

Astrofísica Moderna

Aglomerados de Galáxias e Estruturas de Larga Escala do Universo

Prof. Aion Viana e Prof. Vitor de Souza

Referencias principais da aula:

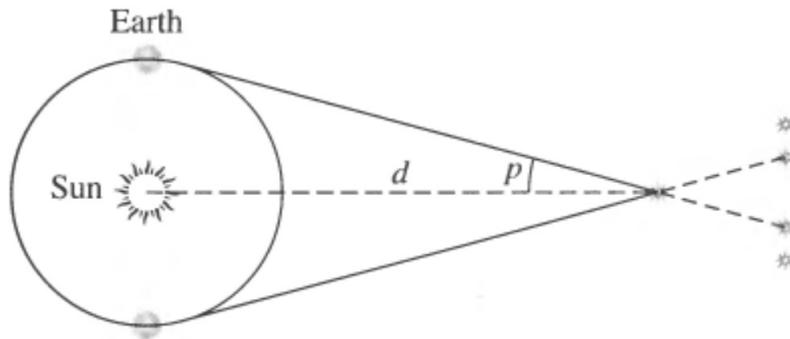
“An introduction to modern astrophysics”, B.W.Carroll and D.A. Ostlie

“Fundamentos de Astronomia”, notas de aula da Prof. Elisabete Gouveia dal Pino IAG/USP

Escalas de distâncias cósmicas - Galáctica

Paralaxe estelar (heliocêntrica):

p = ângulo de paralaxe



para $p \ll 1$ rad

$$d = \frac{1\text{UA}}{\tan p} \simeq \frac{1\text{UA}}{p} \quad \left\{ \begin{array}{l} 1\text{UA} = 1.496 \times 10^8 \text{ km} \end{array} \right.$$

$$d = \frac{1}{p''} \text{ pc}$$

p'' = ângulo em arco-segundos

Distâncias típicas: 1 UA - 400 pc

Distância máxima medida: Hubble telescope WFC3

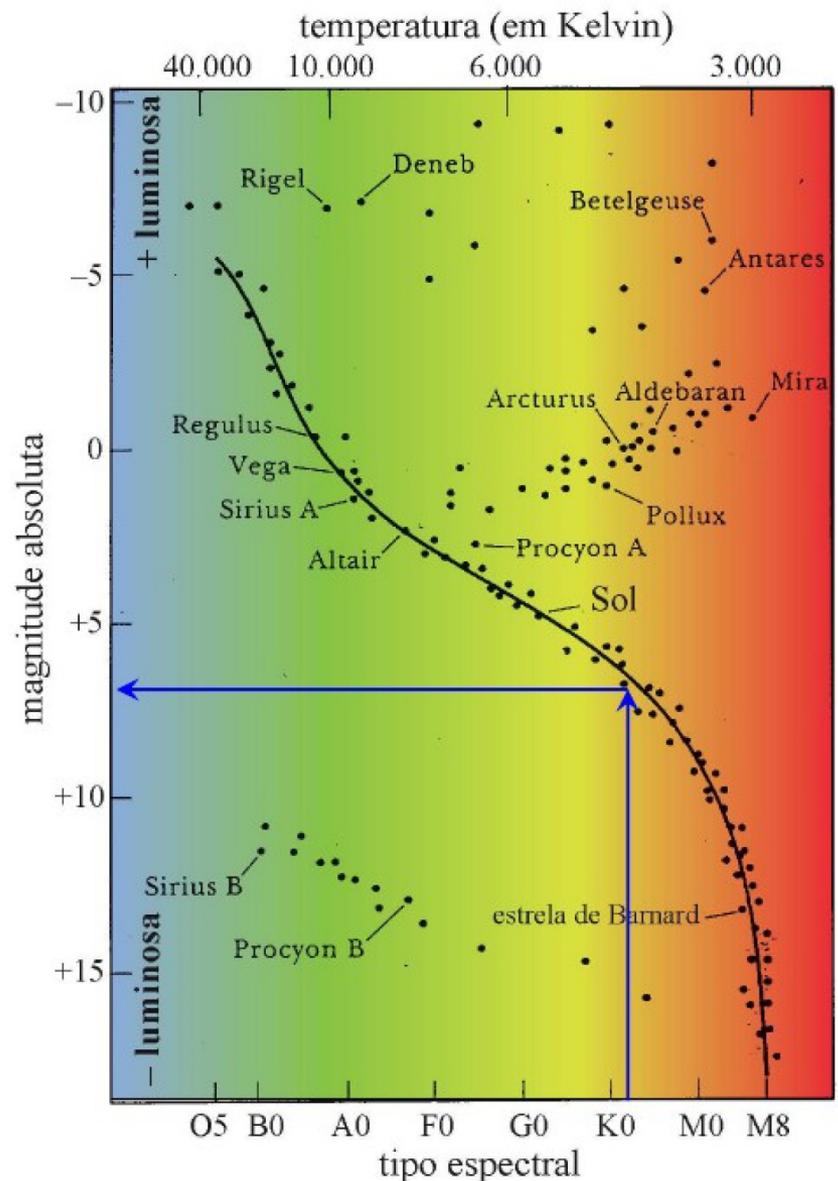
($p'' \sim 20$ a 40 microarco-segundos) $\Rightarrow d \sim 5000$ pc

Escalas de distâncias cósmicas - Galáctica

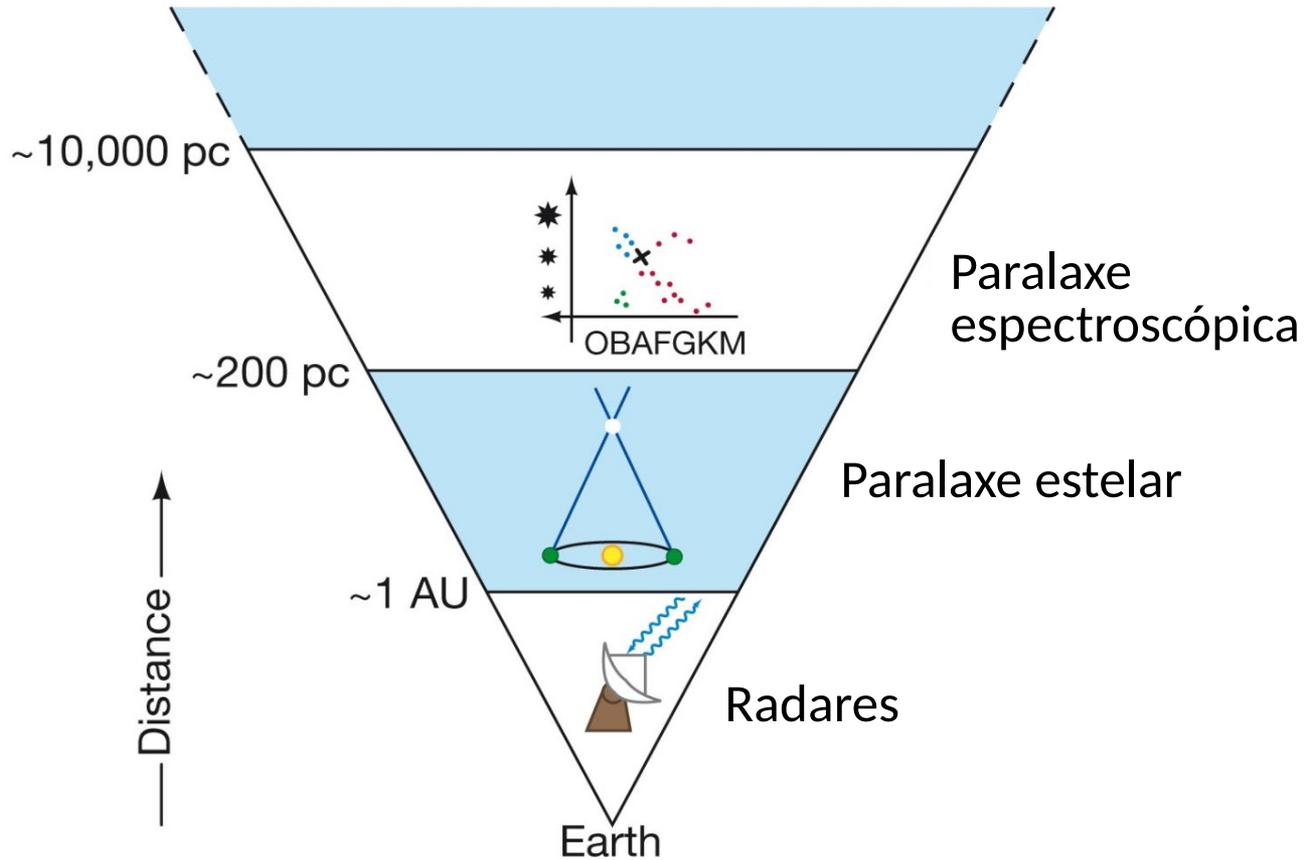
Paralaxe espectroscópica:

- O tipo espectral da estrela observada corresponde a uma magnitude absoluta (luminosidade intrínseca)
- $m - M = 5 \log(d/10\text{pc})$
- Determinamos a distância
- Método sugerido em 1914 por W.D. Adams, W.S.&A. Kohlschütter
- Limites: extinção interestelar, magnitude aparente suficiente para medir espectro

Distâncias máximas: 10 kpc

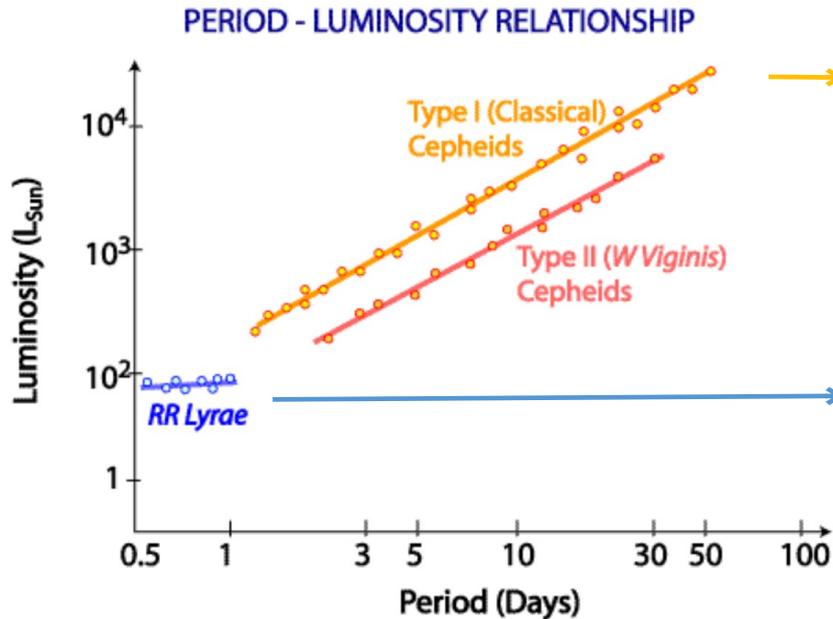


Escalas de distâncias cósmicas-Galáctica



Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Estrelas variáveis:



$$M_{bol} = -3,125 \log P - 1,525$$

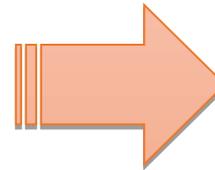
Conhecendo a magnitude absoluta podemos calcular a distância

$$m - M = 5 \log \left(\frac{d}{10} \text{pc} \right)$$

$$M_V = 0,6 \pm 0,3$$

http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable_cepheids.html

Distâncias máximas:
RR Lyrae => 1 Mpc (M31)
Cefeidas => 30 Mpc



Distâncias extragaláticas!

