

ESTRUTURA EM GRANDE ESCALA: Distribuição das galáxias no universo

Galáxias não estão distribuídas uniformemente no espaço

Somente 20 ou 30 % das galáxias estão isoladas no espaço intergaláctico

Normalmente galáxias agrupam-se em:

- pares
- grupos (~ 1 Mpc de extensão, dezenas de galáxias)
- aglomerados (~ alguns Mpc e milhares de galáxias)
(10% das galáxias)
- super aglomerados (~ 50-100 Mpc)

massas vão de 10^{15} a $10^{16} M_{\odot}$

(aglomerados a super aglomerados)

(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

O que define grupos, aglomerados e super-aglomerados de galáxias é a força gravitacional que os mantém ligados.

Construção de um mapa 3D da estrutura do universo



Determinação precisa das distâncias

ESTENDENDO A ESCALA DE DISTÂNCIAS

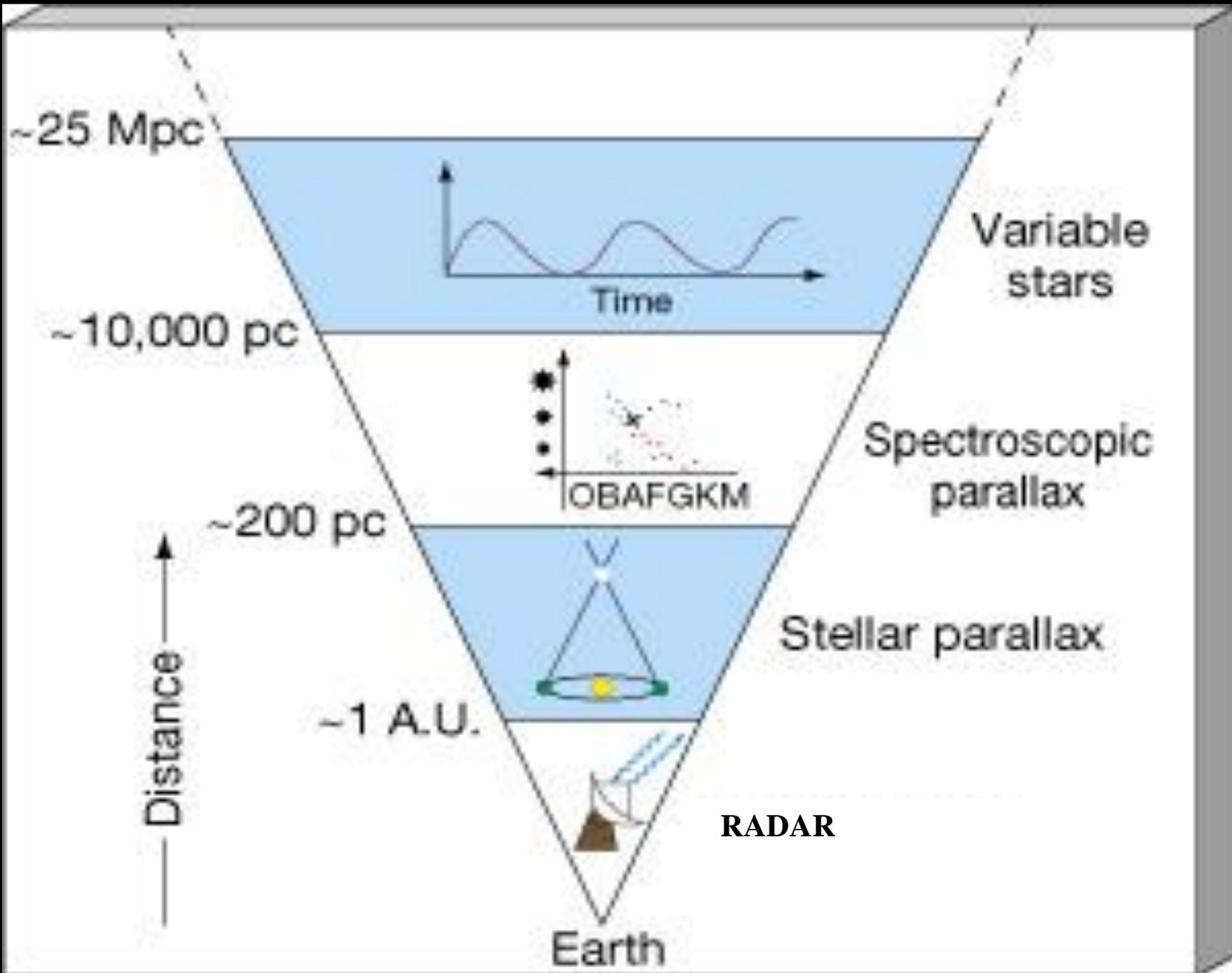
Estimativa : ~ 40 bilhões de galáxias tão brilhantes quanto a nossa existem no universo observável.

Indicador de distância

VARIÁVEIS CEFÉIDAS

Galáxia espiral M100
(16 Mpc)
Pertencente ao
aglomerado de Virgem



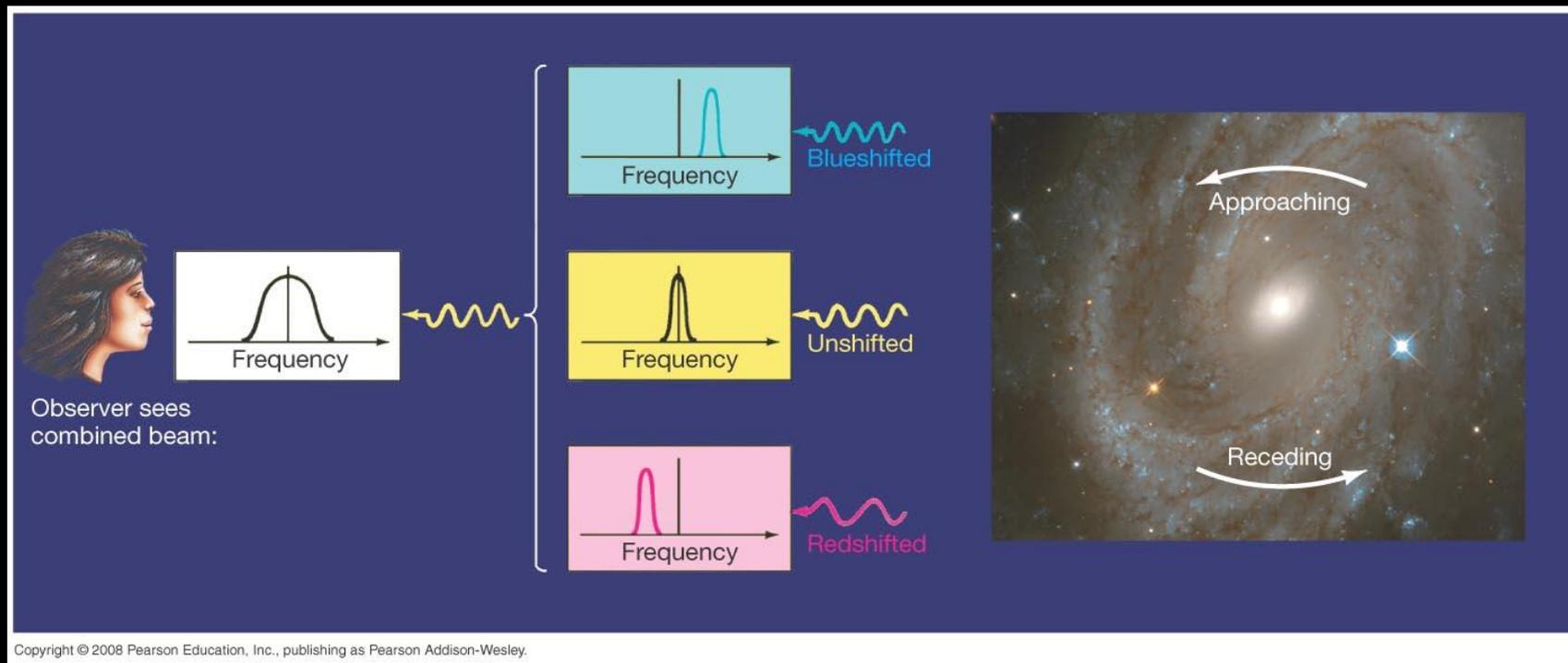


GALÁXIAS ESPIRAIS: RELAÇÃO DE TULLY-FISHER



velocidade de rotação máxima \Leftrightarrow luminosidade

$$L \propto v_{rot}^4$$



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

$$\text{Alargamento} = 2 \times \Delta\lambda$$

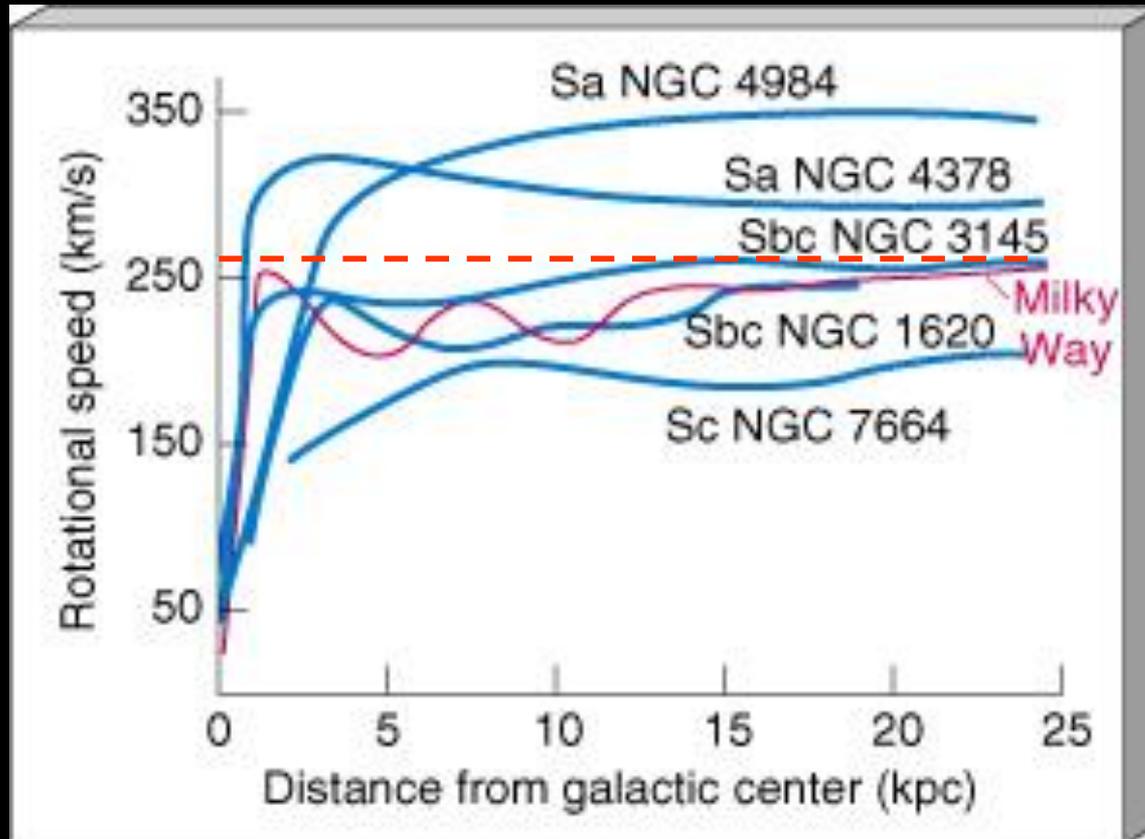
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_{rot}}{c}$$

$$\frac{\text{Alargamento}}{\lambda} = \frac{2 \times v_{rot}^{max}}{c}$$

$$m - M = 5 \log D - 5$$

Curvas de rotação

Galáxia NGC 3145: $v_{rot}^{max} \sim 260 \text{ km/s}$



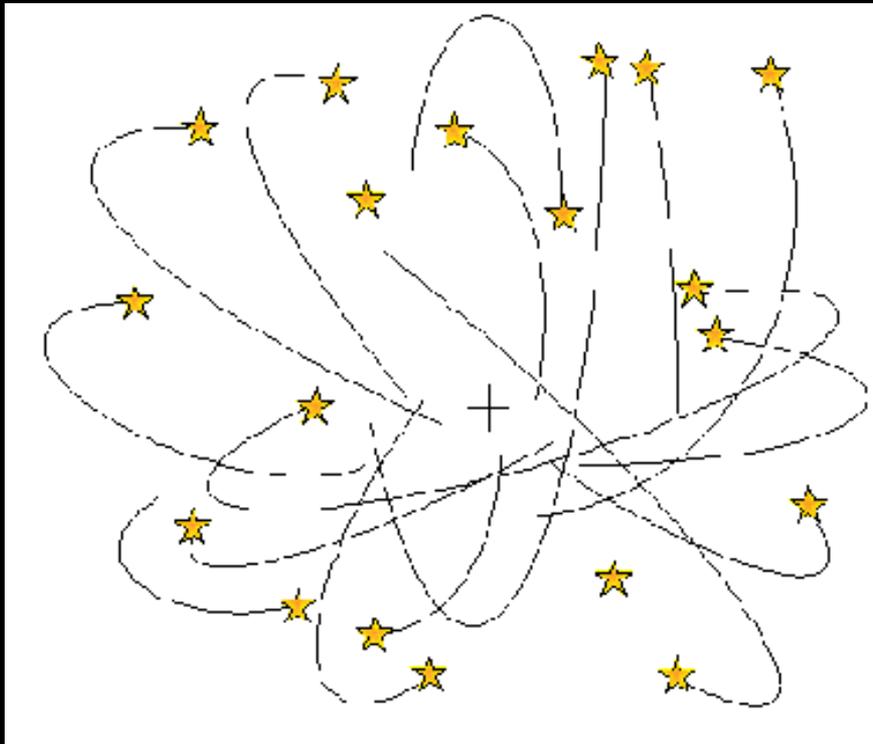
maior a v_{rot} (máxima) \Leftrightarrow maior o alargamento da linha \Rightarrow
maior é a luminosidade

