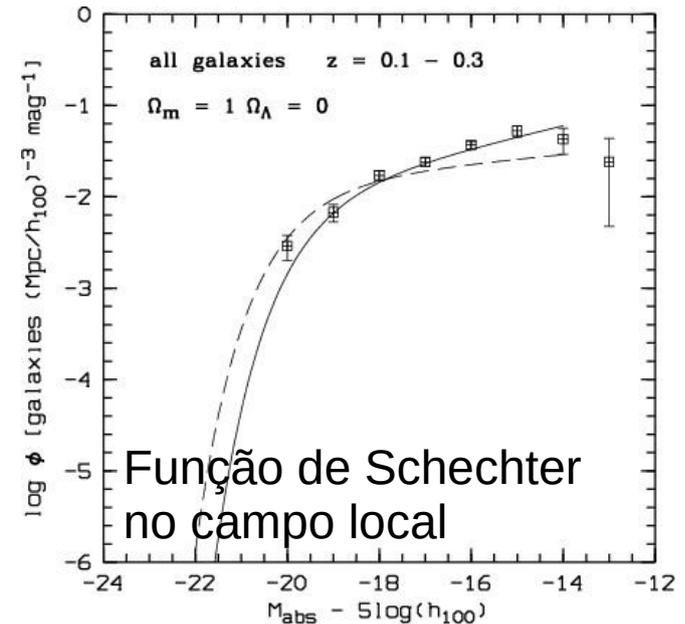
Eles **dependem** do **ambiente** estudado.

Para o **campo** de **galáxias** na vizinhança da Via Láctea:

$$M_B^* = -21, \quad \alpha = -1.0$$

Para o **aglomerado** de **galáxias** de Virgo:

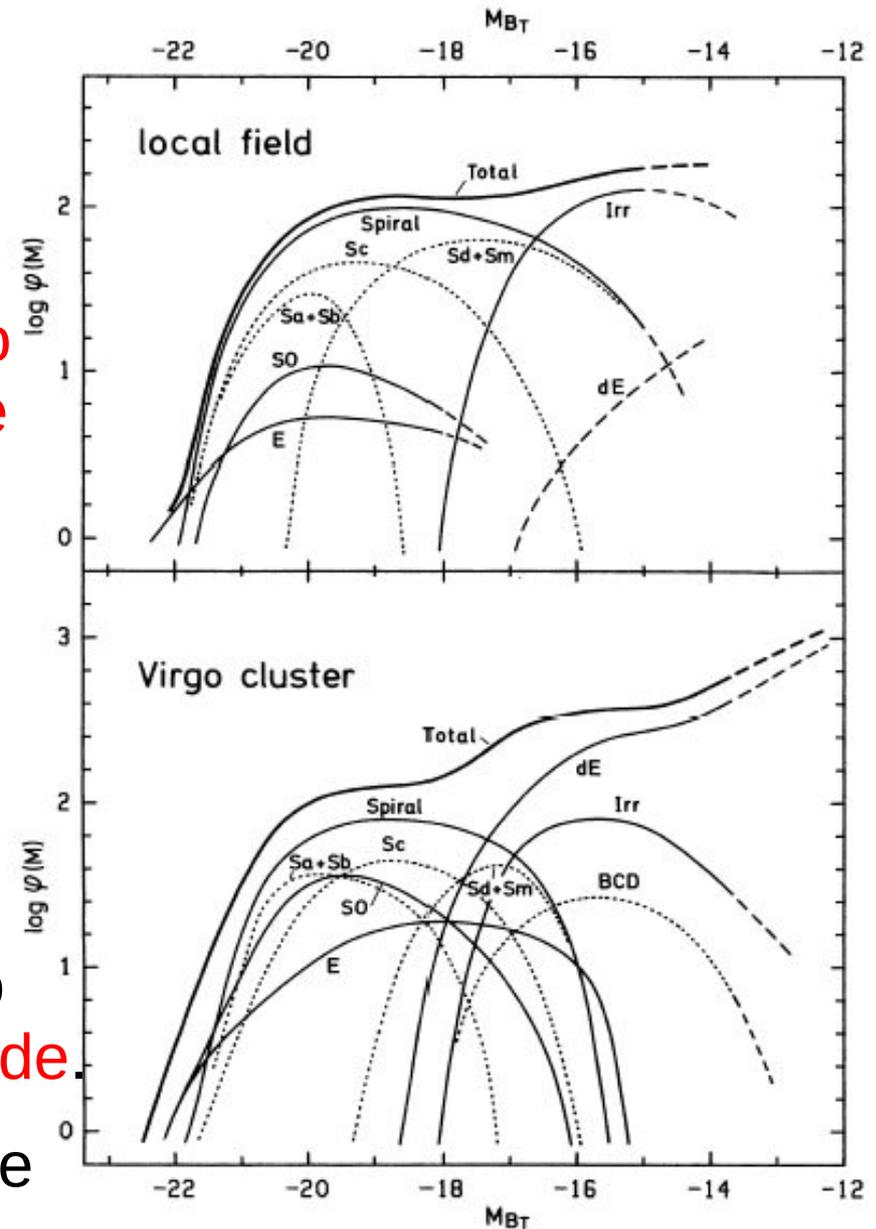
$$M_B^* = -21 \pm 0.7, \quad \alpha = -1.24 \pm 0.02$$



A Função de Schechter

Os **números relativos dos tipos de galáxias** também **variam** com o ambiente:

- **Galáxias anãs** dominam em número (mas **não** em massa ou luminosidade total).
 - Entre as **galáxias brilhantes**, as **espirais** dominam.
 - Em **aglomerados densos**, a fração de **elípticas** é maior do que em **aglomerados menos densos**, onde ela é **maior** que no **campo**, fenômeno chamado **relação morfologia-densidade**
- => dica sobre a **formação/evolução de galáxias** (próxima aula).



Galáxias

Como são **distribuídas** as galáxias no Universo?

- em **Grupos de galáxias**:

Conjuntos de **< 50 galáxias**, **diâmetros** da ordem de **2 Mpc**, e **massas** de **poucas** vezes **$10^{13} M_{\odot}$** ,

Eles podem ser “**soltos**” como o Grupo Local ou extremamente **compactos**.

Maior parte das **galáxias** se encontram em grupos.

ou

Galáxias

Como são **distribuídas** as galáxias no Universo?

- em **Aglomerados de galáxias**:

Diâmetros ~ 10 Mpc e **massas** $\sim 10^{15} M_{\odot}$, Eles vão de

- **Aglomerados Pobres**, ~ 50 galáxias. a

- **Aglomerados Ricos**, **milhares** de galáxias.

Aglomerados também podem ser classificados em **regulares** (esféricos e condensados centralmente) e **irregulares**.

Consistem de:

~ 3 % **galáxias** (na maioria elípticas e lenticulares; muitas galáxias anãs, mas que contribuem pouco à massa ou luminosidade; nos centros uma galáxia cD),

~ 12 % **gás interaglomerado** (~ 1 átomo/litro, 10^{7-8} K) e

~ 85 % **Matéria Escura**.

Apenas $\sim 7\%$ das galáxias do Universo estão em aglomerados.

Galáxias

Como são **distribuídas** as galáxias no Universo?

- e em **Superaglomerados**, que são **Aglomerados** de **Aglomerados**.

Aparentemente são as **maiores estruturas** do Universo, mas **não** são **gravitacionalmente ligados** (só expandem menos rapidamente que o resto do Universo).

Contêm **dezenas** de **aglomerados** e **grupos**, e em geral têm **tamanhos** de até **100 Mpc** e **massas** entre **10^{16}** e **$10^{17} M_{\odot}$** .

Apresentam **formas achatadas**, ou **filamentares**.

Os **espaços vazios** entre Grupos, Aglomerados e Superaglomerados se chamam **Voids**.

O Grupo Local

É o conjunto local de **~35 galáxias**, de **diâmetro** da ordem de **1.2 Mpc**, **massa** de **$\sim 4 \cdot 10^{12} M_{\odot}$** , contendo como **galáxias principais**:

a **Via Láctea**
(=> aula anterior):
tipo SBbc,
diâmetro ~ 50 kpc (disco),
massa $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$,