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

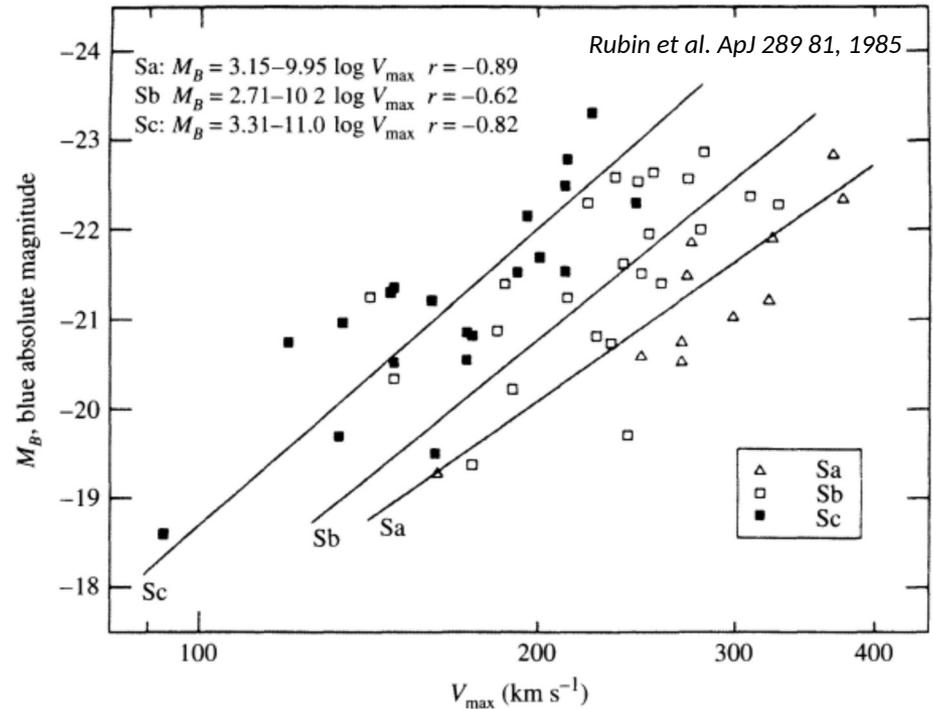
Relação de Tully-Fisher:

Relação entre magnitude absoluta e V_{\max} em **galáxias espirais**

$$M_B = -9.95 \log_{10} V_{\max} + 3.15 \quad (\text{Sa}),$$

$$M_B = -10.2 \log_{10} V_{\max} + 2.71 \quad (\text{Sb}),$$

$$M_B = -11.0 \log_{10} V_{\max} + 3.31 \quad (\text{Sc}).$$



Distâncias máximas: 100 Mpc

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

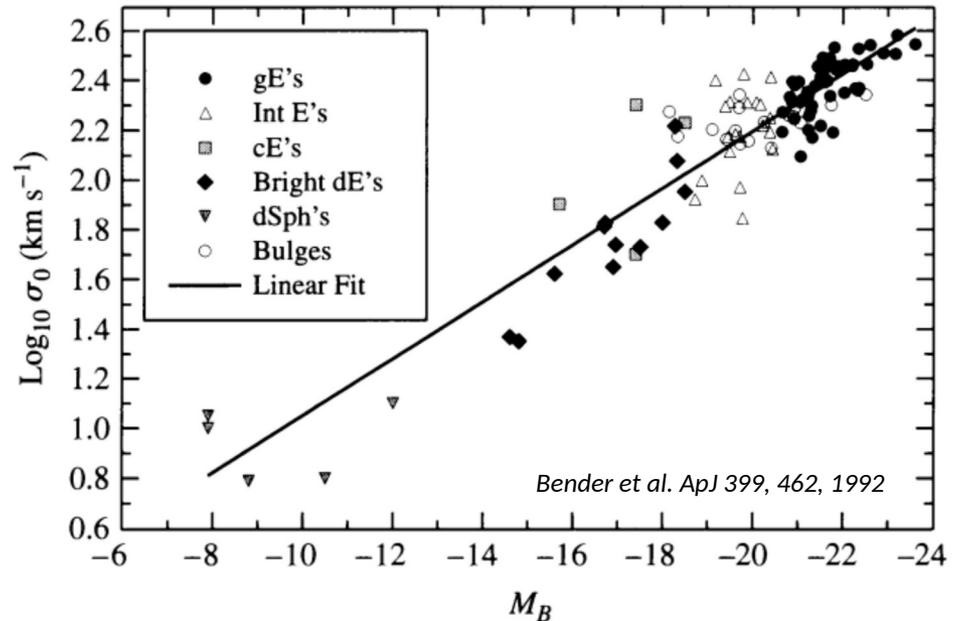
Relação de Faber-Jackson:

Relação entre magnitude absoluta e a dispersão de velocidades centrais σ_0 em **galáxias elípticas**.

$$L \propto \sigma_0^4,$$

$$\log_{10} \sigma_0 = -0.1 M_B + \text{constant.}$$

Distâncias máximas: 100 Mpc



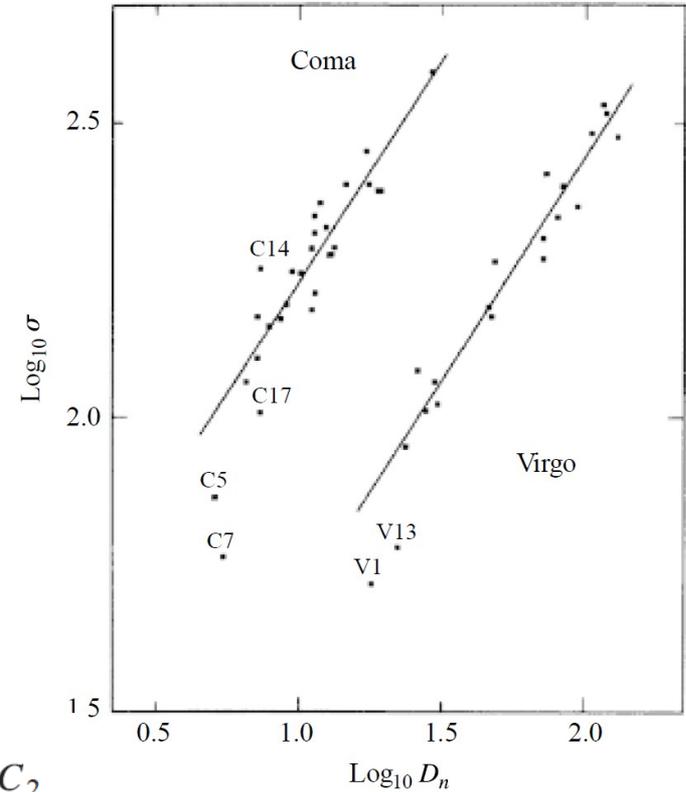
Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Relação de D- σ :

Relação entre diâmetro quando brilho superficial igual a 20.75 B-mag arcseg⁻² e a dispersão de velocidades centrais σ em **galáxias elípticas**.

$$\log_{10} D = 1.333 \log \sigma + C,$$

D proporcional a 1/d: $\frac{d_2}{d_1} = \frac{D_1}{D_2} = 10^{C_1 - C_2}.$



Distâncias máximas: 100 Mpc

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Expansão de supernovas:

Assumindo que a fotosfera de supernova expande esfericamente e emite como corpo negro (Lei de Stefan-Boltzmann):

$$L = 4\pi R^2(t) \sigma T_e^4$$

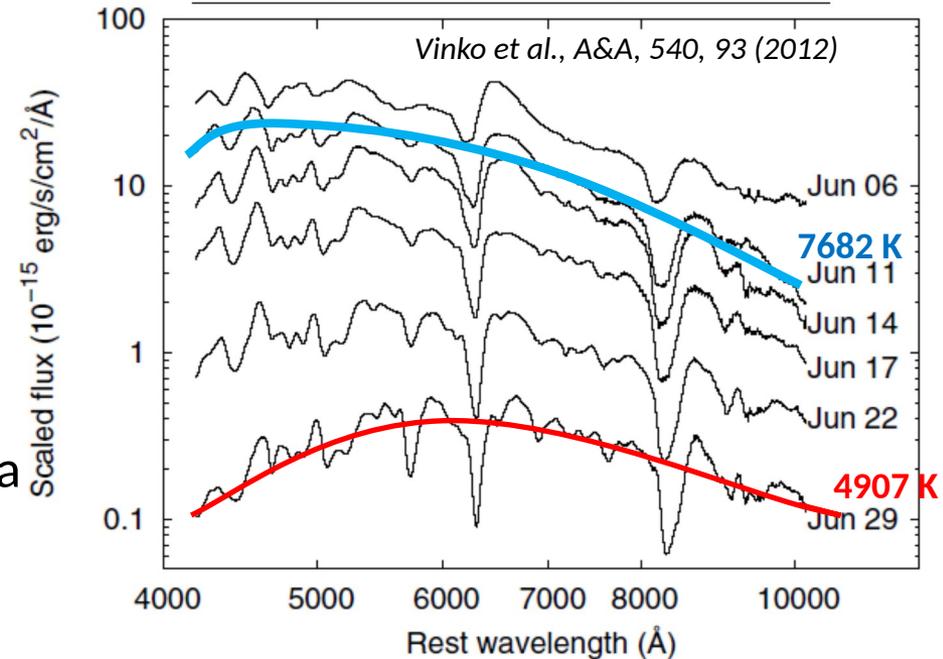
onde o raio da fotosfera é dado por

$$R(t) = v_{\text{fot}} t$$

e v_{fot} é a velocidade da fotosfera calculada por efeito Doppler.

**Luminosidade->Magnitude Abs->
Distância**

$t - t_0$ (d)	T_{phot} (K)	v_{phot} (km s ⁻¹)	θ (10 ⁸ km Mpc ⁻¹)	θ/v (d Mpc ⁻¹)
SN 2011dh				
5.8	7624 (94)	11 400 (200)	5.26 (0.06)	0.53 (0.06)
10.8	7682 (140)	9250 (300)	8.55 (0.29)	1.07 (0.29)
13.8	7336 (131)	7250 (250)	10.94 (0.41)	1.74 (0.41)
16.8	6996 (132)	7200 (300)	12.84 (0.45)	2.06 (0.45)
20.8	6459 (123)	7250 (200)	15.64 (0.57)	2.49 (0.57)
21.8	6451 (121)	7150 (150)	15.89 (0.61)	2.57 (0.61)
28.7	4907 (102)	5600 (300)	23.38 (1.19)	4.83 (1.19)



Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Expansão de supernovas:

Assumindo que a fotosfera de supernova expande esfericamente e emite como corpo negro (Lei de Stefan-Boltzmann):

$$L = 4\pi R^2(t) \sigma T_e^4$$

onde o raio da fotosfera é dado por

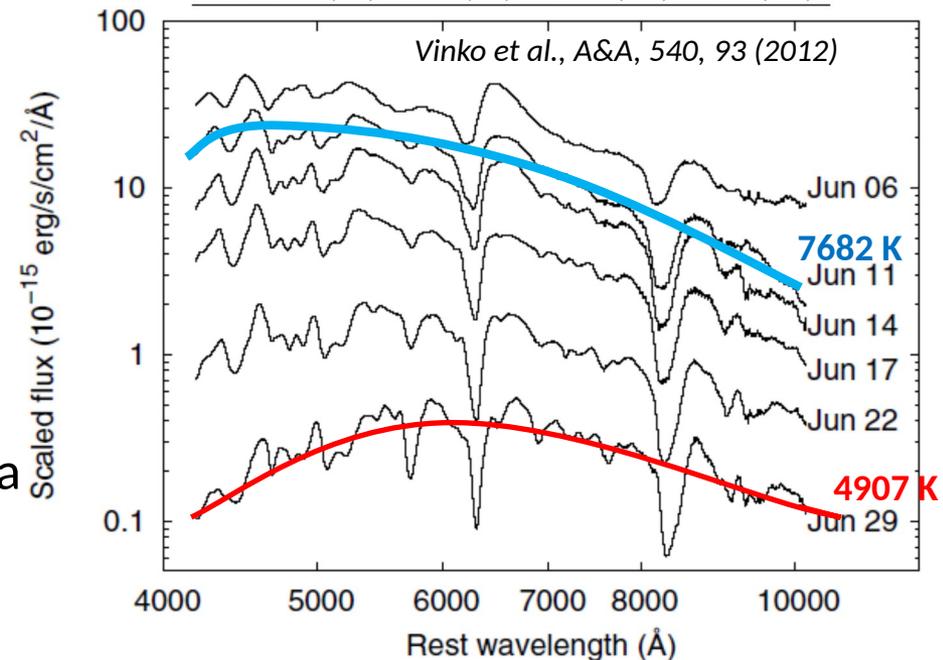
$$R(t) = v_{\text{fot}} t$$

e v_{fot} é a velocidade da fotosfera calculada por efeito Doppler.