GALÁXIAS ELÍPTICAS: RELAÇÃO DE FABER-JACKSON

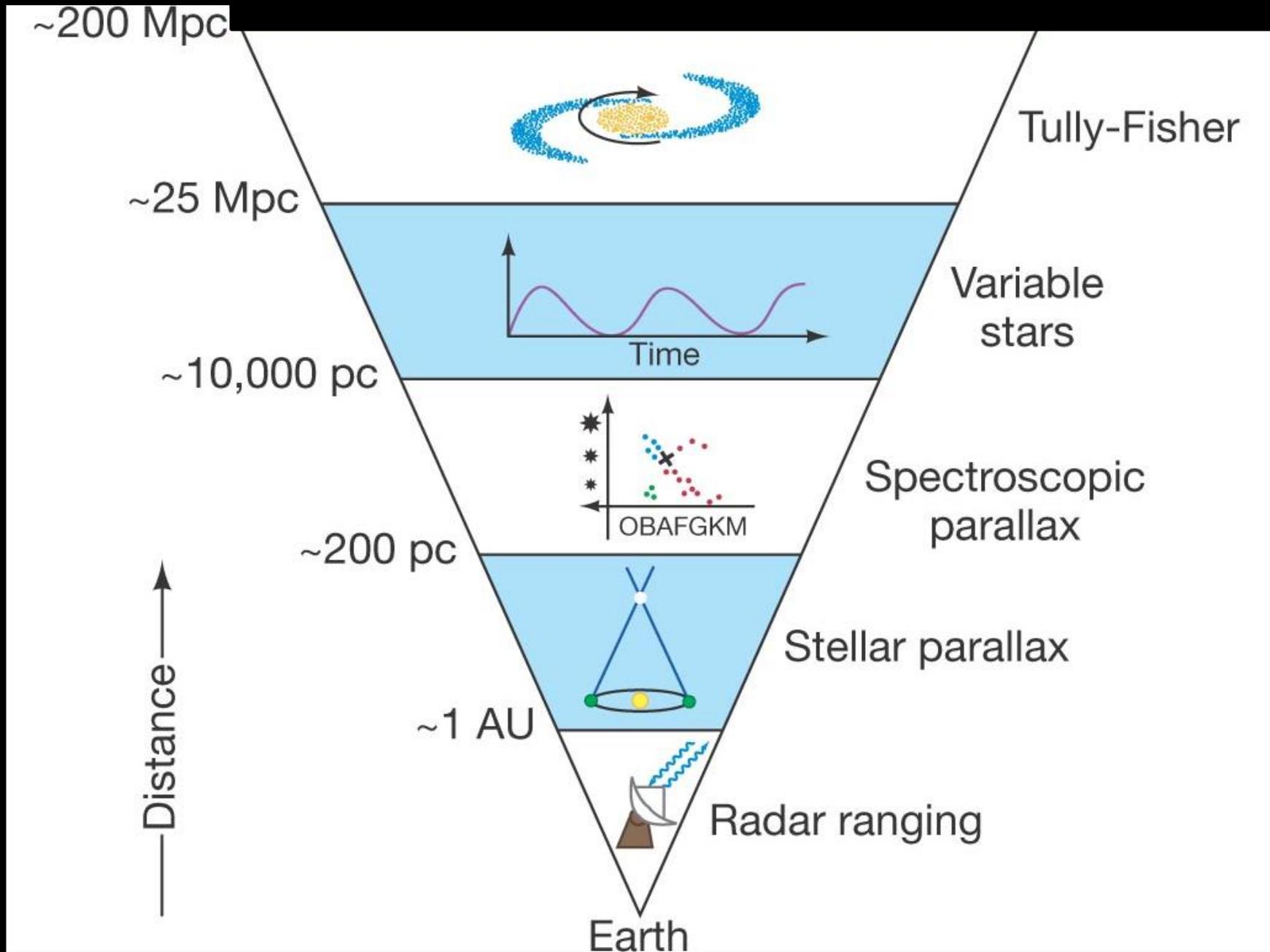


Dispersão de velocidades \leftrightarrow luminosidade

$$L \propto \sigma^4$$

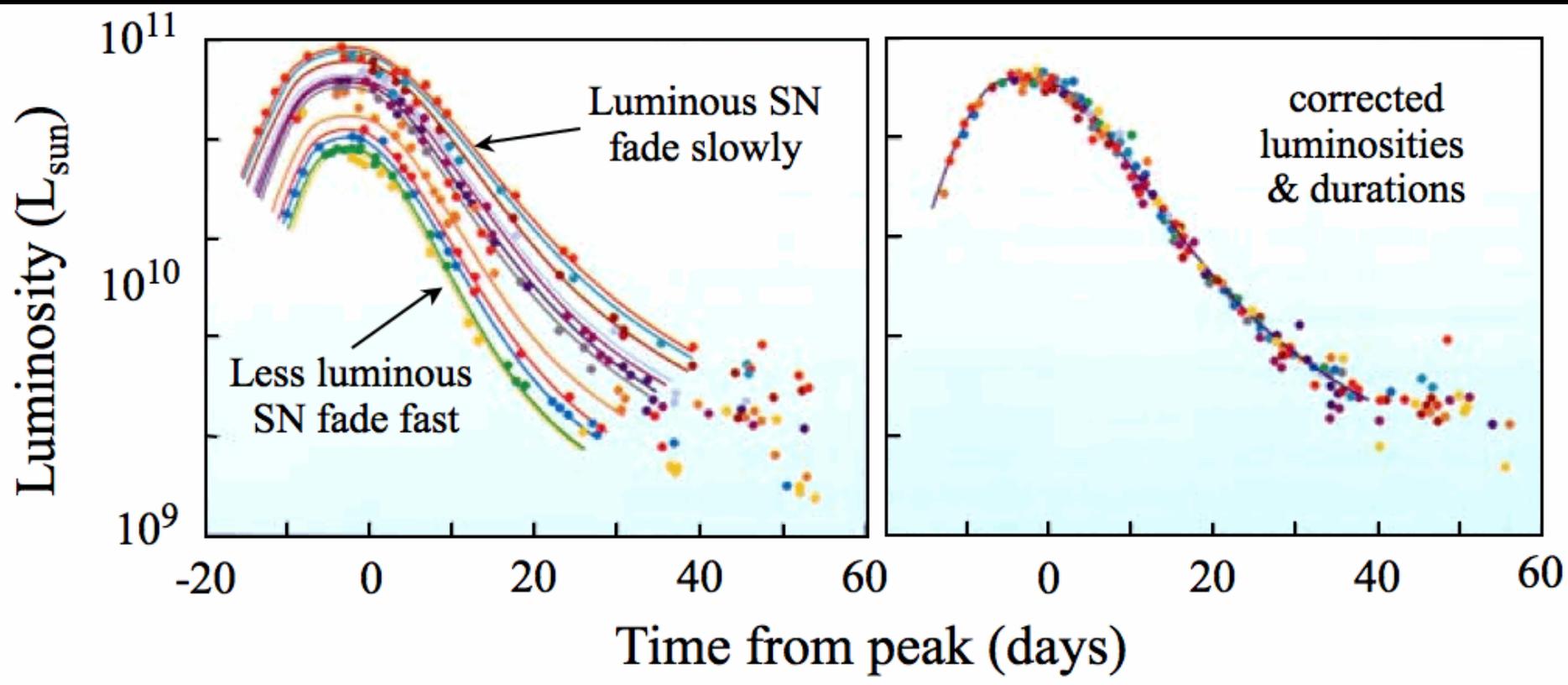


$$m - M = 5 \log D - 5$$



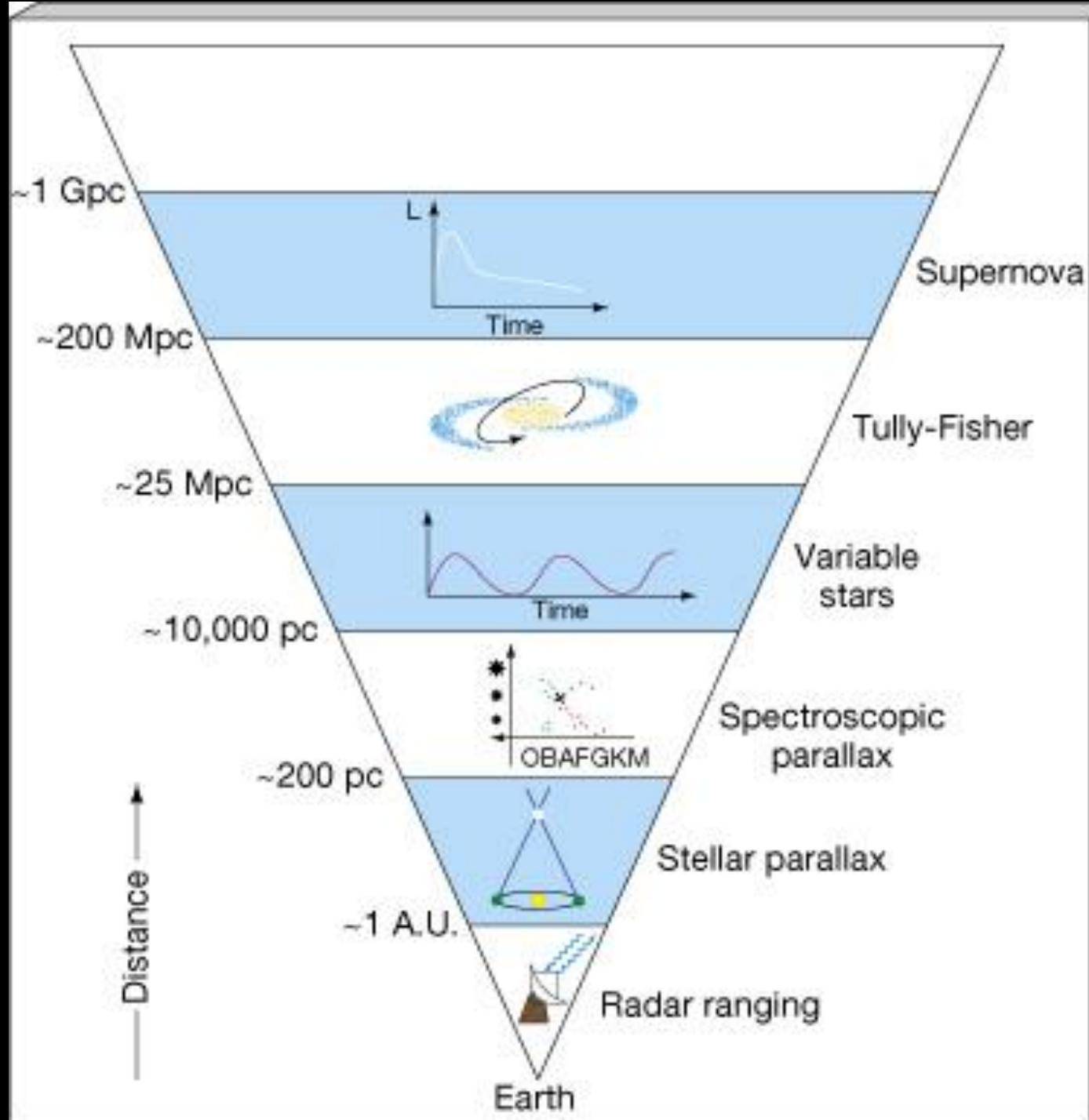
SUPERNOVAS DE TIPO Ia

Curva de luz aproximadamente similar entre todas as SNIa independente da progenitora

