

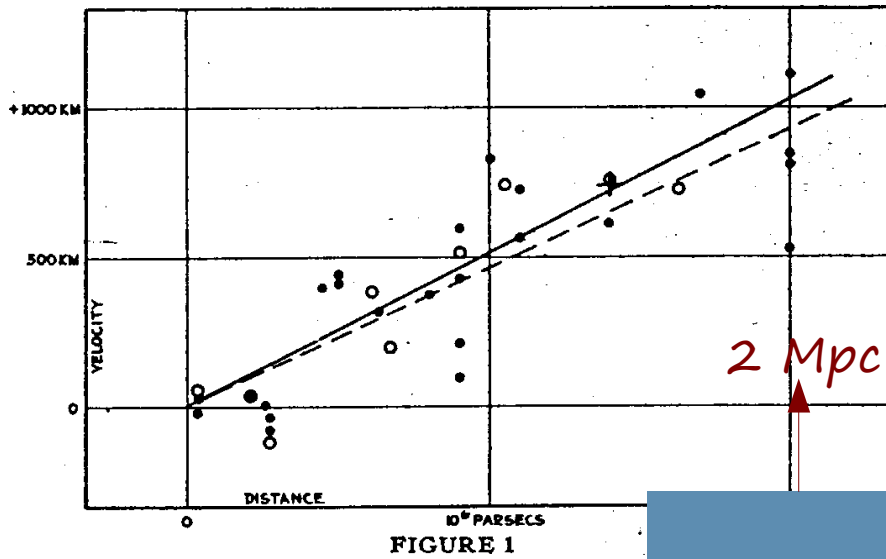
# Medindo parâmetros cosmológicos

## Aula 3

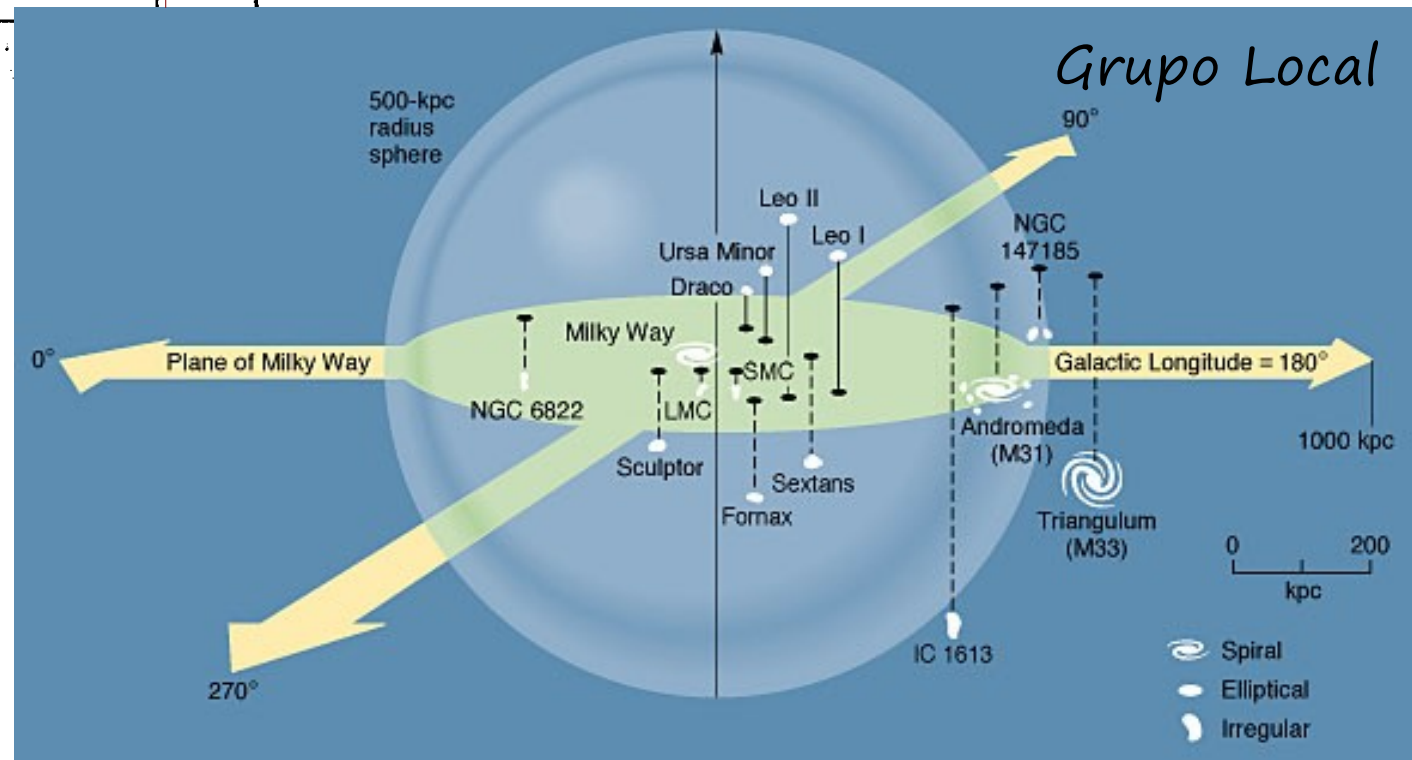
Introdução à Cosmologia

2012/02

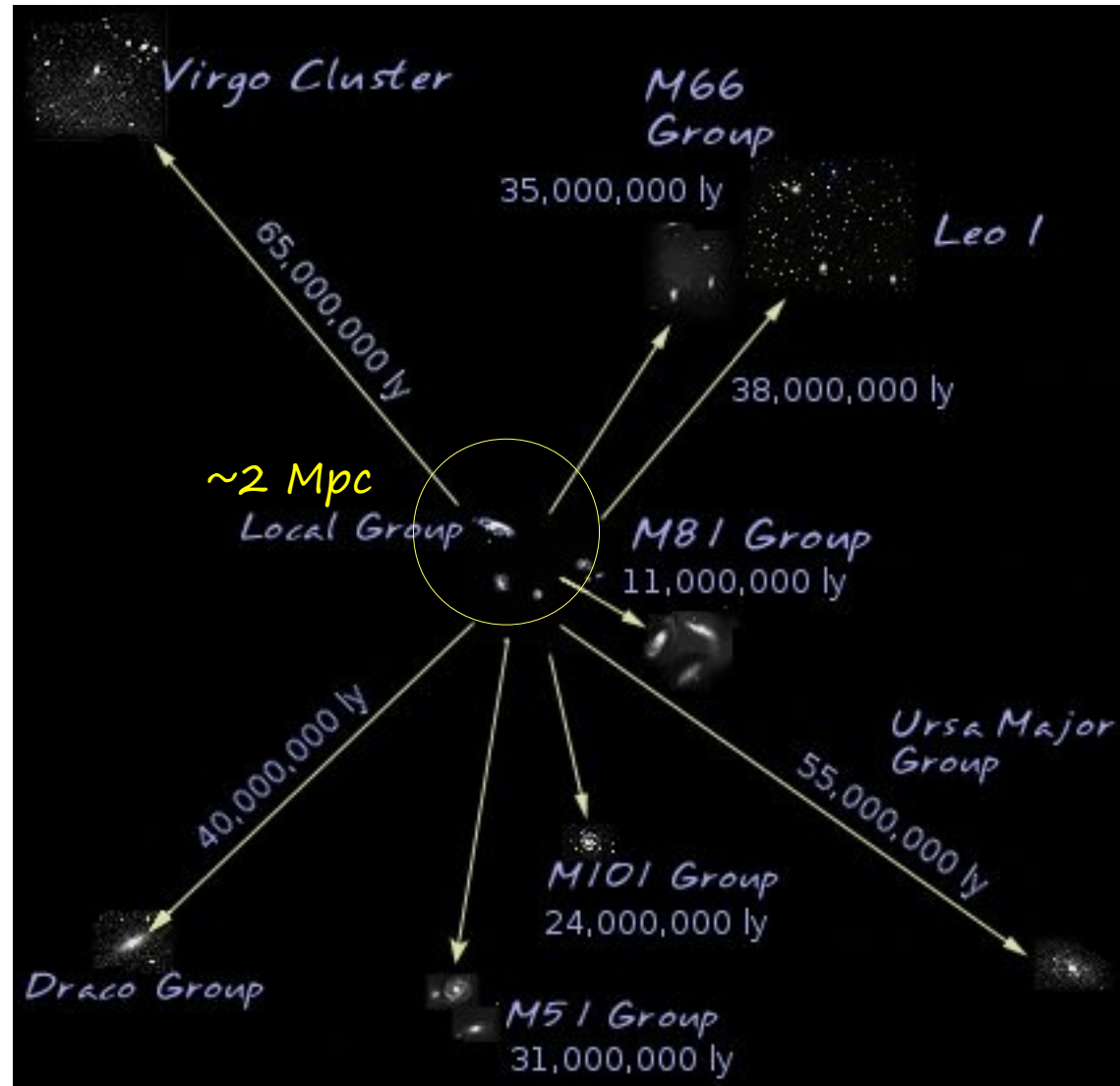
# Aula passada



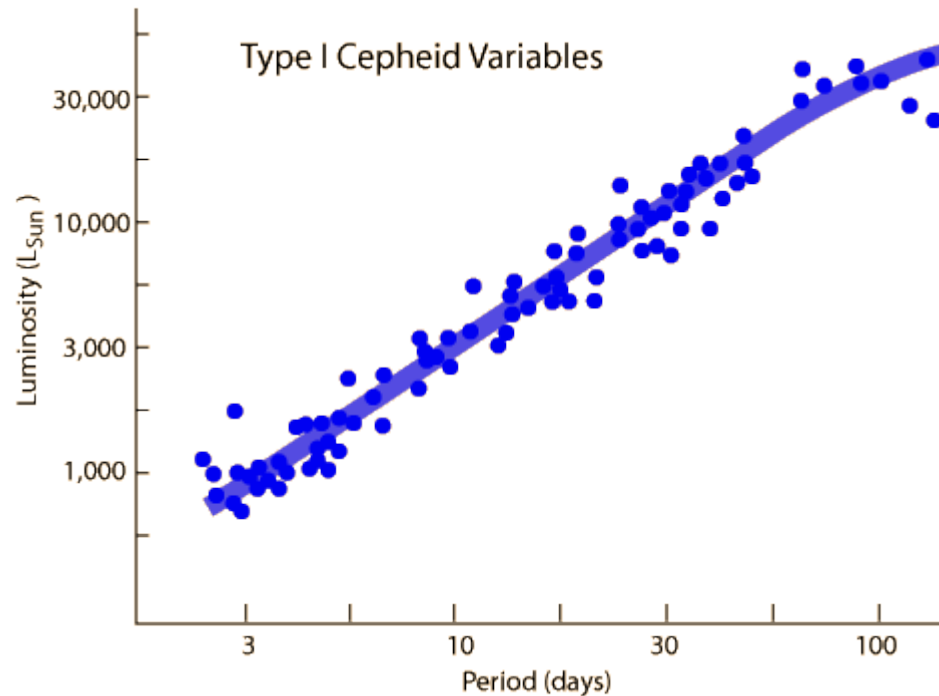
Vimos que Hubble usou variáveis cefeidas para medir  $H_0$ .



# Superaglomerado de Virgo



## Relação período-luminosidade para cefeidas



Magnitude absoluta nas bandas V e I:

$$M_V = -2.760 \log_{10} P - 1.458, \quad M_I = -2.962 \log_{10} P - 1.942$$

# Aceleração do Universo

---

Se quisermos detectar a aceleração do Universo (medir  $q_0$ ), temos que detectar velas padrão em distâncias maiores.

$$D_L \approx \frac{c}{H_0} z \left( 1 + \frac{1 - q_0}{2} z \right) = \boxed{\frac{c}{H_0} z} + \boxed{\frac{c}{H_0} \frac{1 - q_0}{2} z^2} = \text{Ryden}$$

Linear Desprezível

$z \ll 1$  para  $z \ll 1$

Temos que encontrar velas padrão que possam ser observadas a grandes distâncias.