Luminosidade->Magnitude Abs-> Distância

- Principais limitações:
 - SNs não expandem como esfera perfeita
 - SNs não são corpo negro perfeito
 - extinção interestelar

$t - t_0$ (d)	T_{phot} (K)	v_{phot} (km s ⁻¹)	θ (10 ⁸ km Mpc ⁻¹)	θ/v (d Mpc ⁻¹)
SN 2011dh				
5.8	7624 (94)	11 400 (200)	5.26 (0.06)	0.53 (0.06)
10.8	7682 (140)	9250 (300)	8.55 (0.29)	1.07 (0.29)
13.8	7336 (131)	7250 (250)	10.94 (0.41)	1.74 (0.41)
16.8	6996 (132)	7200 (300)	12.84 (0.45)	2.06 (0.45)
20.8	6459 (123)	7250 (200)	15.64 (0.57)	2.49 (0.57)
21.8	6451 (121)	7150 (150)	15.89 (0.61)	2.57 (0.61)
28.7	4907 (102)	5600 (300)	23.38 (1.19)	4.83 (1.19)



Distâncias máximas: 200 Mpc

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Curvas de luminosidade de supernovas de tipo Ia

- Durante muito tempo considerou-se que SNs de tipo Ia tinham a mesma luminosidade: $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ no seu máximo => velas padrão



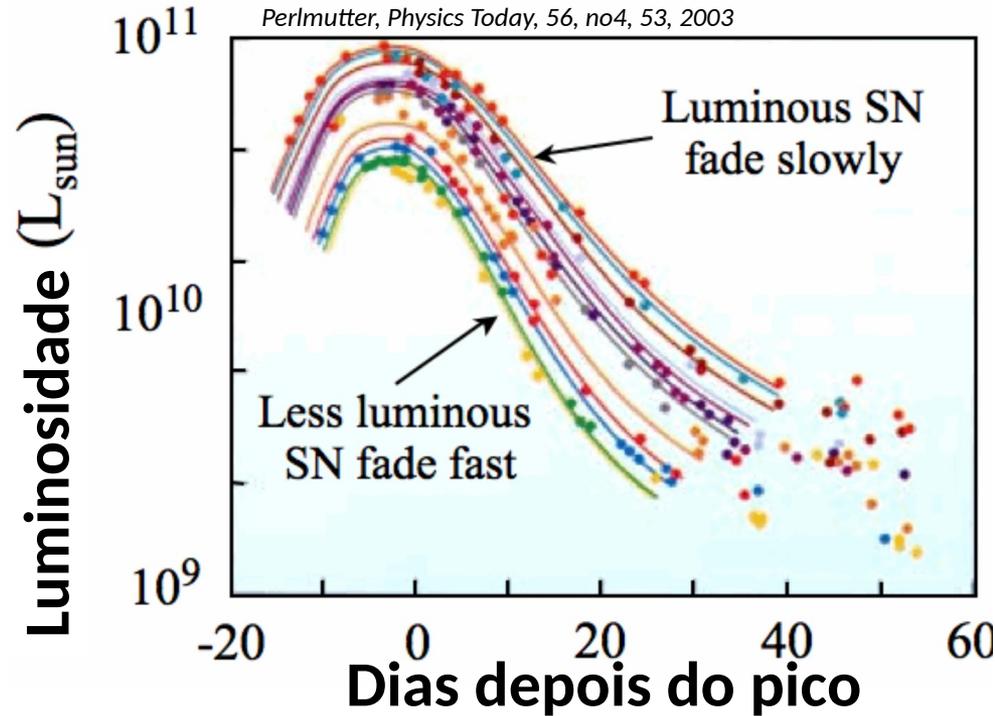
Artist's rendition of a white dwarf accumulating mass from a nearby companion star. This type of progenitor system would be considered singly-degenerate.

Image courtesy of David A. Hardy, © David A. Hardy/www.astroart.org.

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Curvas de luminosidade de supernovas de tipo Ia: Método dos 15 dias

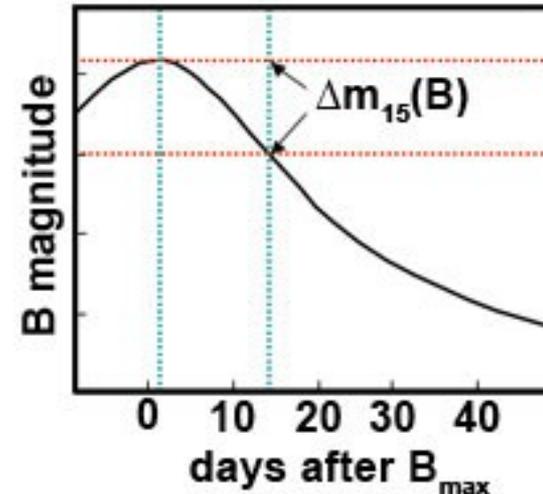
- Durante muito tempo considerou-se que SNs de tipo Ia tinham a mesma luminosidade: $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ no seu máximo => **velas padrão**
- SNs de tipo Ia têm luminosidades diferentes: **não são velas padrão!**
- Quanto maior o brilho, mais tempo leva para apagar: **velas padronizáveis**



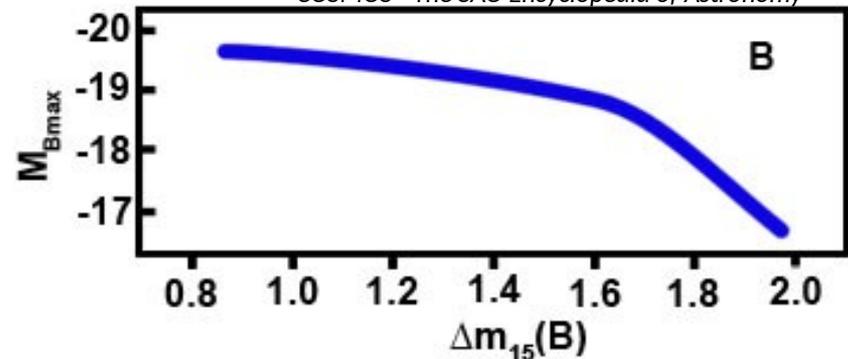
Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Curvas de luminosidade de supernovas de tipo Ia: Método dos 15 dias

- Durante muito tempo considerou-se que SNs de tipo Ia tinham a mesma luminosidade: $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ **no seu máximo => velas padrão**
- SNs de tipo Ia têm luminosidades diferentes: **não são velas padrão!**
- Quanto maior o brilho, mais tempo leva para apagar: **velas padronizáveis**
- Relação entre magnitude absoluta do máxima e taxa de decaimento (diferença de magnitude em 15 dias)



COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy



Ex: Relação de Phillips:

$$M_{\max}(B) = -21.726 + 2.698\Delta m_{15}(B)$$

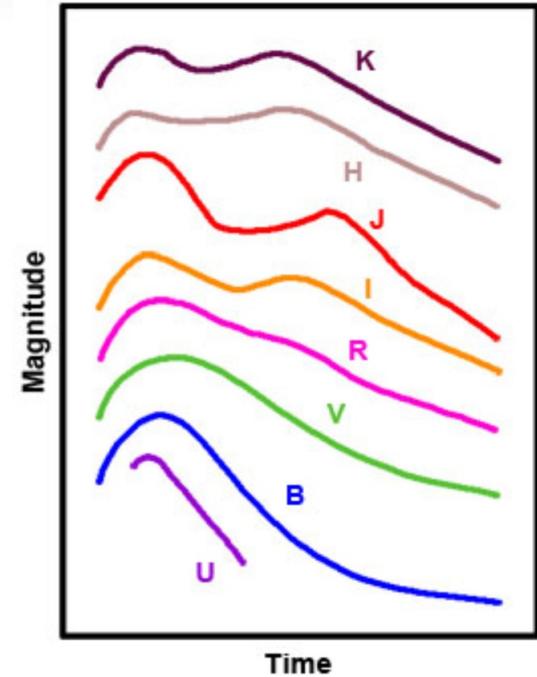
Phillips, M. M. (1993). ApJL 413

Distâncias máximas: 1 Gpc

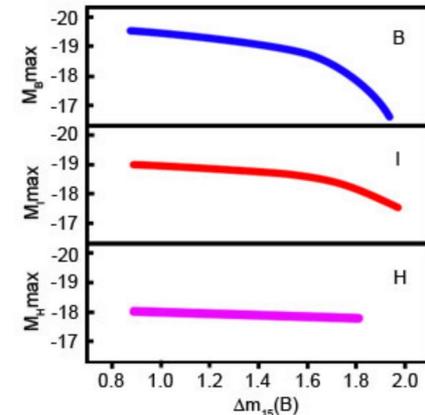
Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Curvas de luminosidade de supernovas de tipo Ia: Método dos 15 dias

- Durante muito tempo considerou-se que SNs de tipo Ia tinham a mesma luminosidade: $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ **no seu máximo => velas padrão**
- SNs de tipo Ia têm luminosidades diferentes: **não são velas padrão!**
- Quanto maior o brilho, mais tempo leva para apagar: **velas padronizáveis**
- **Relação entre magnitude absoluta do máxima e taxa de decaimento (diferença de magnitude em 15 dias)**
- **Evolução diferente para diferentes filtros (temperaturas)**



COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy

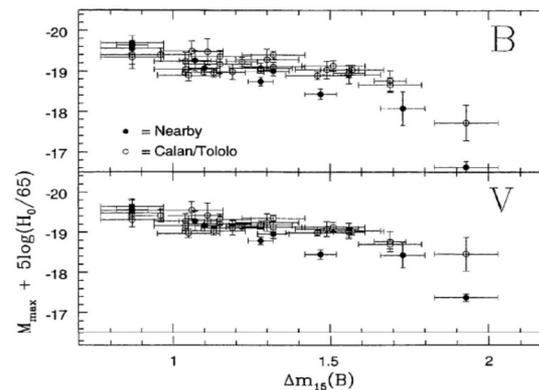
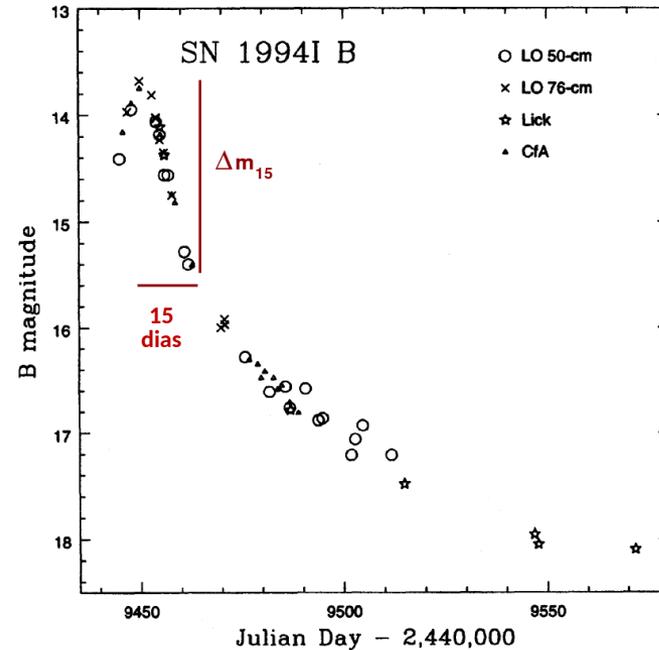


Distâncias máximas: 1 Gpc

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Curvas de luminosidade de supernovas de tipo Ia: Método dos 15 dias

- Durante muito tempo considerou-se que SNs de tipo Ia tinham a mesma luminosidade: $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ no seu máximo => velas padrão
- SNs de tipo Ia têm luminosidades diferentes: **não são velas padrão!**
- Quanto maior o brilho, mais tempo leva para apagar: **velas padronizáveis**
- Relação entre magnitude absoluta do máxima e taxa de decaimento (diferença de magnitude em 15 dias)
- Evolução diferente para diferentes filtros (temperaturas)