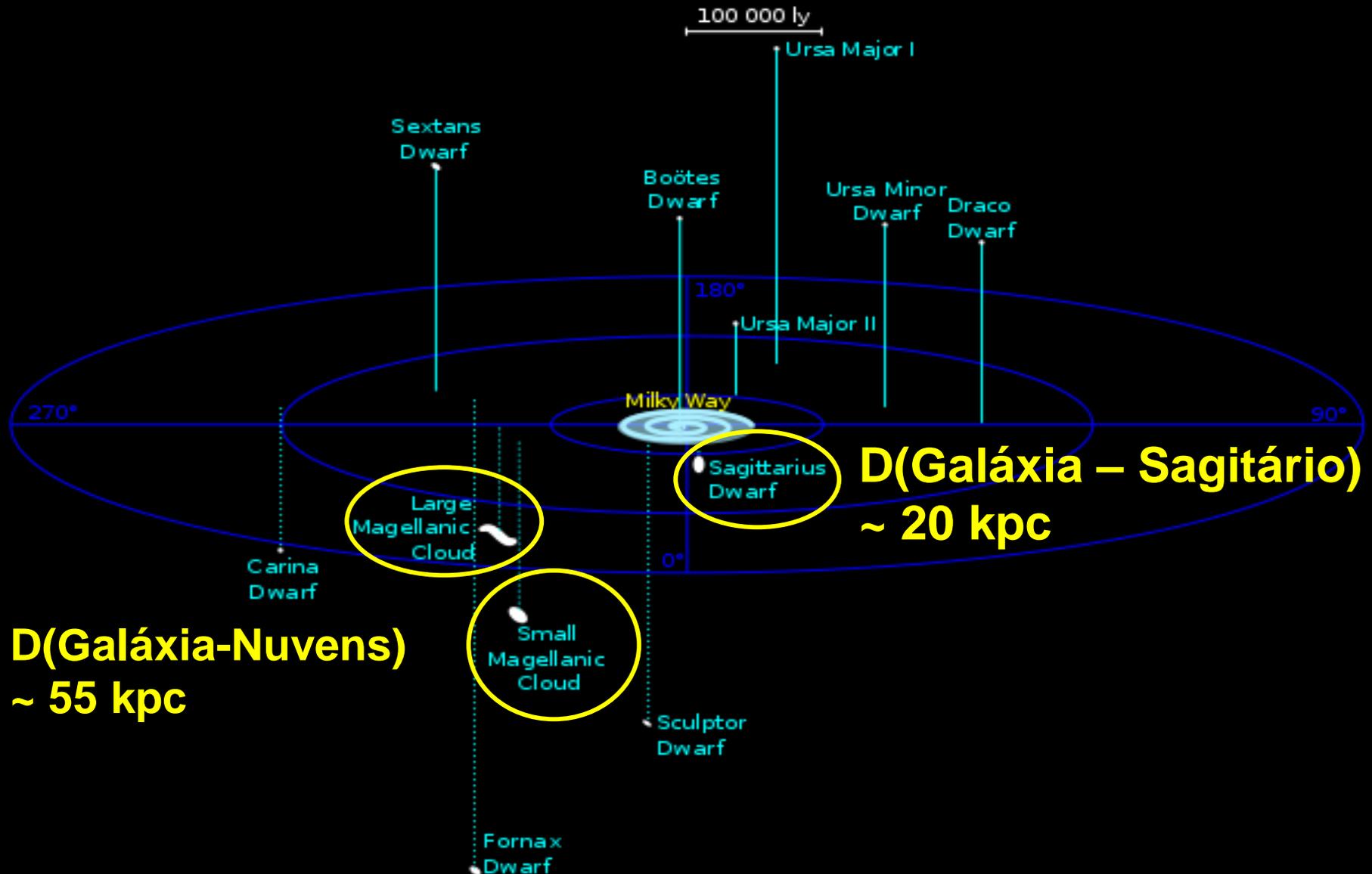


Máximo de luminosidade $\sim 10^{11} L_{\odot}$

$m - M = 5 \log D - 5$



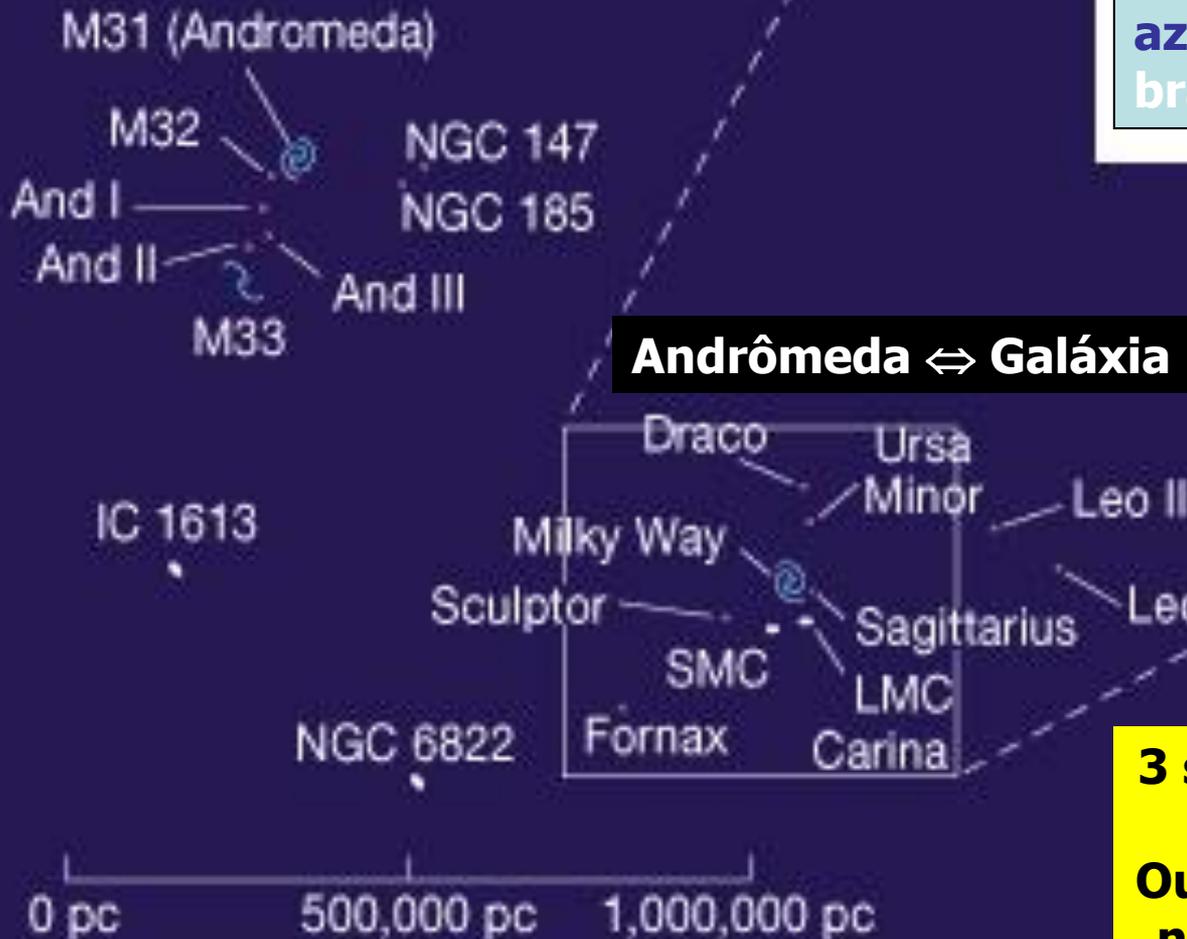
A nossa Galáxia forma um pequeno grupo com as suas satélites : **Nuvens de Magalhães, a elíptica anã Sagitário, outras elípticas anãs e irregulares anãs .**



O GRUPO LOCAL

Grupo Local consiste em:

Nossa Galáxia + Andrômeda + dezenas de galáxias menores



vermelho: elípticas anãs
azul: espirais
branco: irregulares

~ 50 galáxias no total

Andrômeda ↔ Galáxia : 800 kpc

3 são espirais: nossa Galáxia + Andrômeda + M33
Outras: elípticas anãs (maior número) e irregulares anãs