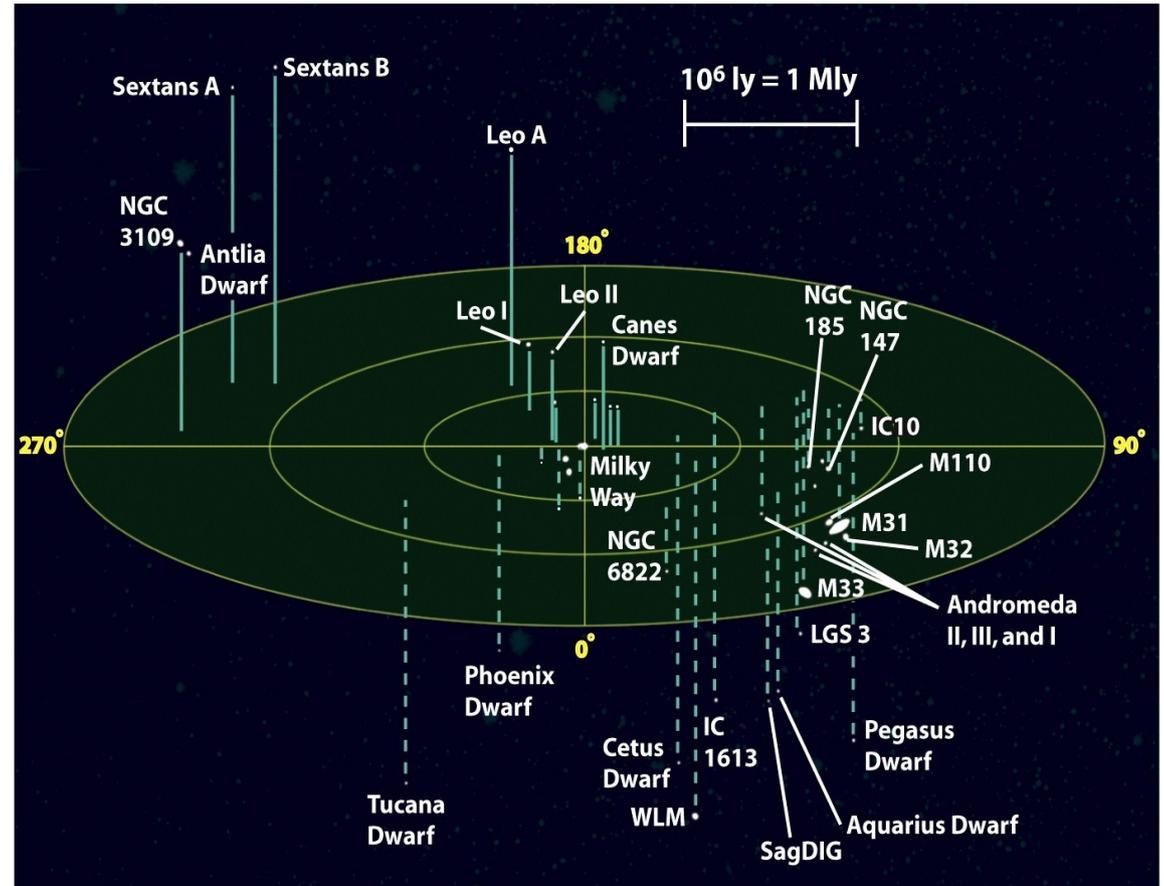
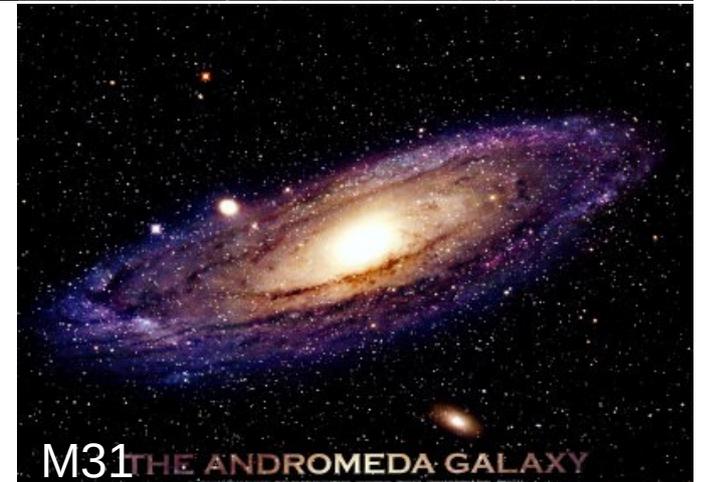
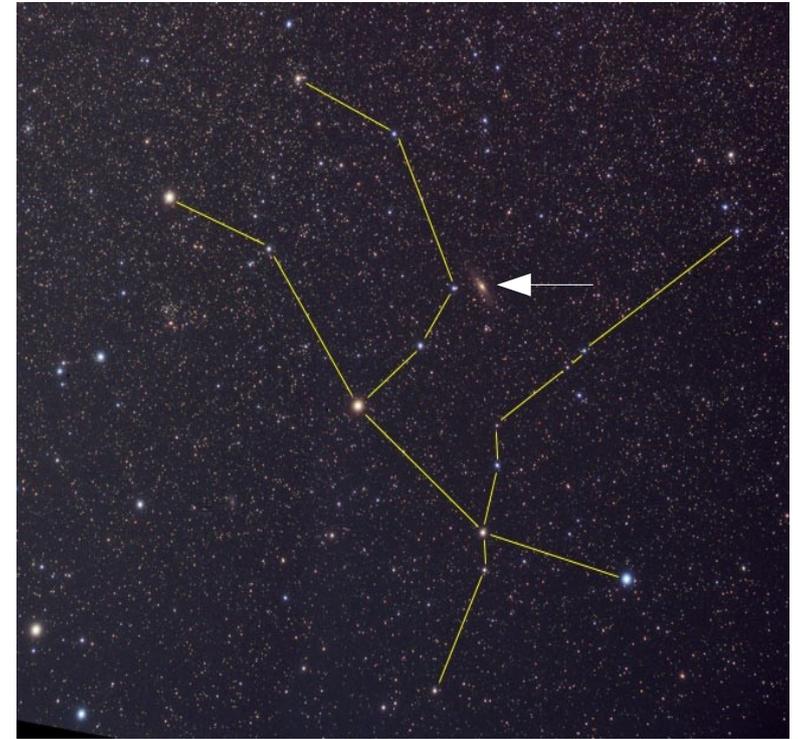


Figure 24-19
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

O Grupo Local

A galáxia de **Andrômeda** (M31):
visível a olho nu na constelação
do mesmo nome, com um
diâmetro aparente de 2.5° no céu
(5 vezes o da Lua),
a **770 kpc** de **distância**.

Tipo **Sb**,
diâmetro ~ 40 kpc (disco),
massa $1.2 \cdot 10^{12} M_\odot$ (incerta),



O Grupo Local

e a galáxia do **Triângulo** (M33)
visível a olho nu sob condições
boas, a **~800 kpc** de **distância**.

Tipo **Scd**,
diâmetro ~40 kpc (disco),
massa $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$,



O Grupo Local

as **galáxias satélites** destas galáxias principais, como as **Nuvens de Magalhães**, acompanhantes da **Via Láctea**,

e **M32** e **NGC 205**, satélites de **Andrômeda**,

e outras **galáxias anãs**.

As galáxias outras que a Via Láctea, M31 e M33 juntas têm $\sim 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.

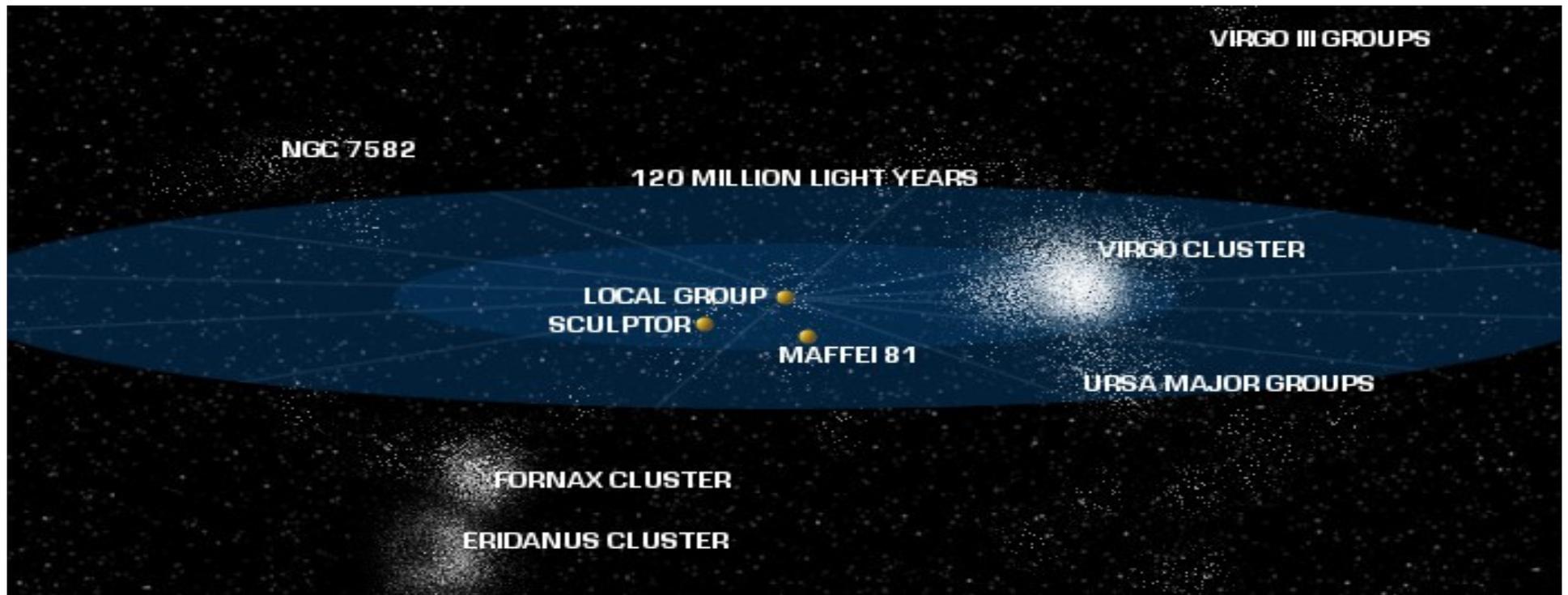


O Grupo Local

Retrato de Grupo para comparar os tamanhos



A Vizinhança do Grupo Local



Os **Grupos Vizinhos** mais pertos são **Sculptor**, a **1.8 Mpc**, e o **Grupo de M81**, a **3.1 Mpc**.

Nosso vizinho maior, o **Aglomerado de galáxias** mais próximo, é o **Aglomerado de Virgo**.

O Aglomerado de Virgo

É um **Aglomerado Rico** e **Irregular**.

O **centro** fica a **16 Mpc** da Terra, e ele tem um **diâmetro** de **~3 Mpc**.

=> $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ no céu

Virgo consiste de

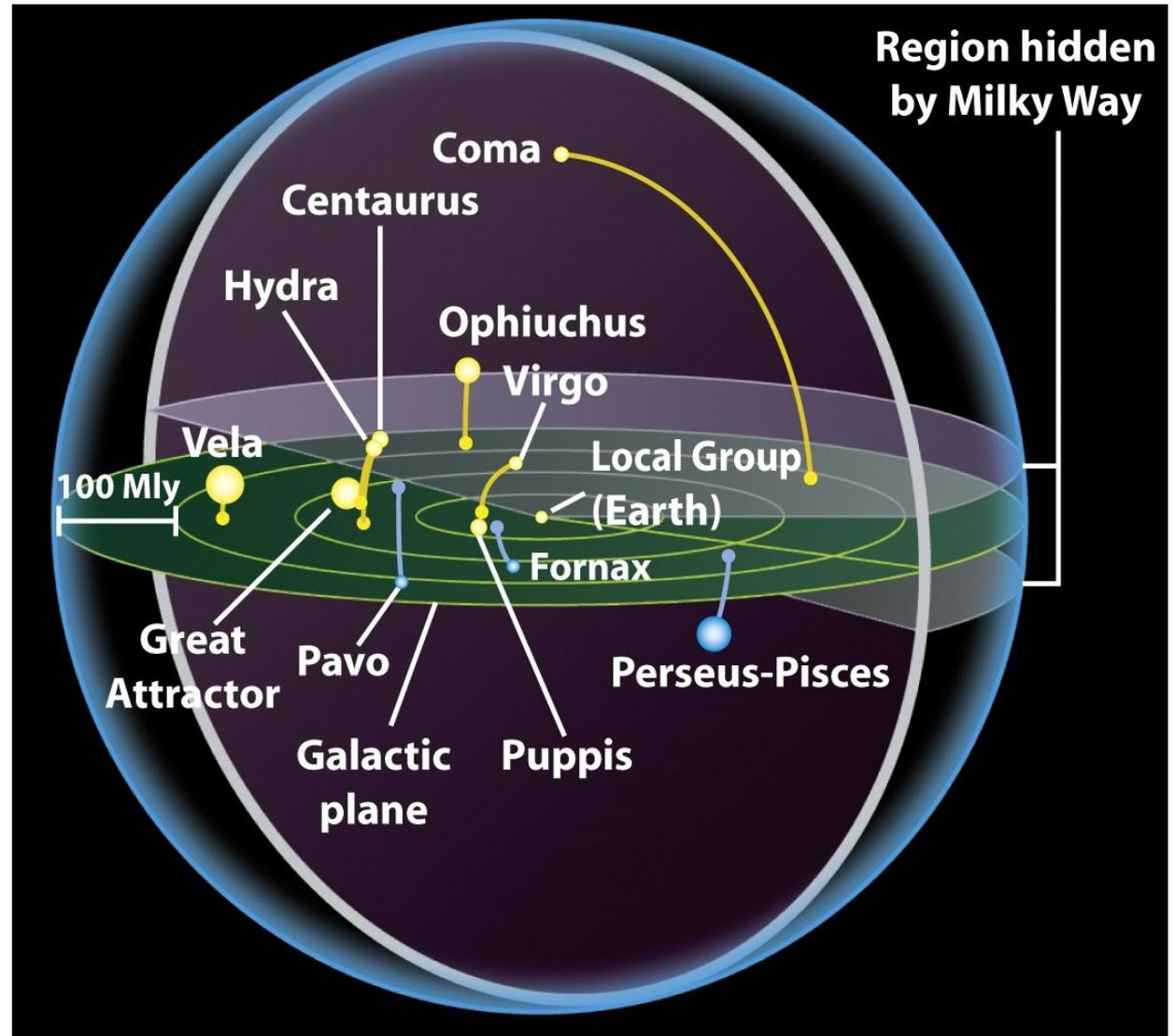
- **250 galáxias grandes**, entre eles três **elípticas gigantes** perto do **centro**, cada uma do **tamanho** do **Grupo Local** (uma delas é M87), e
- **>2000 pequenas galáxias**.