$D_L > 100 \text{ Mpc}$  ( $z \sim 0.02$ ) – para que esteja no fluxo de Hubble

$D_L > 1.000 \text{ Mpc}$  ( $z \sim 0.2$ ) – para sair do regime linear

# Supernovas Ia (SNe Ia)

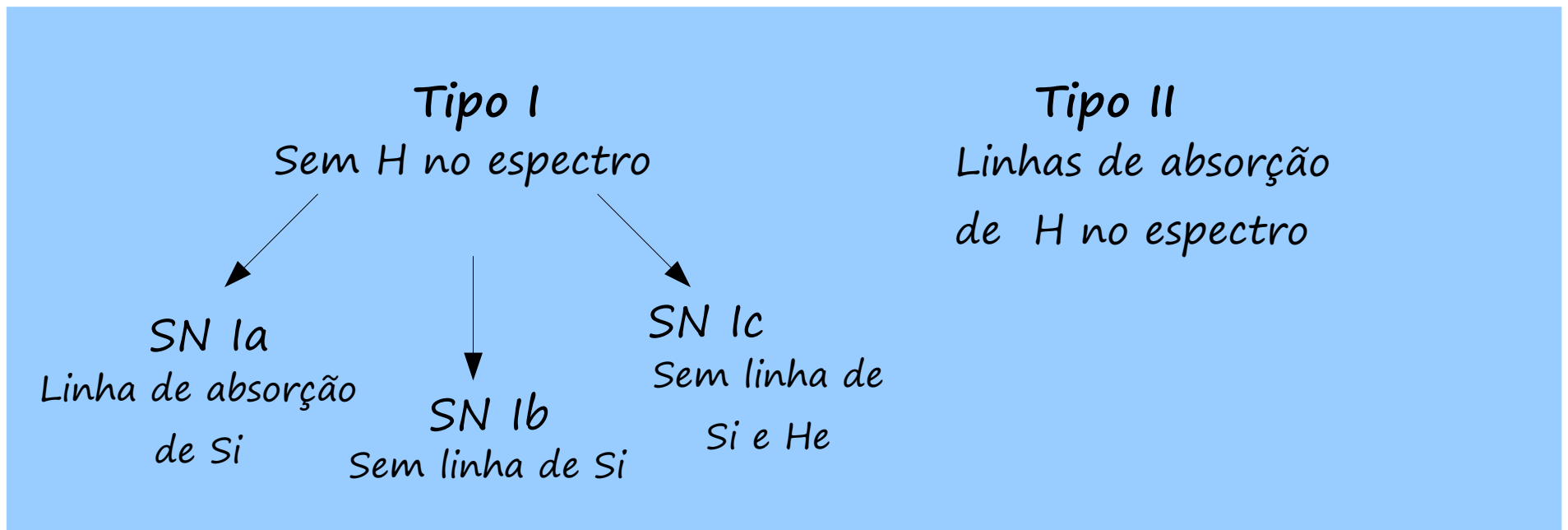
---

Explosões de estrelas muito mais luminosas que variáveis cefeidas.

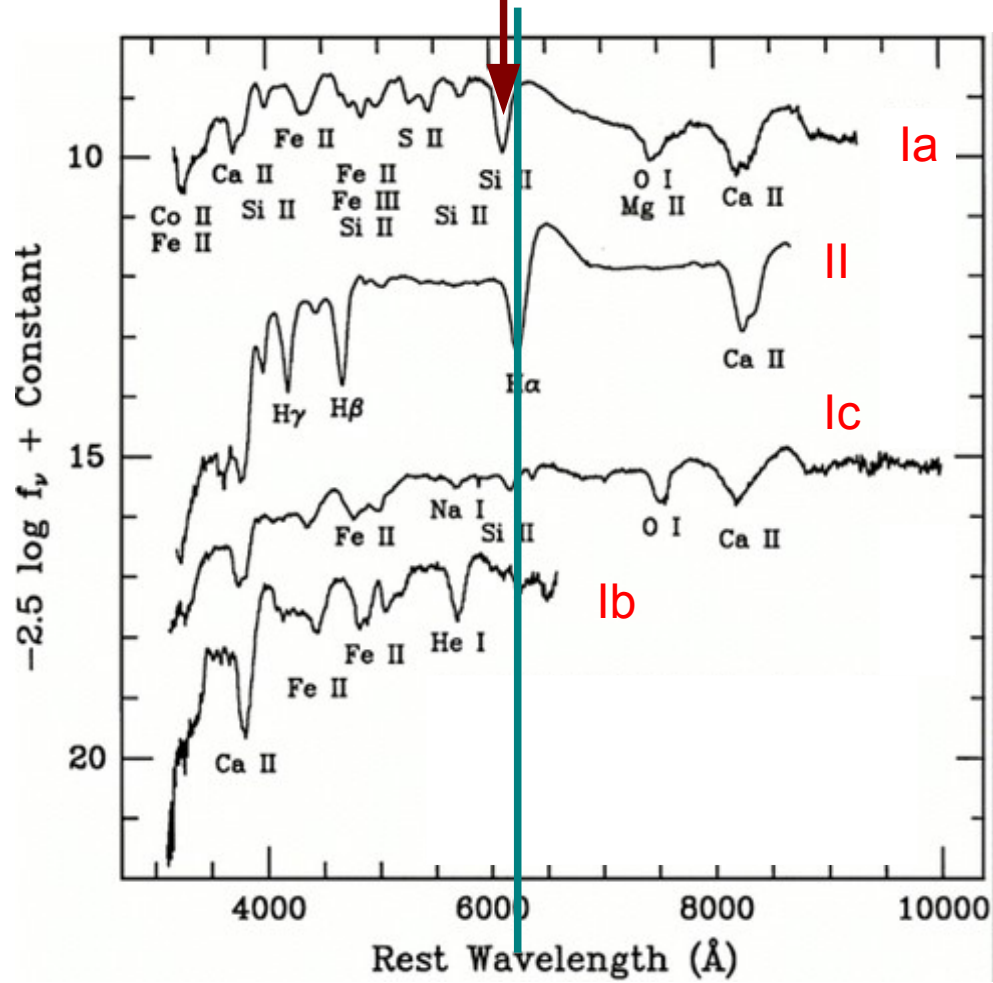
Cefeidas –  $4 \times 10^2$  a  $4 \times 10^4 L_{\odot}$

Supernovas Ia –  $3 \times 10^9$  a  $5 \times 10^9 L_{\odot}$

Podem ser vistas a distâncias muito maiores.