Andrômeda e suas galáxias satélites

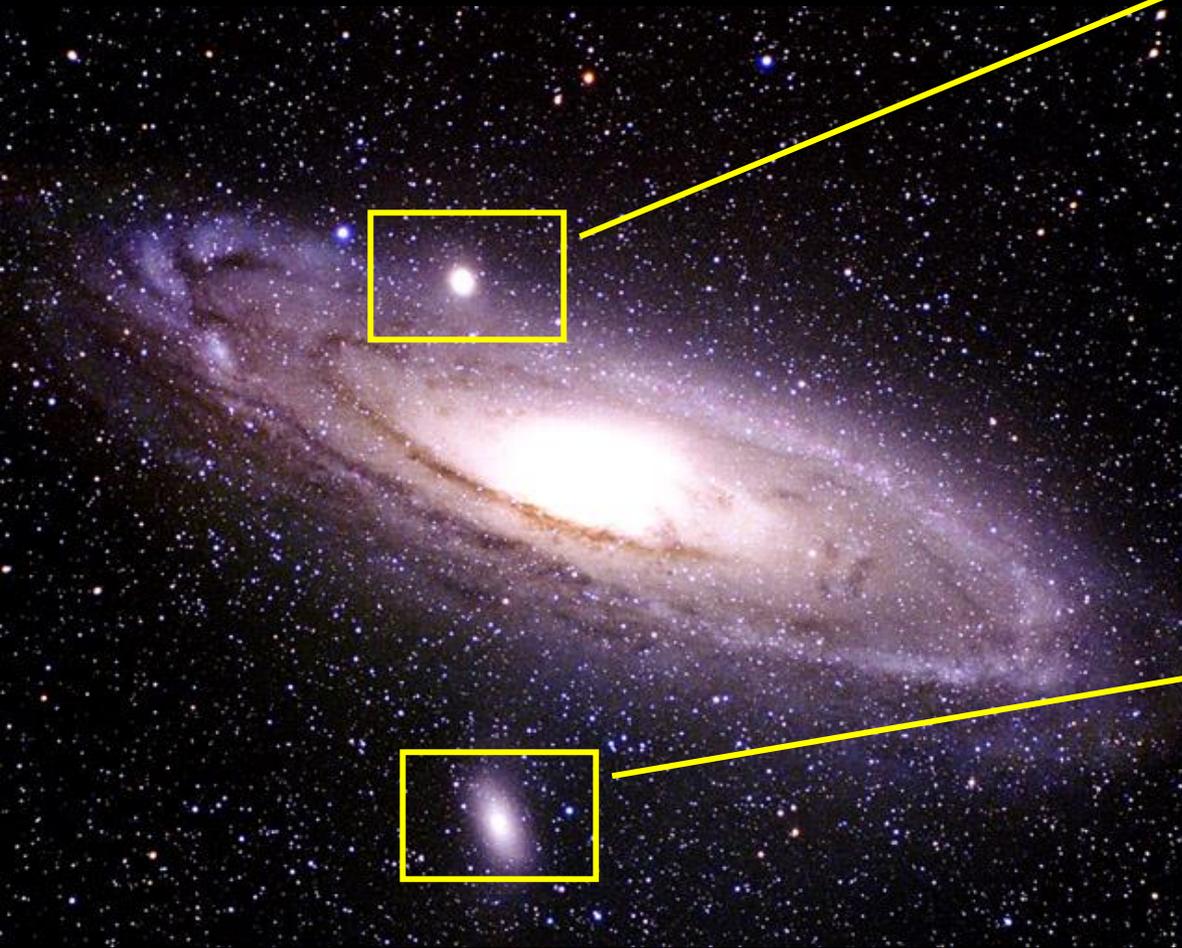
M32

Elíptica anã



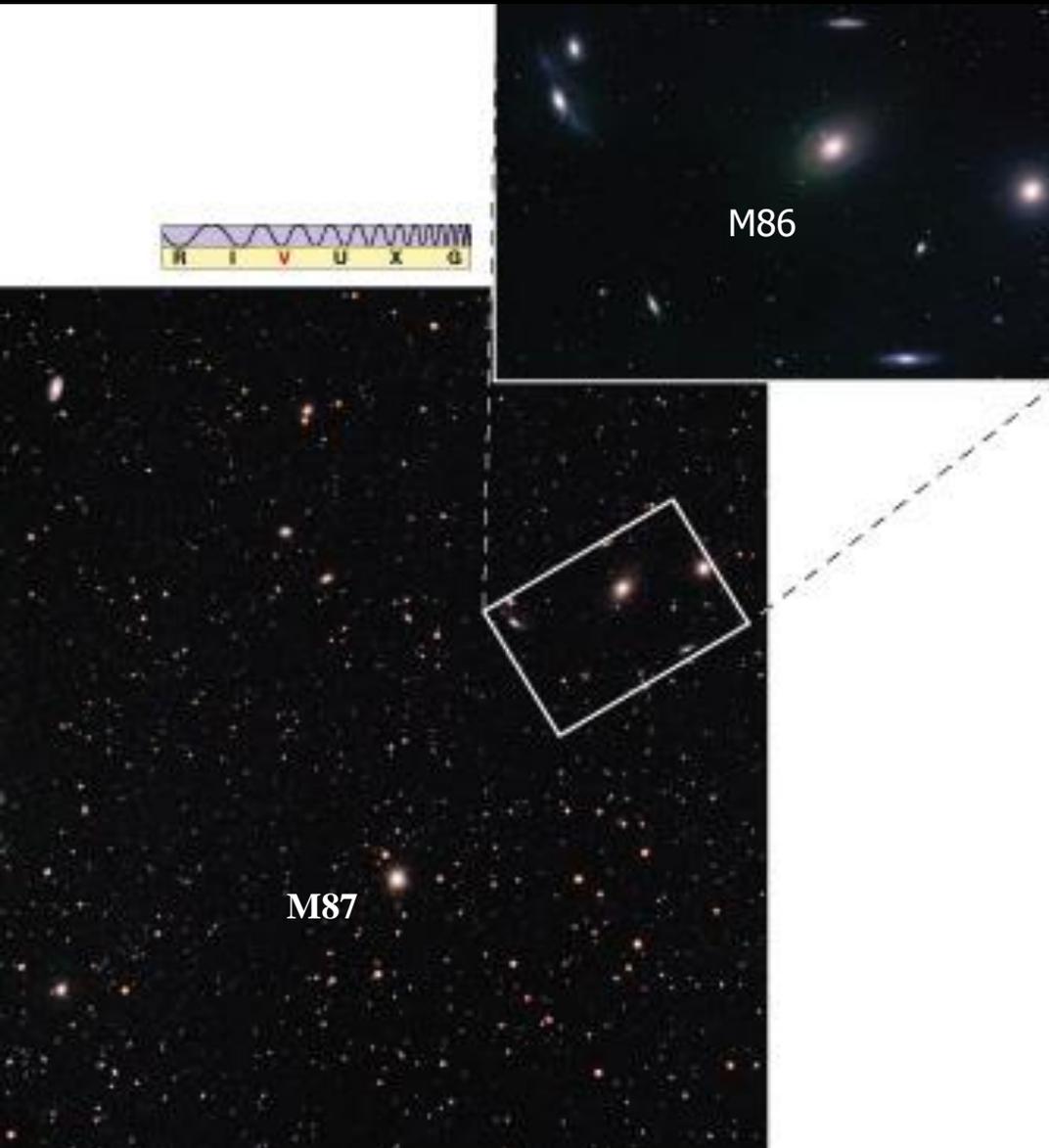
M33

espiral



A próxima concentração de galáxias:

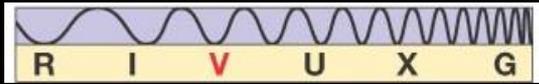
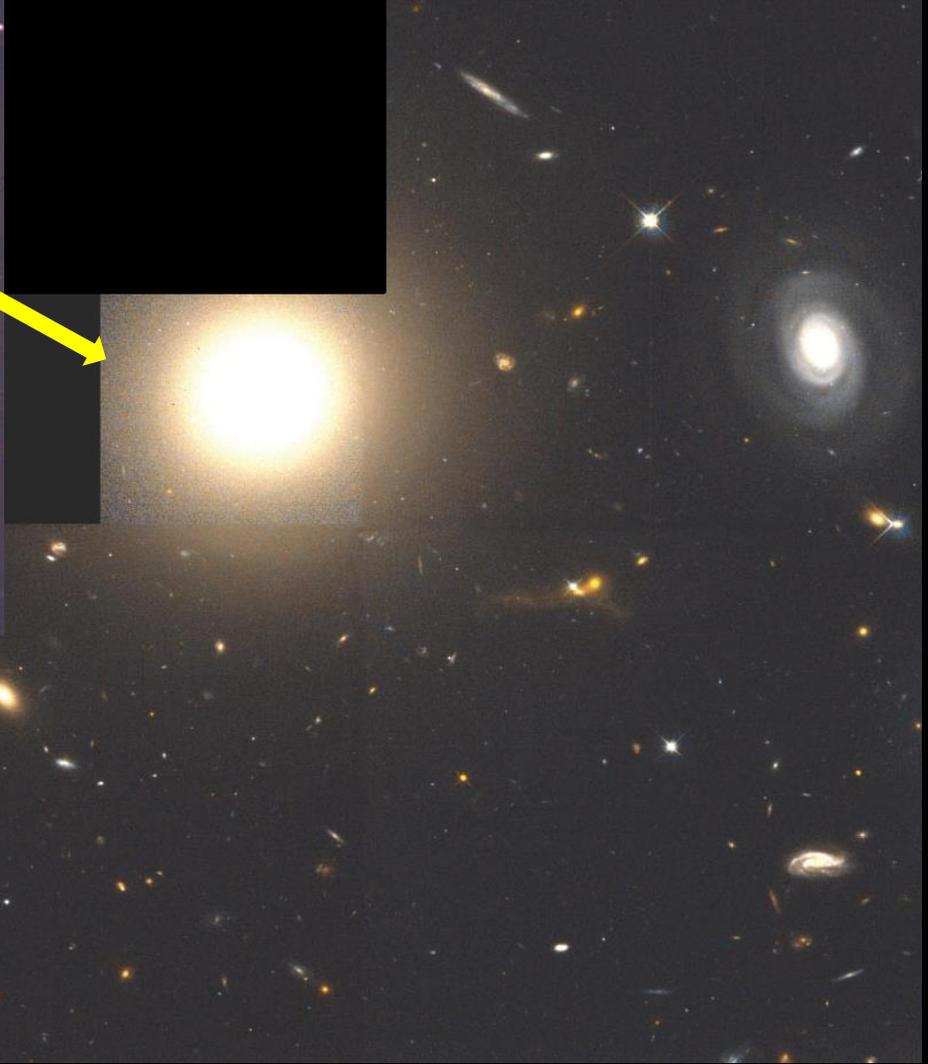
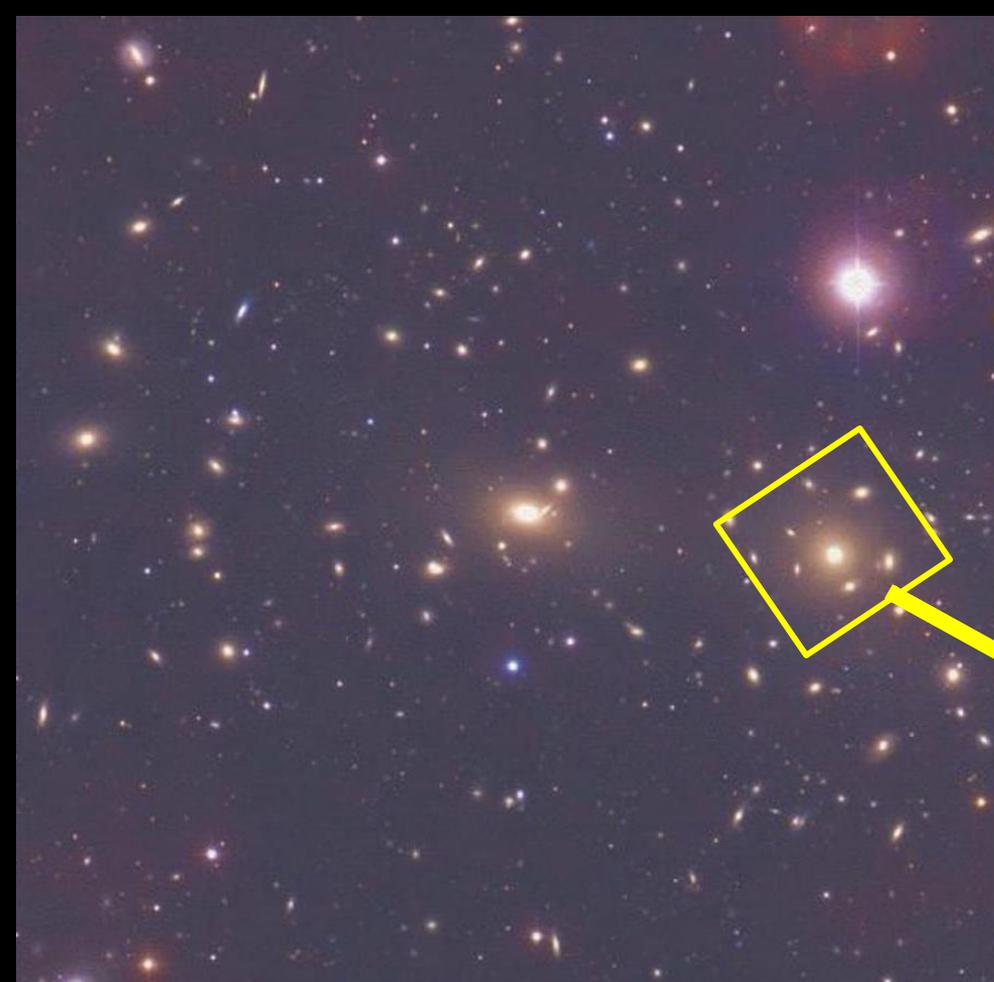
AGLOMERADO DE VIRGEM



- Contém $> \sim 3500$ galáxias
- 3 Mpc de dimensão

17 Mpc da Galáxia

M86 e M87 são elípticas gigantes



**Aglomerado de Coma
(100 Mpc da MW)**

Aglomerado Abell 1689

613 Mpc da MW
2,5 bilhões de
anos-luz



Espera-se que: galáxias em um aglomerado se movam de maneira randômica

Mas em maior escala : galáxias e aglomerados se movem de maneira ordenada.

A LEI DE HUBBLE

Vesto Slipher (1917) observou que numa amostra de 40 galáxias espirais, a maioria tinha espectros deslocados para o vermelho (movimento de afastamento (RECESSÃO) em relação à nossa Galáxia)

- O espectro medido da maior parte das galáxias, em todas as direções no céu, apresenta linhas com deslocamento para λ s maiores em relação ao λ em repouso (**REDSHIFT**).