A Vizinhança do Aglomerado de Virgo

Os **Aglomerados** da vizinhança, todos **Irregulares** se agrupam em torno de um plano, ou filamento, centrado no Aglomerado de Virgo, agrupamento chamado **Superaglomerado de Virgo**.

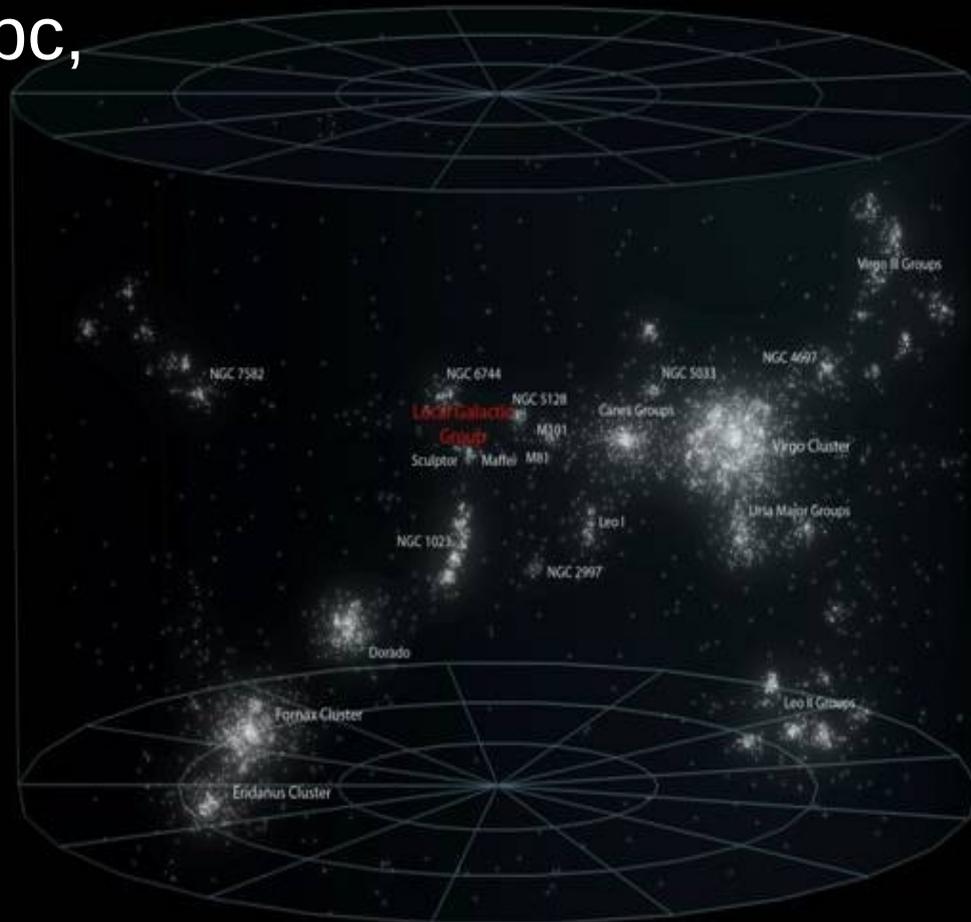
O **Aglomerado Regular** mais próximo é **Coma**, a **90 Mpc** daqui.



O Superaglomerado de Virgo

Superaglomerado de Virgo

diam. 40 Mpc,
 $\sim 10^{15} M_{\odot}$



A atração do Superaglomerado de Virgo se manifesta como redução da sua velocidade de recessão em relação ao *Hubble Flow* (\Rightarrow já)

O Grande Atrator

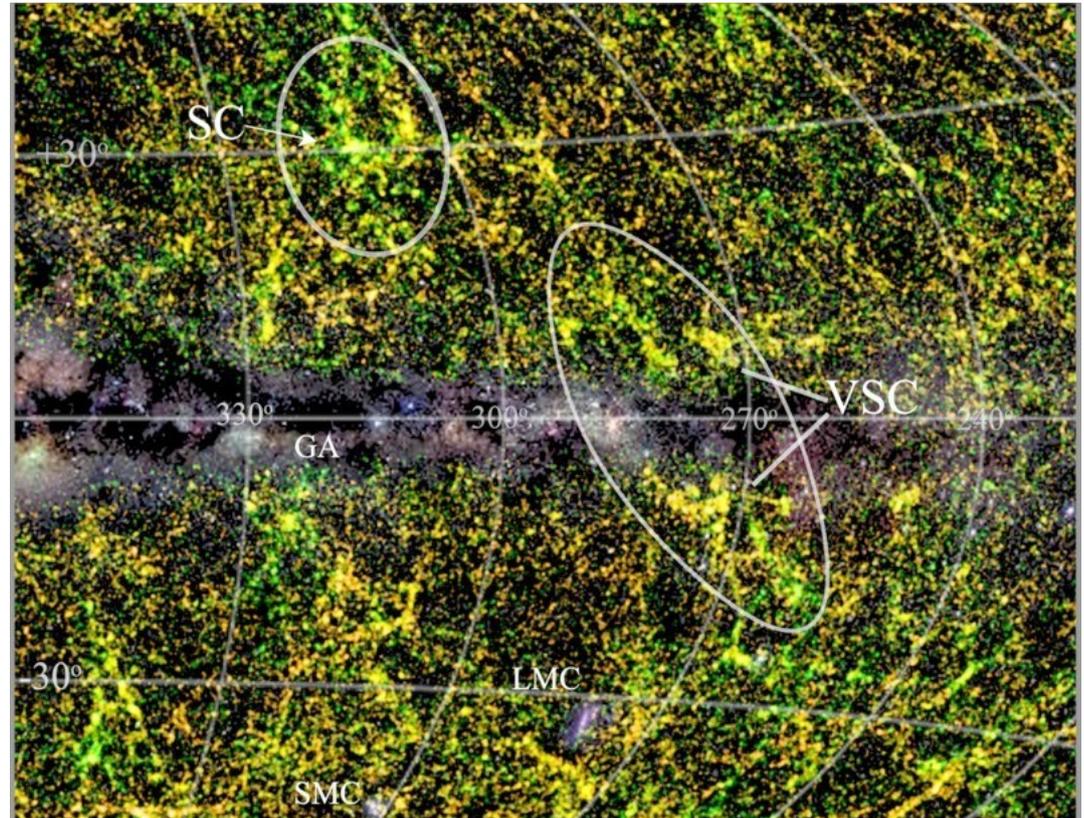
O Superaglomerado de Virgo como um todo está sendo atraído por uma **massa maior** ainda, **movimentando-se** na **direção** desta com 627 km/s (de novo, em relação ao *Hubble Flow*).

Segundo cálculos, esta massa, batizada de **Grande Atrator**, encontra-se a uns 60 Mpc daqui na direção da constelação Centauro e é da ordem de $3 \cdot 10^{16} M_{\odot}$.

Por estar atrás do disco Galáctico, na **Zona Vazia**, é difícil achar este superaglomerado observacionalmente. Uma teoria afirma, que ele pode consistir por boa parte de **Matéria Escura**, dificultando ainda mais a sua observação.

O Grande Atrator

Segunda uma outra teoria, a atração pode ser o **efeito combinado** de **vários superaglomerados** encontrando-se aproximadamente na mesma direção, como o **Superaglomerado de Shapley (SC)** e o de **Vela (VSC)**, descoberto no final de 2016).



A região de céu em torno do Grande Atrator (GA), Thomas Jarrett (2016):

As galáxias em verde encontram-se a < 500 mi. ly da Via Láctea, as em amarelo, entre 500 e 1000 mi. ly, e as em laranja, a > 1000 mi. ly.

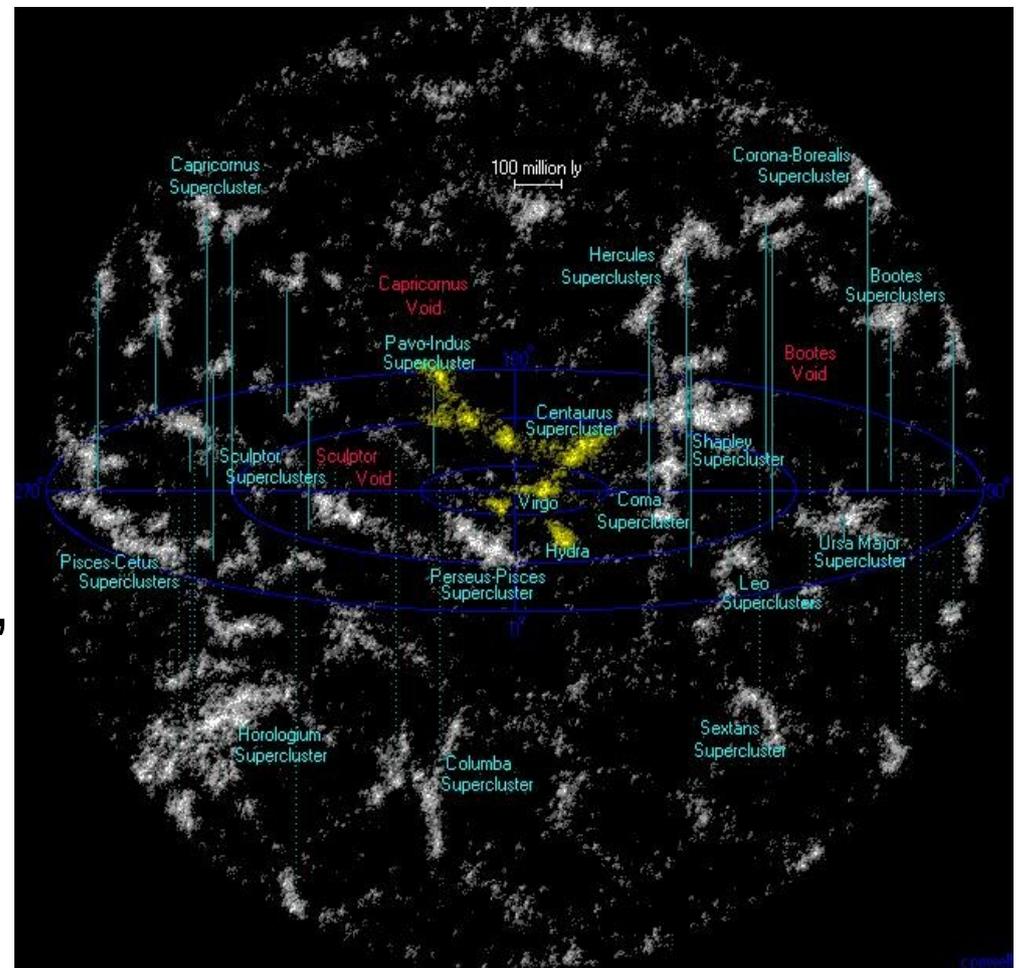
O Superaglomerado Local ou Laniakea

O **superaglomerado** com o **Grande Atrator** no **centro** é chamado **Superaglomerado de Laniakea** (às vezes Lenakaeia) ou **Superaglomerado Local** (em amarelo).