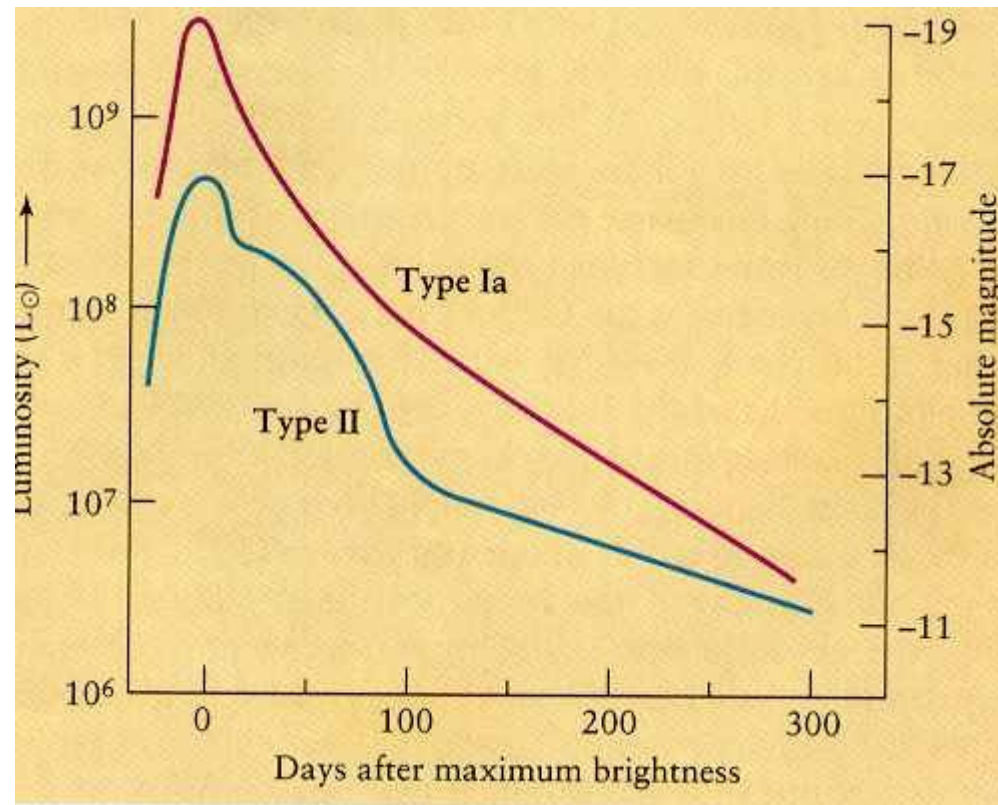


Espectros:



