Curso de Cosmologia 2013B

Parte I
Aula 4

Martín Makler
CBPF

ICRA CBPF

MCTI

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

Lembrando….

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$\boxed{H^2(a) = H_0^2\left[\Omega_r\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda\right]}$$

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^{\,2}}$$

Lembrando….

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$H^2(a) = H_0^2\left[\Omega_r\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda\right]$$

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^2}$$

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta\, d\phi^2\right)$$

Lembrando....

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$\boxed{H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda \right]}$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^2}$$

$$\boxed{ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta\, d\phi^2\right)}$$

Lembrando….

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$\boxed{H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda \right]}$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^2}$$

$$\boxed{ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta \, d\phi^2\right)}$$

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1)$$

Lembrando….

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-4} + \Omega_M \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-3} + \Omega_K \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-2} + \Omega_\Lambda \right]$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^2}$$

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta \, d\phi^2 \right)$$

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1)$$

$$\frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$

Lembrando….

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$\boxed{H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda \right]}$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^{\,2}}$$

$$\boxed{ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta\, d\phi^2\right)}$$

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1) \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$

Lembrando….

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$\boxed{H^2(a) = H_0^2\left[\Omega_r\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda\right]}$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^{\,2}}$$

$$\boxed{ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta\, d\phi^2\right)}$$

Trajetória da luz (geodésica nula)

$$\int_{t_1}^{t_0}\frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1}\frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1) \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$

Lembrando....

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda \right]$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^{\,2}}$$

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta\, d\phi^2\right)$$

Trajetória da luz (geodésica nula)

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1) \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$

$$\boxed{z := \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} - 1}$$

Lembrando....

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda \right]$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^{\,2}}$$

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta\, d\phi^2\right)$$

Trajetória da luz (geodésica nula)

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1) \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{z := \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} - 1}$$

Lembrando....

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$H^2(a) = H_0^2 \left[\Omega_r \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda \right]$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^{\,2}}$$

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta \, d\phi^2 \right)$$

Trajetória da luz (geodésica nula)

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1) \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$

Desvio para o vermelho $\Rightarrow$

$$z := \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} - 1$$

Lembrando….

Conservação da Energia + Eq. de Friedamn: Parâmetro de Hubble

$$H^2(a) = H_0^2\left[\Omega_r\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-4} + \Omega_M\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3} + \Omega_K\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2} + \Omega_\Lambda\right]$$

Métrica:

$$\Omega_k = -\frac{K}{H_0^{\ 2}}$$

$$\boxed{ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(\frac{1}{1-Kr^2}dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta\, d\phi^2\right)}$$

Trajetória da luz (geodésica nula)

$$\int_{t_1}^{t_0}\frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1}\frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \equiv f(r_1) \Rightarrow \frac{\delta t_1}{a(t_1)} = \frac{\delta t_0}{a(t_0)}$$

Desvio para o vermelho $\Rightarrow$

$$\boxed{z := \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} - 1}$$

$$\frac{a(t)}{a_0} = (1+z)^{-1}$$

Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

F: Energia por unidade de área por unidade de tempo

Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

F: Energia por unidade de área por unidade de tempo

Área da S^2 centrada na fonte no instante de detecção t_0: $4\pi a^2(t_0) r_1{}^2$

Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

F: Energia por unidade de área por unidade de tempo

Área da S^2 centrada na fonte no instante de detecção t_0: $4\pi a^2(t_0) r_1{}^2$

Variação da energia: $h\nu_1 / h\nu_0 = (1+z)^{-1}$

Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

F: Energia por unidade de área por unidade de tempo

Área da S^2 centrada na fonte no instante de detecção t_0: $4\pi a^2(t_0) r_1^{\,2}$

Variação da energia: $h\nu_1 / h\nu_0 = (1+z)^{-1}$

Diferença de tempo: $\delta t_0 / \delta t_1 = a(t_0) / a(t_1) = 1 + z$

Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

F: Energia por unidade de área por unidade de tempo

Área da S^2 centrada na fonte no instante de detecção t_0: $4\pi a^2(t_0) r_1^{\,2}$

Variação da energia: $h\nu_1/h\nu_0 = (1+z)^{-1}$

Diferença de tempo: $\delta t_0 / \delta t_1 = a(t_0)/a(t_1) = 1+z$

Logo: $$F = \frac{L'}{4\pi a^2(t_0) r_1^2}$$

Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

F: Energia por unidade de área por unidade de tempo

Área da S^2 centrada na fonte no instante de detecção t_0: $4\pi a^2(t_0) r_1^2$

Variação da energia: $h\nu_1/h\nu_0 = (1+z)^{-1}$

Diferença de tempo: $\delta t_0 / \delta t_1 = a(t_0)/a(t_1) = 1+z$

Logo: $$F = \frac{L'}{4\pi a^2(t_0) r_1^2} = \frac{L}{4\pi a^2(t_0) r_1^2 (1+z)^2}$$

Distância de Luminosidade

$$d_L^2 := \frac{L}{4\pi F}$$

F: Energia por unidade de área por unidade de tempo

Área da S^2 centrada na fonte no instante de detecção t_0: $4\pi a^2(t_0) r_1^2$

Variação da energia: $h\nu_1 / h\nu_0 = (1+z)^{-1}$

Diferença de tempo: $\delta t_0 / \delta t_1 = a(t_0)/a(t_1) = 1 + z$

Logo: $$F = \frac{L'}{4\pi a^2(t_0) r_1^2} = \frac{L}{4\pi a^2(t_0) r_1^2 (1+z)^2}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{d_L^2 = a^2(t_0) r_1^2 (1+z)^2}$$

Distância de Luminosidade

$$\boxed{d_L = a(t_0)r_1(1+z)}$$

Distância de Luminosidade

$$\boxed{d_L = a(t_0) r_1 (1+z)}$$

Como

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} = \begin{cases} \sin^{-1}\left(\sqrt{|K|} r_1\right) \Big/ \sqrt{|K|}, \ \text{para } K > 0 \\ r_1, \ \text{para } K = 0 \\ \sinh^{-1}\left(\sqrt{|K|} r_1\right) \Big/ \sqrt{|K|}, \ \text{para } K < 0 \end{cases}$$

Distância de Luminosidade

$$\boxed{d_L = a(t_0) r_1 (1+z)}$$

Como

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} = \begin{cases} \sin^{-1}\left(\sqrt{|K|}r_1\right)\Big/\sqrt{|K|}, \text{ para } K > 0 \\ r_1, \text{ para } K = 0 \\ \sinh^{-1}\left(\sqrt{|K|}r_1\right)\Big/\sqrt{|K|}, \text{ para } K < 0 \end{cases}$$

e

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a} = \int_{t_1}^{t_0} \frac{da}{\dot{a}a} = -\int_z^0 \frac{dz'}{H}$$

Distância de Luminosidade

$$\boxed{d_L = a(t_0)r_1(1+z)}$$

Como

$$\int_{t_1}^{t_0}\frac{dt}{a(t)} = \int_0^{r_1}\frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} = \begin{cases} \sin^{-1}\left(\sqrt{|K|}r_1\right)/\sqrt{|K|}, \text{ para } K>0 \\ r_1, \text{ para } K=0 \\ \sinh^{-1}\left(\sqrt{|K|}r_1\right)/\sqrt{|K|}, \text{ para } K<0 \end{cases}$$

e

$$\int_{t_1}^{t_0}\frac{dt}{a} = \int_{t_1}^{t_0}\frac{da}{\dot{a}a} = -\int_z^0\frac{dz'}{H}$$

teremos

$$d_L = (1+z)\,\mathrm{sen}_K\left(H_0\sqrt{|1-\Omega_0|}\int_0^z\frac{dz'}{H(z')}\right)\Big/ H_0\sqrt{|1-\Omega_0|}$$

Distância de Luminosidade

No caso plano:

$$d_L = (1+z)\int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

Distância de Luminosidade

No caso plano:

$$d_L = (1+z)\int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

Lembrando que (no modelo LCDM)

$$H^2(a) = H_0^{\,2}\left[\Omega_r a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda\right]$$

Distância de Luminosidade

No caso plano:

$$d_L = (1+z)\int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

Lembrando que (no modelo LCDM)

$$H^2(a) = H_0^{\,2}\left[\Omega_r a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda\right]$$

temos

$$d_L = \frac{(1+z)}{H_0}\int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_r (1+z')^4 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

Distância de Luminosidade

Expansão em série (**independente do modelo**):

Em 1ª ordem

Distância de Luminosidade

Expansão em série (**independente do modelo**):

Em 1ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz$$

Distância de Luminosidade

Expansão em série (**independente do modelo**):

Em 1ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz$$ ⇦ **"Lei" de Hubble**

Distância de Luminosidade

Expansão em série (**independente do modelo**):

Em 1ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz$$ ⇦ **"Lei" de Hubble**

Exercício: obter, em 2ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz\left[1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z\right]$$

Distância de Luminosidade

Expansão em série (**independente do modelo**):

Em 1ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz$$ ⇦ **“Lei” de Hubble**

Exercício: obter, em 2ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz\left[1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z\right]$$

Dica: expandir $\dfrac{1}{a(t)}$ em série de potências

O parâmetro de desaceleração

Em 2ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz\left[1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z\right]$$

onde

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0}{a_0 H_0^2}$$

O parâmetro de desaceleração

Em 2ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz\left[1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z\right]$$

onde

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0}{a_0 H_0^2}$$

Exercício: obter a equação para $\ddot{a}$ e relacionar com os parâmetros cosmológicos

Sacolejada, estalo…

Exercício: obter, em 3ª ordem

$$H_0 d_L(z) = cz\left[1+\frac{1}{2}(1-q_0)z-\frac{1}{6}\left(1-q_0-3q_0^2+j_0+\frac{Kc^2}{H_0^2}\right)z^2+O(z^3)\right]$$

onde $j_0 = \dfrac{\dddot{a}_0}{a_0 H_0^3}$ é a sacolejada

Termo de 4ª ordem

$$\frac{cz}{H_0}\frac{1}{24}\left[2(1-q_0)-15q_0^2(1+q_0)+5j_0+10q_0 j_0+s_0+\left(\frac{2Kc^2(1+3q_0)}{H_0^2}\right)\right]z^3$$