Foi definido em **2014** devido a uma maneira nova de definir superaglomerados.

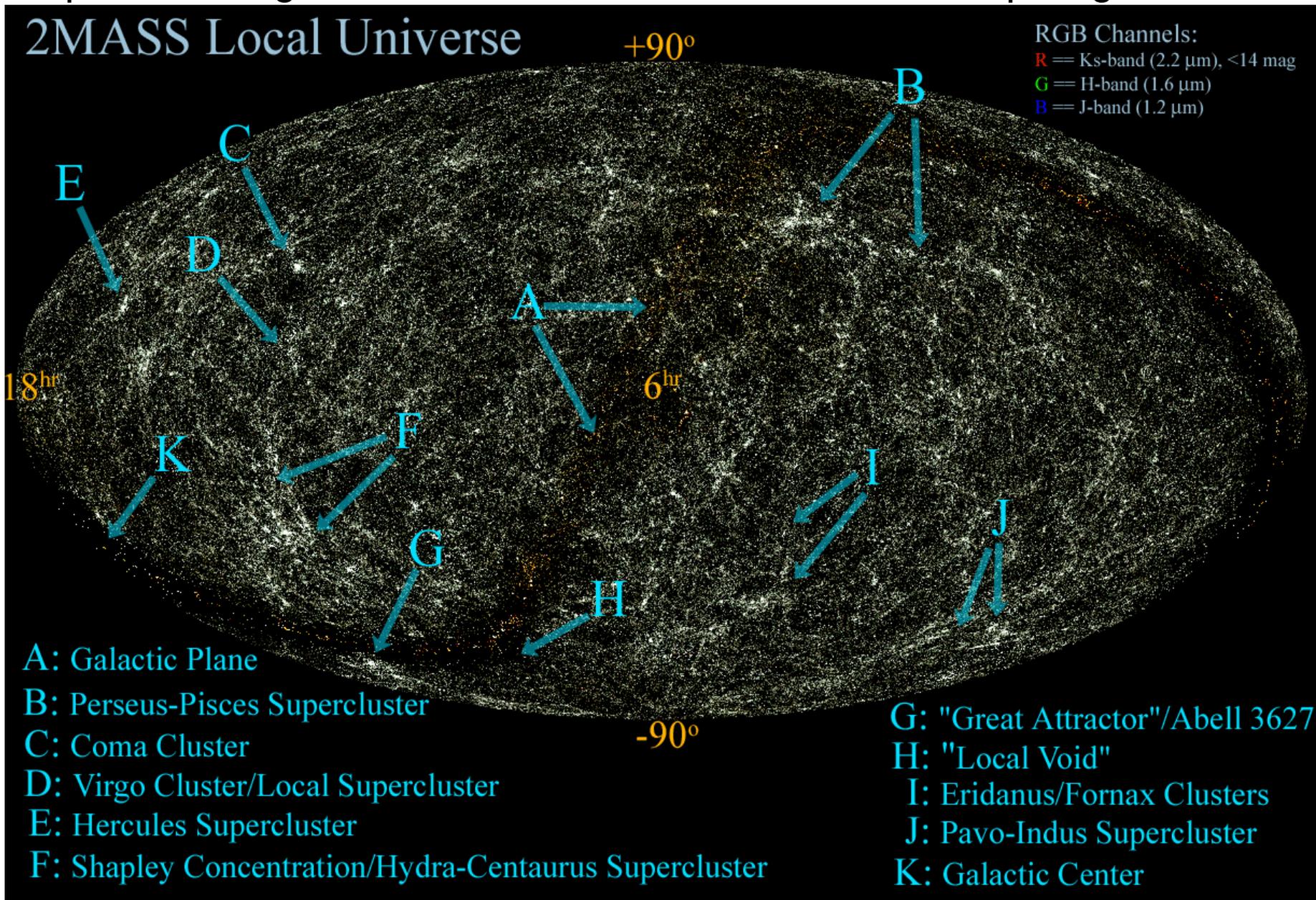
O **diâmetro** dele deve ser da ordem de **160 Mpc** e a **massa**, $\sim 1 \cdot 10^{17} M_{\odot}$.

O **Superaglomerado de Virgo**, antigamente definido como o Superaglomerado Local, representa apenas um **apêndice** de Laniakea.



Superaglomerados de Galáxias

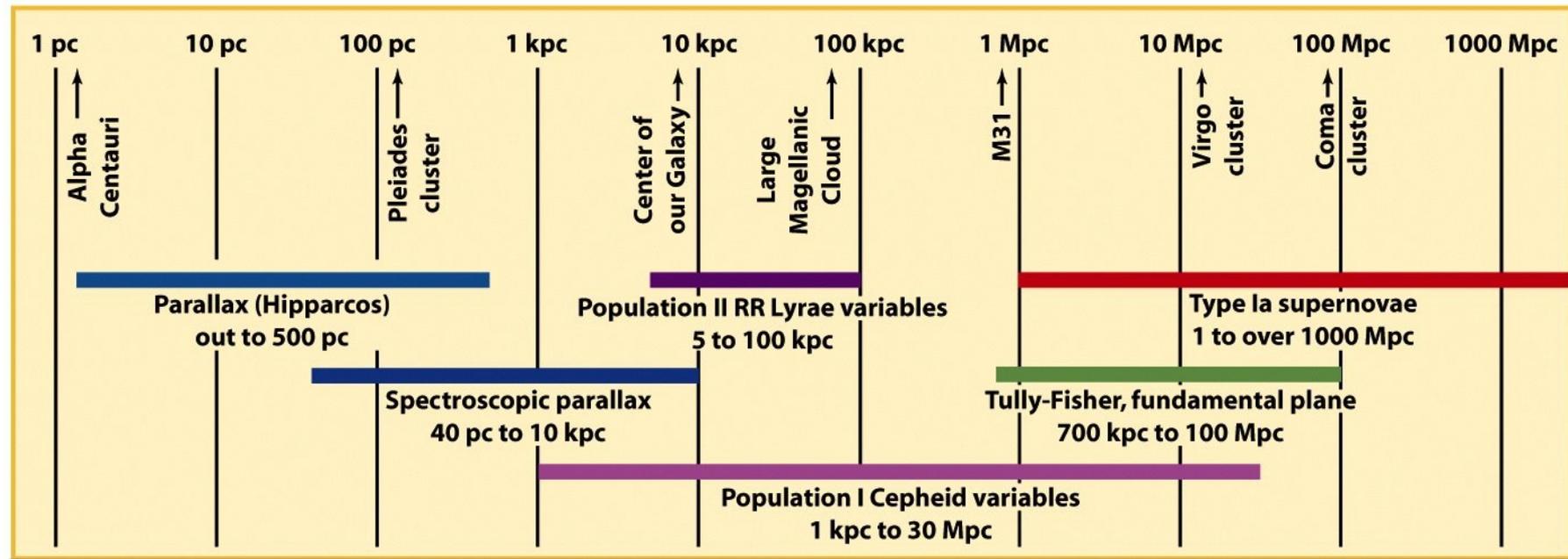
Mapeando as galáxias no céu, se vê vários outros Superaglomerados.



A Expansão do Universo

O *Redshift* cosmológico

E como se **mede** as **distâncias** até aquelas **galáxias** fora do **Grupo Local**? Maioria deles são tão **longes**, que os métodos que conhecemos até agora (paralaxe, ajuste da Sequência Principal, Velas Padrão como Cefeidas, etc.) não funcionam, por que não dá pra observar paralaxes, estrelas individuais, Cefeidas, etc.



Alguns métodos de medição de distâncias

A Expansão do Universo

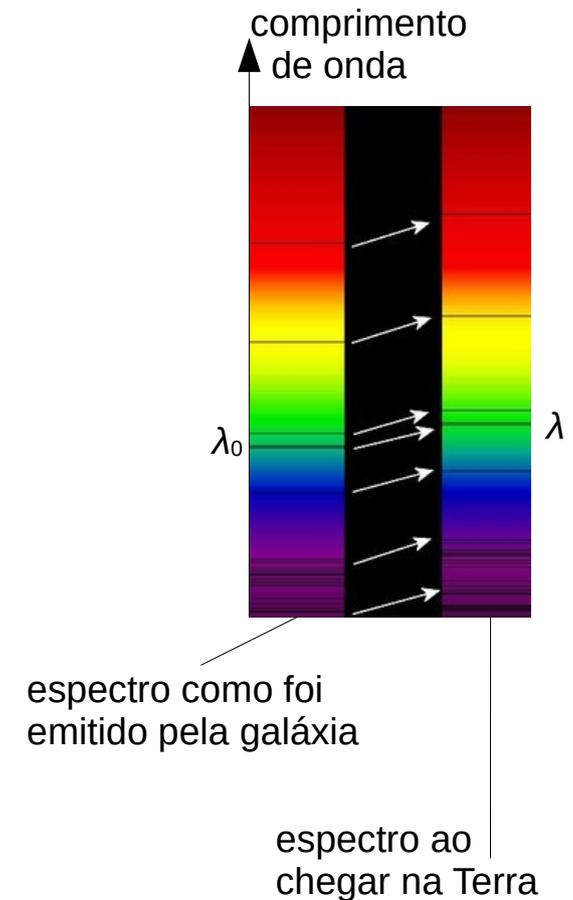
O *Redshift* cosmológico

Em 1914, V. M. **Slipher** descobriu, que os **espectros** da maioria das **galáxias** são **deslocados** para **comprimentos de onda maiores** que os de repouso.

Eles sofrem um ***redshift*** (“deslocamento para o vermelho”).

Interpretando este *redshift* como um **efeito Doppler**, isto significaria, que estas galáxias estariam se **afastando** de nós.

Uma exceção notável é a galáxia de Andrômeda, cujo espectro sofre um *blueshift*, e que está se aproximando.



A Expansão do Universo

O *Redshift* cosmológico

Na verdade, **não** é exatamente um **efeito Doppler**. É a **expansão do Universo** (=> aulas Cosmologia), que “**estica**” os **comprimentos de onda** da luz que o permea.