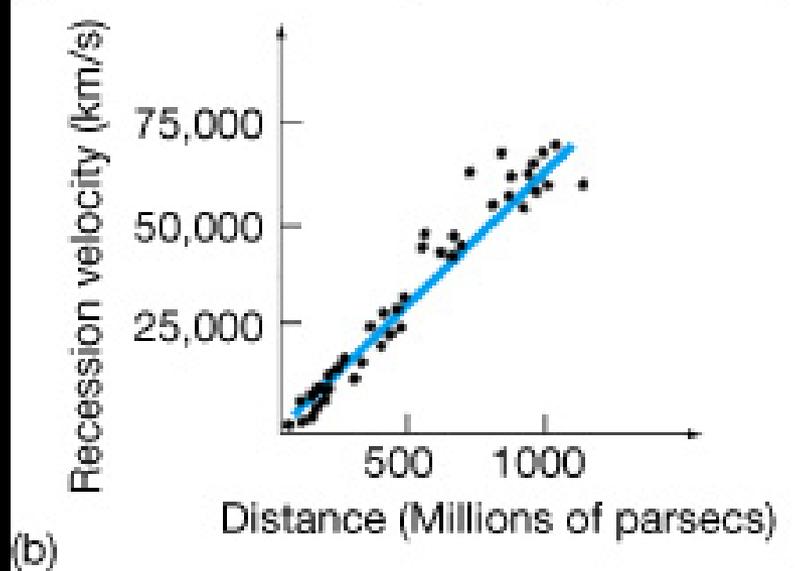
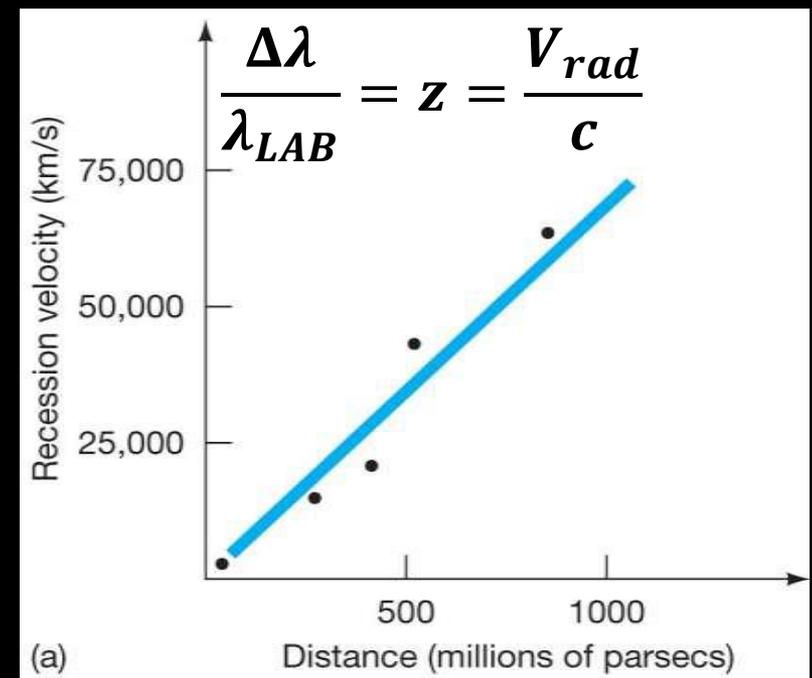
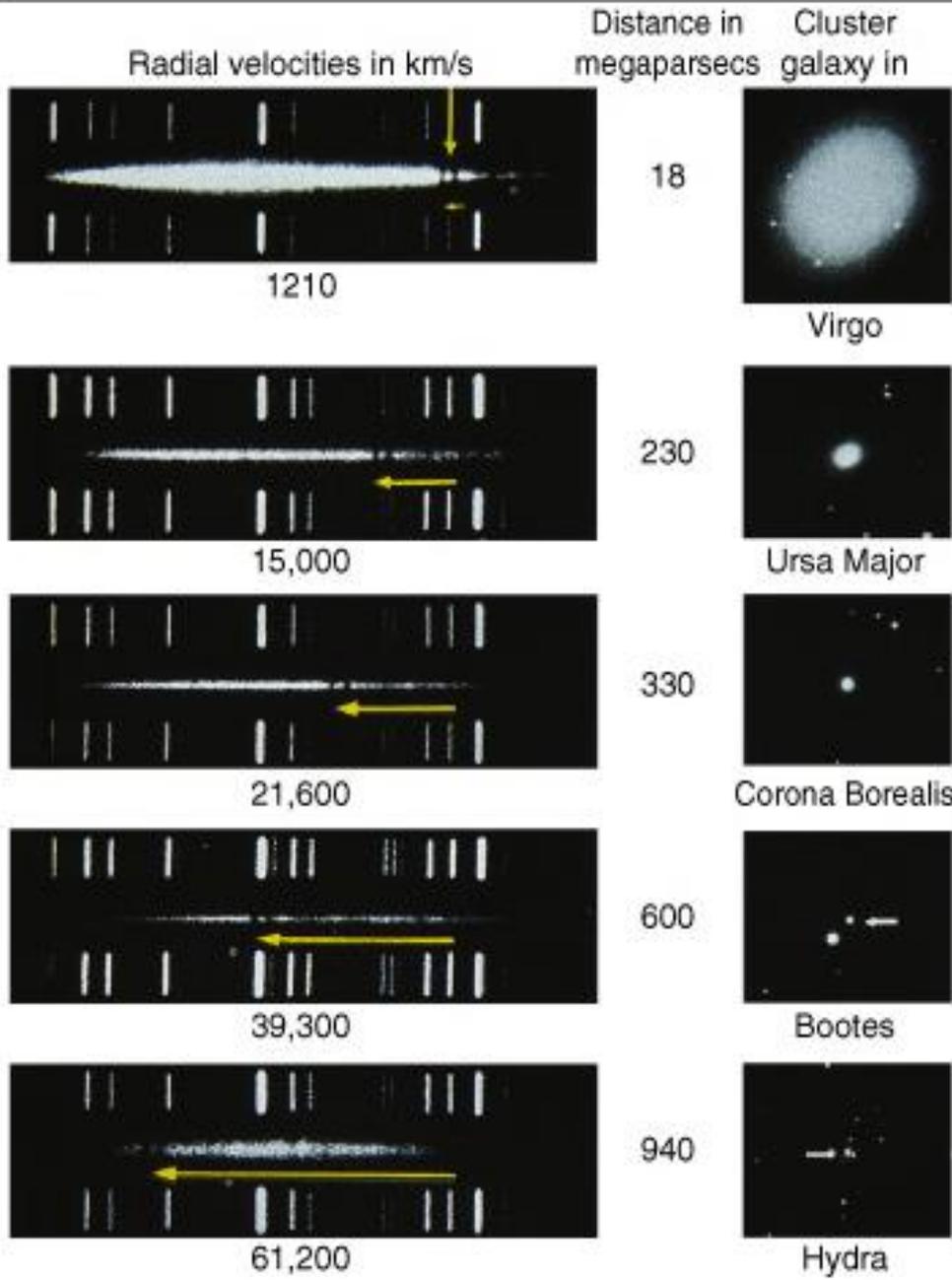
$$\frac{\lambda_{obs} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V}{c} \quad \Delta\lambda > 0$$

- Efeito observado em grandes escalas (distâncias)

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \equiv Z$$

$$Z = \text{redshift}$$

Através do redshift mede-se v: DIAGRAMAS DE HUBBLE



A taxa na qual alguma galáxia se afasta é \propto à distância
≡ lei de Hubble

vel. de recessão = H_0 × distância

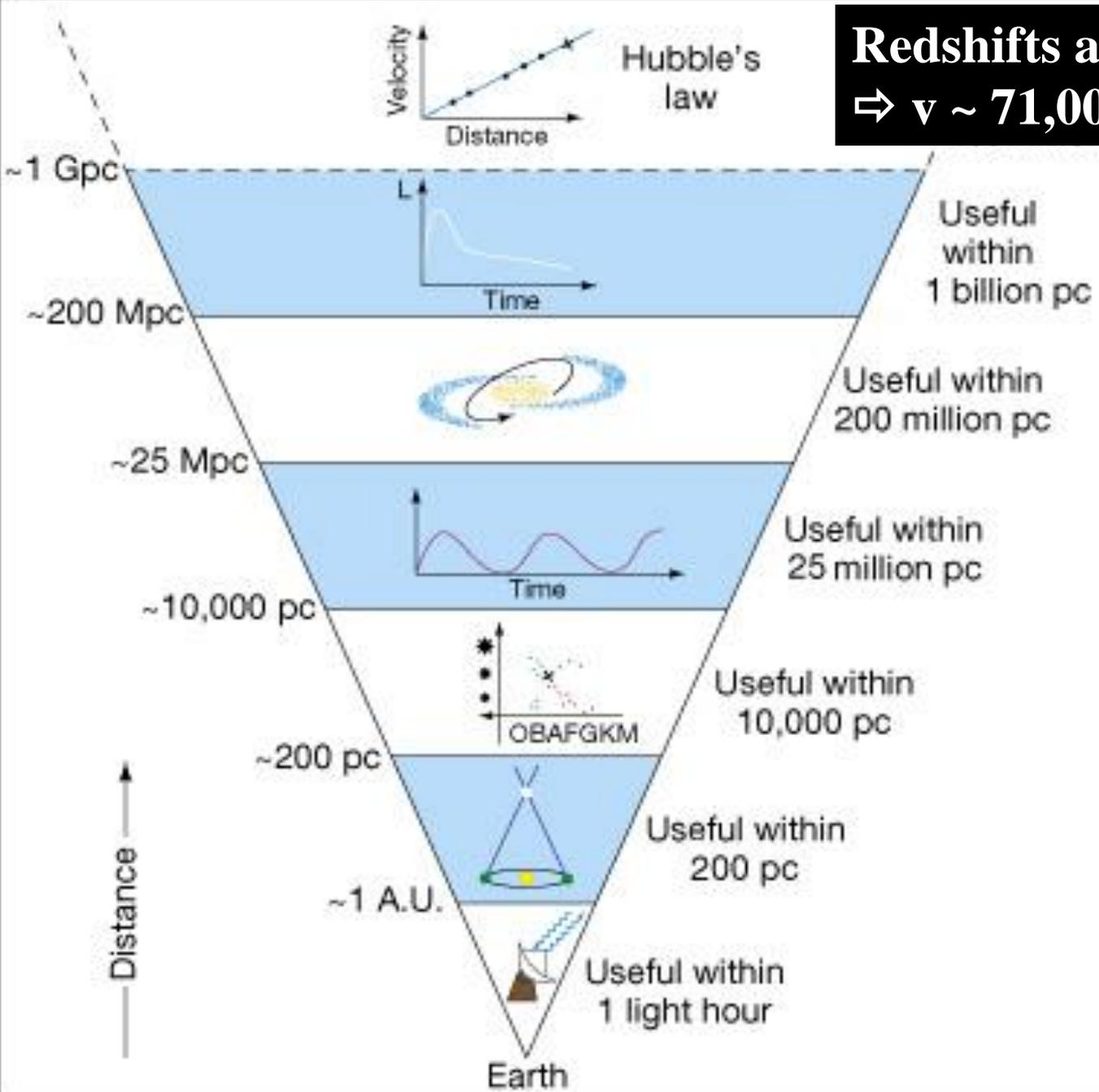
Constante de Hubble

$H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$ → incerteza de 10%

incerteza estimada levando-se
em conta todos os métodos de
determinação de distância