onde $s_0 = \dfrac{\ddddot{a}_0}{a_0 H_0^4}$ é o estalo

Dica: ver http://arxiv.org/pdf/gr-qc/0309109

O Lado Escuro do Universo

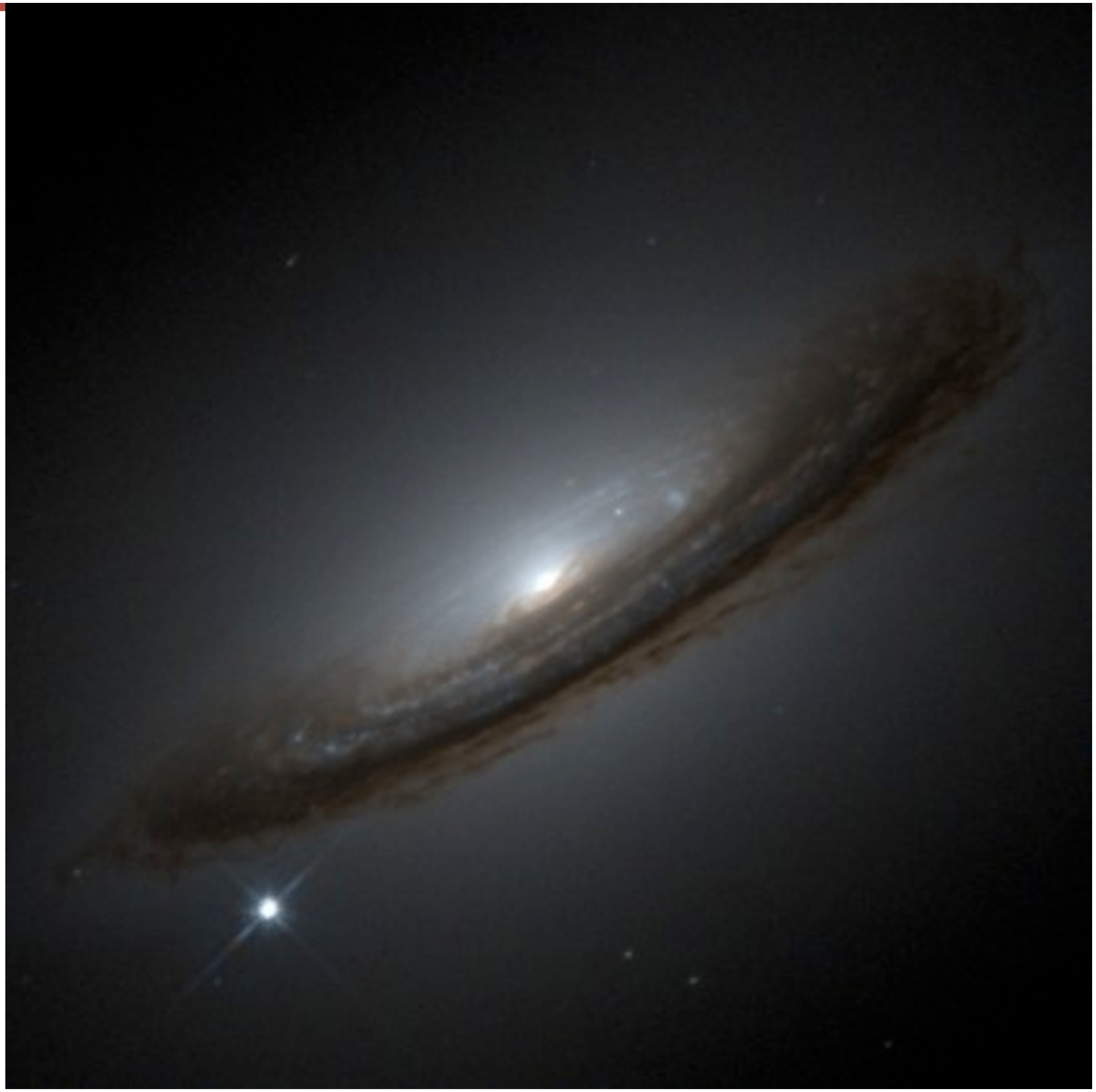
Episódio II

O Lado Escuro do Universo

Episódio II

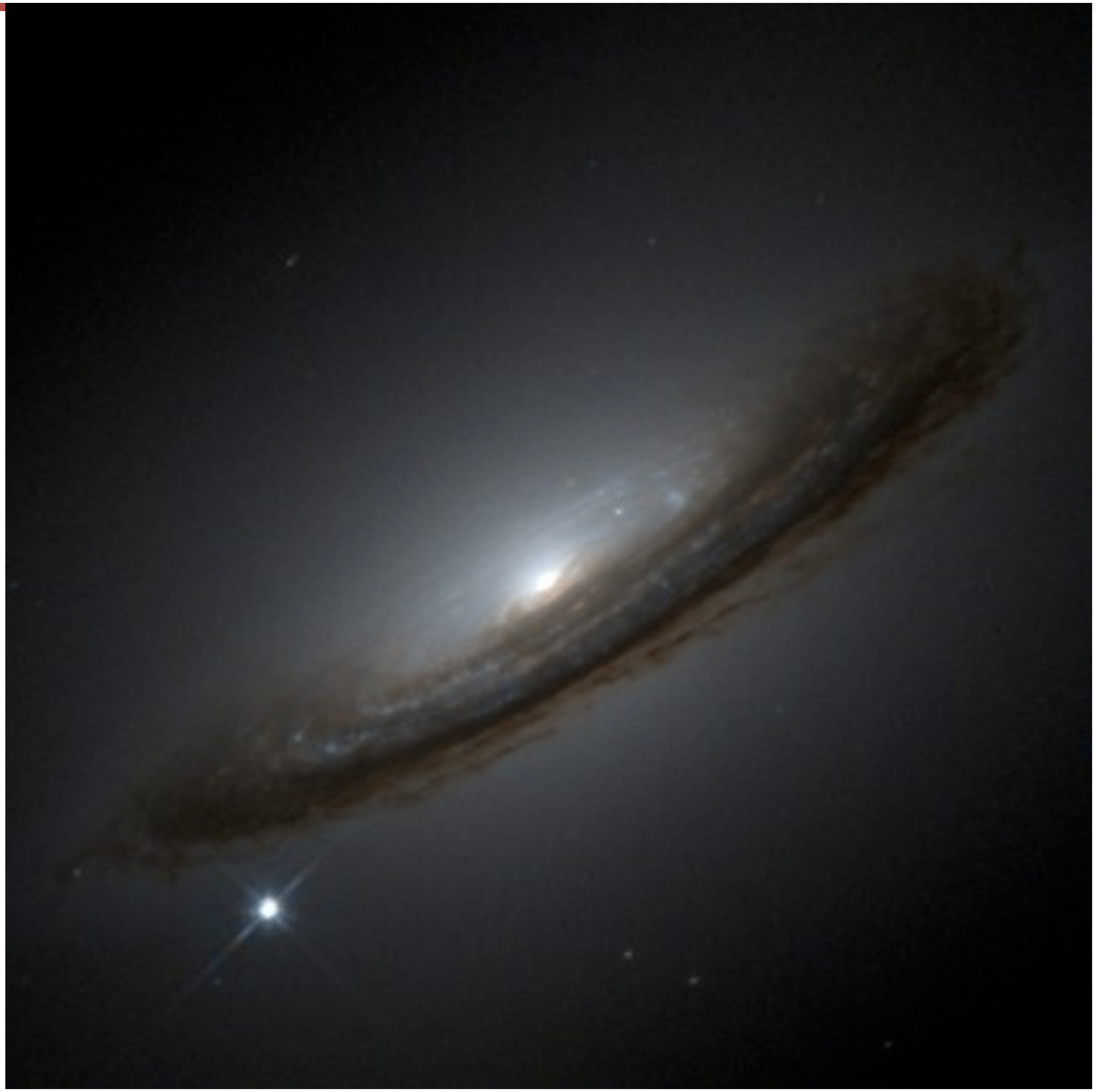
O Universo Acelerado

Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia



Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

Vantagens:



Supernovas do Tipo Ia
e Cosmologia

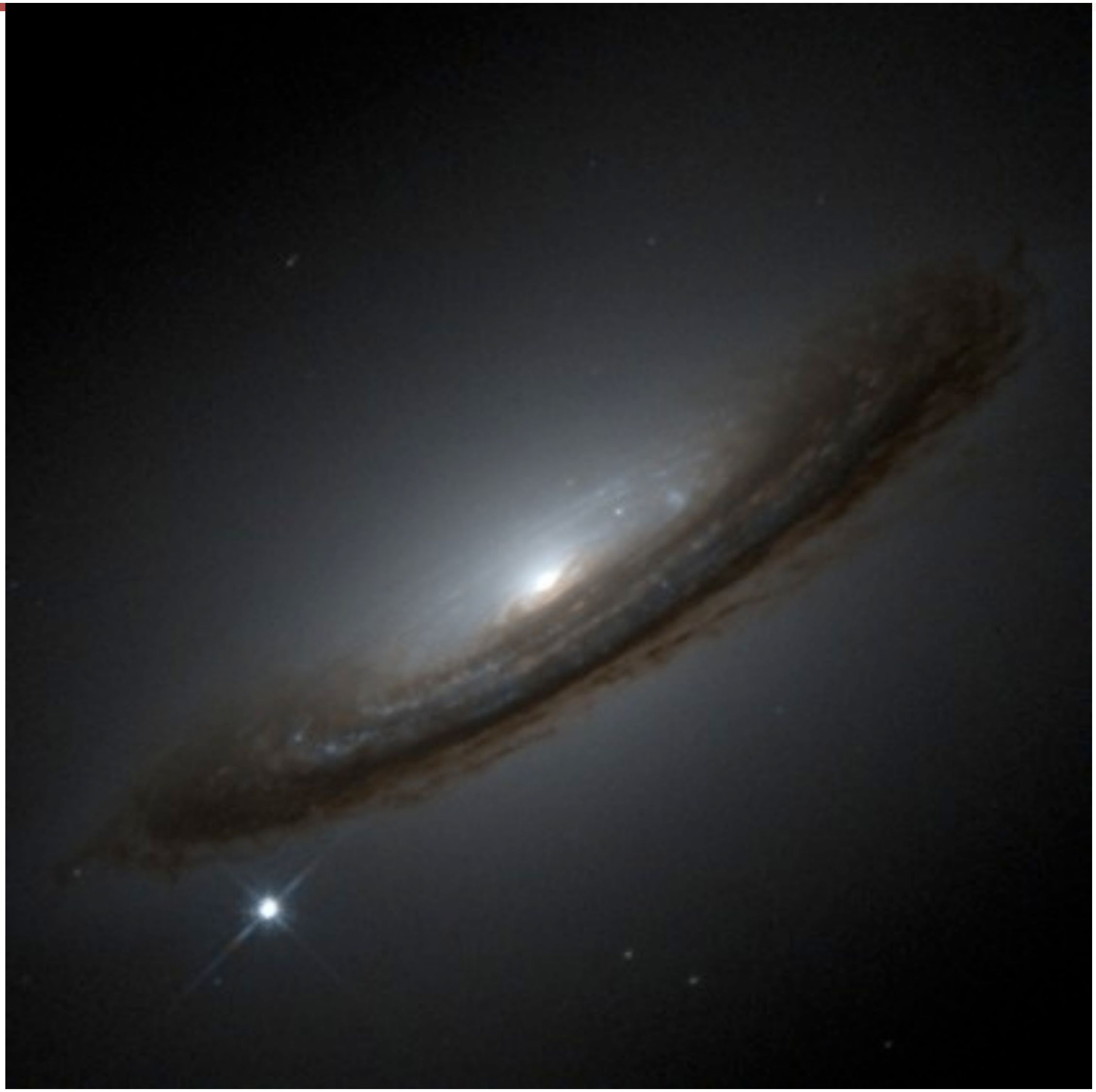
Vantagens:

- Luminosidade

Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

Vantagens:

- Luminosidade Extrema



Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

Vantagens:

- Luminosidade Extrema

  (10^9 - $10^{10}\,L_\odot$)