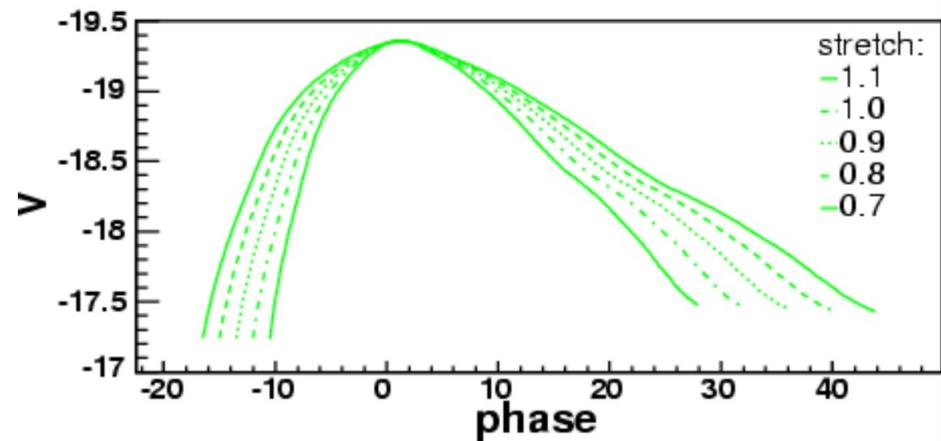
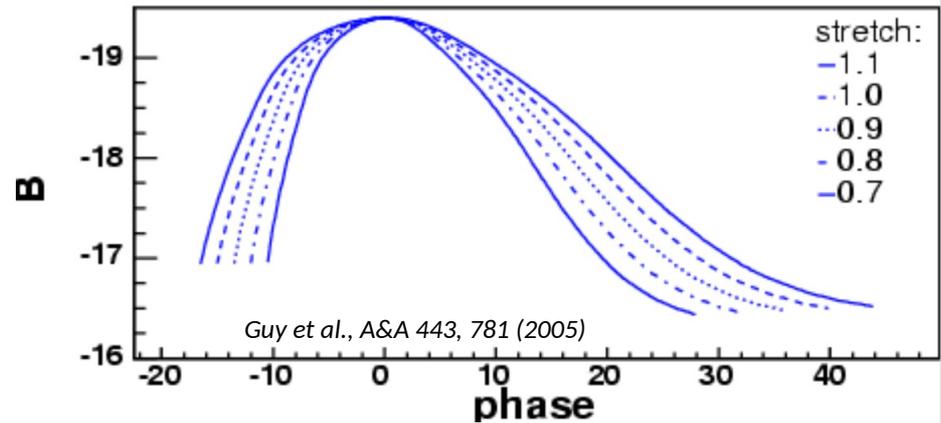
Hamuy et al., AJ 112, 2391 (1996)

Distâncias máximas: 1 Gpc

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Curvas de luminosidade de supernovas de tipo Ia: Método do alongamento (stretching)

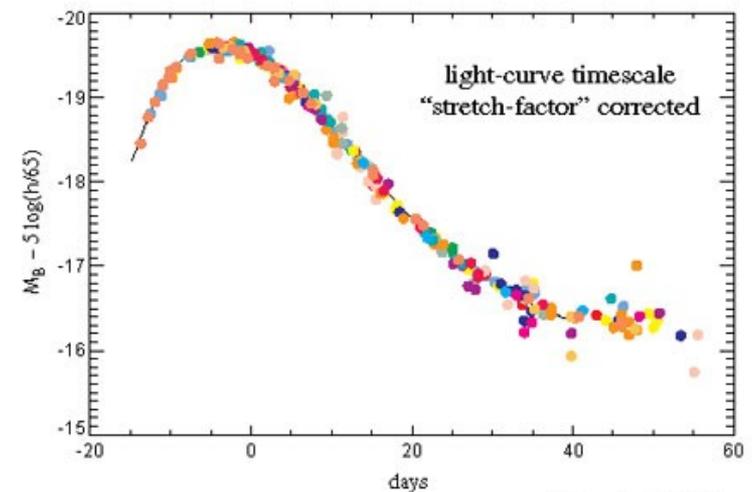
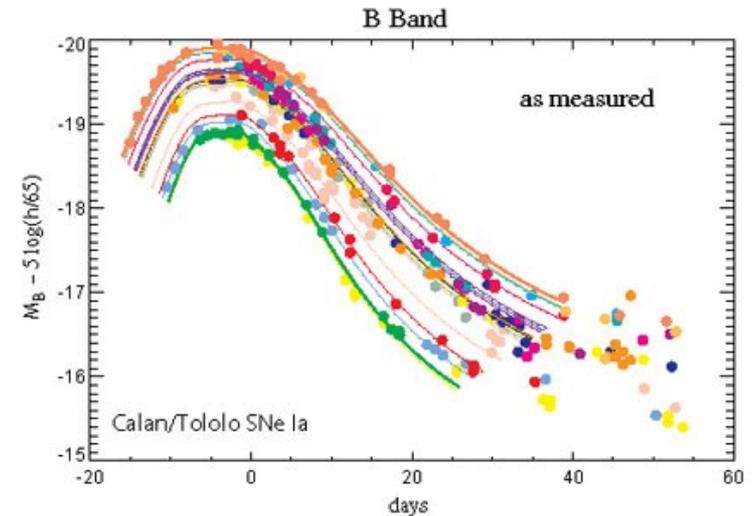
- Durante muito tempo considerou-se que SNs de tipo Ia tinham a mesma luminosidade: $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ no seu máximo => **velas padrão**
- SNs de tipo Ia têm luminosidades diferentes: **não são velas padrão!**
- Quanto maior o brilho, mais tempo leva para apagar: **velas padronizáveis**
- Correção da curva de luminosidade pela relação de decaimento => parâmetro de alongamento
- Todas SNs-Ia são renormalizadas para terem $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ no seu máximo



Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Curvas de luminosidade de supernovas de tipo Ia: Método do alongamento (stretching)

- Durante muito tempo considerou-se que SNs de tipo Ia tinham a mesma luminosidade: $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ no seu máximo => velas padrão
- SNs de tipo Ia têm luminosidades diferentes: não são velas padrão!
- Quanto maior o brilho, mais tempo leva para apagar: velas padronizáveis
- Correção da curva de luminosidade pela relação de decaimento => parâmetro de alongamento
- Todas SNs-Ia são renormalizadas para terem $\langle M_B \rangle \sim M_V \sim -19.3 \pm 0.03$ no seu máximo

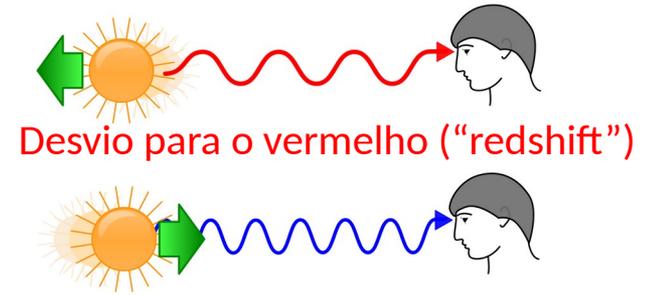


Kim, et al. (1997)

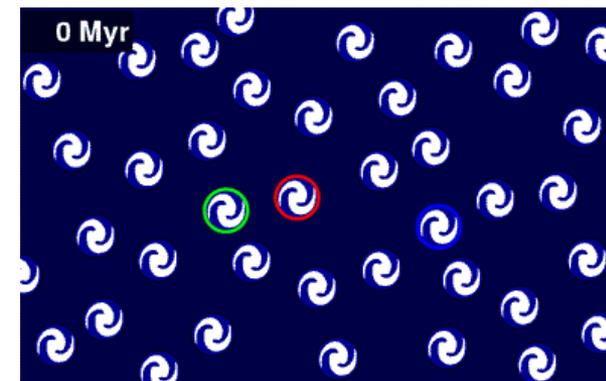
Distâncias máximas: 1 Gpc

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

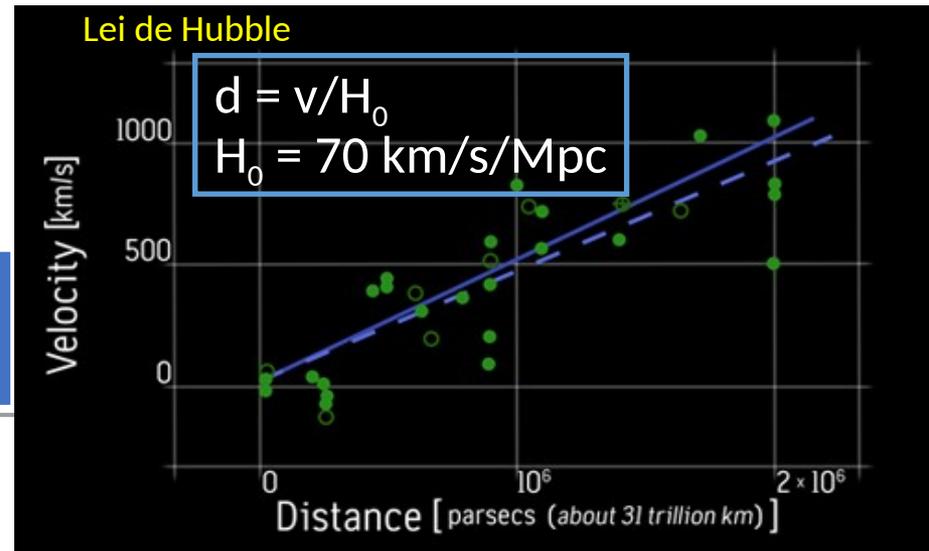
Lei de Hubble



Redshift relativístico: $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{(1+v/c)}{(1-v/c)}} - 1$ \longleftrightarrow $\frac{v}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$