Fillipenko 1997

## Curvas de luz:



*Supernova por ser vista no céu durante alguns meses.*

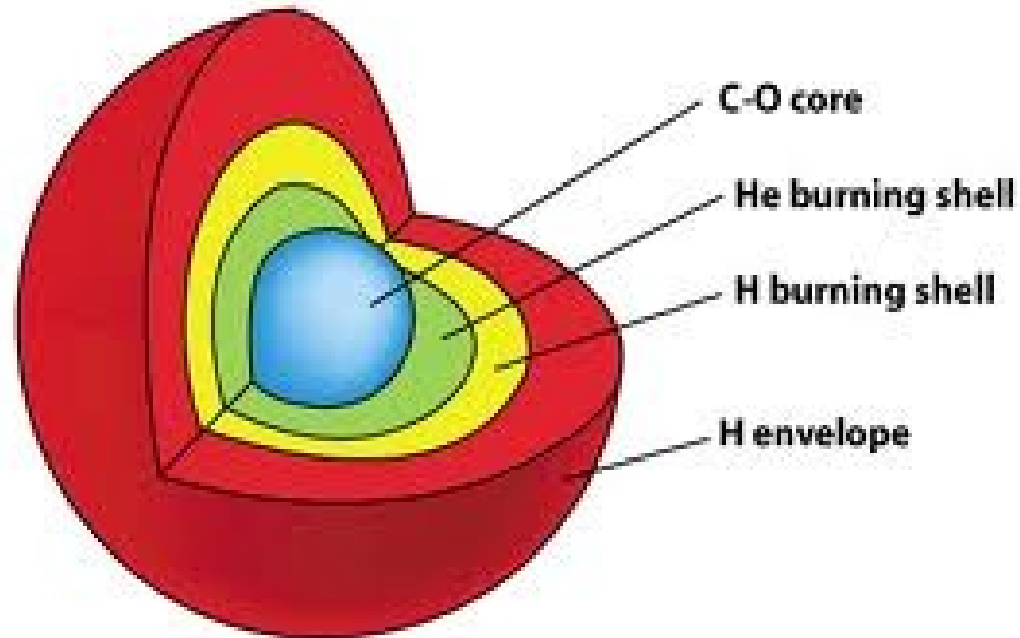


# Supernovas Ia – modelos

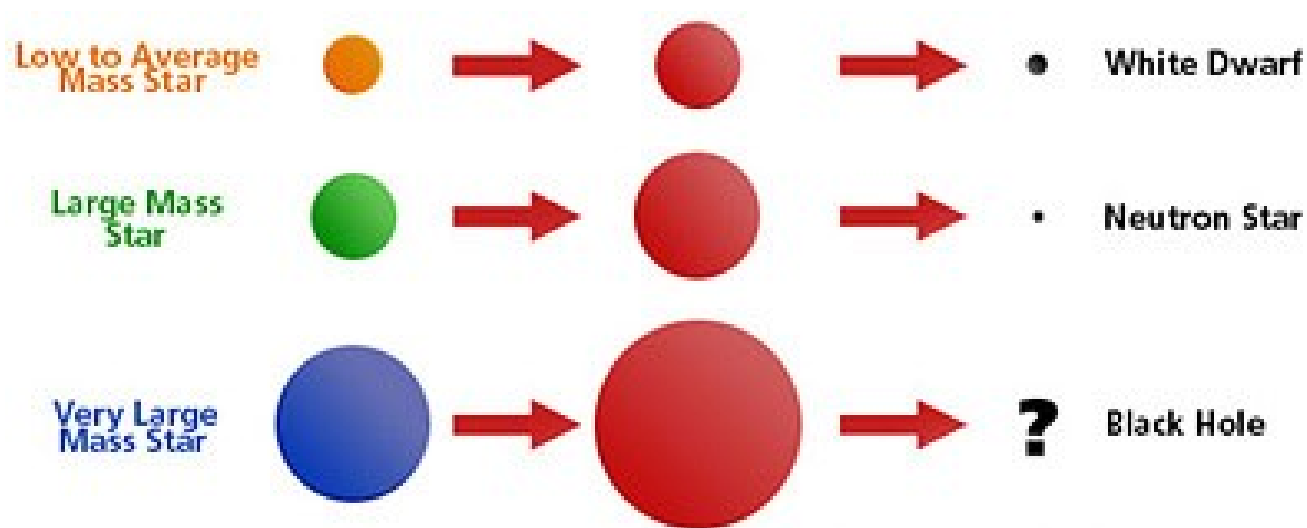
---

*Ciclo de vida de uma estrela*

*Fusão nuclear contrabalança colapso gravitacional.*



Quando a fusão no núcleo cessa, o destino da estrela é determinado pela sua massa:



The fate of a star depends on its mass (size not to scale)

Anãs brancas e estrelas de nêutrons são estrelas muito densas cujo colapso gravitacional é contrabalanceado pela pressão de degenerescência de elétrons e nêutrons, respectivamente.

*Supernovas Ib, Ic e II resultam do colapso gravitacional do núcleo de estrelas mais massivas.*



*Nebulosa do caranguejo resultou de uma supernova observada pelos chineses, árabes e japoneses no ano de 1054.*

*Essas explosões resultam em uma nebulosa e uma estrela densa central (estrela de neutrons ou buraco negro?).*

Supernovas Ia resultam de uma explosão termonuclear de um sistema binário formado por uma anã branca e outra estrela



1. Anã branca acreta massa da outra estrela;
2. Quando estrela se aproxima de  $1.4 M_{\odot}$  (limite de Chandrasekhar), pressão e temperatura no centro aumentam;
3. Fusão se reinicia e temperatura aumenta;

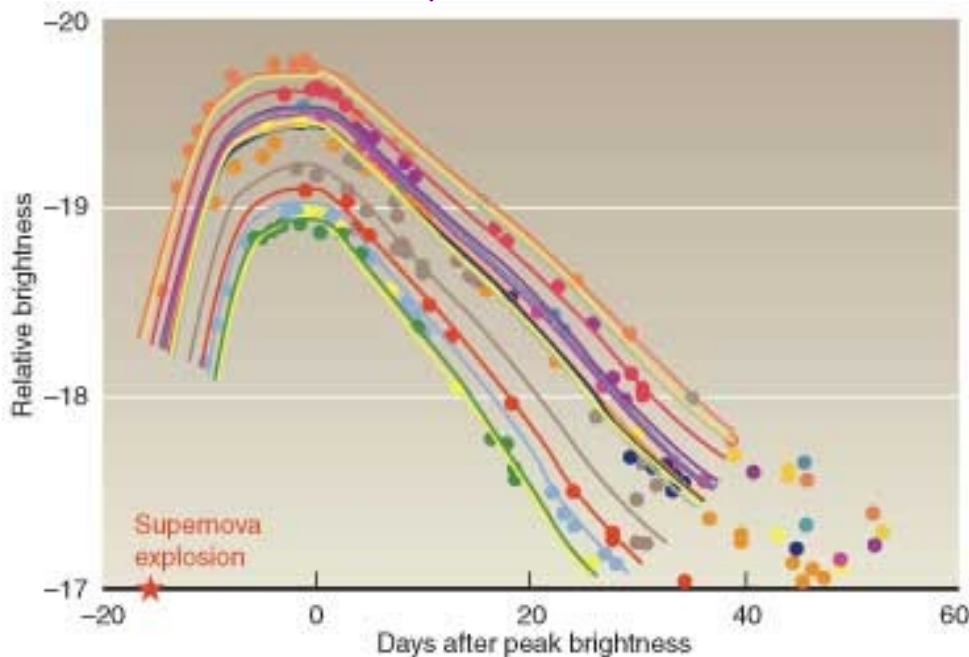
4. Estrela normal se expandiria para equilibrar aumento de temperatura, anã branca não consegue regular pressão de degenerescência dos elétrons e explode;

Sempre explodem com  $\sim 1.4 M_{\odot}$ , então são candidatos a velas padrão!