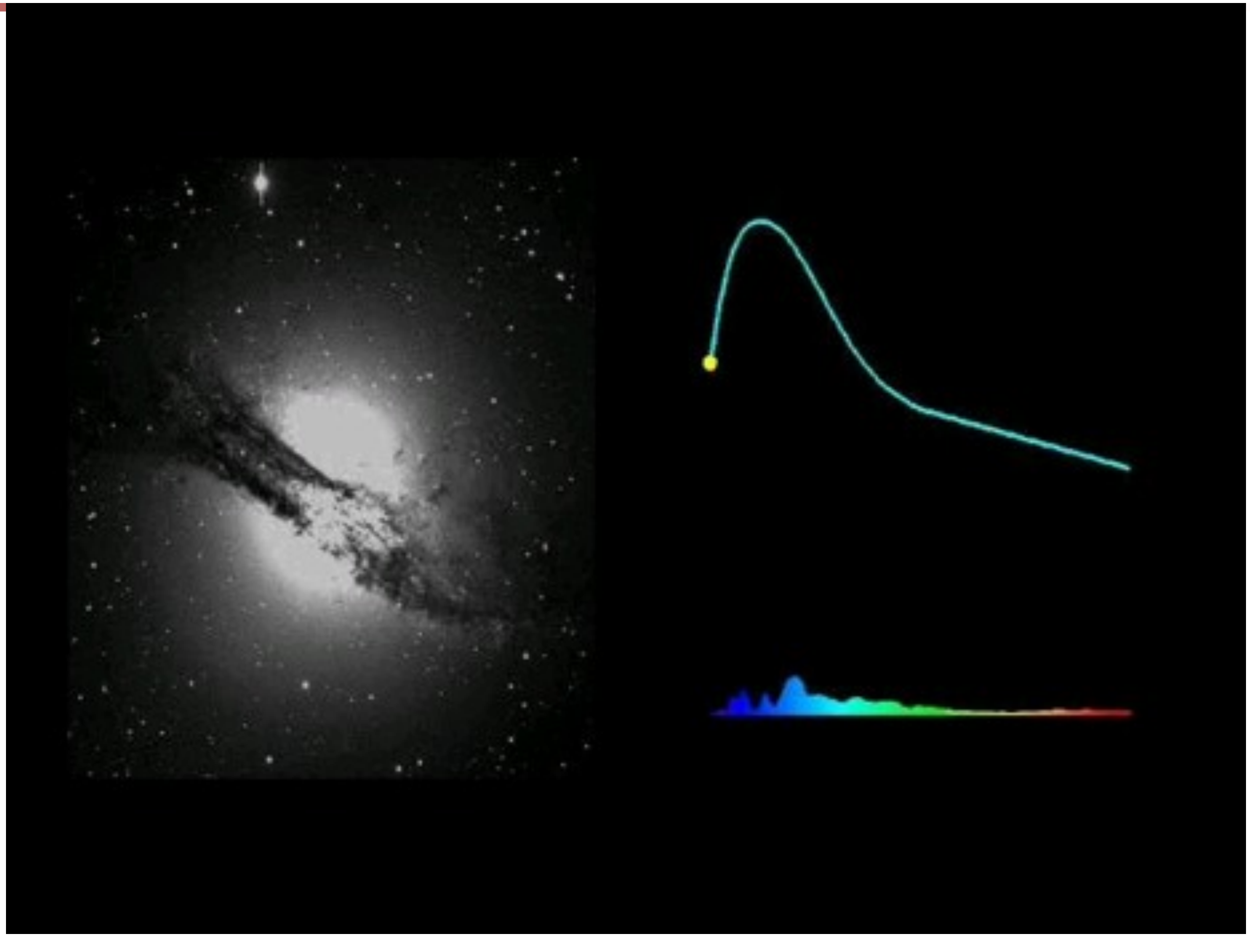
Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

Vantagens:

- Luminosidade Extrema

  (10^9 - 10^{10} $L_\odot$)