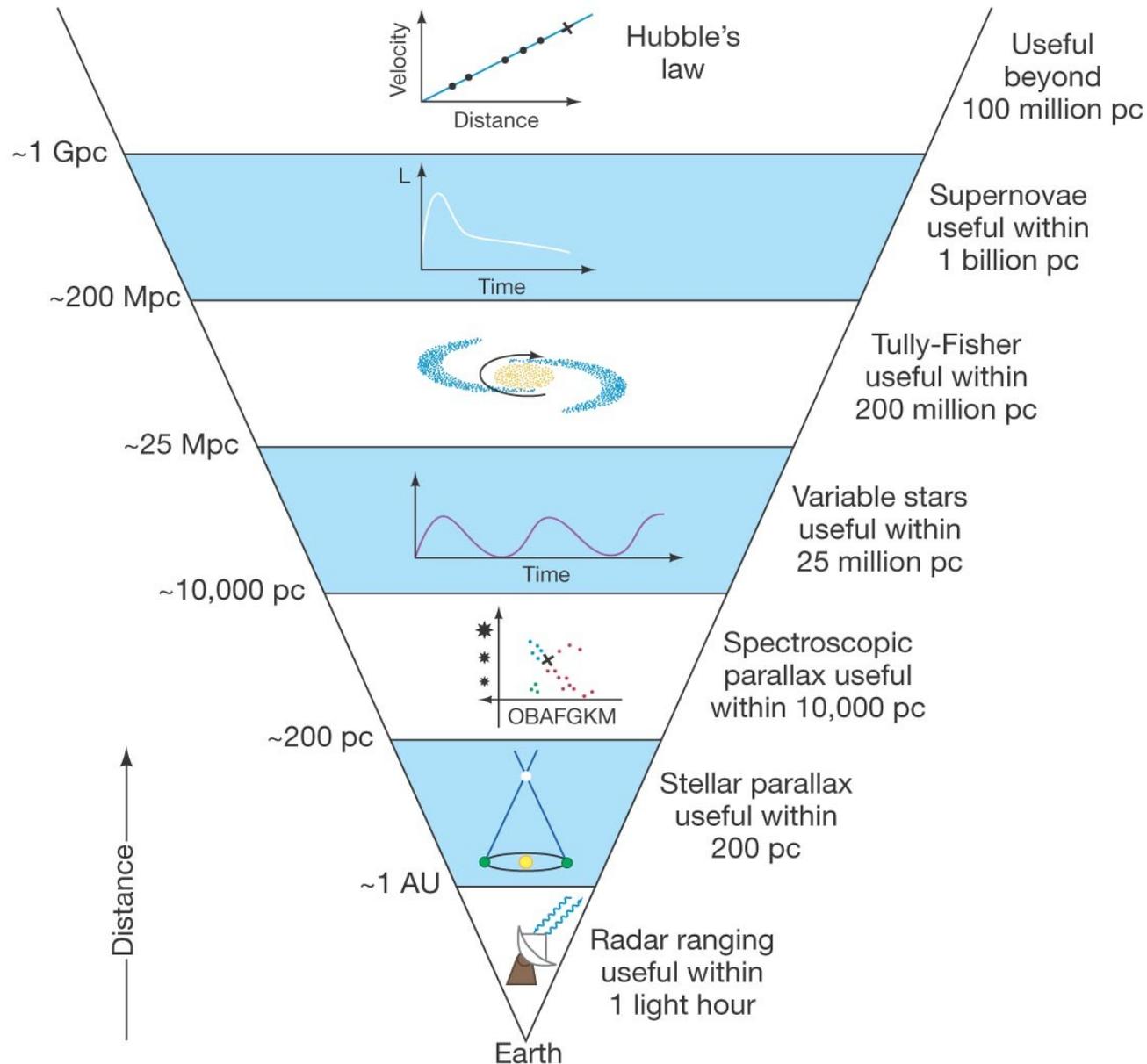


Hubble descobriu que o Universo está em expansão



Distâncias máximas observadas: 9 Gpc

Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica



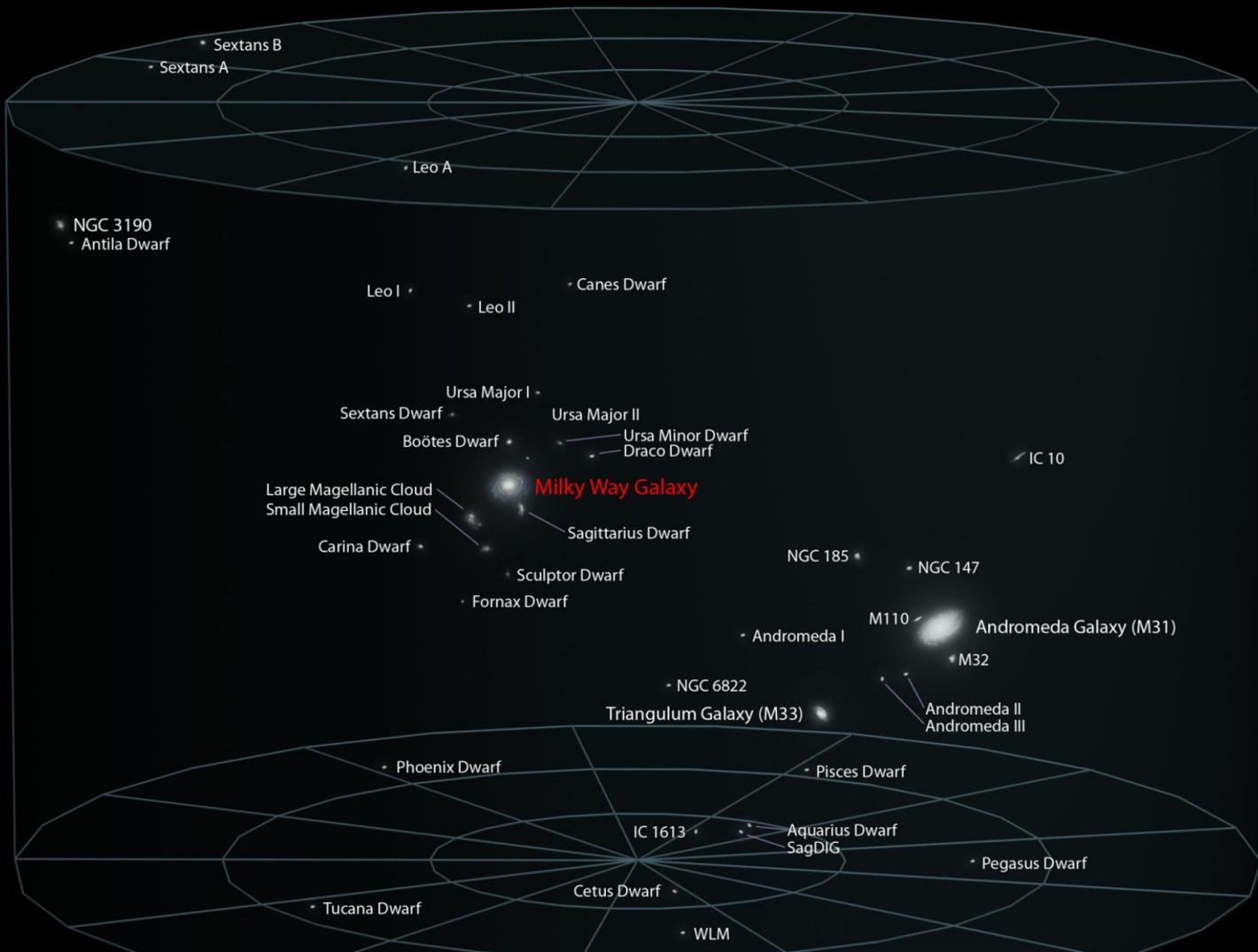
Escala de distâncias cósmicas-Extragaláctica

Indicadores de distâncias e erros típicos

TABLE 27.1 Distance Indicators. (Adapted from Jacoby et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 104, 599, 1992.)

Method	Uncertainty for Single Galaxy (mag)	Distance to Virgo Cluster (Mpc)	Range (Mpc)
Cepheids	0.16	15 – 25	29
Novae	0.4	21.1 ± 3.9	20
Planetary nebula luminosity function	0.3	15.4 ± 1.1	50
Globular cluster luminosity function	0.4	18.8 ± 3.8	50
Surface brightness fluctuations	0.3	15.9 ± 0.9	50
Tully–Fisher relation	0.4	15.8 ± 1.5	> 100
D – σ relation	0.5	16.8 ± 2.4	> 100
Type Ia supernovae	0.10	19.4 ± 5.0	> 1000

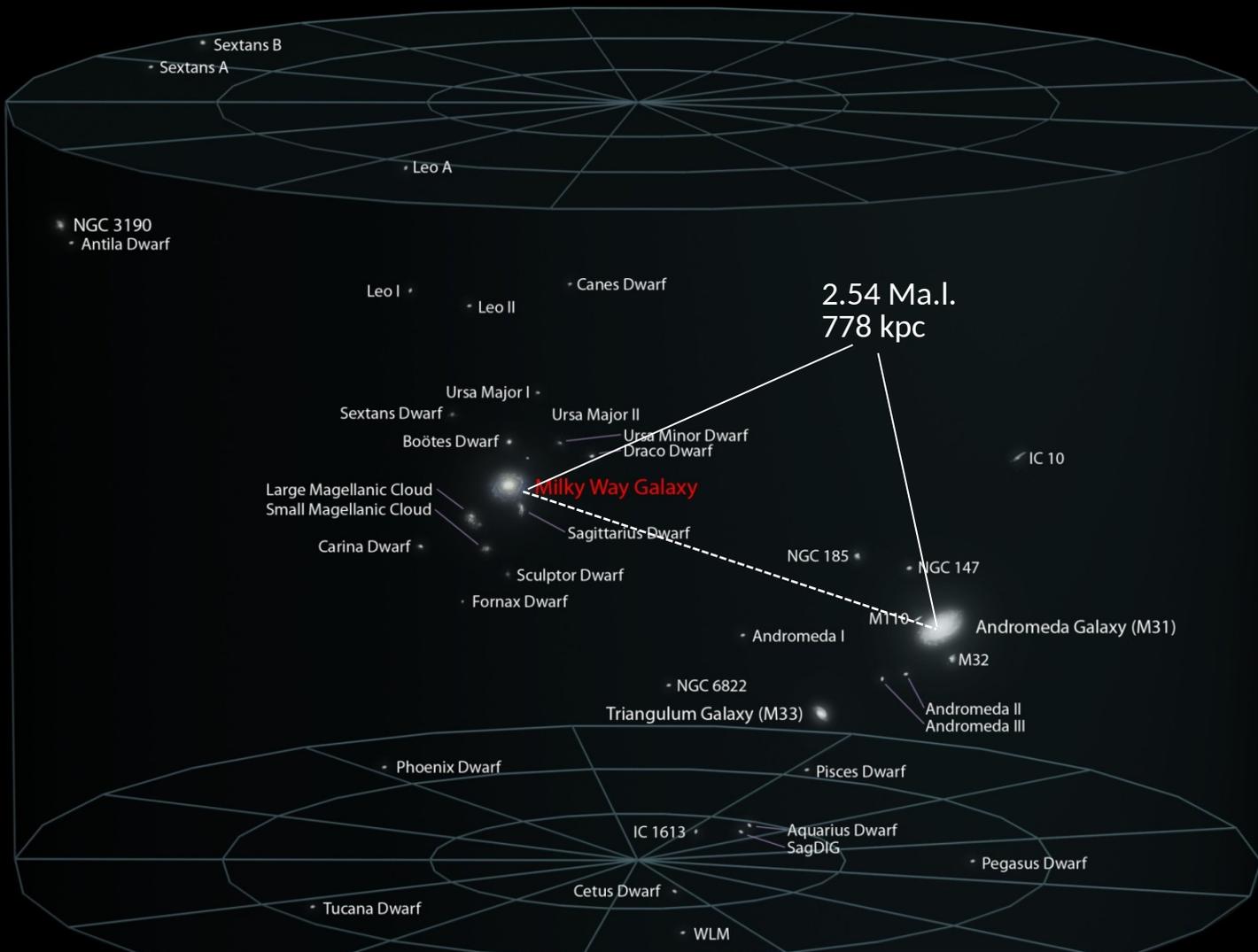
Aglomerados de galáxias



A Via Láctea pertence ao **Grupo Local**

- $D \sim 1$ Mpc: aglomerado de galáxias considerado “pobre”
- contém cerca de 30 objetos (poucas S, várias E anas e Irr)

Aglomerados de galáxias



A Via Láctea pertence ao **Grupo Local**

- D ~ 1 Mpc: aglomerado de galáxias considerado “pobre”
- contém cerca de 30 objetos (poucas S, várias E anãs e Irr)

Aglomerados de galáxias ricos x pobres

Aglomerados pobres

- Menos de 50 membros
- Diâmetro: $D \sim 1$ Mpc
- Dispersão de velocidades: 150 km/s
- Massa: $2 \times 10^{13} M_{\text{sol}}$
- Massa/Luminosidade: $260 M_{\text{sol}}/L_{\text{sol}}$
- Exemplo: Grupo Local

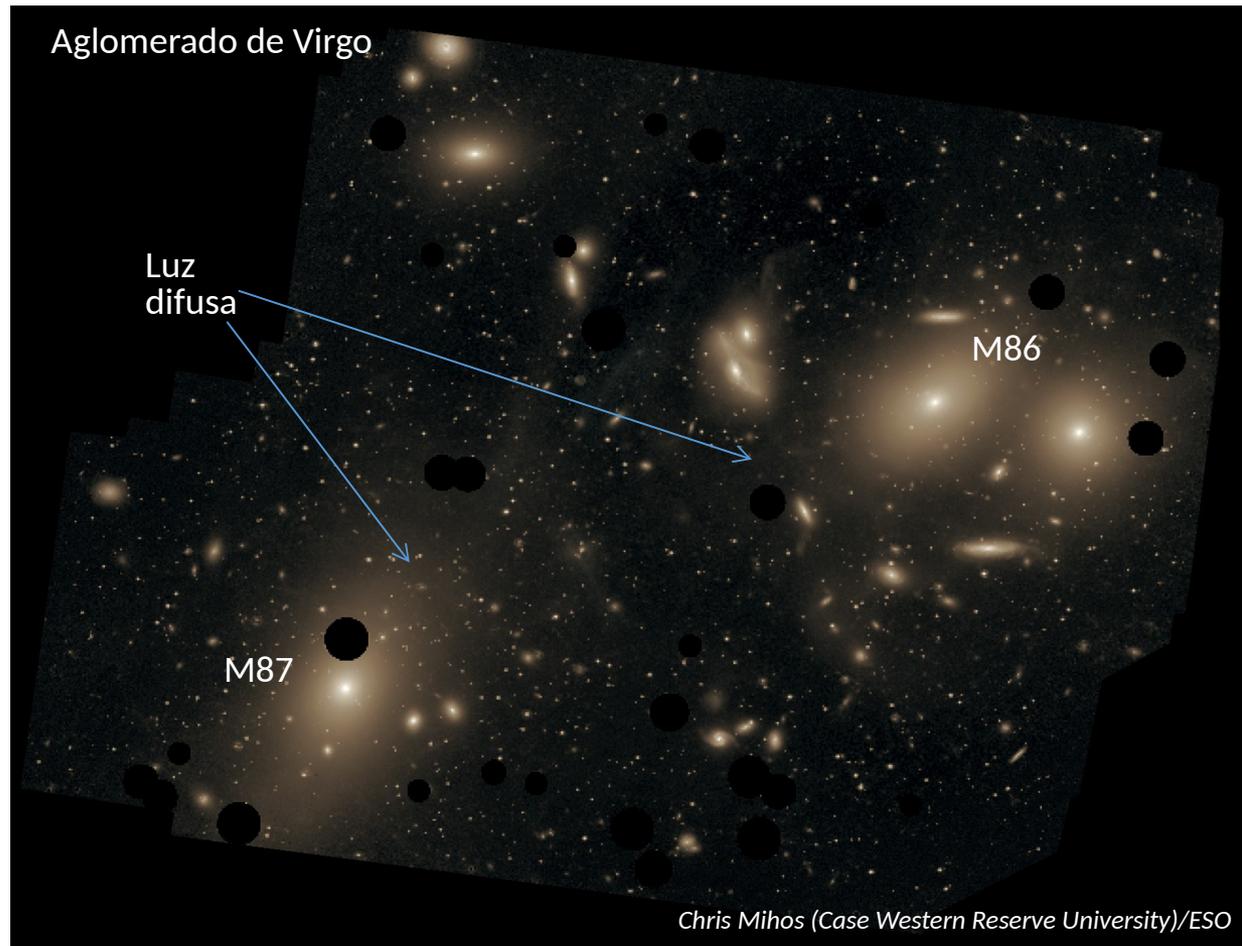
Aglomerados ricos

- Até 1000 membros
- Diâmetro: $D \sim 6$ Mpc
- Dispersão de velocidades: 800-1000 km/s
- Massa: $1 \times 10^{15} M_{\text{sol}}$
- Massa/Luminosidade: $400 M_{\text{sol}}/L_{\text{sol}}$
- Exemplo: Virgo