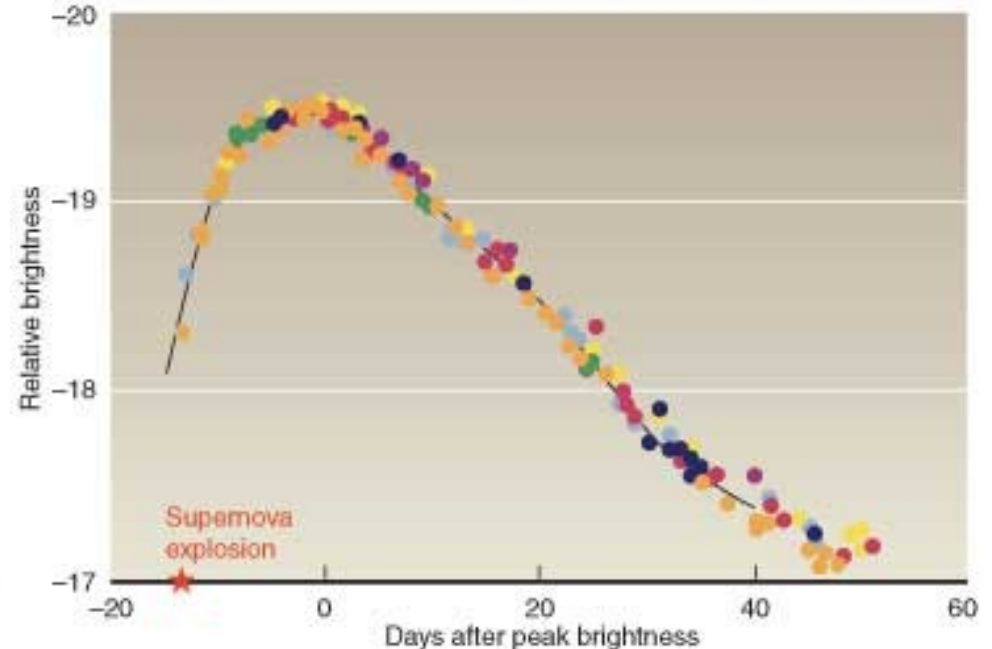
# Supernovas Ia – velas padronizáveis

Observação de supernovas em galáxias com distância conhecida mostra luminosidades intrínsecas diferentes. Não são, a rigor, velas padrão.

Curva de luz para diversas SNe Ia



Velas padronizáveis!



Luminosidade máxima se correlaciona com a largura da curva de luz. Quanto mais “longa”, mais luminosa.

# Sistema de magnitudes

---

Hiparco (190 a.C. - 120 a.C.) classificou brilho das estrelas visíveis a olho nu em 6 categorias:

Estrelas mais brilhantes: magnitude 1



Estrelas menos brilhantes: magnitude 6

*Notar que classificação de Hiparco é contra intuitiva.*

Olho humano tem resposta aprox. logarítmica ao brilho, então:

Estrela de mag 1 não é 6 vezes mais brilhante que estrela de mag 6.

Estrela de mag 1 é 100 vezes mais brilhante que estrela de mag 6!

Hiparco classificou somente a **magnitude aparente** das estrelas, que é aquela vista da Terra e é definida como:

$$m \equiv -2.5 \log_{10}(f / f_x)$$

$$f_x = 2.53 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}$$

Fluxo de estrela de referência, Vega

Devido ao sinal negativo da definição, um valor pequeno de  $m$  corresponde a um fluxo alto, de acordo com Hiparco.

O conceito de magnitude aparente está relacionado à medida feita na Terra, não é uma propriedade intrínseca da estrela.

A **magnitude absoluta** de uma fonte é definida como a magnitude aparente com a qual ela seria observada da Terra se estivesse a uma distância de luminosidade  $D_L=10$  pc:

$$M \equiv -2.5 \log_{10}(L/L_x)$$

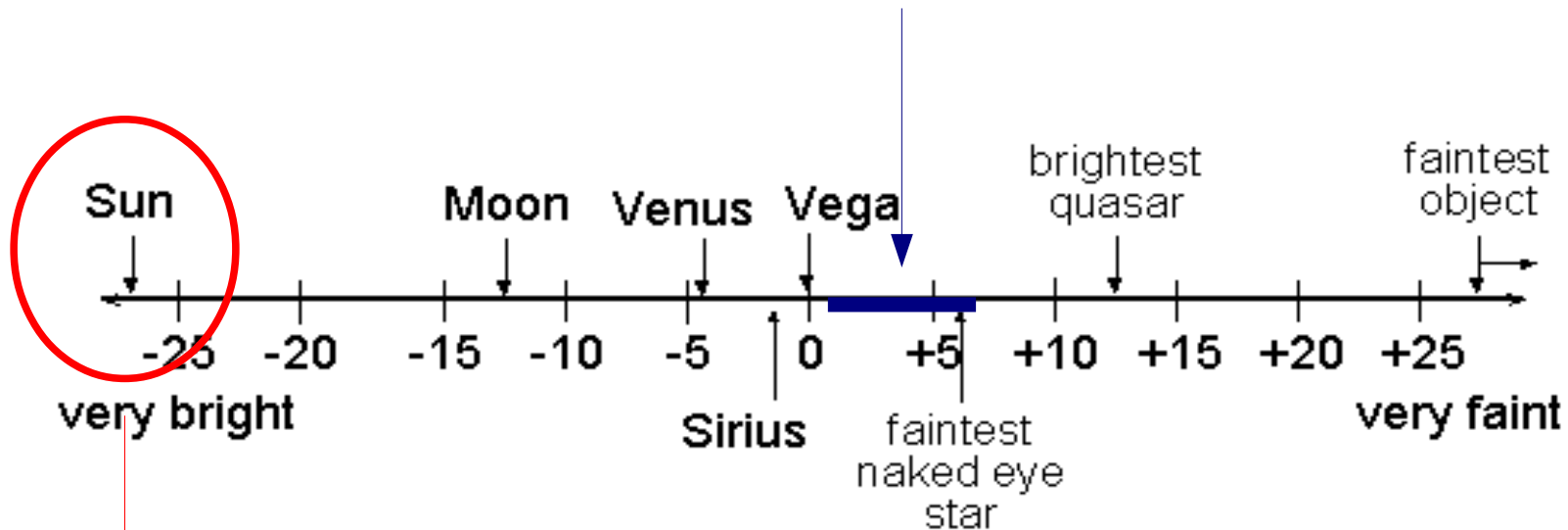
$$L_x = 78.7 L_{\odot}$$

é a luminosidade de uma fonte que produz fluxo  $f_x$  quando vista de uma distância  $D_L=10$  pc.

Propriedade intrínseca da fonte.



## Medidas de Hiparco



Apparent brightnesses of some objects in the magnitude system.