➔ Podem ser vistas a grandes distâncias



Curvas de luz de Supernovas do Tipo Ia

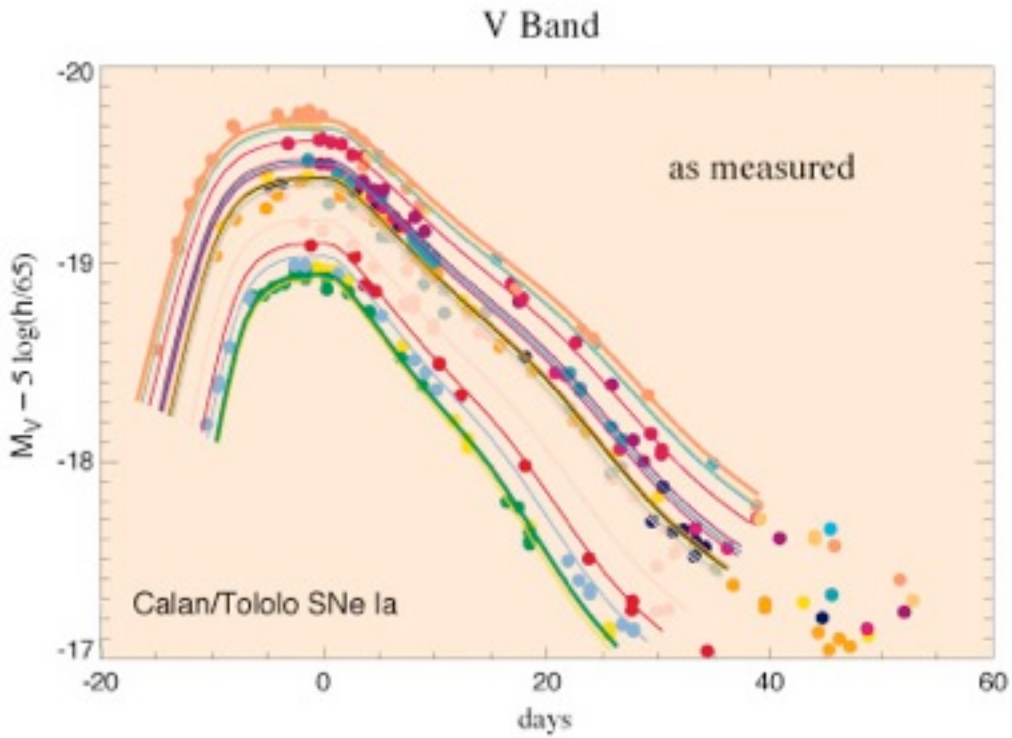
Altamente homogêneas

➔ Velas padronizáveis

Curvas de luz de Supernovas do Tipo Ia

Altamente homogêneas

➔ Velas padronizáveis

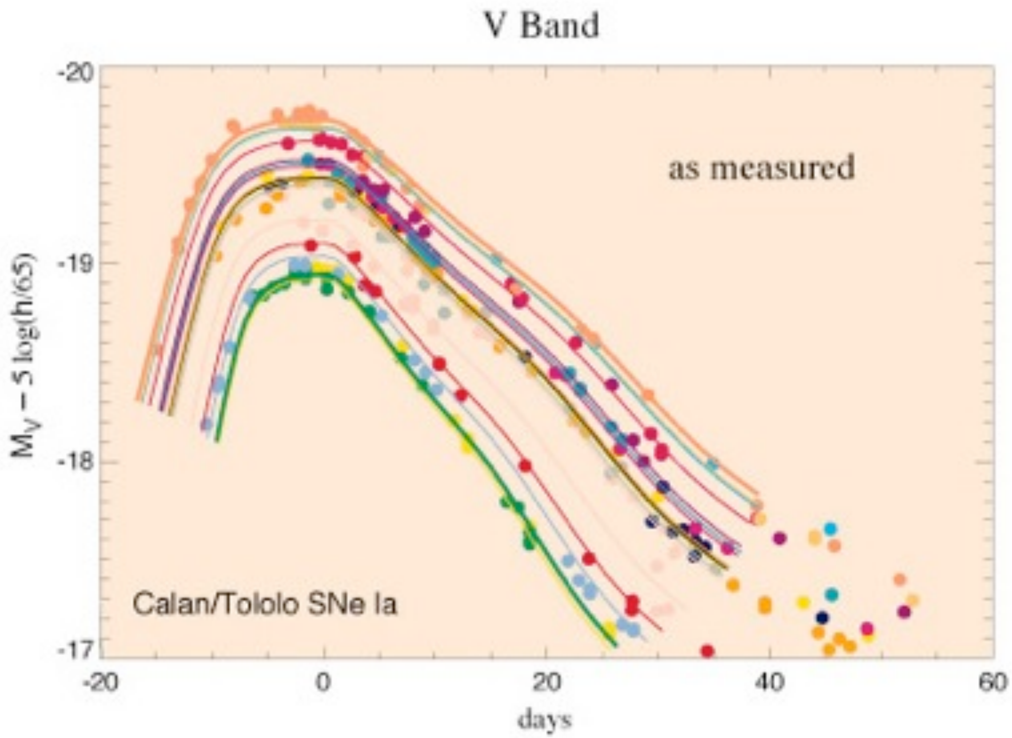


opyleft Martín Makler

Curvas de luz de Supernovas do Tipo Ia

Altamente homogêneas

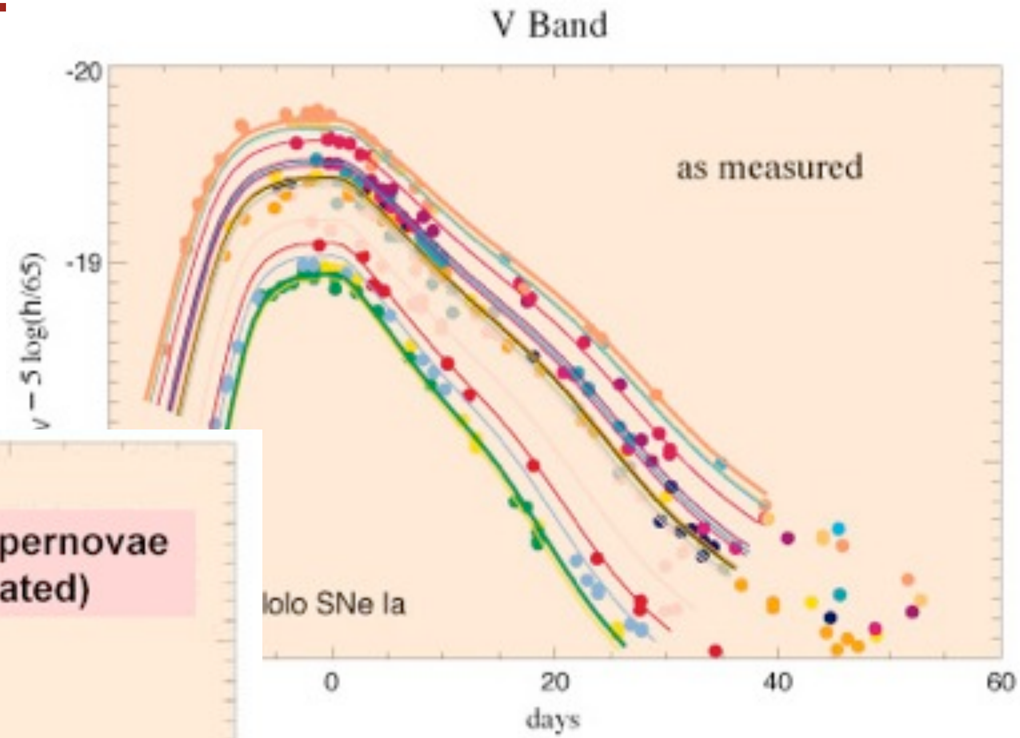
➔ Velas padronizáveis

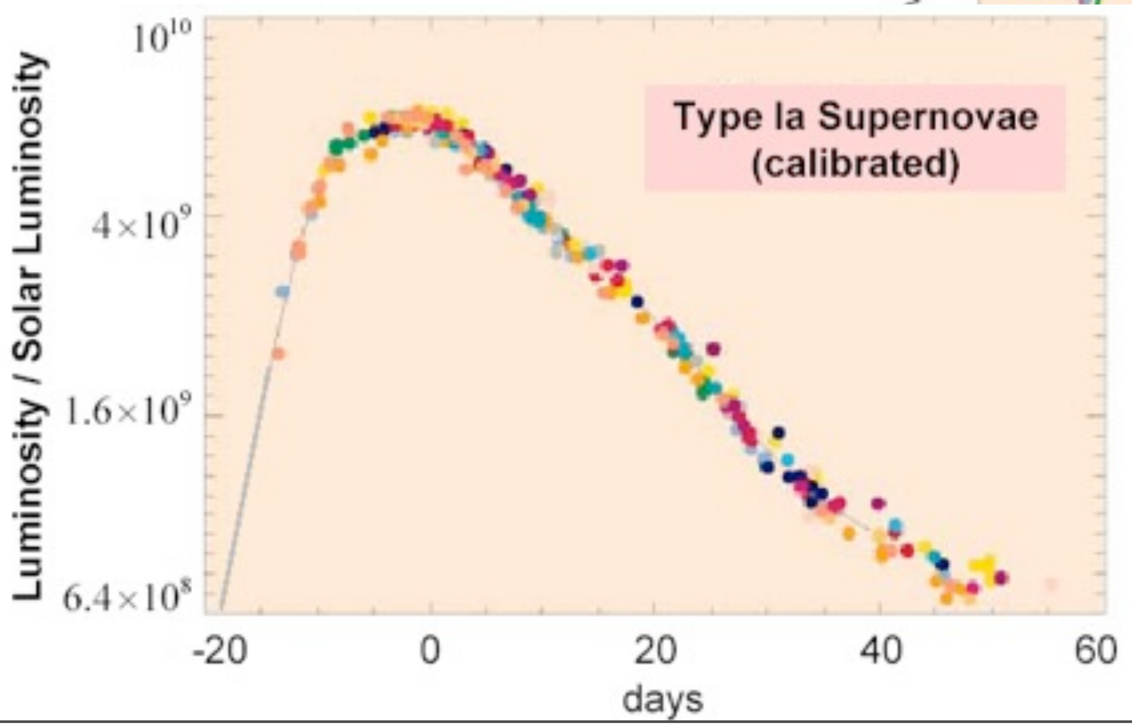


Curvas de luz de Supernovas do Tipo Ia

Altamente homogêneas

➔ Velas padronizáveis





Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

Vantagens:

- Luminosidade Extrema

  (10^9 - $10^{10}\,L_\odot$)

- Altamente homogêneas

→ Velas padronizáveis

Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

Vantagens:

- Luminosidade Extrema

(10^9 - $10^{10}\,L_\odot$)

- Altamente homogêneas

➔ Velas padronizáveis

Desvantagens:

- Eventos raros e aleatórios

~ 1/500 ano/galáxia

- Duração curta

Solução:

- Busca automatizada
- SCP, High-z team

Supernovas do Tipo Ia e Cosmologia

Vantagens:

- Luminosidade Extrema

  (10^9 - $10^{10}\,L_\odot$)

- Altamente homogêneas

  → Velas padronizáveis

Desvantagens:

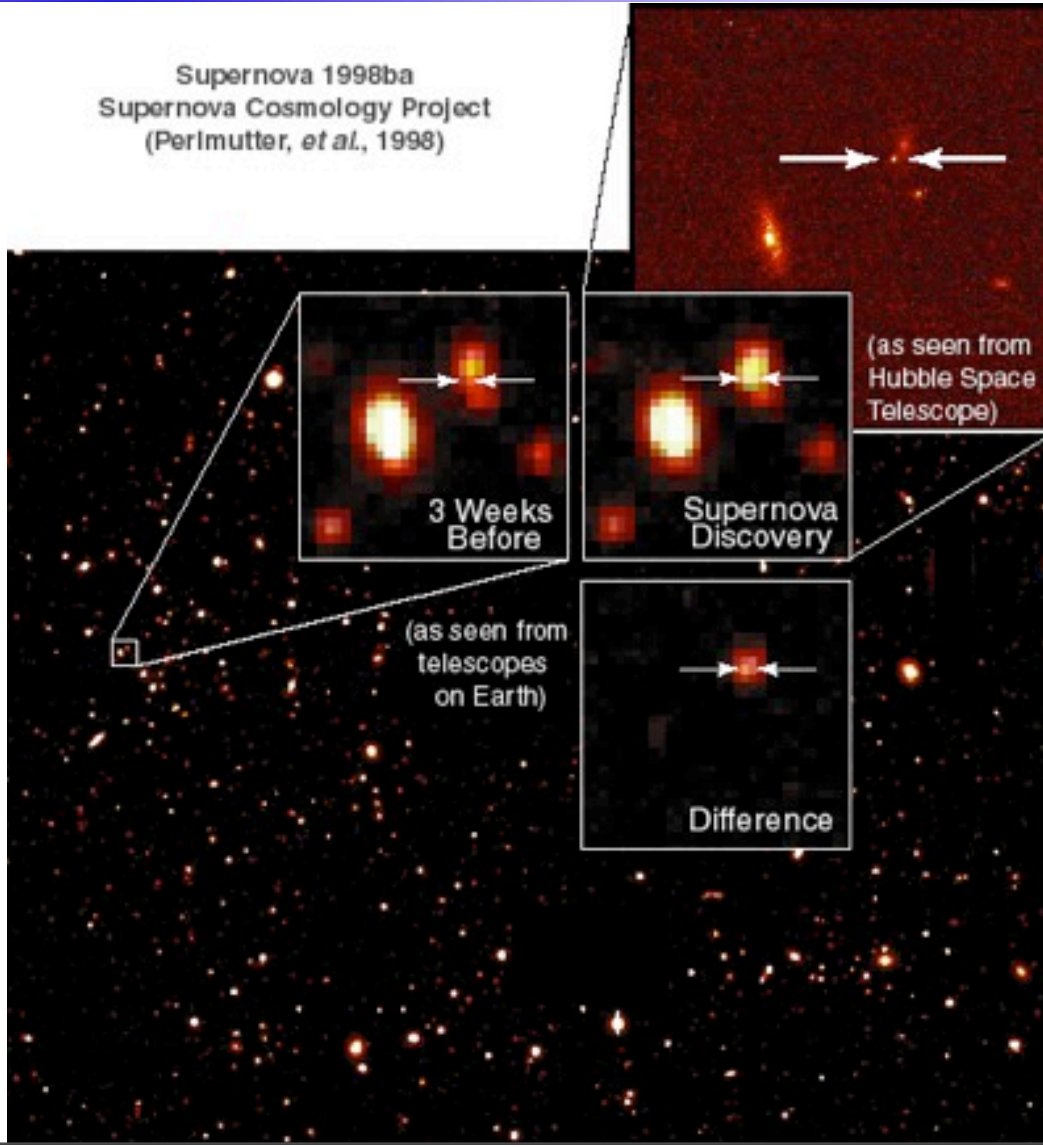
- Eventos raros e aleatórios

  ~ 1/500 ano/galáxia

- Duração curta

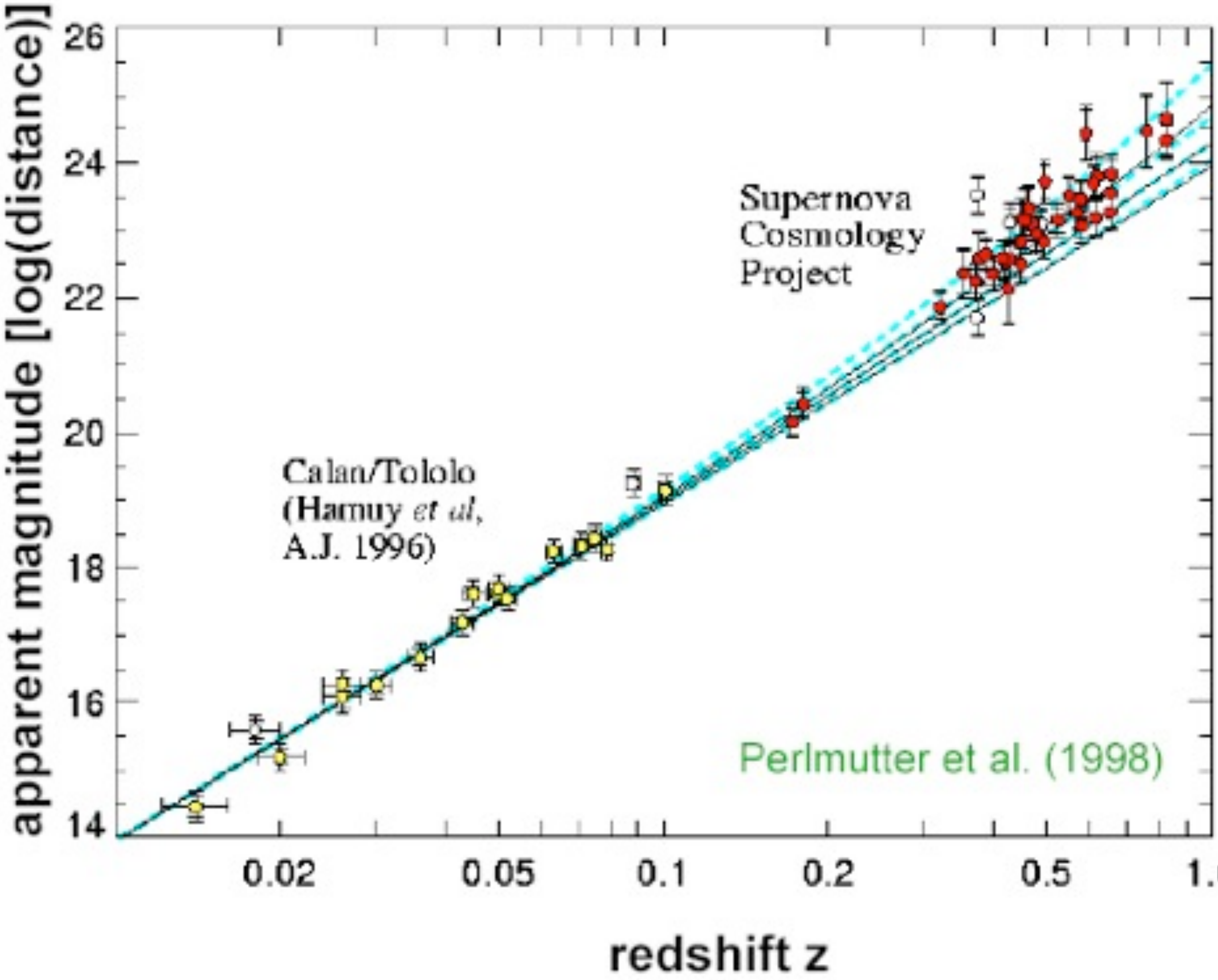
Solução:

- Busca automatizada
- SCP, High-z team



O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias

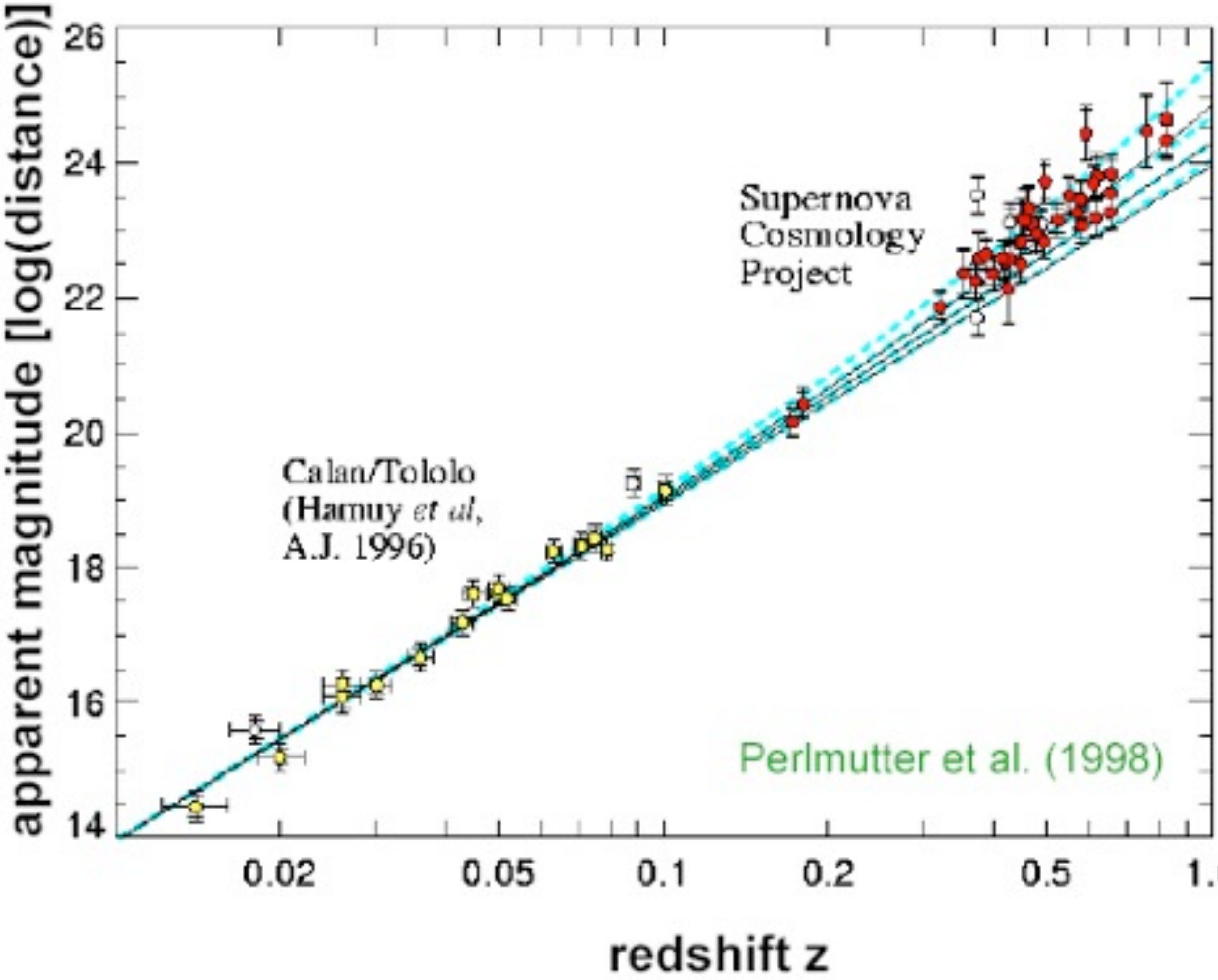


O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias

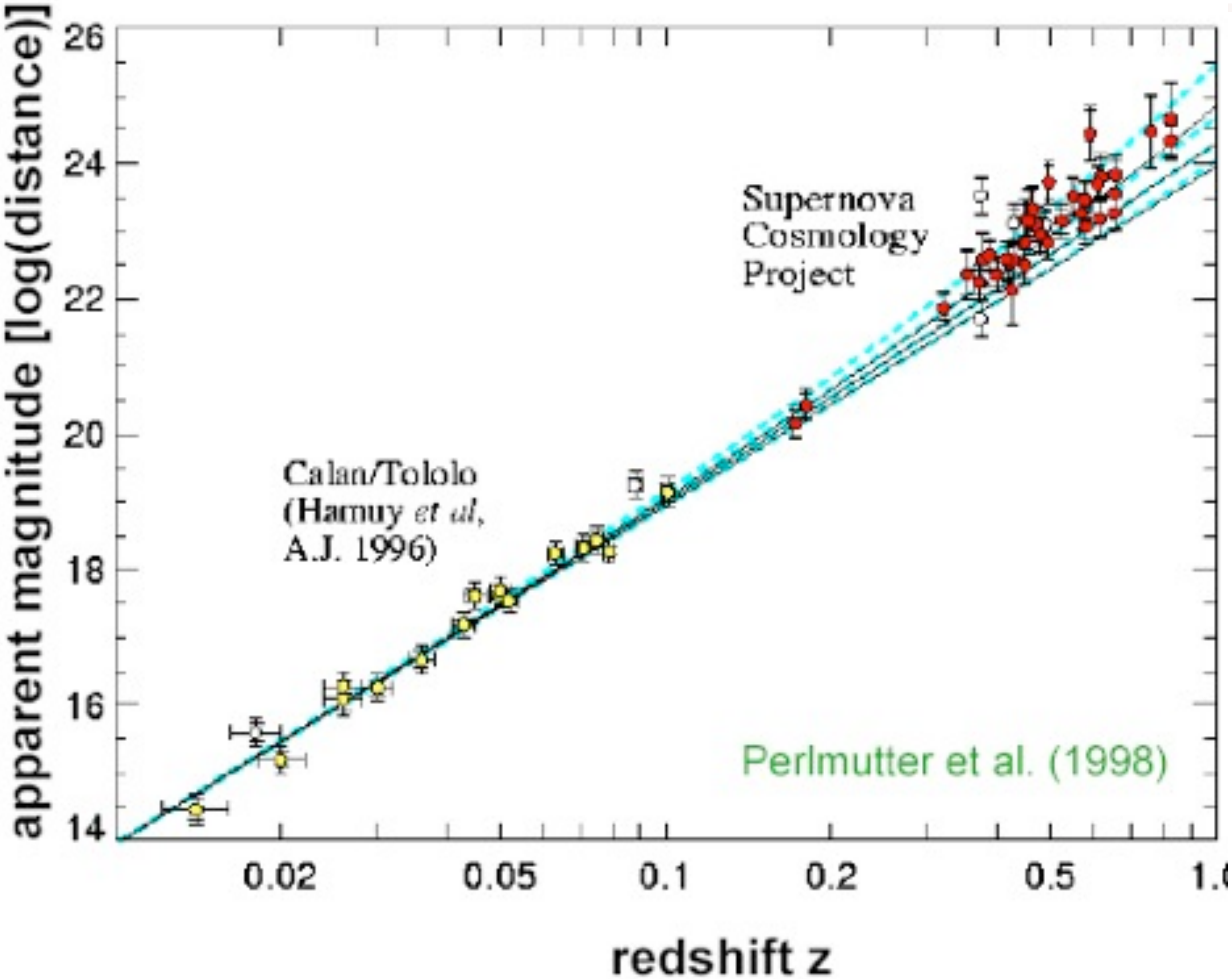
O Universo está em expansão acelerada.

Mas



O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias



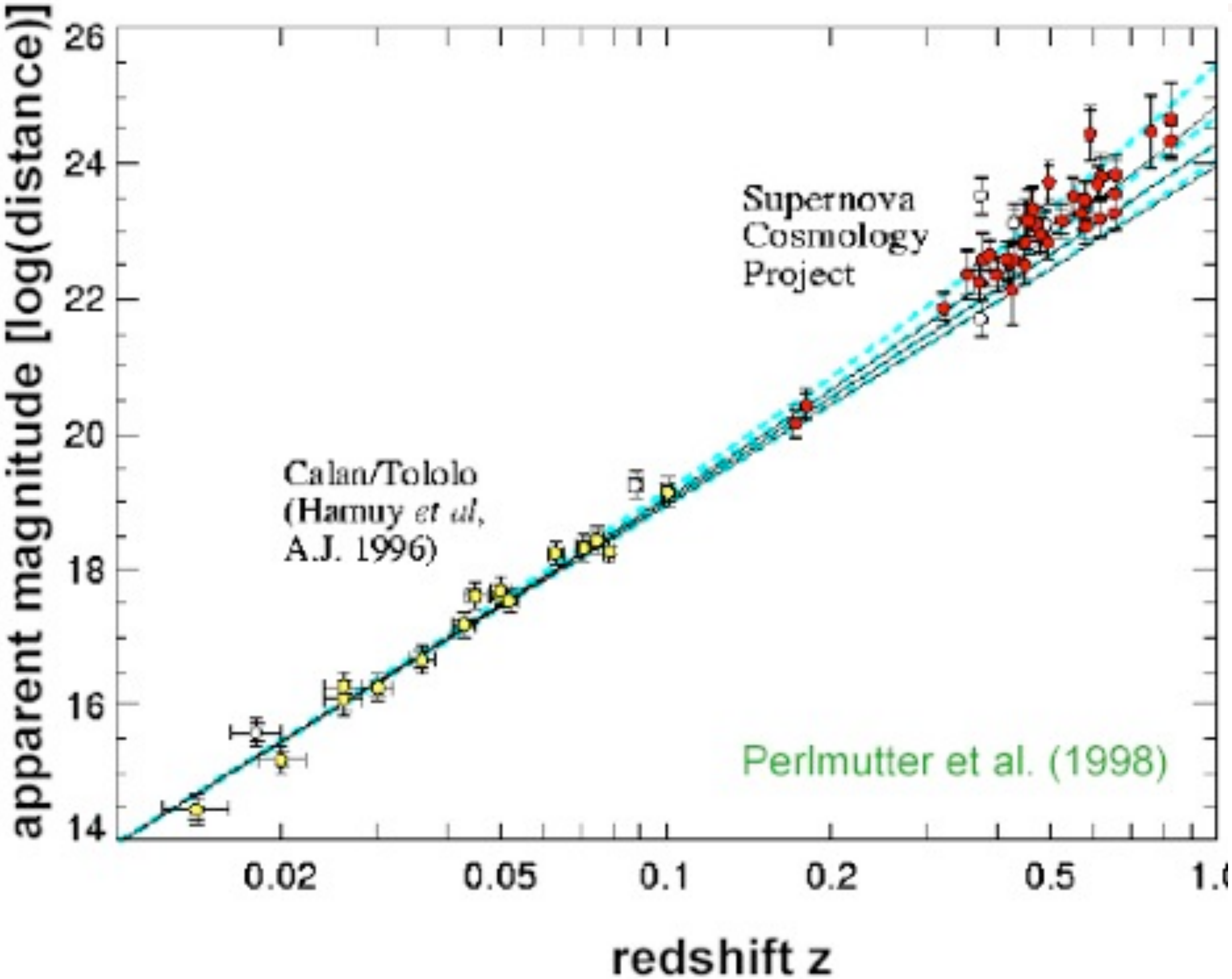
O Universo está em expansão acelerada.

Mas

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias



O Universo está em expansão acelerada.