Aglomerado de Virgo (Virgem)

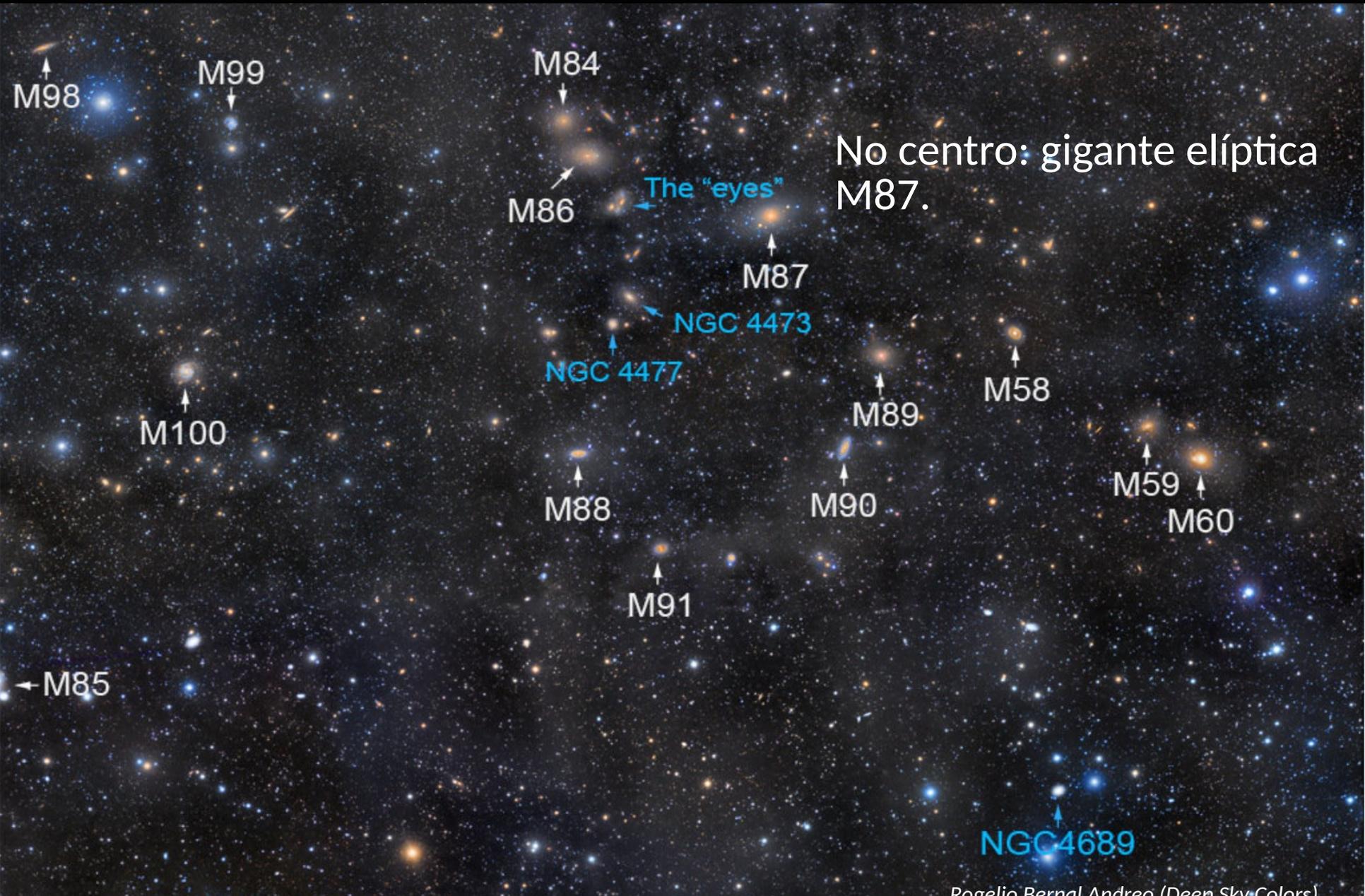
Virgo : aglomerado rico mais próximo: contém mais de 1000 galáxias

- área $10^\circ \times 12^\circ$ no céu
- Diâmetro: $D = 3 \text{ Mpc}$
- Distância: $d = 15 \text{ Mpc}$ (estrelas Cefeidas na galáxia S M100).
- Três elípticas gigantes (20 vezes maiores que galáxias normais) dominam o centro.



Chris Mihos (Case Western Reserve University)/ESO

Aglomerado de Virgo (Virgem)



Classificação de Aglomerados Ricos

Regulares (ex. Coma):

- **esféricos**: concentração de galáxias no centro
- **inúmeras interações entre galáxias** teriam causado distribuição simétrica
- **Maioria das galáxias: elípticas** (~15% espirais ou irregulares)
- razão E:S0:S = 3:4:2

Irregulares (ex. Virgo):

- galáxias **distribuídas aleatoriamente**
- Quantidade de galáxias **espirais e irregulares é maior**
- razão E:S0:S = 1:2:3

Aglomerado de Coma

- Mais próximo aglomerado regular
- + de 1000 gals. (~10000 contando anãs)
- Diâmetro: $D = 6 \text{ Mpc}$
- Distância $d = 100 \text{ Mpc}$ (dist.)
- Maioria: E e SOs (15% S)



Aglomerado de Coma

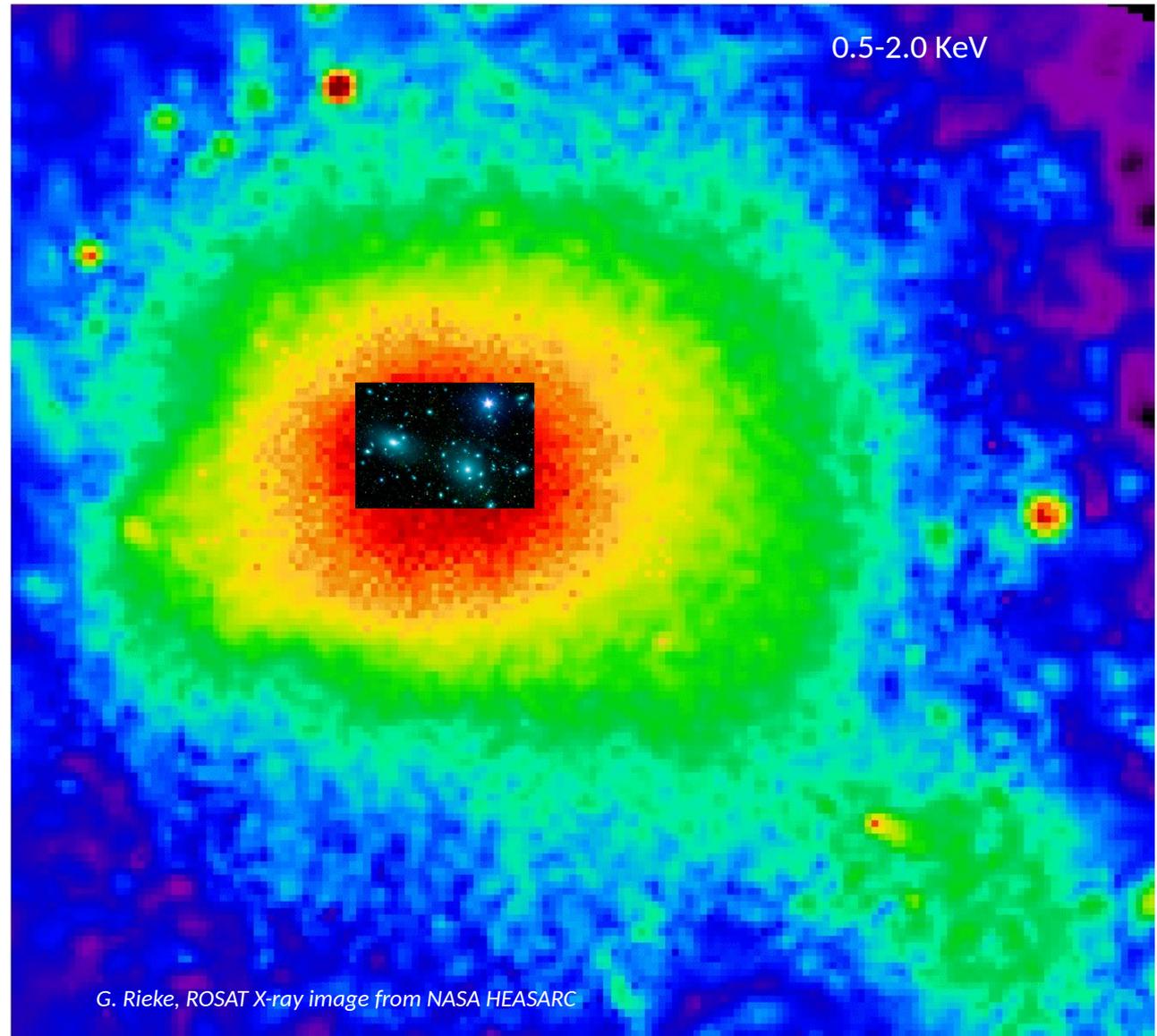
Duas galáxias cD no Centro:

NGC 4889

NGC 4874

Aglomerado de Coma

- Distribuição de gás quente esférica => aglomerado se estende muito além do núcleo
- Emissão Bremsstrahlung (freamento) está emitindo em raio-X
- Parece estar engolindo outro aglomerado (abaixo a direita)



Massa de aglomerados

Massa do Virial

Teorema do Virial:

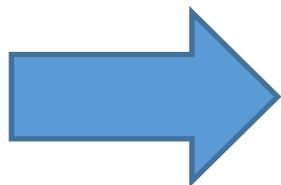
$$- 2E_c = E_p$$

Energia cinética:

$$E_c = \frac{3M \langle v_r^2 \rangle}{2}$$

Energia potencial de esfera de densidade constante (núcleo):

$$E_p = \frac{- 3GM^2}{5R_{vir}}$$



$$M_{Virial} = \frac{5 \langle v_r^2 \rangle R_{vir}}{G}$$

onde o raio do virial R_{vir} é definido como:

$$\rho(< R_{vir}) = \Delta_c \rho_c$$

Δ_c é uma constante que depende da cosmologia (tipicamente $\Delta_c = 200$)

ρ_c é a densidade crítica do Universo

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}, \quad \rho_c = 1.8788 \times 10^{-26} h^2 \text{ kg/m}^3.$$

Massa do aglomerado de Coma

A dispersão de velocidades do aglomerado de Coma é 977 km/s. Dentro do raio do Virial $R = 3$ Mpc, a massa

$$M_{\text{Virial}} = \frac{5 \langle v_r^2 \rangle R_{\text{vir}}}{G} = 3.3 \times 10^{15} M_{\text{sol}}$$

Como a luminosidade de Coma é $5 \times 10^{12} L_{\text{sol}}$, a razão massa-luminosidade é **$M/L = 660 M_{\text{sol}}/L_{\text{sol}}$**

Alta quantidade de
matéria escura!