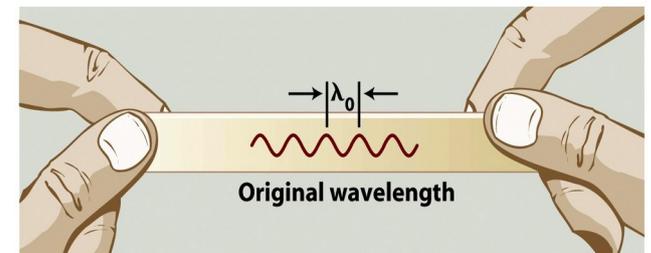
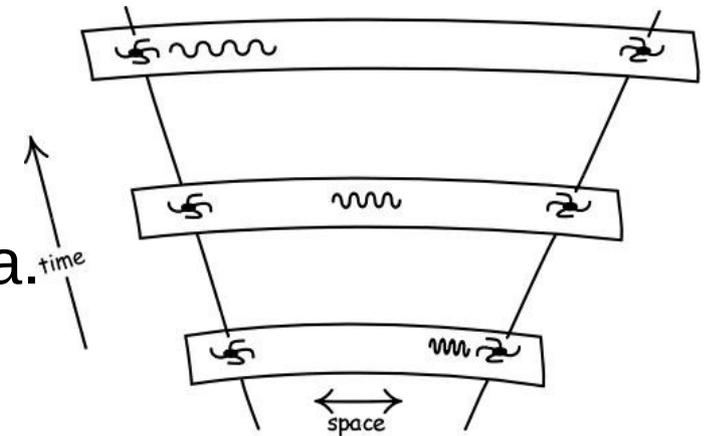
Os comprimentos de onda são esticados por um fator $1+z$, onde z é chamado de **redshift (cosmológico)**:

$$\lambda = (1+z) \cdot \lambda_0$$

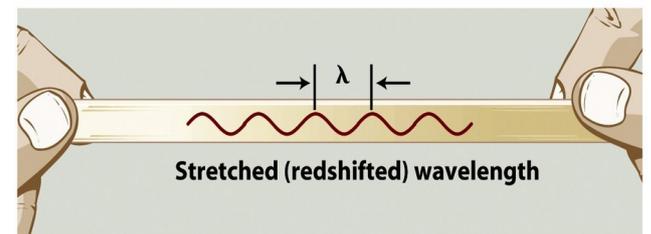
Para z pequenos ($\ll 1$), uma galáxia com redshift z está se **afastando** com velocidade

$$v = c \cdot z$$

! As próprias **galáxias não** estão **expandindo**. Elas são **gravitacionalmente ligadas**. É o **espaço entre as galáxias** que está **expandindo**.



(a) A wave drawn on a rubber band ...



(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.

A Expansão do Universo

Lei de Hubble-leMaître (1929, até 2018 Lei de Hubble):

Edwin Hubble (e independentemente, Georges leMaître em 1927) descobriu, que estas **velocidades** de **recessão** das **galáxias** distantes são **proporcionais** às **distâncias** até elas (medidas usando cefeidas):

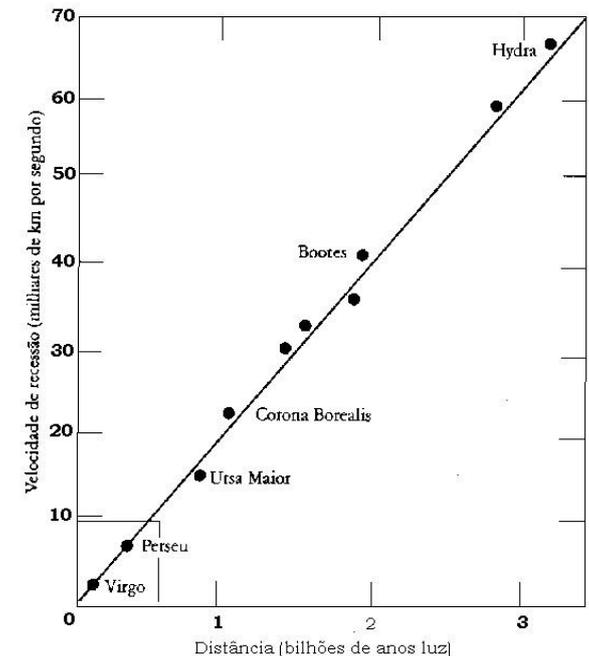
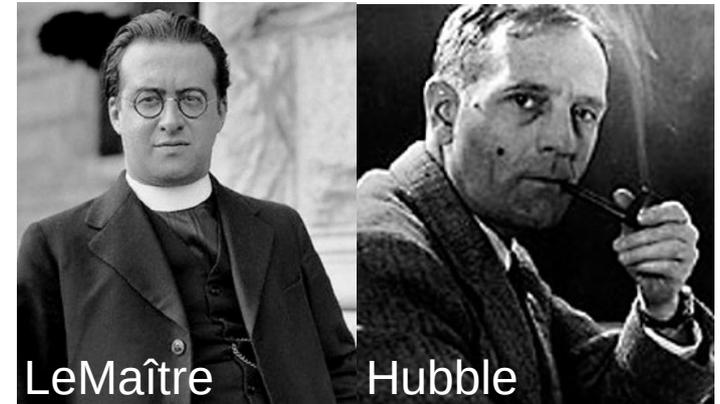
$$v = H_0 \cdot d$$

H_0 : **constante de Hubble**, medida para a **taxa da expansão** (inclinação da reta no gráfico).

O valor da constante de Hubble foi um assunto controverso por décadas, mas hoje as opiniões convergiram para um valor de $\sim 70 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$.

Adotemos $67.7 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$

Diagrama de Hubble: velocidade vs. distância.



A Expansão do Universo

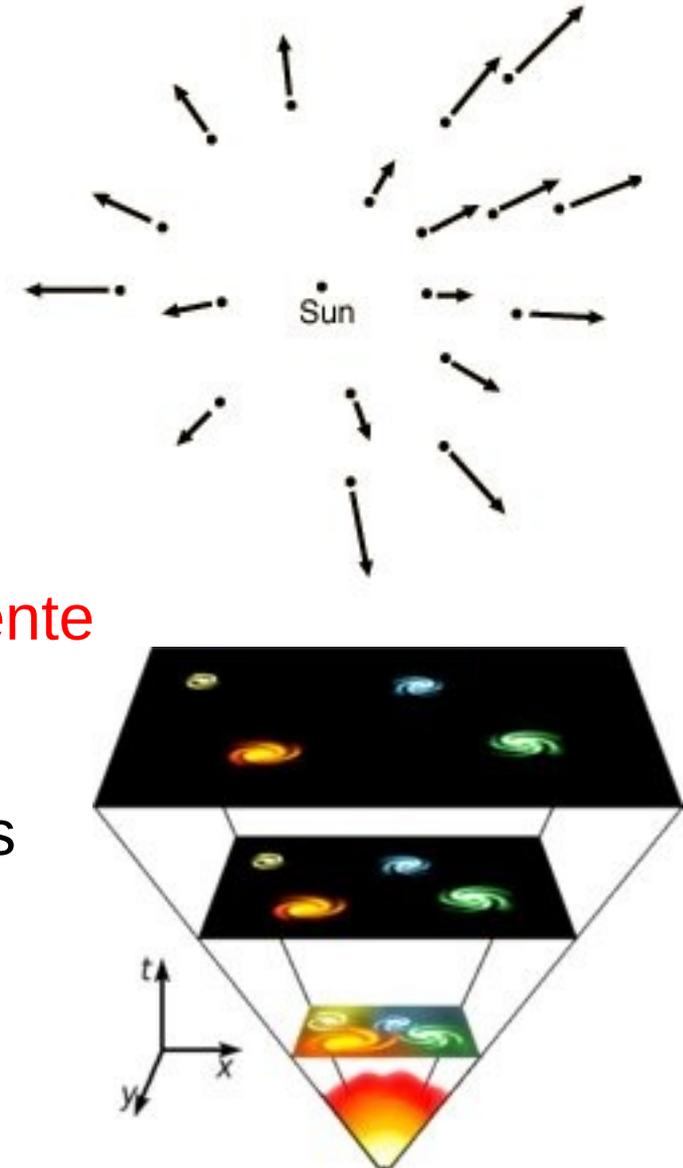
Lei de Hubble-leMaître (1929):

Se as velocidades de recessão das galáxias são proporcionais às suas distâncias até nós, então estamos no **centro** da **expansão**?

Afinal, a Terra é o **centro** do **Universo**?

Não, num Universo **expandindo uniformemente** (homogenea- e isotropicamente), **qualquer ponto** “vê” os outros pontos se afastando com velocidades proporcionais às suas distâncias.

=> **Qualquer ponto** se “sente” o **centro** do **Universo**.



A Expansão do Universo

Lei de Hubble-leMaître (1929):

Além de comprovar a expansão do Universo, a Lei de Hubble-leMaître nós fornece um **método para medir a distância** até uma galáxia:

medir z através de uma linha espectral conhecida:

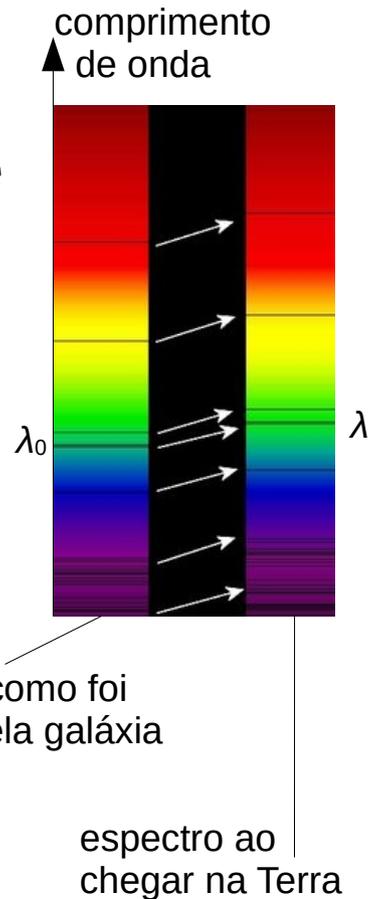
$$z = \lambda/\lambda_0 - 1$$

=> **Distância** $d = v/H_0 = c \cdot z/H_0$ válido para $z \leq 0.13$

até um *redshift* de 2, a fórmula

$$d \approx c/H_0 \cdot [(z+1)^2-1]/[(z+1)^2+1]$$

é uma boa aproximação.