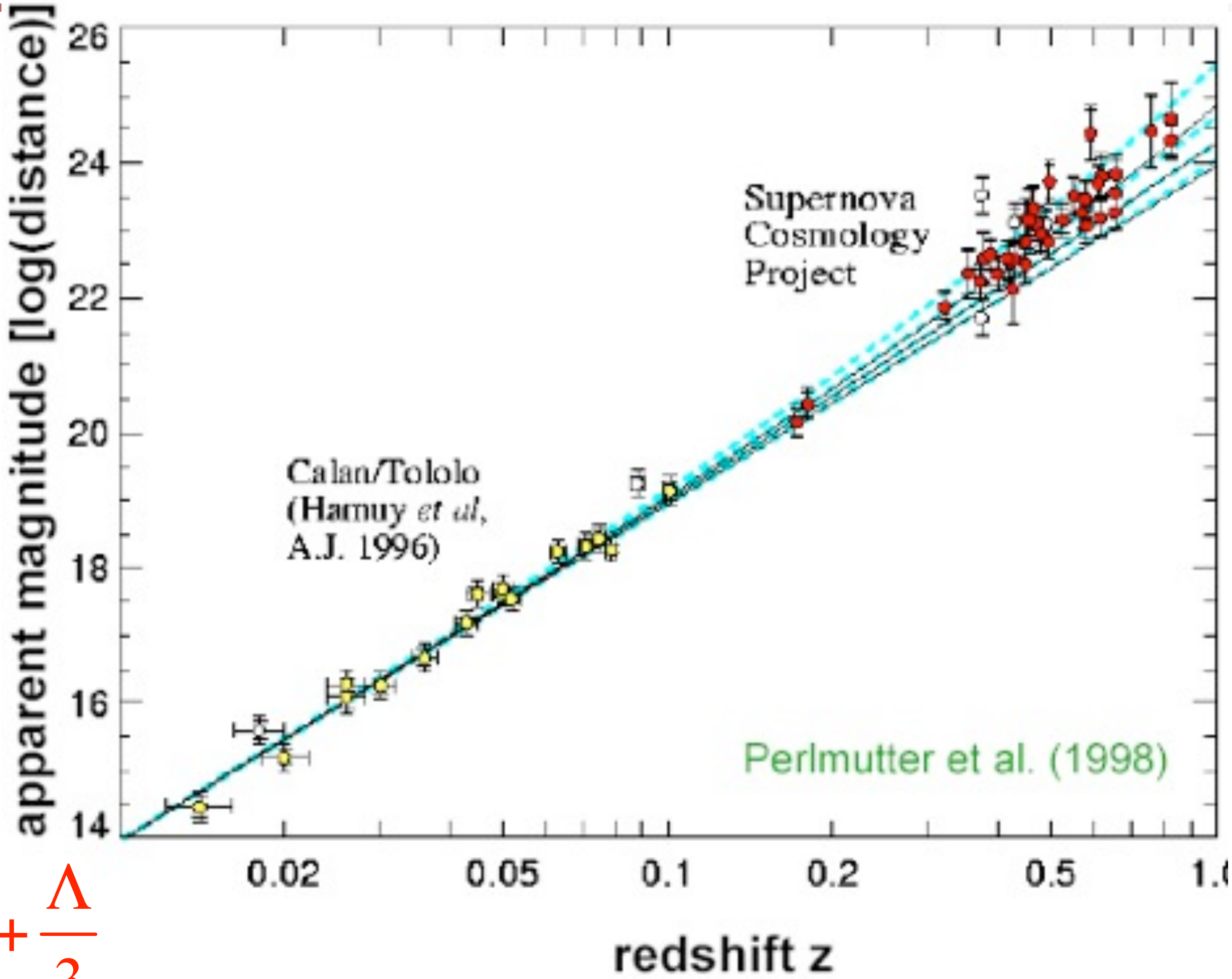
Mas

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

$\Longrightarrow$ **Energia escura, ou constante cosmológica!**

O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias



O Universo está em expansão acelerada.

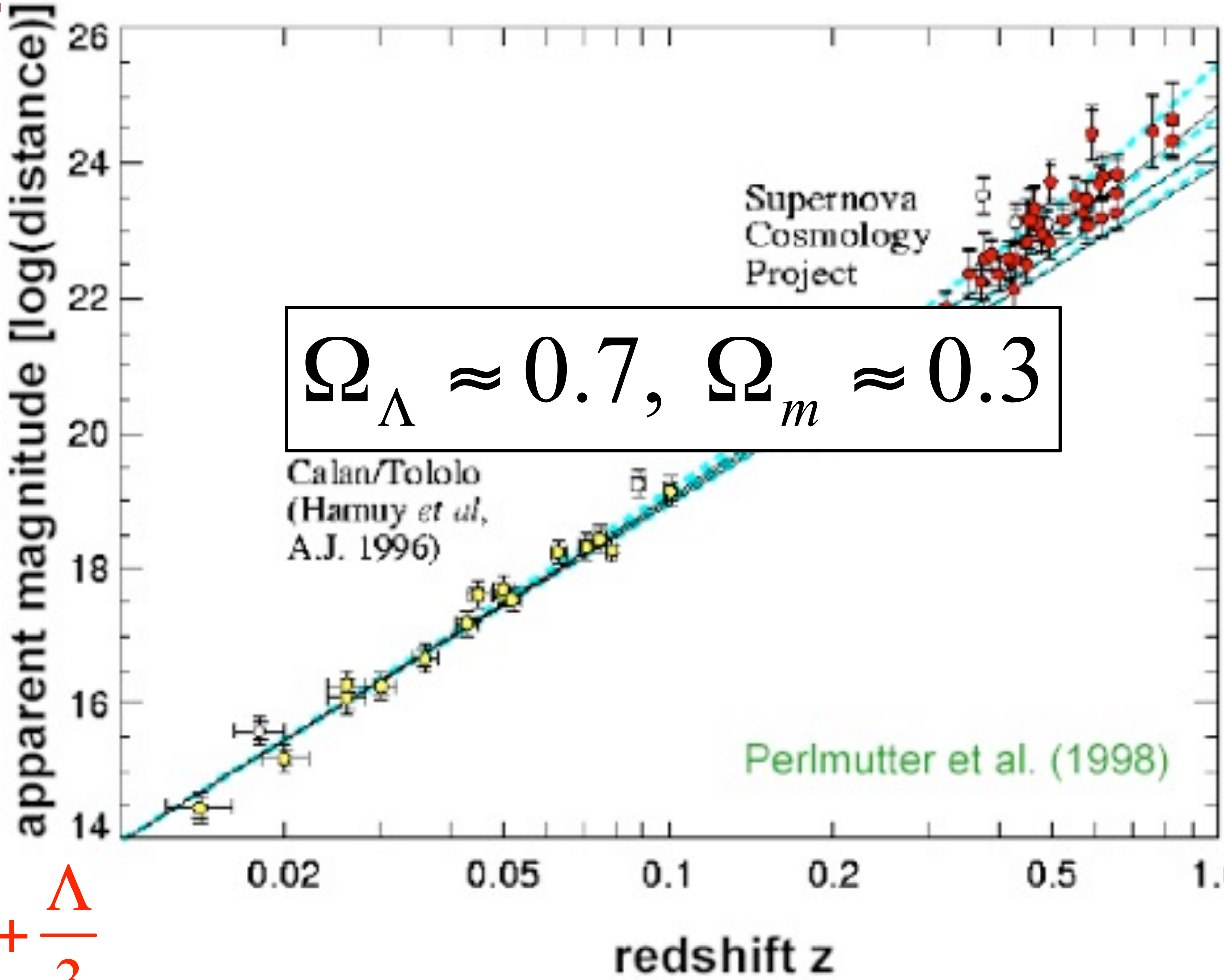
Mas

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

$\Longrightarrow$ **Energia escura, ou constante cosmológica!**

O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias



$$\Omega_\Lambda \approx 0.7,\ \Omega_m \approx 0.3$$

O Universo está em expansão acelerada.

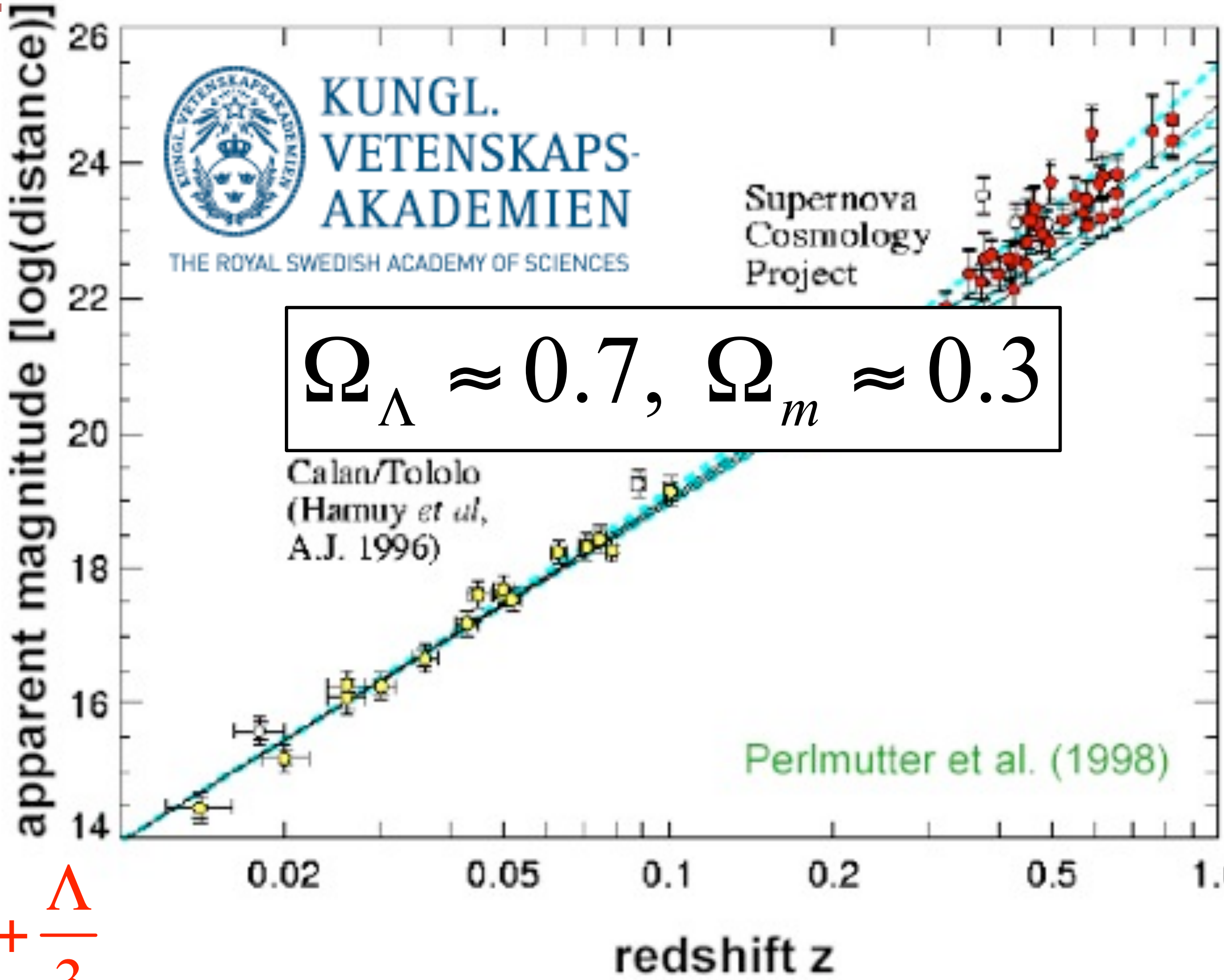
Mas

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

$\Rightarrow$ **Energia escura, ou constante cosmológica!**

O Universo Acelerado

Diagrama de Hubble para grandes distâncias



O Universo está em expansão acelerada.