*Sol tem mag aparente negativa*

## Módulo de distância

---

Podemos relacionar as magnitudes aparente e absoluta usando a definição de distância de luminosidade:

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi f}}$$

Pelas definições de magnitude absoluta e aparente, temos:

$$M \equiv -2.5 \log_{10}(L/L_x) \longrightarrow L = 10^{-M/2.5} L_x$$

$$m \equiv -2.5 \log_{10}(f/f_x) \longrightarrow f = 10^{-m/2.5} f_x$$

$$\frac{L}{f} = 10^{(m-M)/2.5} \frac{L_x}{f_x}$$

$$\frac{L}{f} = 10^{(m-M)/2.5} \left( \frac{L_x}{f_x} \right)$$

Lembrando que  $L_x$  é a luminosidade de uma fonte que produz fluxo  $f_x$  quando vista de uma distância  $D_L = 10 \text{ pc}$ , temos:

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi f}} \longrightarrow 10 \text{ pc} = \sqrt{\frac{L_x}{4\pi f_x}}$$

$$\frac{L}{f} = 10^{(m-M)/2.5} (10 \text{ pc})^2 4\pi$$

$$D_L^2 \left( \frac{L}{4\pi f} \right) = 10^{(m-M)/2.5} (10 \text{ pc})^2$$

Então, a distância de luminosidade de uma fonte se relaciona com as suas magnitudes aparente e absoluta através de:

$$D_L^2 = 10^{(m-M)/2.5} (10 \text{ pc})^2$$

$$\log_{10} \left( \frac{D_L}{10 \text{ pc}} \right)^2 = \frac{m - M}{2.5}$$

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

ou

$$M = m - 5 \log_{10} \left( \frac{D_L}{1 \text{ Mpc}} \right) - 25$$

Como é usual tratar fluxos e luminosidades em termos de  $m$  e  $M$ , é conveniente tratar distância de luminosidade em termos de do módulo de distância  $m-M$ :

$$m - M = 5 \log_{10} \left( \frac{D_L}{1 \text{ Mpc}} \right) + 25$$

Exemplos

Grande Nuvem de Magalhães:  $D_L = 0.050 \text{ Mpc}$  ou  $m-M = 18.5$

Aglomerado de Virgo:  $D_L = 15 \text{ Mpc}$  ou  $m-M = 30.9$

## Aproximação de 2ª ordem

---

Podemos então escrever a aproximação obtida na aula passada

$$D_L \approx \frac{c}{H_0} z \left( 1 + \frac{1 - q_0}{2} z \right)$$

para o módulo de distância:

$$m - M \approx 43.17 - 5 \log_{10} \left( \frac{H_0}{70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}} \right) + 5 \log_{10} z + 1.086 (1 - q_0) z$$

**Exercício**

Se temos então uma classe de velas padrão com luminosidade intrínseca conhecida ( $M$ ) e medirmos o fluxo ( $m$ ) e desvio para o vermelho, podemos ajustar os valores de  $H_0$  e  $q_0$ .

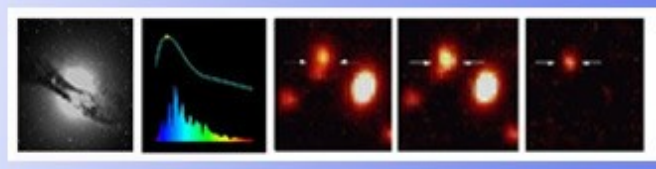
# Aceleração do Universo

---

Em 1998, dois grupos de pesquisa



Supernova  
Cosmology Project



## The High-Z SN Search

anunciaram os resultados de medidas da expansão do Universo usando  
*SNe Ia*.