A Expansão do Universo

O *Redshift* cosmológico

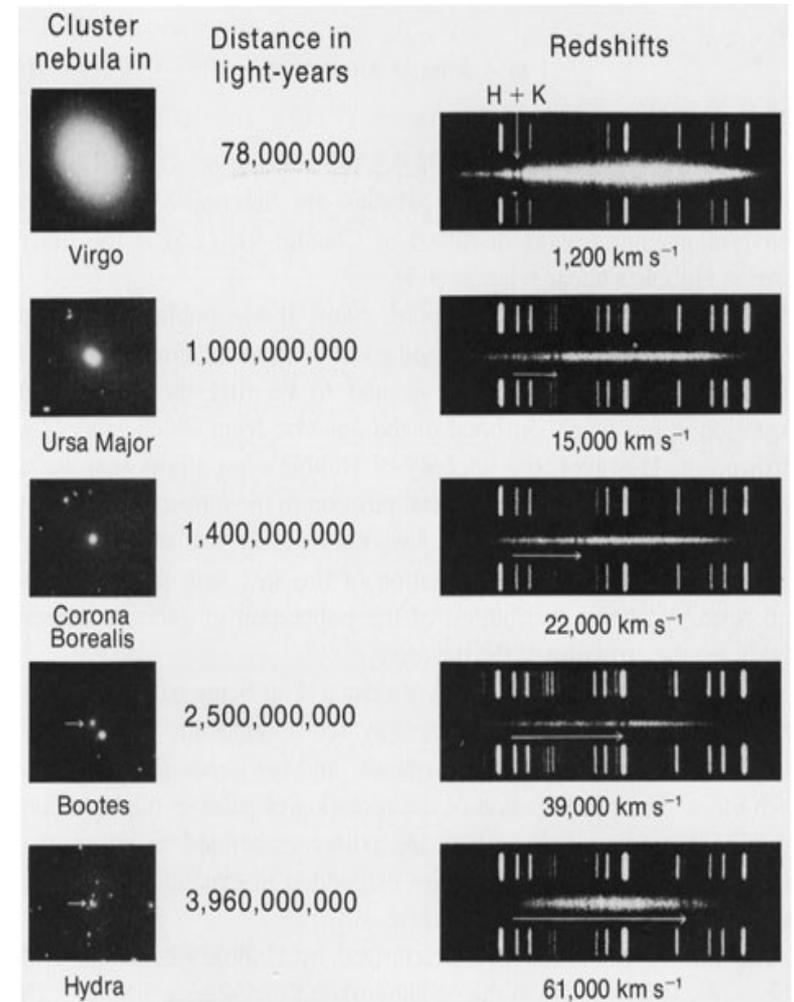
Como a luz de galáxias distantes leva **tempo** para chegar em nós, vemos os objetos com **redshifts altos** como eles eram no **passado**, quando a **idade do Universo** era **menor**, e o tamanho, menor por um fator $(1+z)^{-1}$ em uma dimensão.

=> O **redshift** é uma medida para o **tamanho** e a **idade do Universo** $t(z)$ na **época** da **emissão** da luz.

Quanto **maior** o **redshift**, tanto **menor** o **tamanho** e a **idade do Universo**.

O tempo hoje, em redshift 0, é t_0 ,

O **lookback time** de z é o tempo decorrido desde **redshift** z : $t_L = t_0 - t(z)$



A Expansão do Universo

Alguns Termos

Este movimento de expansão é chamado de *Hubble Flow*, “Corrente de Hubble”(?).

O movimento de uma galáxia *relativo* ao *Hubble Flow* é seu *movimento peculiar*.

O *redshift* de um objeto extragaláctico que se *mede* é composto do *redshift cosmológico* devido à *expansão* do *Universo* e um *efeito Doppler* tradicional devido ao *movimento peculiar*.

Já que as distâncias no Universo escalam com $(1+z)^{-1}$, os *volumes* são proporcionais a $(1+z)^{-3}$, e áreas de superfícies, a $(1+z)^{-2}$.

Quando se estuda um volume que expande junto com o *Hubble Flow*, se fala de *volume comovente*.

Analogicamente, densidades por volumes comoventes são *densidades comoventes*.

A Expansão do Universo

A Correção K

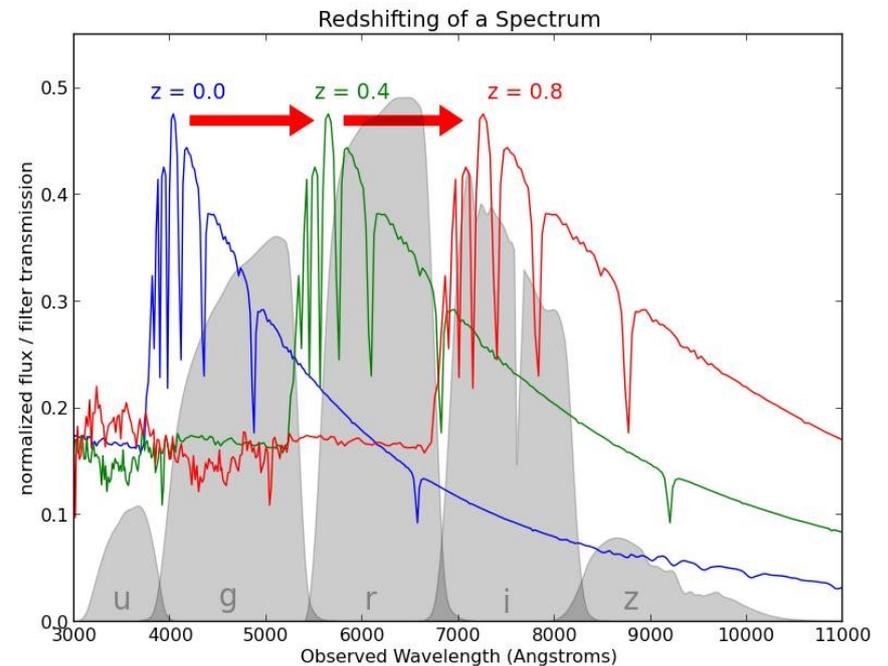
Quando se faz **observações fotométricas** de uma galáxia distante, o **redshift** coloca uma **parte diferente do espectro** da galáxia, de **comprimento de onda menor**, numa dada **banda X**, do que se a galáxia fosse observada com **redshift zero**.

Temos que aplicar uma **correção** chamada **correção K**:

$$M_X = m_X - (m - M) - K_X$$

onde m_X e M_X são as **magnitudes aparente** e **absoluta** na banda X, e $(m - M)$ é o **módulo de distância** (de luminosidade) (=> aula 3).

! Alguns definem a correção K com o sinal oposto.



O espectro de uma galáxia modelo em três **redshifts** diferentes. Sobreposto: as funções de transmissão de 5 bandas do sistema fotométrico do SDSS

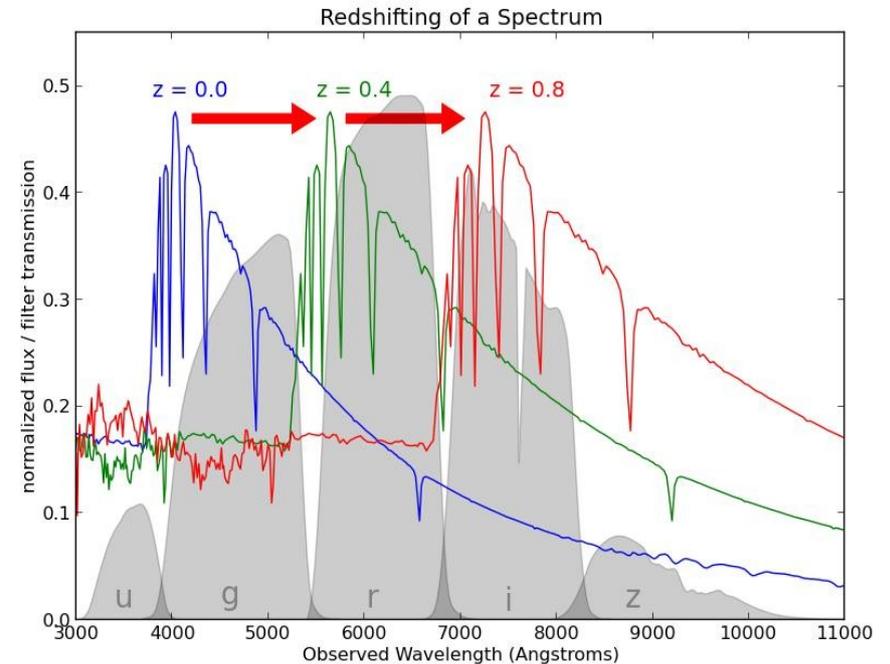
A Expansão do Universo

A Correção K

A correção K depende do *redshift* e da *banda X*, mas também do *espectro* da galáxia.

=> Algum *conhecimento* sobre o objeto observado é *necessário* para estimar a correção K.

Uma saída é observar usando um *filtro* que corresponde à *faixa* *espectral* de *interesse redshiftado*.



O espectro de uma galáxia modelo em três *redshifts* diferentes. Sobreposto: as funções de transmissão de 5 bandas do sistema fotométrico do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS)

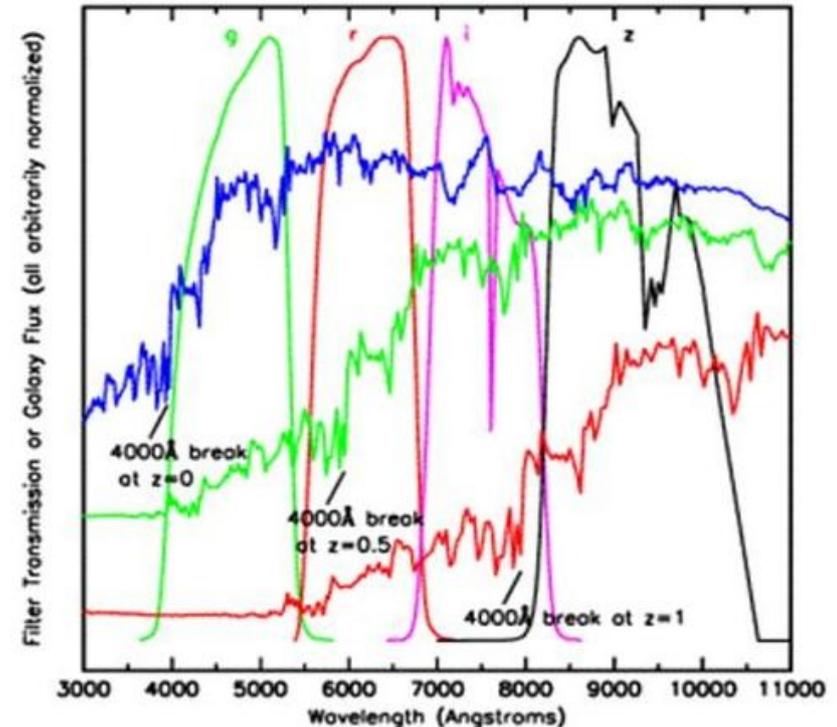
A Expansão do Universo

A Correção K

! A distância $d_L = 10^{(m-M+5)/5}$ pc é chamada **distância de luminosidade**. Ela difere da **distância própria** $d_{p,0}$ por um fator $(1+z)$: $d_L = (1+z) \cdot d_{p,0}$, por que no caminho pra Terra, o fluxo cai, além do fator geométrico $4\pi d_{p,0}^2$ por mais um fator $(1+z)^{-2}$:

$$F = L/4\pi d_L^2 = L/4\pi((1+z) \cdot d_{p,0})^2 \\ = (1+z)^{-2} \cdot F_0,$$

onde F_0 é o fluxo que chegaria na Terra após percorrer a distância própria, se a luz não sofresse o deslocamento em comprimento de onda.