Massa de aglomerados

Distribuição de gás em aglomerados Regulares

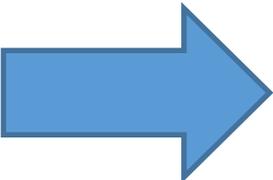
Gás em equilíbrio hidrostático:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho(r)}{r^2}$$

Lei dos gases perfeitos:

$$P = \frac{\rho k T}{\mu m_H}$$

Massa função do raio:


$$M_r = -\frac{kT(r)r}{\mu m_H G} \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln r} + \frac{\partial \ln T}{\partial \ln r} \right)$$

- $T(r)$ e $\rho(r)$ são calculadas observacionalmente a partir da emissão em raio-X do gás quente
- Massa total dentro de r estimada

Massa do Aglomerado de Abell 1413

- Primeiro, a distribuição média do brilho da superfície dos raios X em função do raio foi ajustada um modelo empírico (Fig. 4.6a).
- Então, a temperatura média projetada do gás foi estimado em anéis a diferentes distâncias radiais do centro do cluster (Fig. 4.6b).
- Estes foram desenhados e a variação da massa total dentro do raio r derivada usando a fórmula do slide anterior (Fig. 4.6c).
- Finalmente, a relação entre a densidade do gás e a densidade total em função do raio, ou no caso da Fig. 4.6d, a superdensidade relativa à densidade cosmológica crítica pode ser encontrado.

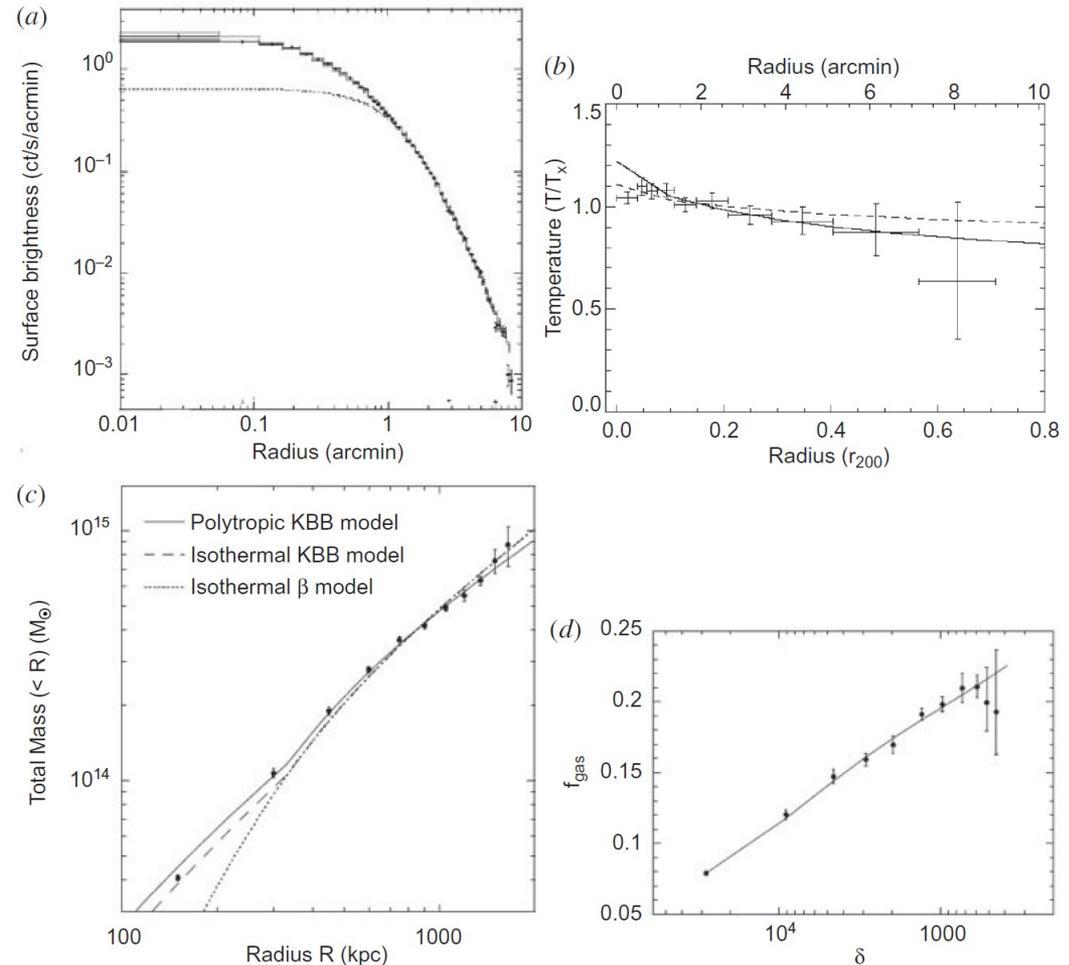


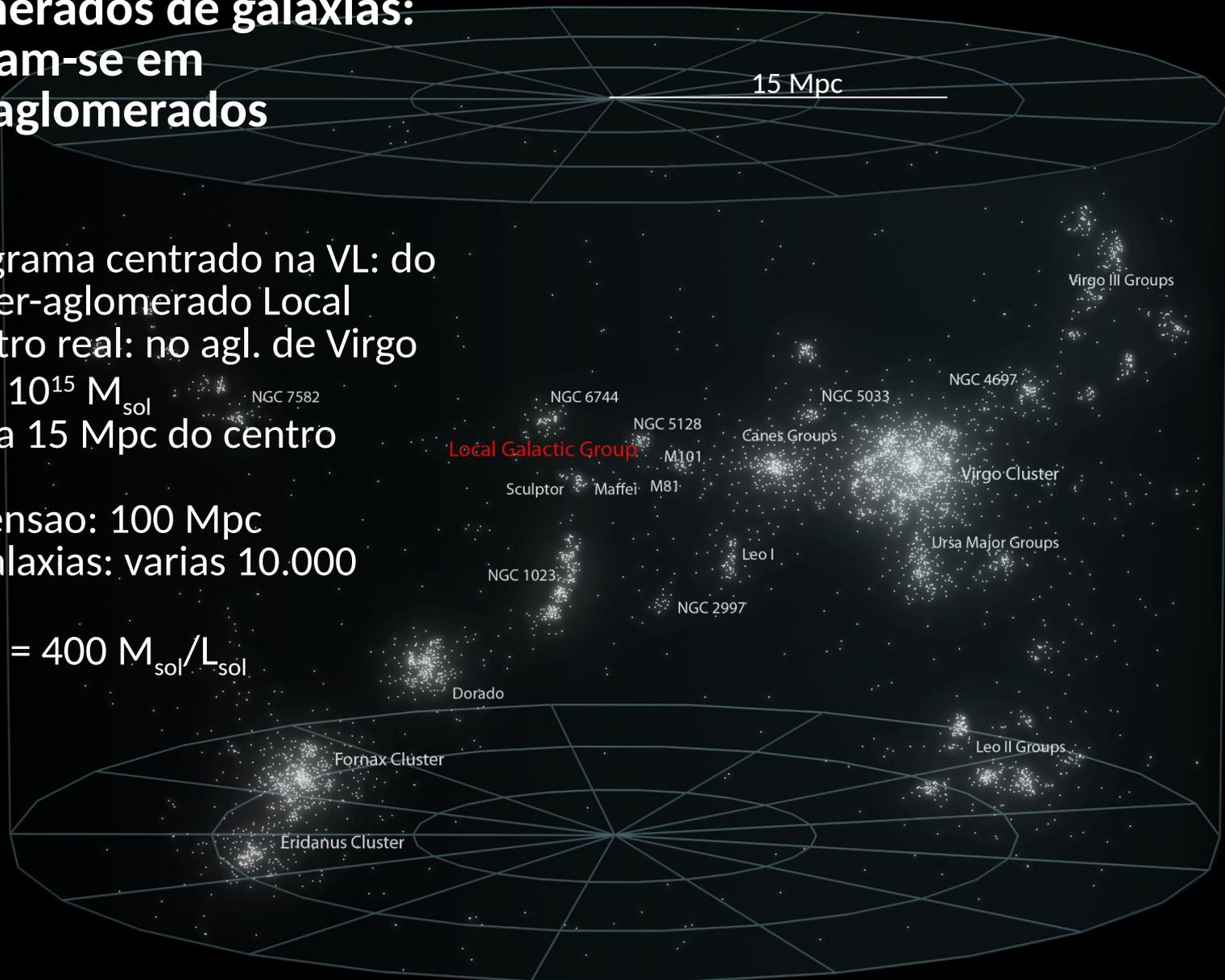
Fig. 4.6

Illustrating the determination of the physical properties of the cluster A1413 from X-ray imaging and spectroscopy by the XMM-Newton X-ray Observatory. (a) The X-ray brightness distribution as a function of distance from the centre of the cluster. (b) The projected radial distribution of the temperature of the gas. (c) The integrated mass distribution as a function of distance from the centre. (d) The fraction of gas density to total mass density f_{gas} within the cluster as a function of overdensity δ relative to the critical cosmological density (Pratt and Arnaud, 2002).

Super-aglomerados de galáxias

**Aglomerados de galaxias:
agrupam-se em
superaglomerados**

- Diagrama centrado na VL: do Super-aglomerado Local
- Centro real: no agl. de Virgo
- $M = 10^{15} M_{\text{sol}}$
- GL: a 15 Mpc do centro
- Extensão: 100 Mpc
- N galaxias: varias 10.000
- $M/L = 400 M_{\text{sol}}/L_{\text{sol}}$



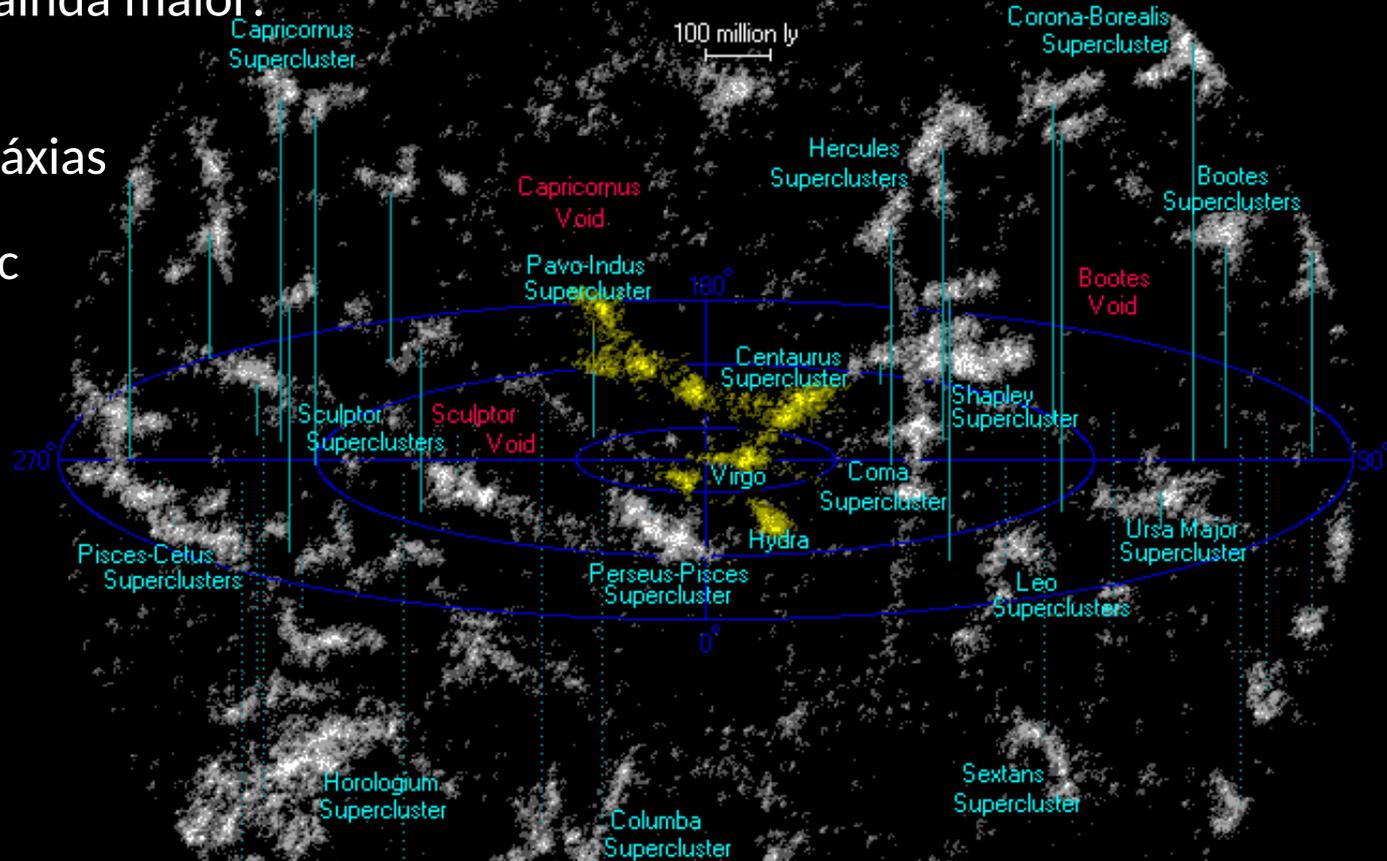
Super-aglomerados de galáxias

- Super-aglomerado de Virgo seria só um lobulo de um super-aglomerado ainda maior:
Laniakea