Redshifts até ~ 0,24

$\Rightarrow v \sim 71,000 \text{ km/s} : D \sim 1 \text{ Gpc}$



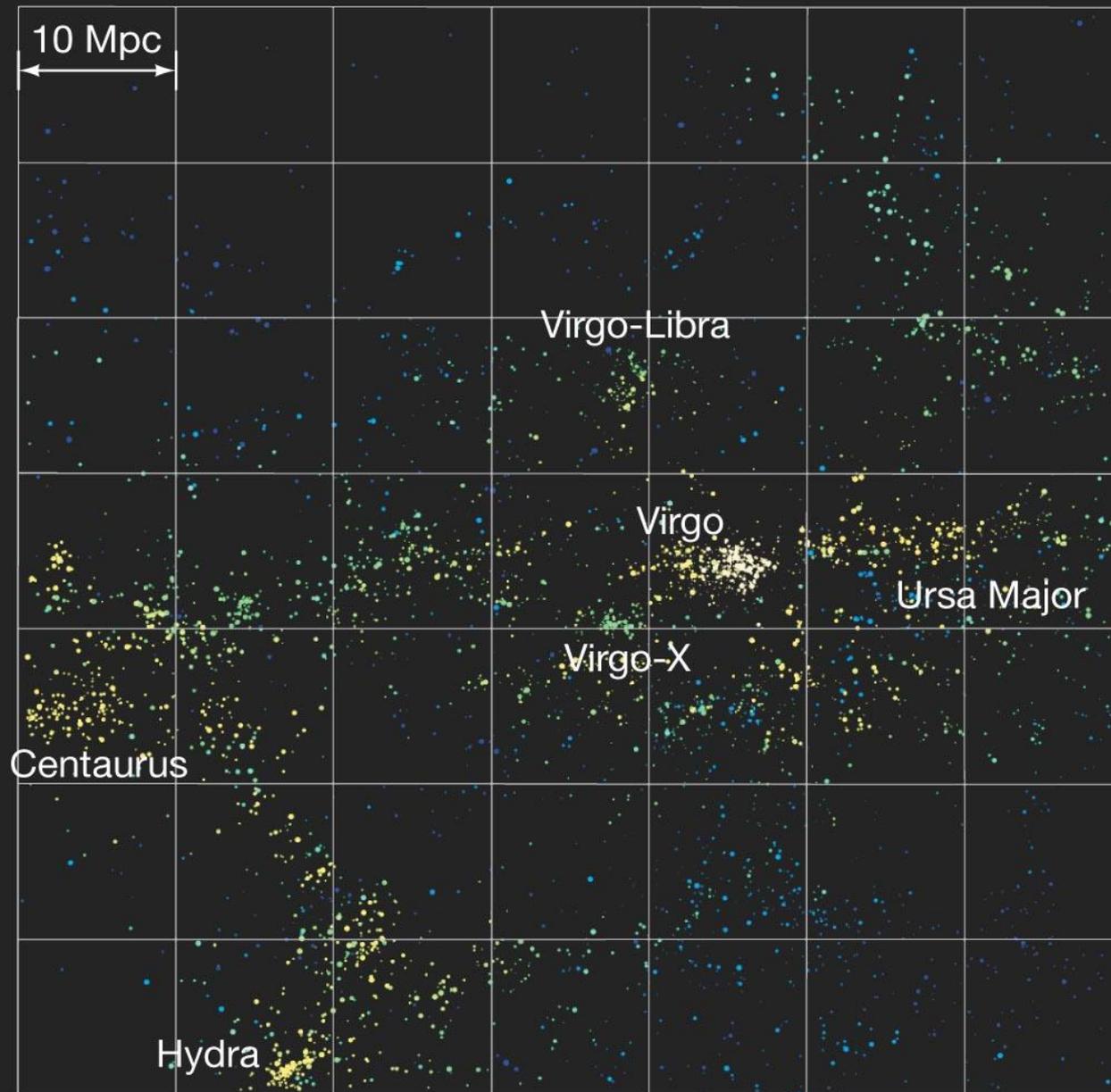
Usando todos os indicadores de distância

**Mapeamento do universo
Aglomerados de aglomerados**



SUPERAGLOMERADOS

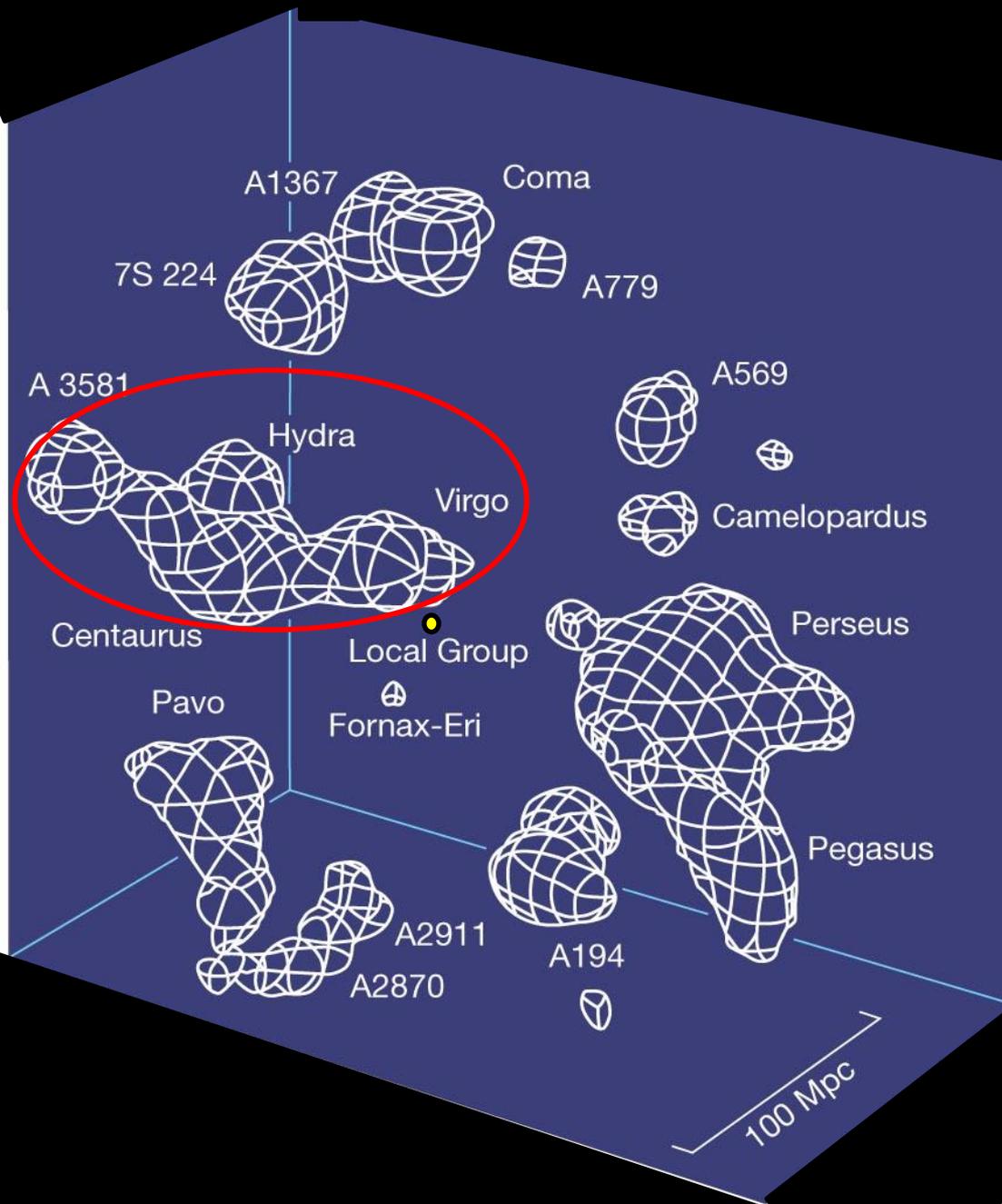
O SUPERAGLOMERADO LOCAL (superaglomerado de Virgem)



Tamanho total ~
40 -50 Mpc
Tamanho irregular e
alongado
 $10^{15} M_{\odot}$

Branco e amarelo =
regiões + densas

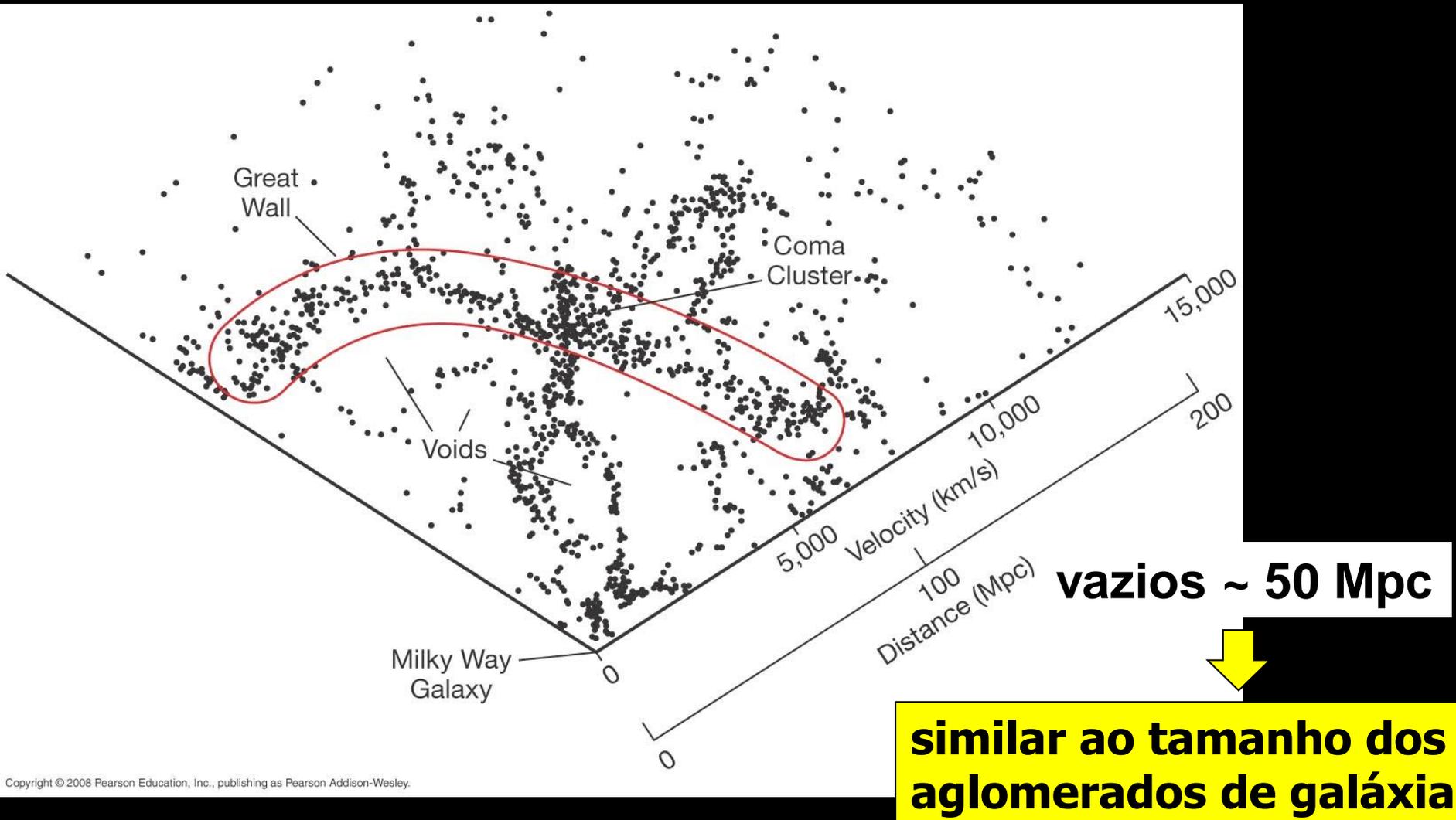
Verde e azul =
menos densas

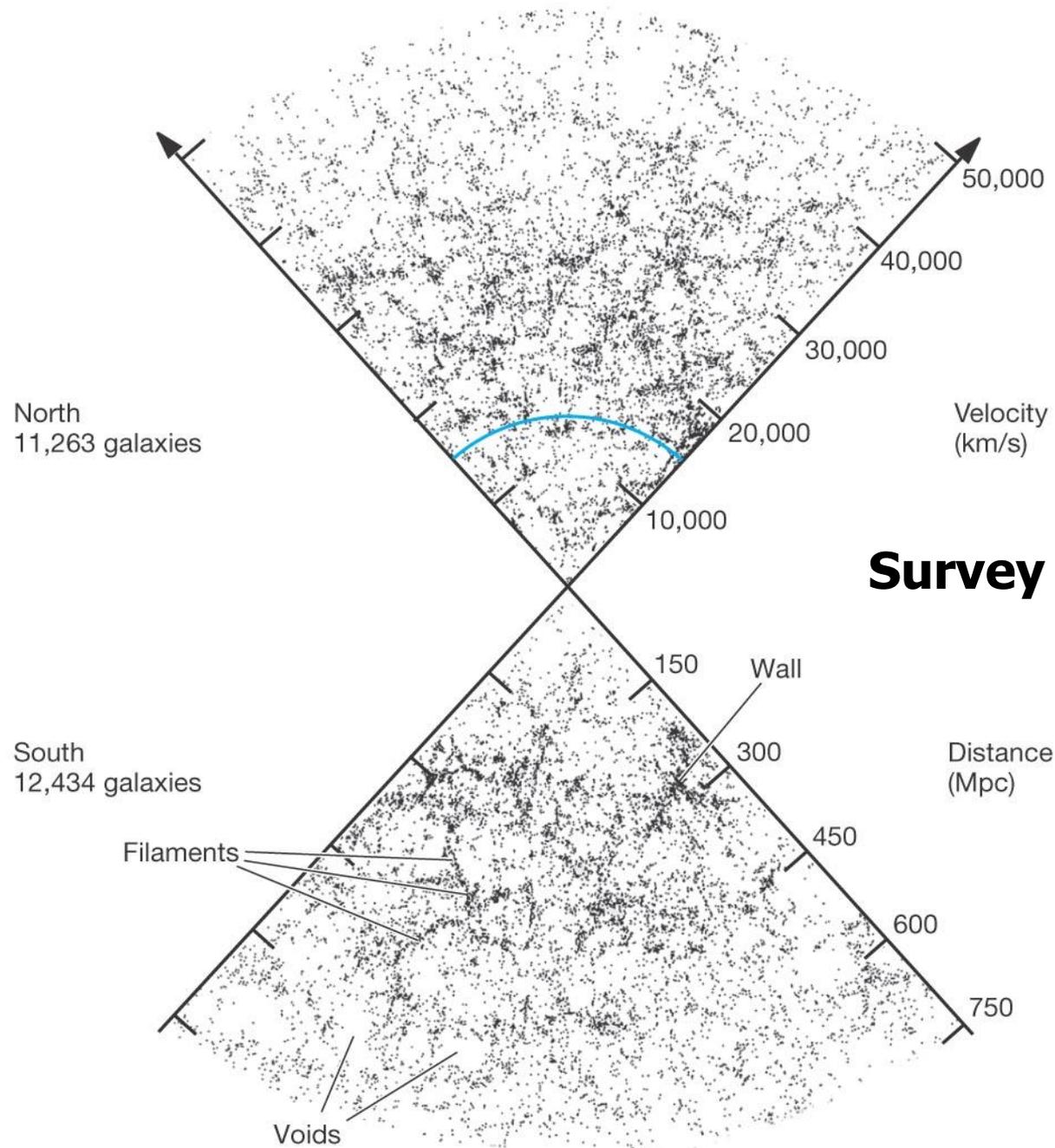


Grupo Local na periferia do Superaglomerado Local ou Superaglomerado de Virgem

muitos superaglomerados apresentam estruturas filamentosares ou paredes (assinalado em vermelho na fig.)