O espectro de uma galáxia modelo em três *redshifts* diferentes. Sobreposto: as funções de transmissão de 4 bandas do sistema fotométrico do SDSS

A Expansão do Universo

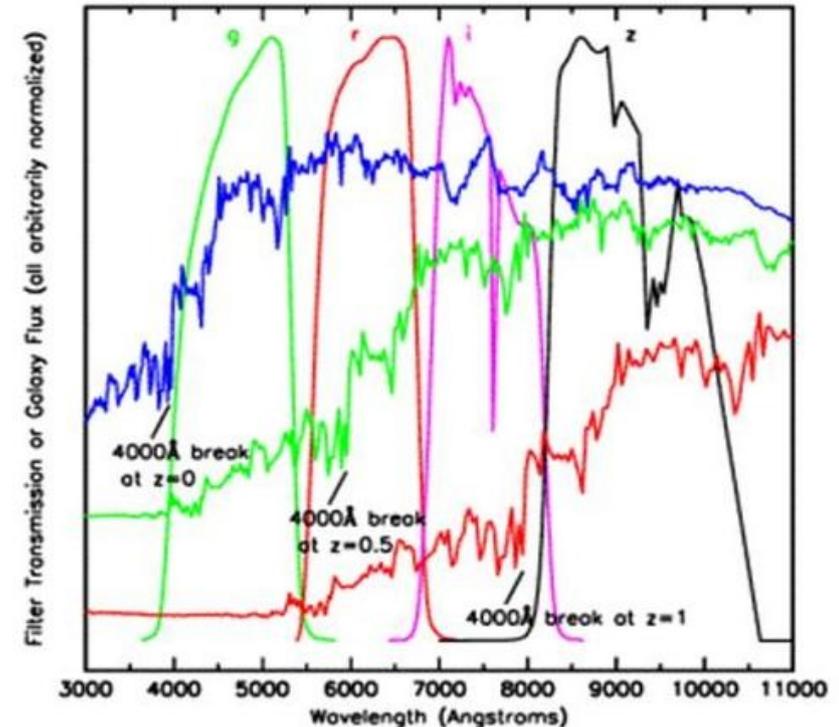
A Correção K

- Um fator $(1+z)^{-1}$ vem da **redução** de **energia** por **fóton** por causa do aumento do seu comprimento de onda, já que $E = h \cdot c / \lambda$.

- O outro vem do fato, que o **número** de fótons chegando por **unidade** de **tempo** também é **reduzido** por $(1+z)^{-1}$. O espaço entre os fótons é esticado também.

Em consequência, também vemos os **acontecimentos** na galáxia distante

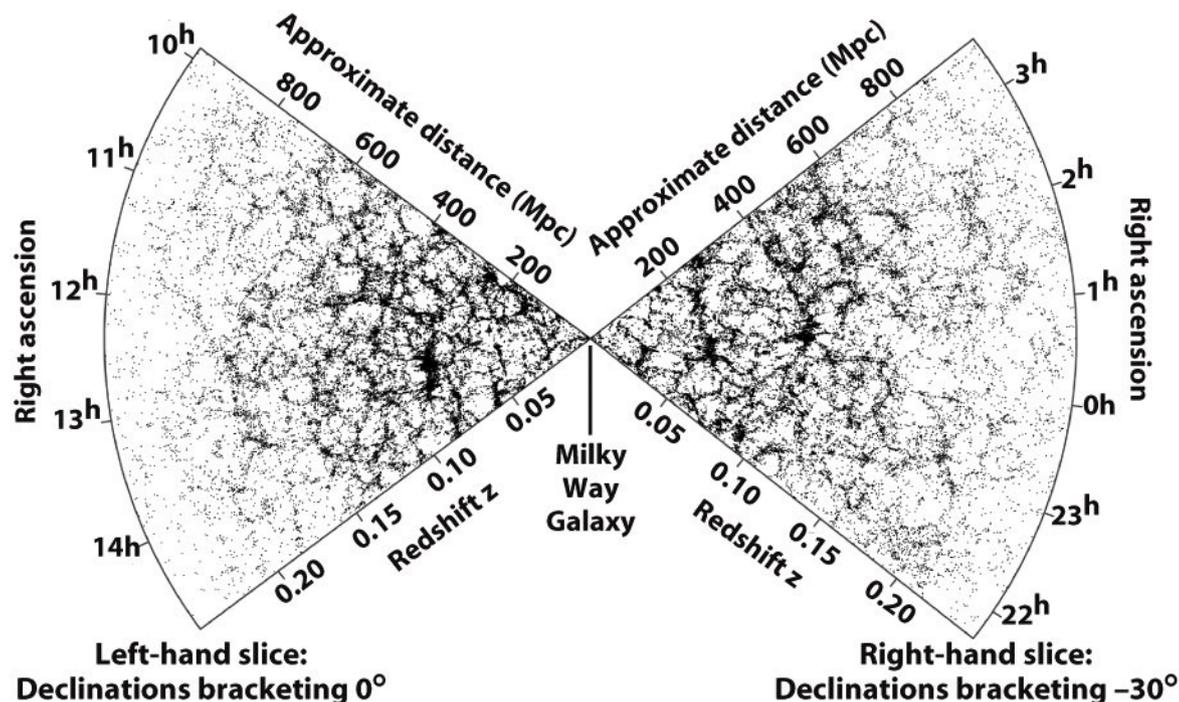
decorrerem **mais lentamente**, por um fator $(1+z)^{-1}$: $\Delta t_o / \Delta t_e = 1+z$, onde Δt_o é a duração de um evento lá, e Δt_e a duração observada na Terra => **dilatação cosmológica do tempo**.



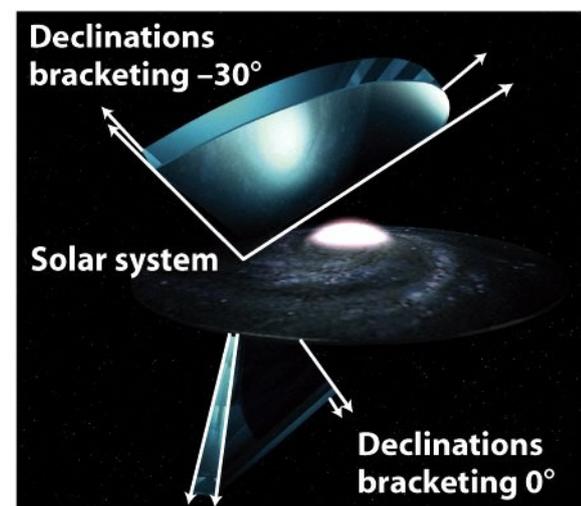
O espectro de uma galáxia modelo em três *redshifts* diferentes. Sobreposto: as funções de transmissão de 4 bandas do sistema fotométrico do SDSS

Galáxias

Amostras de *Redshifts*



(a) The 2dF galaxy survey



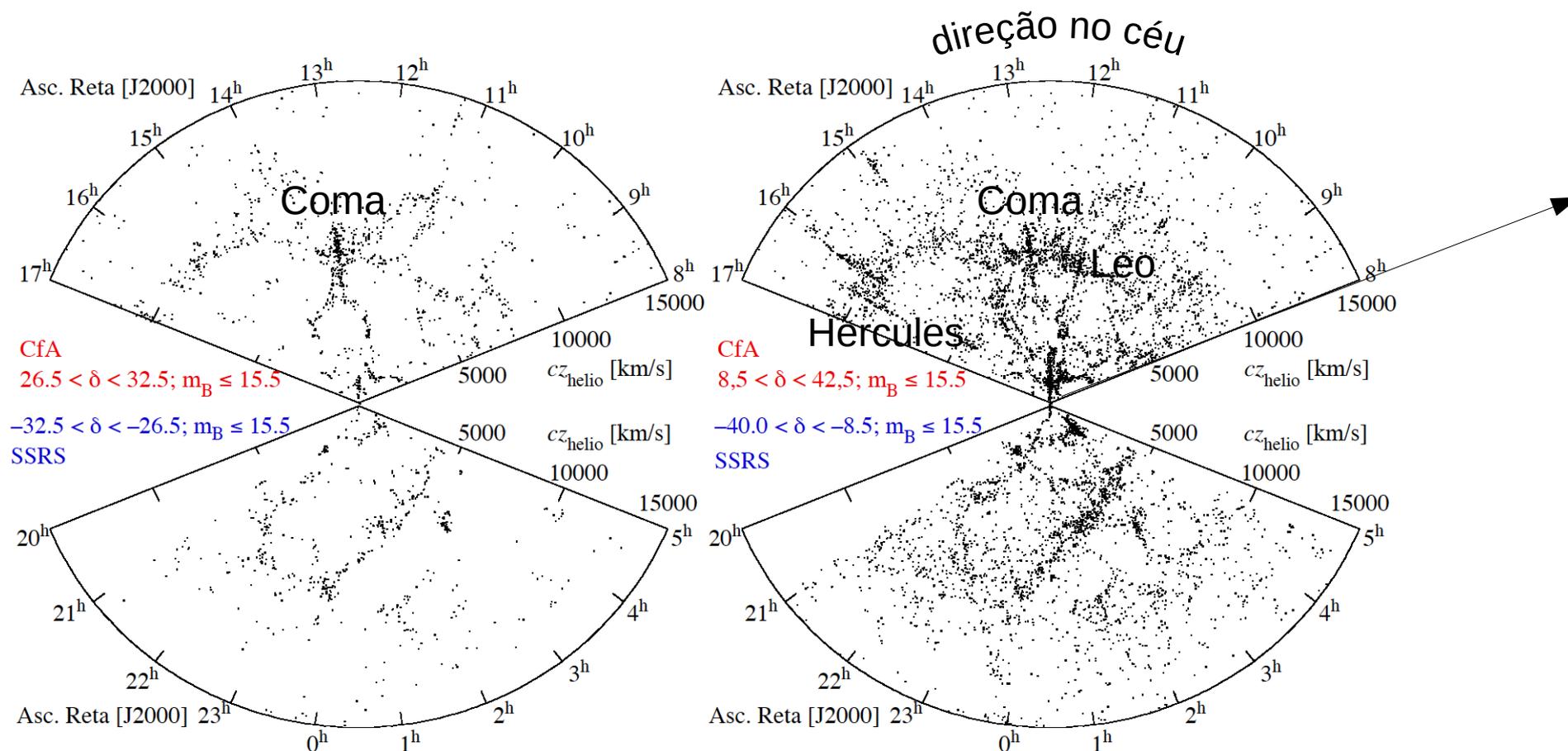
(b) Fields of view in the 2dF survey

Medindo os *redshifts* de galáxias numa “fatia” do espaço, e usando o *redshift* como coordenada radial, obtemos uma amostra de *redshifts*. Como o *redshift* é proporcional à distância, a amostra reflete a distribuição espacial das galáxias na fatia.

Galáxias

Amostras de *Redshifts*

Nas amostras de *redshifts*, também se vê os **aglomerados** de galáxias, ...