Mas

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

$\Rightarrow$ **Energia escura, ou constante cosmológica!**

A Idade do Universo

Idade x H_0^{-1}

Evolução do Universo ($\Lambda = 0$)

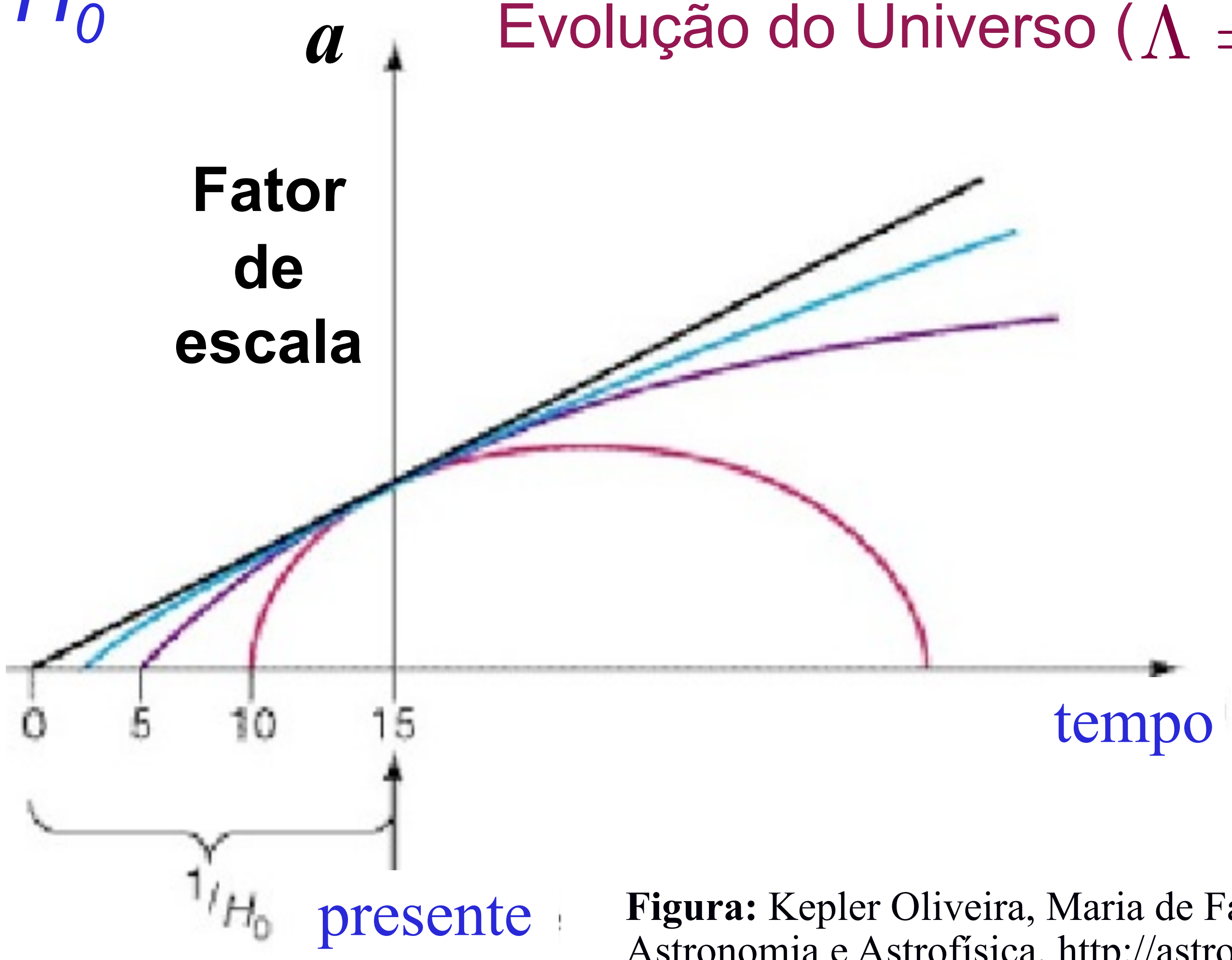


Figura: Kepler Oliveira, Maria de Fátima Saraiva
Astronomia e Astrofísica, http://astro.if.ufrgs.br/

A Idade do Universo

Idade x H_0^{-1}

Evolução do Universo ($\Lambda = 0$)

$$\dot{a}_0 = a_0 / t_{0\text{est}}$$

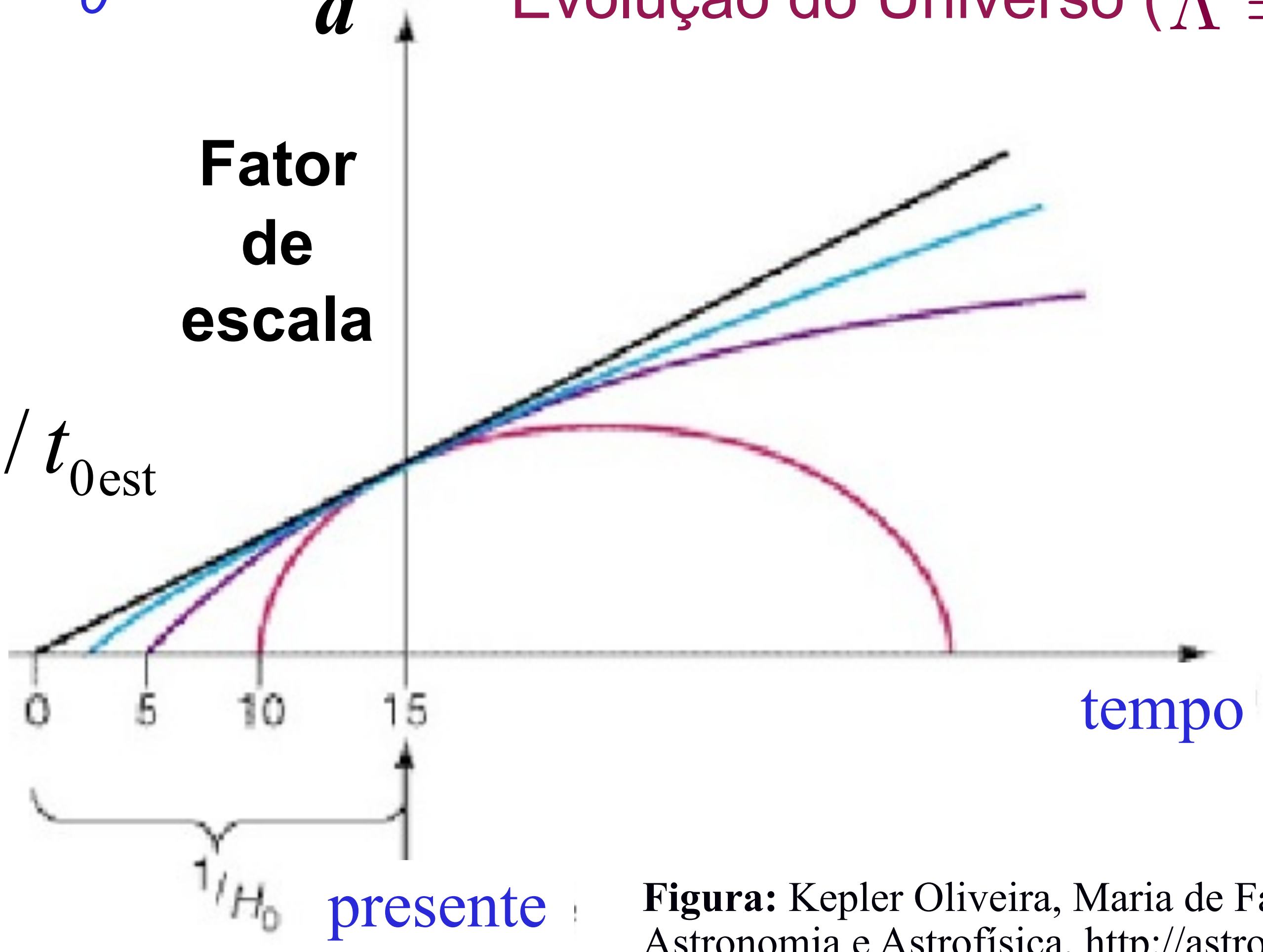


Figura: Kepler Oliveira, Maria de Fátima Saraiva
Astronomia e Astrofísica, http://astro.if.ufrgs.br/

A Idade do Universo

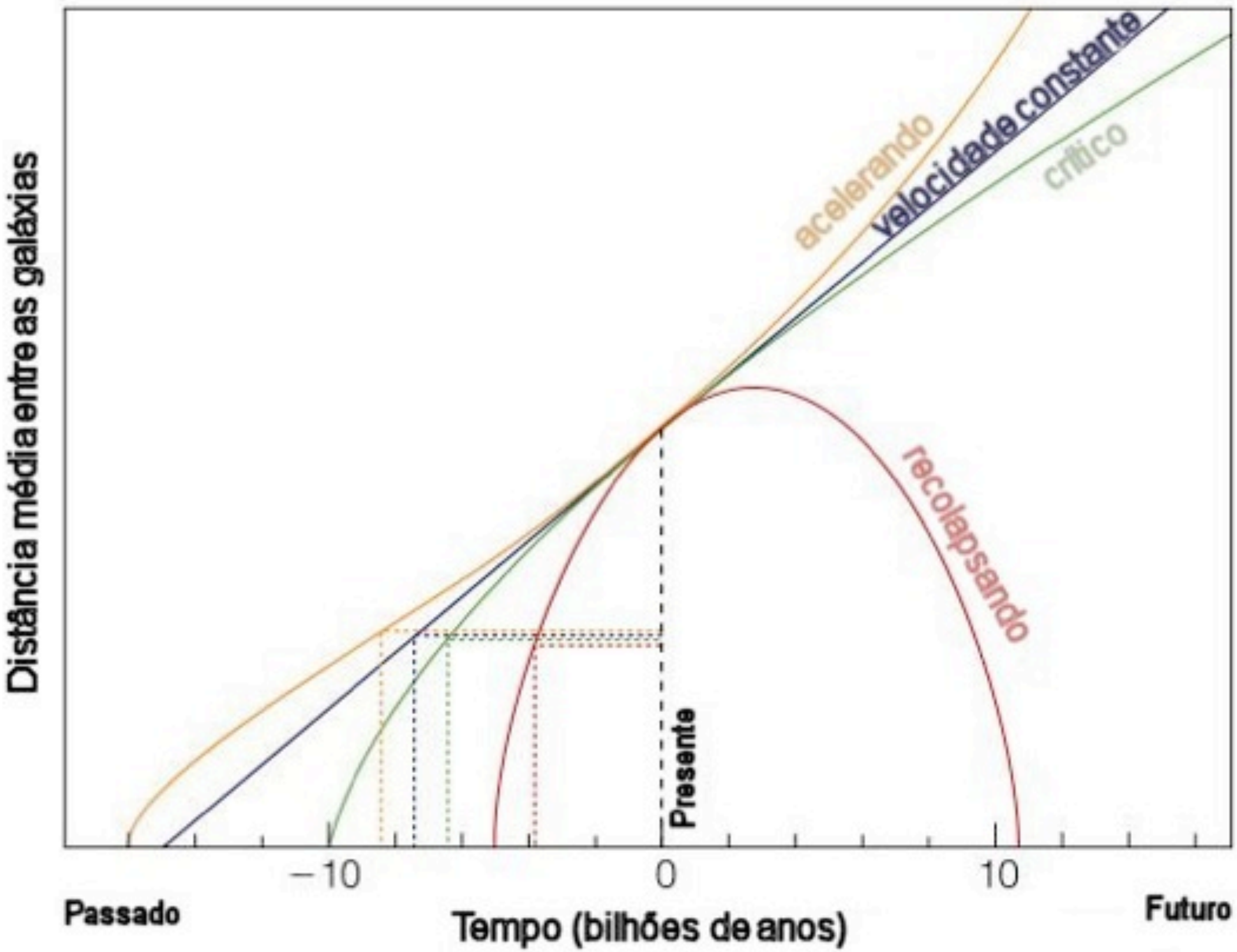


Figura: Kepler Oliveira, Maria de Fátima Saraiva, Astronomia e Astrofísica, http://astro.if.ufrgs.br/