“Redshift Survey” com 1732 galáxias





Survey com 24.000 galáxias

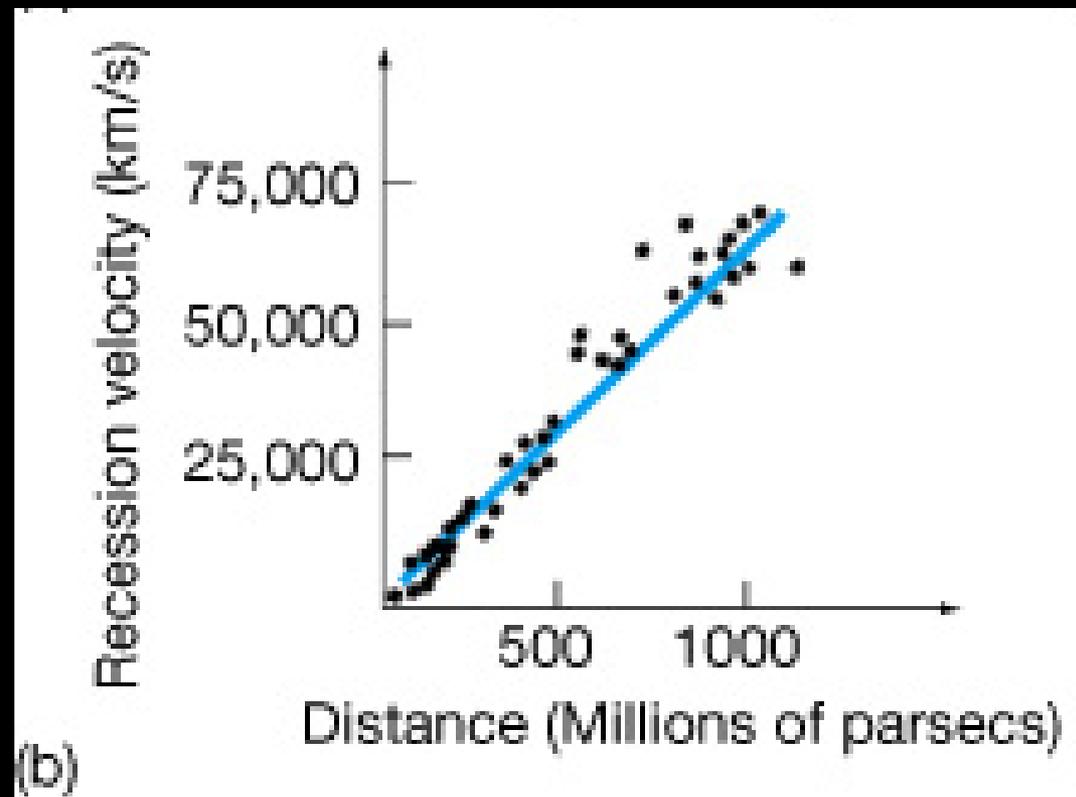
COSMOLOGIA

IMPLICAÇÕES DA LEI DE HUBBLE

A taxa na qual alguma galáxia se afasta é \propto à distância
 \equiv lei de Hubble

LEI DE HUBBLE:
Velocidade de recessão = $H_0 \times$ distância

lei empírica:
relação encontrada
através das
observações



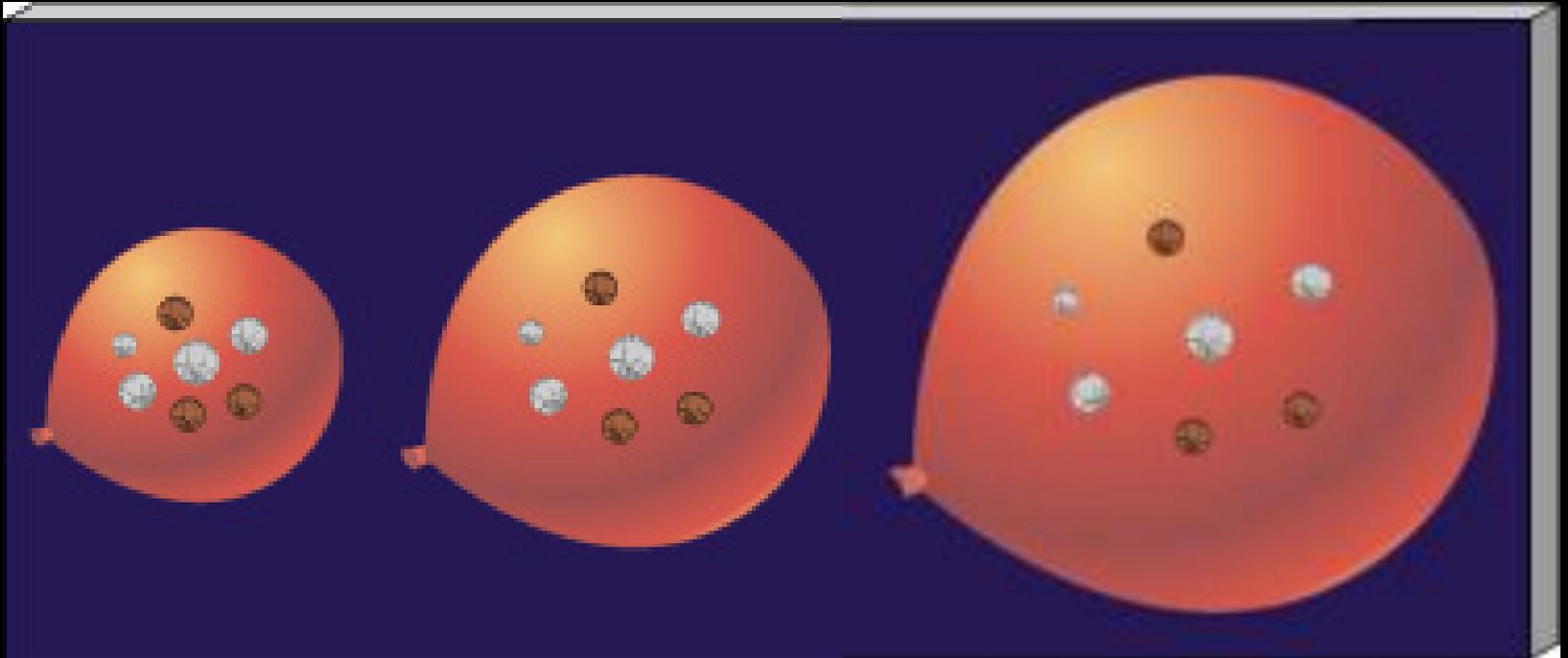
Principal consequência da lei de Hubble

UNIVERSO NÃO É ESTÁTICO E SIM DINÂMICO

UNIVERSO ESTÁ EM EXPANSÃO

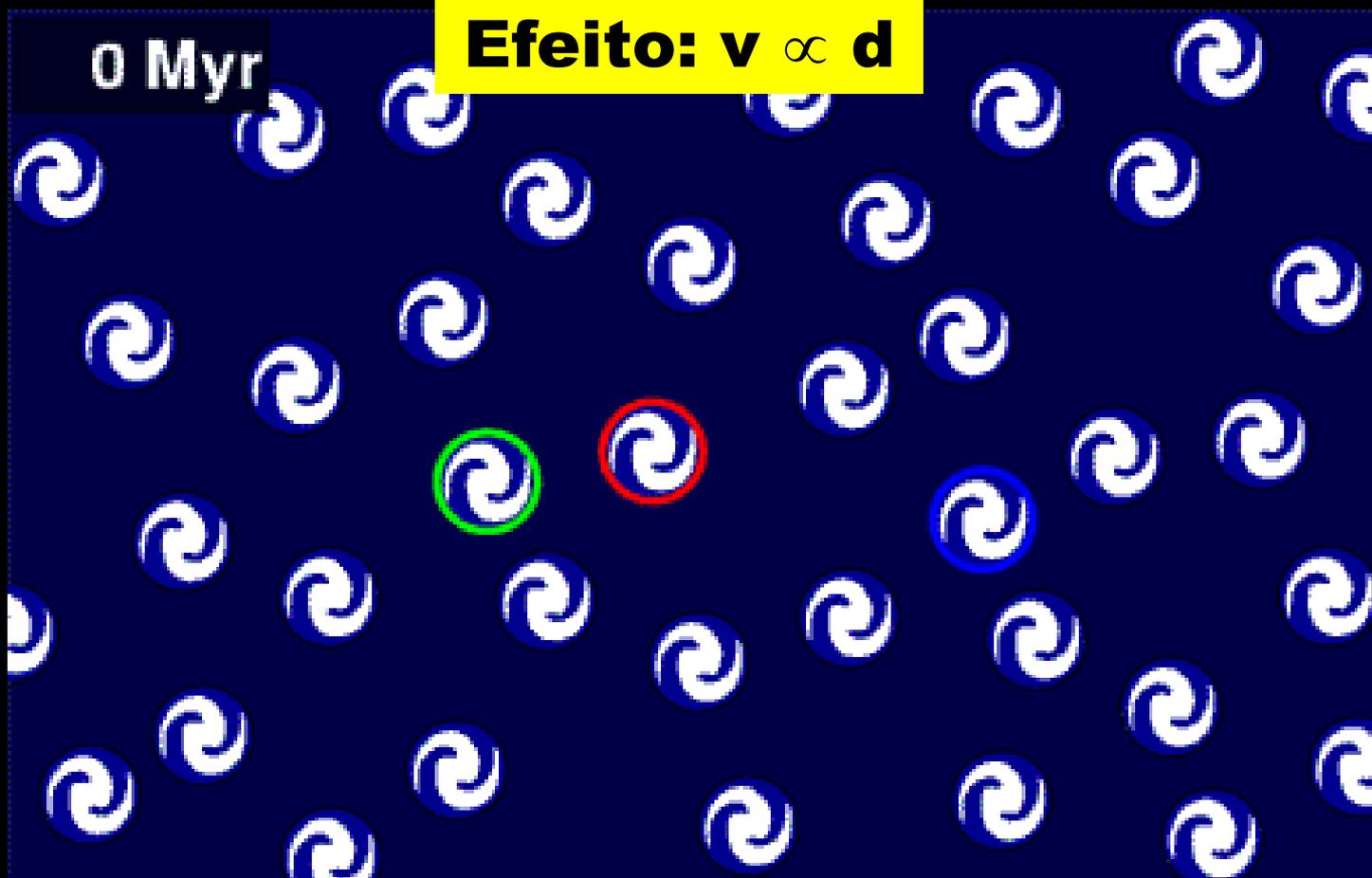
**Fluxo de Hubble → redshift cosmológico
(não relacionado a movimento individual
das galáxias e sim à expansão do universo)**