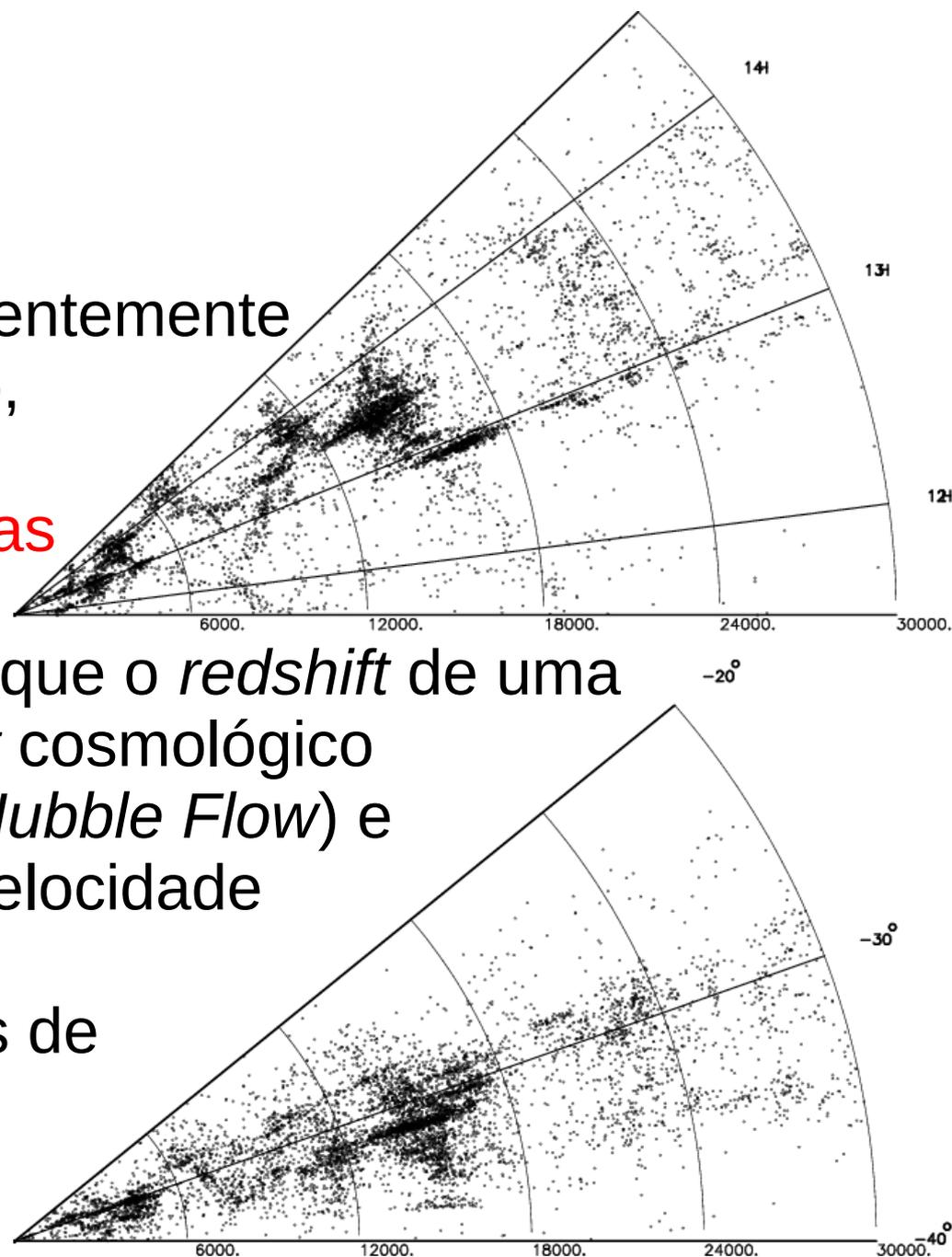
Cfa (Center for Astrophysics) Survey, 1985, duas “fatinhas” vizinhas

Galáxias

Amostras de *Redshifts*

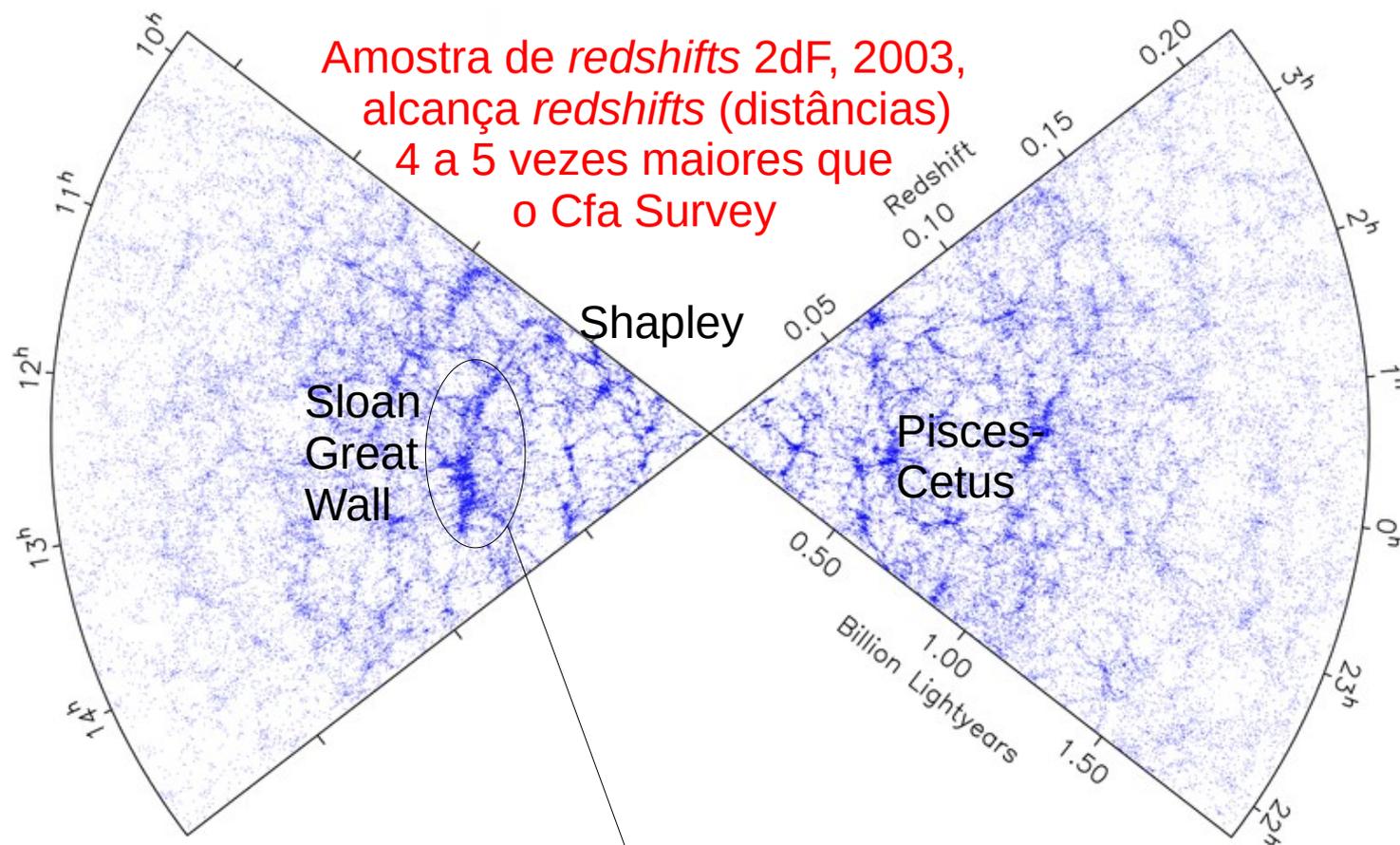
As estruturas alongadas aparentemente apontando na “nossa” direção, chamadas **Dedos de Deus**, refletem as **variações aleatórias** na **velocidade peculiar** das galáxias nos aglomerados, já que o *redshift* de uma galáxia se compõe do *redshift* cosmológico (devido à posição dentro do *Hubble Flow*) e um efeito Doppler (devido à velocidade peculiar).

Logicamente, os aglomerados de galáxias **não** são alongados na nossa direção.



Galáxias

Amostras de *Redshifts*



..., e os **super-aglomerados**.

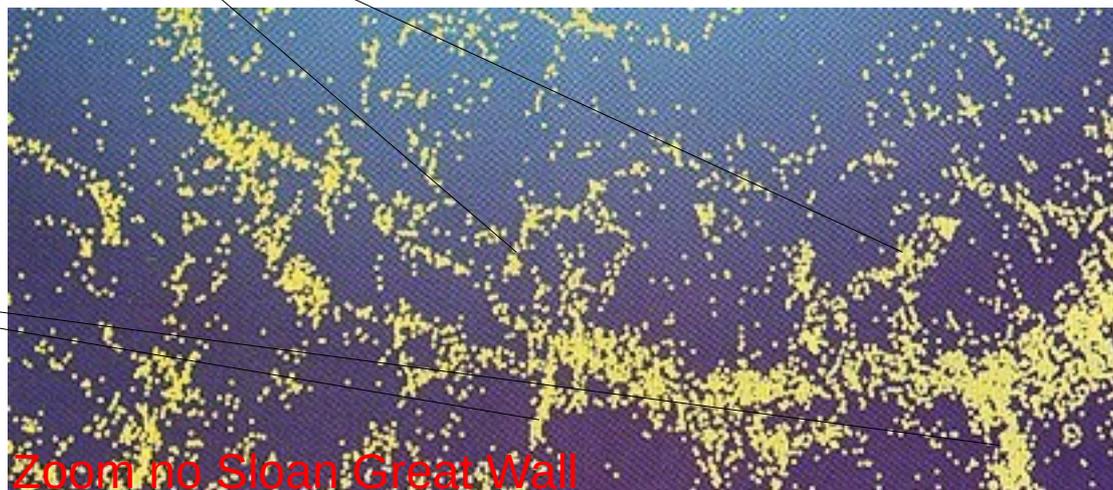
Galáxias

Amostras de *Redshifts*

No nível **Superaglomerados** acontece um fenômeno contrário aos Dedos de Deus, o **efeito Kaiser**. Eles aparecem mais comprimidos do que eles são (“Panquecas de Deus”) por causa das **velocidades peculiares sistemáticas**:

O Superaglomerado puxa as galáxias do nosso lado para longe de nós
=> velocidade peculiar “recuando”
=> *redshift* Doppler coloca os aglomerados mais perto do centro de massa do Superaglomerado

Do outro lado:
blueshift de Doppler também coloca os Aglomerados mais perto do centro do Superaglomerado



O Efeito Kaiser é de amplitude menor que os Dedos de Deus.

Galáxias

Não se encontra estruturas maiores que 100 Mpc no Universo.

Aparentemente, o Universo é homogêneo em escalas maiores que 100 Mpc. (=> aulas Cosmologia)



Universidade Federal do ABC

Noções de Astronomia e Cosmologia

FIM PRA HOJE