1. Para  $z$  pequeno, medidas de  $H_0$ :

$$H_0 = (70 \pm 7) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

2. Para  $z$  grande, medidas da aceleração do Universo:

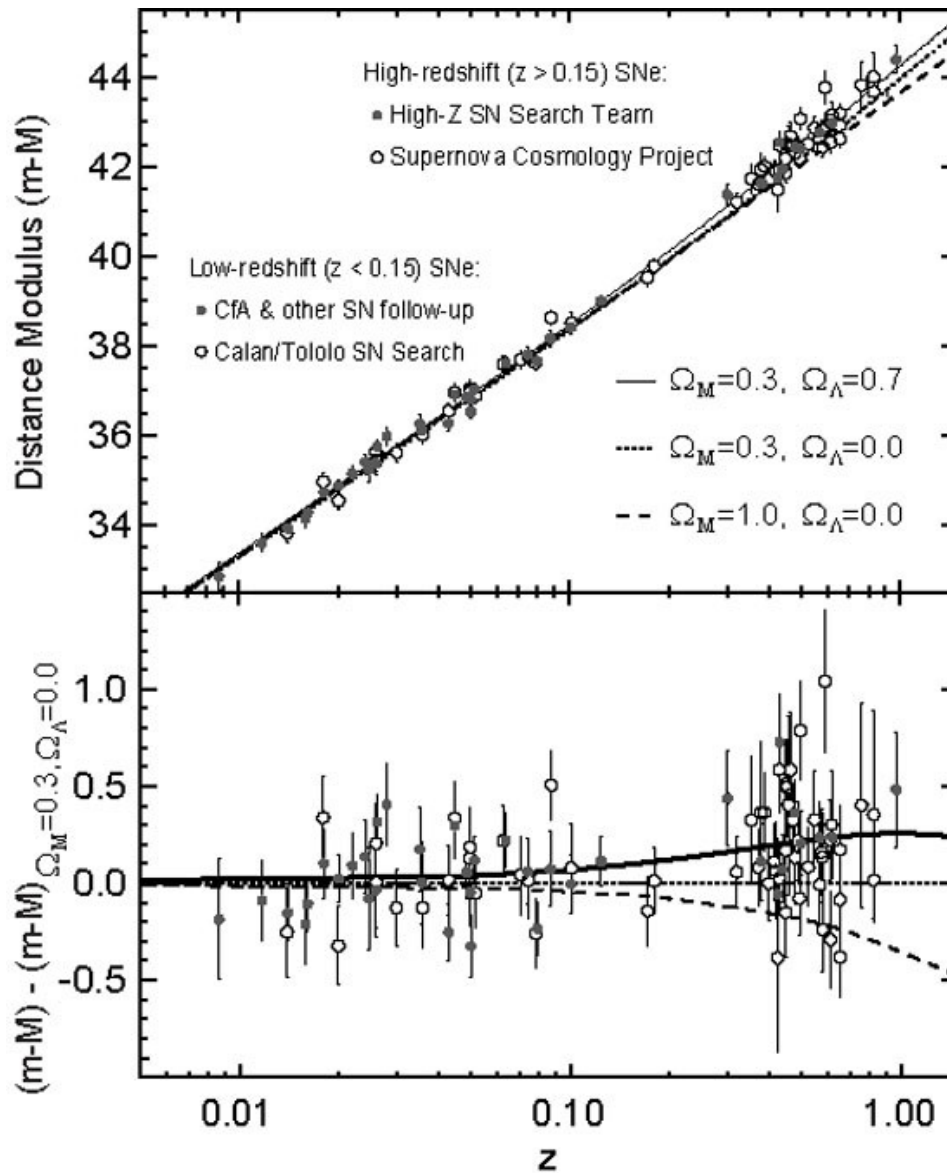


Diagrama de Hubble em termos de módulo de distância e desvio para o vermelho.

Diferença entre  $(m-M)$  previsto por cada modelo e  $(m-M)$  para Universo com  $\Omega_{m,0}=0.3$  (paradigma da época).

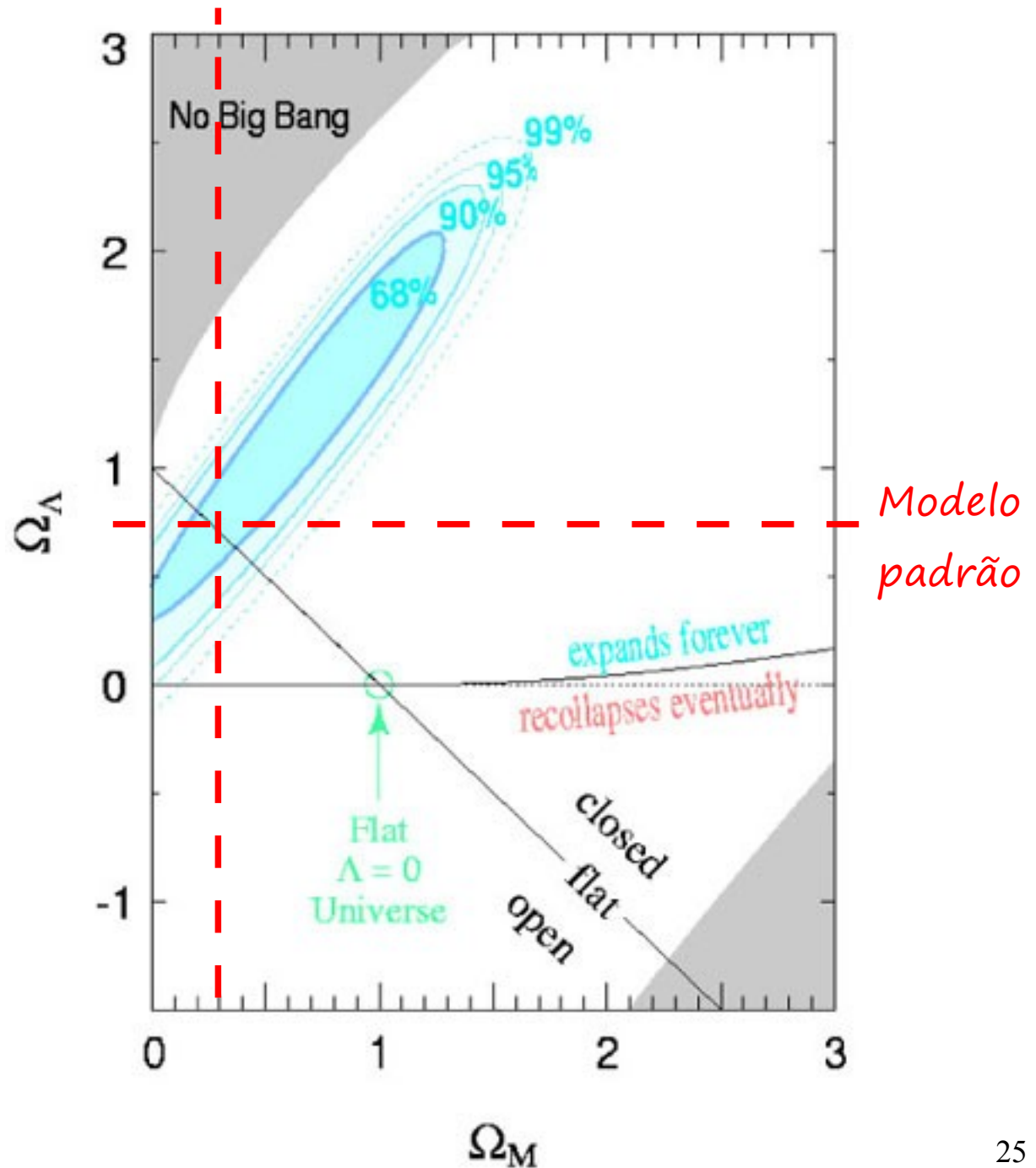
Melhor ajuste é dado pelos modelos com expansão acelerada.



Os valores de  $z$  alcançados são altos demais para que a expansão em série até a segunda ordem seja válida.

Calcular resultados esperados para modelos com diferentes valores de  $\Omega_{m,0}$  e  $\Omega_{\Lambda,0}$  e verificar quais valores ajustam melhor observações.

Prêmio Nobel 2011.



# Incertezas

---

A conclusão de que a expansão do Universo está acelerando vem da observação de SNe Ia com  $z \sim 0.5$  tem, em média, magnitudes 0.25 maior (são menos luminosas) do que o que se esperava em um Universo dominado por matéria com  $\Omega_{m,0} = 0.3$ .

Esse efeito poderia ser causado por outros fenômenos:

1. Supernovas próximas são diferentes das distantes (evolução?);

Outras características como o espectro não parecem evoluir.

2. Galáxias distantes podem conter mais poeira;

Poeira absorve mais alguns comprimentos de onda do que outros.