**Visualização da expansão do universo:
superfície do balão = visão bidimensional do universo
moedas = galáxias**



Atenção: como o próprio exemplo mostra, as galáxias não estão se expandindo internamente! As estrelas de cada uma delas estão ligadas pelas suas próprias forças internas (assim como estrelas, planetas, pessoas, átomos).

a expansão do universo não é um movimento das galáxias no espaço, mas sim uma expansão do próprio espaço



Para cada galáxia, a velocidade média com que ela se afasta de nossa galáxia é a variação da distância dividida pelo tempo:

• $v_{\text{verde}} = (1 \text{ M anos-luz}) / 100 \text{ M anos} = 0,01 \text{ anos-luz/ano} = 3000 \text{ km/s.}$

• $v_{\text{azul}} = (2 \text{ M anos-luz}) / 100 \text{ M anos} = 0,02 \text{ anos-luz/ano} = 6000 \text{ km/s.}$

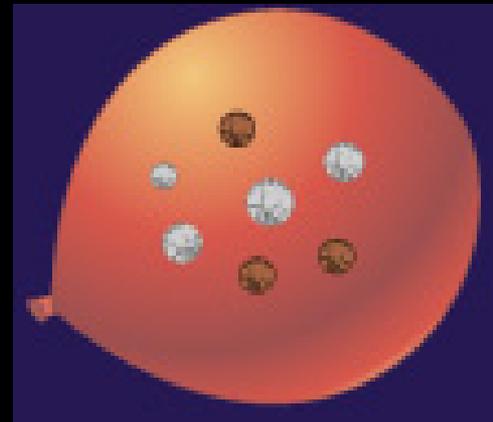
O REDSHIFT REINTERPRETADO

~~deslocamento
doppler~~

**Conceitualmente incorreto
falar em velocidade de
recessão de galáxias
apesar de se usar
frequentemente este
termo...**

**Galáxias se movem COM o universo e não
em relação ao mesmo**

**REDSHIFT COSMOLÓGICO -> mede a mudança de
tamanho do universo**



Ao invés de velocidade de recessão se usa *redshift* cosmológico Z

z é chamado de *redshift*

$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}}$$

Para v pequenas, ou seja, $z \ll 1$

$$z = \frac{v}{c}$$

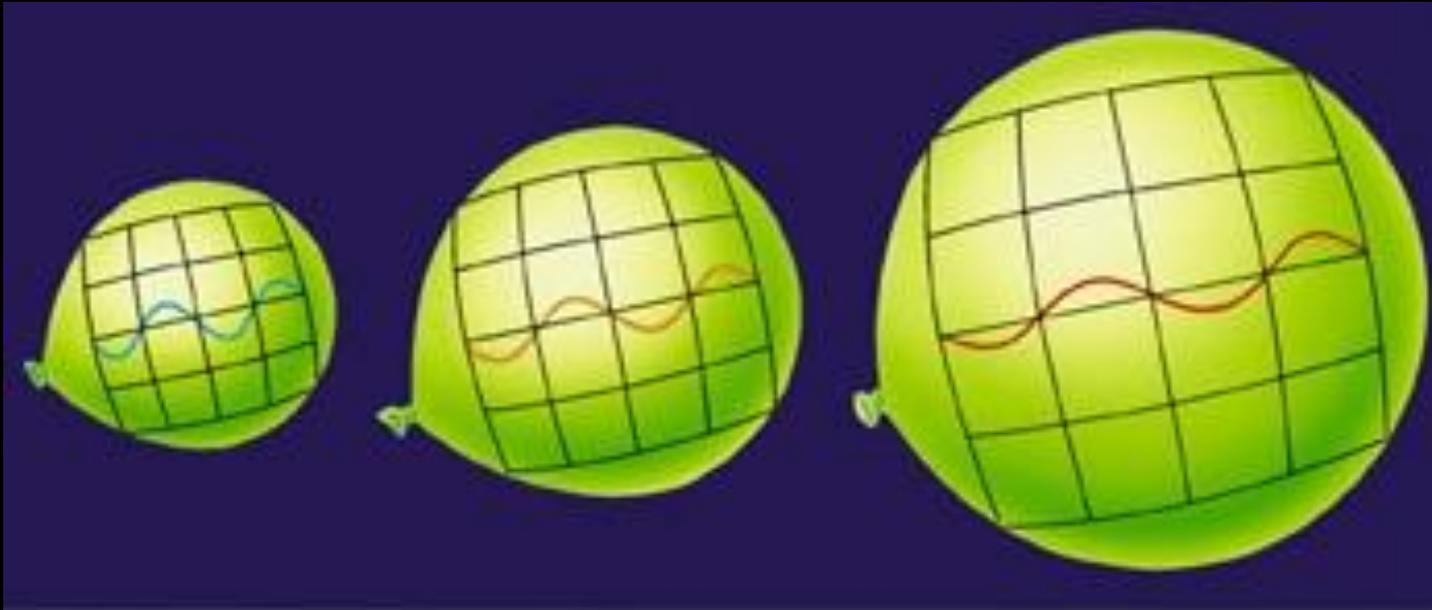
Se a velocidade de “afastamento” (efeito da expansão) for próxima a da luz, v não pode ser calculado pela fórmula acima!!

Fórmula da relatividade restrita:

$$1 + z = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Mas o que acontece com a luz então? Por que o aumento de comprimento de onda (redshift)?

Visão do que acontece com o fóton: o comprimento de onda se expande como se estivesse preso ao espaço que também se expande (efeito da TRG).



Na verdade o redshift de um fóton mede o quanto universo se expandiu desde que o fóton foi emitido.

Exemplo: o redshift medido de um quasar é $Z = 5$. Qual era o tamanho do universo na época em que este quasar emitiu a luz?

Expressão dada pela cosmologia relativística = relaciona a variação no comprimento de onda com a variação das escalas no universo.

$$R = \frac{R_{\text{atual}}}{6}$$

$$1+z = \frac{R_{\text{atual}}}{R}$$

universo tinha $\sim 1/6$ do tamanho atual quando o fóton foi emitido.

$$1+z = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$v \sim 95\% c$$

Definição ambígua de distância :

- distância da galáxia quando a mesma emitiu a luz que hoje observamos?
- distância atual da galáxia? (cálculo desta distância depende do modelo cosmológico adotado)

Usa-se: *redshift*

ou

look back time

Há quanto tempo o objeto emitiu a radiação que medimos hoje

Costuma-se usar *redshift* z para expressar tempo

TABLE 24.2 Redshift, Distance, and Look-Back Time

Redshift	V/C	Present Distance		Look-Back Time
		(Mpc)	(10 ⁶ light-years)	(millions of years)
0.000	0.000	0	0	0
0.010	0.010	42	137	137
0.025	0.025	105	343	338
0.050	0.049	209	682	665
0.100	0.095	413	1350	1290
0.200	0.180	809	2640	2410
0.250	0.220	999	3260	2920
0.500	0.385	1880	6140	5020
0.750	0.508	2650	8640	6570
1.000	0.600	3320	10,800	7730
1.500	0.724	4400	14,400	9320
2.000	0.800	5250	17,100	10,300
3.000	0.882	6460	21,100	11,500
4.000	0.923	7310	23,800	12,100
5.000	0.946	7940	25,900	12,500
6.000	0.960	8420	27,500	12,700
10.000	0.984	9660	31,500	13,200
50.000	0.999	12,300	40,100	13,600
100.000	1.000	12,900	42,200	13,700
∞	1.000	14,600	47,500	13,700

Para velocidades pequenas em relação a da luz:

distância atual(em anos-luz) ~ look-back time

Mas notar que... distância atual sempre um pouco maior ⇒ universo expande um pouco desde que a luz de uma dada galáxia foi emitida.

$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_v}{\lambda_v}$$

Para $v \leq 20\% c$: $z = \frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$

Para $v > 20\% c$:

$$1 + z = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = 1 + \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

TABLE 24.2 Redshift, Distance, and Look-Back Time

Redshift	V/C	Present Distance		Look-Back Time (millions of years)
		(Mpc)	(10 ⁶ light-years)	
0.000	0.000	0	0	0
0.010	0.010	42	137	137
0.025	0.025	105	343	338
0.050	0.049	209	682	665
0.100	0.095	413	1350	1290
0.200	0.180	809	2640	2410
0.250	0.220	999	3260	2920
0.500	0.385	1880	6140	5020
0.750	0.508	2650	8640	6570
1.000	0.600	3320	10,800	7730
1.500	0.724	4400	14,400	9320
2.000	0.800	5250	17,100	10,300
3.000	0.882	6460	21,100	11,500
4.000	0.923	7310	23,800	12,100
5.000	0.946	7940	25,900	12,500
6.000	0.960	8420	27,500	12,700
10.000	0.984	9660	31,500	13,200
50.000	0.999	12,300	40,100	13,600
100.000	1.000	12,900	42,200	13,700
∞	1.000	14,600	47,500	13,700

$$1 + z = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Para velocidades significativas em relação à da luz

Exemplo: um objeto cuja luz leva 12,1 bilhões de anos para chegar até nós não está atualmente a uma distância de ~12,1 bilhões de anos-luz e sim de 23,8 bilhões de anos-luz.

TABLE 24.2 Redshift, Distance, and Look-Back Time

Redshift	V/C	Present Distance		Look-Back Time (millions of years)
		(Mpc)	(10 ⁶ light-years)	
0.000	0.000	0	0	0
0.010	0.010	42	137	137
0.025	0.025	105	343	338
0.050	0.049	209	682	665
0.100	0.095	413	1350	1290
0.200	0.180	809	2640	2410
0.250	0.220	999	3260	2920
0.500	0.385	1880	6140	5020
0.750	0.508	2650	8640	6570
1.000	0.600	3320	10,800	7730
1.500	0.724	4400	14,400	9320
2.000	0.800	5250	17,100	10,300
3.000	0.882	6460	21,100	11,500
4.000	0.923	7310	23,800	12,100
5.000	0.946	7940	25,900	12,500
6.000	0.960	8420	27,500	12,700
10.000	0.984	9660	31,500	13,200
50.000	0.999	12,300	40,100	13,600
100.000	1.000	12,900	42,200	13,700
∞	1.000	14,600	47,500	13,700

Quasar z=2 observado com m=23

Distância atual $R_{\text{atual}}=5250$ Mpc

Usando a relação tamanho e redshift:

$$\frac{R_{\text{atual}}}{R} = 3$$

Pode-se determinar qual a distância que o quasar estava de nós quando emitiu a luz que se observa hoje:

$$\frac{5,25 \text{ Gpc}}{R} = 3$$

R = 1,75 Gpc

Pode-se determina a luminosidade:

$$m - M = 5 \log D - 5$$

M=-18,22

$$M - M_{\odot} = -2,5 \log \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)$$

L=1,57 bilhões de L_{\odot}

IMPLICAÇÕES DA LEI DE HUBBLE

***Redshift* está relacionado com a distância**

A lei de Hubble mostra muito mais do que a simples estimativa de distâncias...

- **Cálculo do TEMPO DE HUBBLE**

Assumindo que a taxa de expansão do universo permaneceu constante no tempo, podemos nos perguntar :

quanto tempo levou para que todas as galáxias chegassem às distâncias atuais ??

Usando a lei de Hubble, estimamos este tempo por:

$$tempo = \frac{distância}{velocidade} = \frac{\cancel{distância}}{H_0 \times \cancel{distância}}$$

$$tempo = \frac{1}{H_0}$$

$$tempo = \frac{1}{H_0}$$

Usando $H_0=71$ km/s/Mpc, chega-se a:
tempo = 13,7 Ganos!!!

A lei de Hubble implica necessariamente que há ~ 13,7 bilhões de anos atrás , “todas as galáxias estavam reunidas” num dado ponto (se $v=0$, $d=v/H_0 \Rightarrow d=0$) num dado instante $t=0$.

Este ponto (SINGULARIDADE) expandiu-se num dado tempo, fazendo com que as galáxias adquirissem as velocidades relativas hoje observadas (*redshift*).

$$tempo = \frac{1}{H_0}$$

O tempo de 13,7 bilhões de anos pode ser considerado como uma estimativa da idade do universo!

Isto implica que calculando H_0 através das medidas de redshifts \Rightarrow estimativa da idade do universo!!!

Mas há um erro considerável associado à estimativa de idade:

- 1. Incerteza no valor de H_0 .**
- 2. Assume-se que a velocidade de expansão permaneceu constante no tempo (não houve aceleração ou desaceleração).**

Conceito mais importante a ser levado em conta:

A idade do universo é finita \Rightarrow o universo teve um começo