A Idade do Universo

- Aceleração resolve o problema da idade

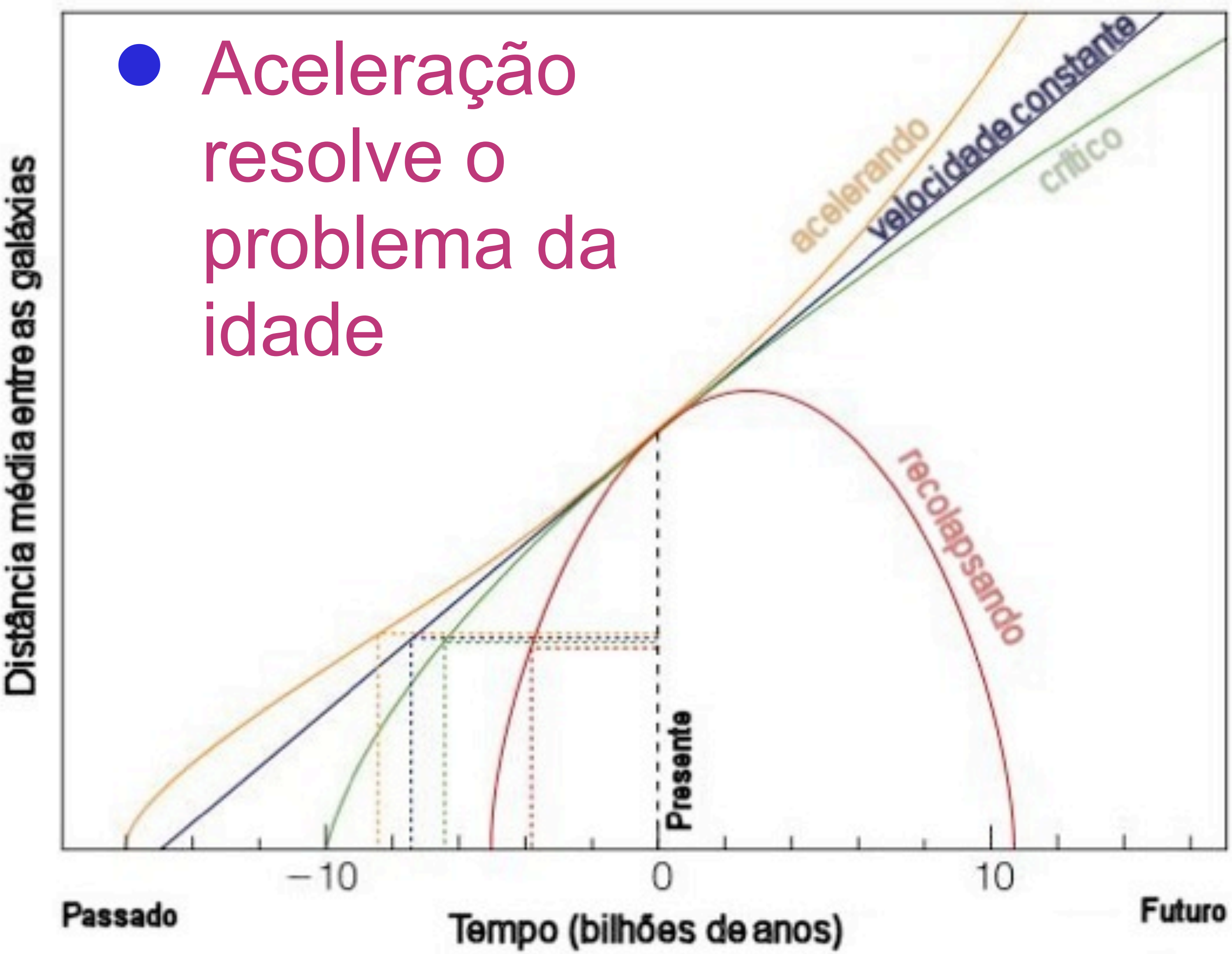
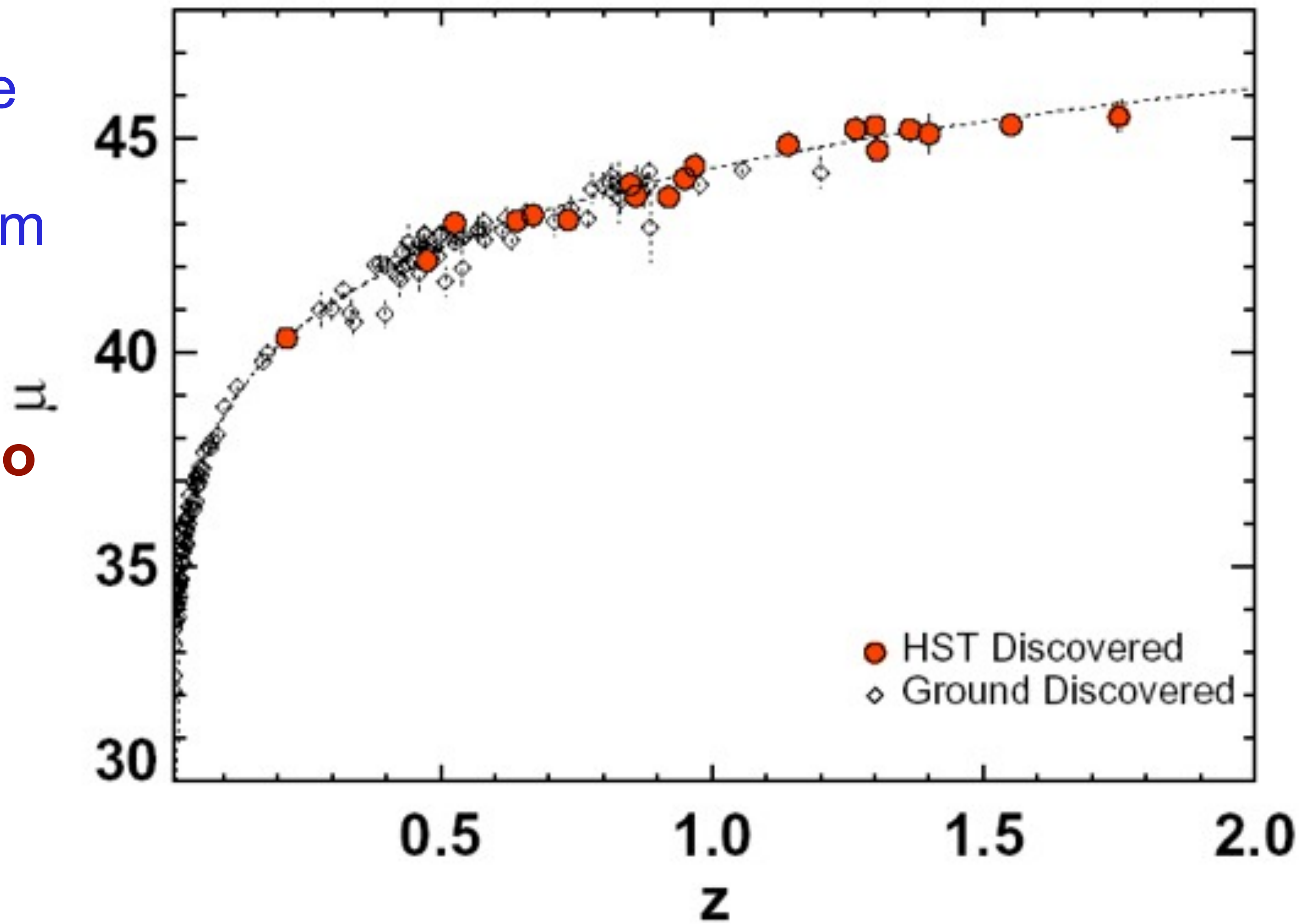


Figura: Kepler Oliveira, Maria de Fátima Saraiva, Astronomia e Astrofísica, http://astro.if.ufrgs.br/

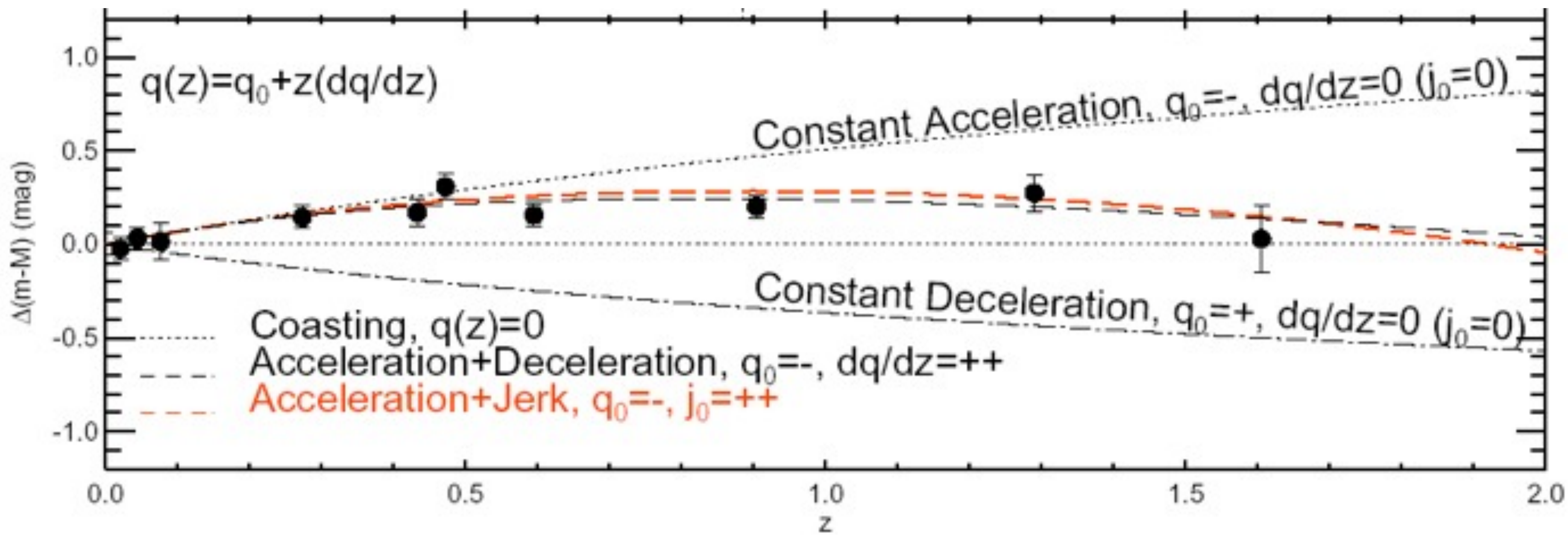
O Universo Acelerado

- Diagrama de Hubble para grandes z, com boa precisão

➔ **O Universo está em expansão acelerada**



O Universo Desacelerando!



Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

Candidatos (Taxonomia da Energia Escura):

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

Candidatos (Taxonomia da Energia Escura):

- Constante cosmológica

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

Candidatos (Taxonomia da Energia Escura):

- Constante cosmológica
- Campo escalar:

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

Candidatos (Taxonomia da Energia Escura):

- Constante cosmológica
- Campo escalar:
  - Quintessência

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

Candidatos (Taxonomia da Energia Escura):

- Constante cosmológica
- Campo escalar:
  - Quintessência
  - Quartessência, k-essência, spintessência, meleca...

Energia Escura

2/3 da densidade do universo estão sob a forma de Energia Escura!

Evidências:

- Expansão acelerada de galáxias distantes
- Idade do Universo
- Curvatura pequena
- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Análise combinada de diversos observáveis cosmológicos

Candidatos (Taxonomia da Energia Escura):

- Constante cosmológica
- Campo escalar:
  - Quintessência
  - Quartessência, k-essência, spintessência, meleca...

Nova teoria da gravitação