- mais de 100000 galáxias

- extensão ~ 160 Mpc

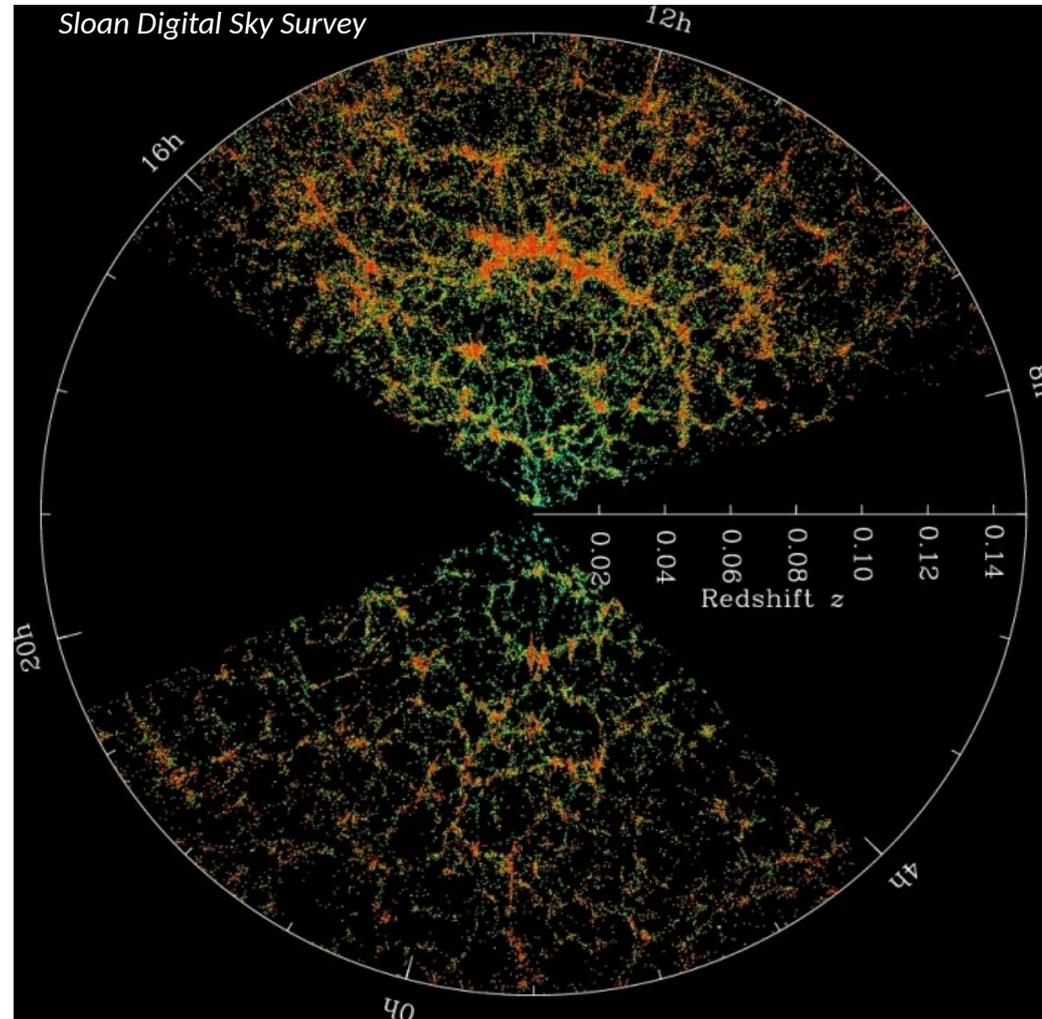
- $M = 10^{17} M_{\text{sol}}$



Estruturas em Grande Escala do Universo

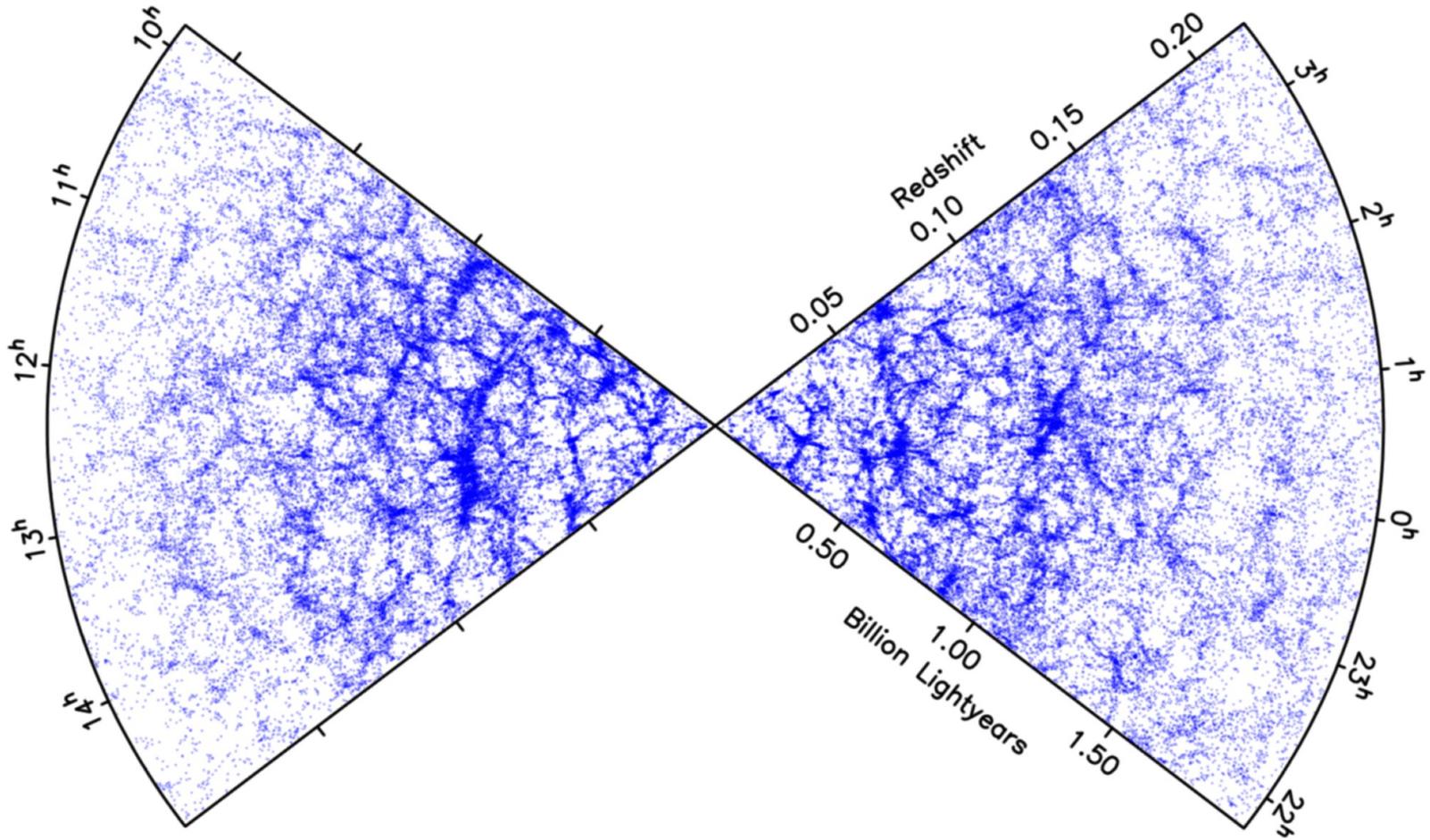
Com lei de Hubble: mapear o Universo: distribuição espacial das galáxias

- Distribuição em grandes escalas: não aleatória: em filamentos ou cadeias circundando vazios imensos (100 Mpc)
- Universo formado de “bolhas”: com galáxias distribuindo-se nas superfícies dessas bolhas
- Aglomerados e super-aglomerados => formados nas zonas de contato entre 2 ou + bolhas
- Estrutura vermelha: a “Grande Muralha” de agls. de galáxias => 70 Mpc x 200 Mpc.

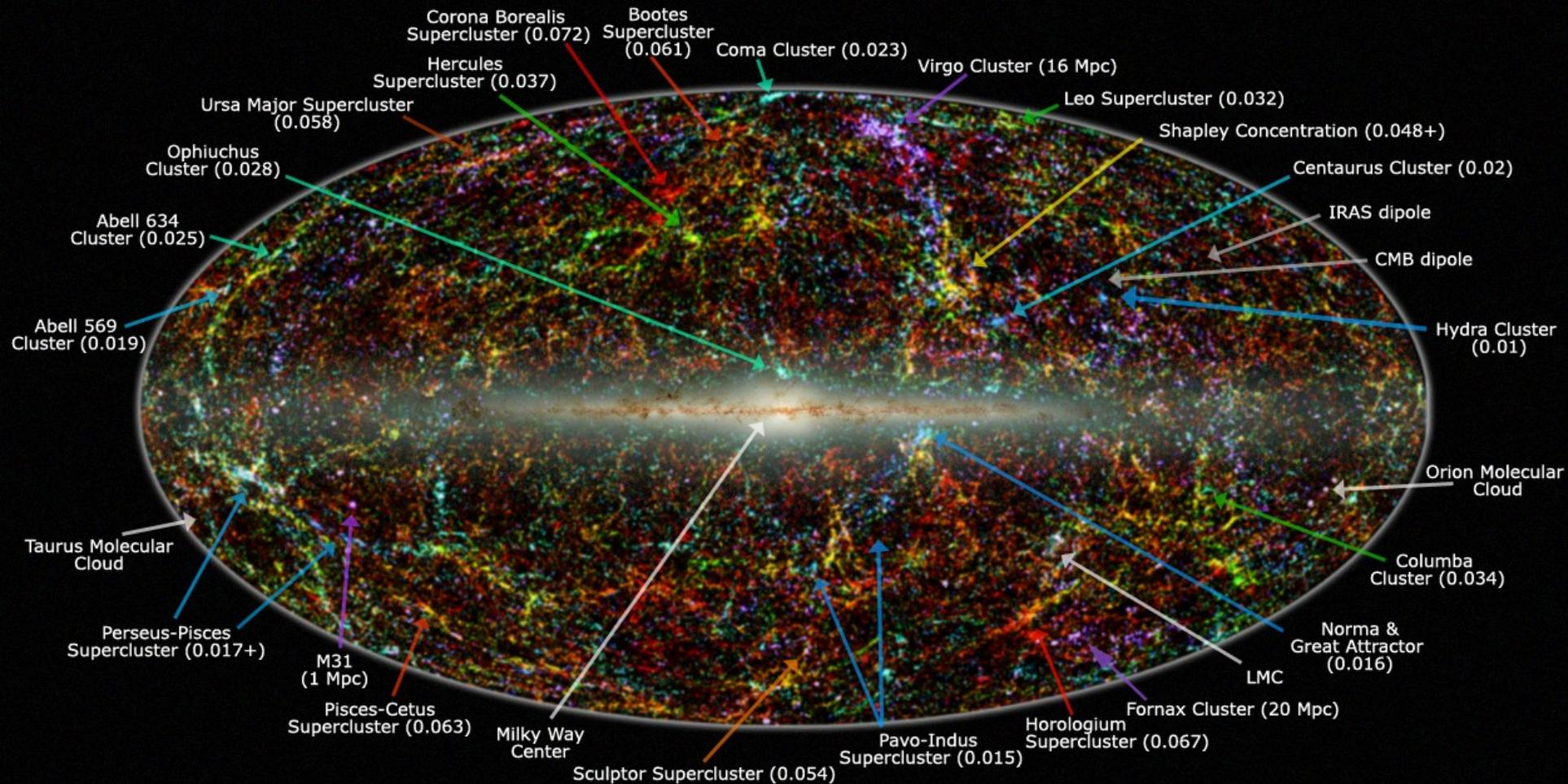


Estruturas em Grande Escala do Universo

2dF Redshift Survey ($z=0.2 \Rightarrow 780$ Mpc)



Estruturas em Grande Escala do Universo



Legenda: imagem mostra as galáxias do 2MASS com cores correspondentes aos redshifts (Jarrett 2004); aglomerados e super-aglomerados de galáxias conhecidos estão indicados (números em parentesis mostram distancias)