

A Escala Astronômica de Distâncias

Ronaldo E. de Souza
`mailto:ronaldo@astro.iag.usp.br`



8 de junho de 2006

1

Introdução

- Paralaxe - O Indicador Fundamental
- Vizinhança Solar
- Paralaxe Estatística
- A Galáxia

2

As Cefeidas

- Padrão da Curva de Luz
- Relação Período-Luminosidade
- Absorção Interestelar
- Peculiaridades Cinemáticas Locais e Estimativa de H_0

3

Relação Tully-Fisher

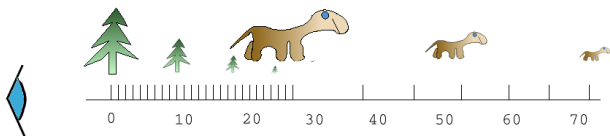
- Estrutura das Espirais
- Relação TF como Conseqüência Dinâmica
- A Calibração Empírica
- Estimativa de H_0 do HST Key Group

4

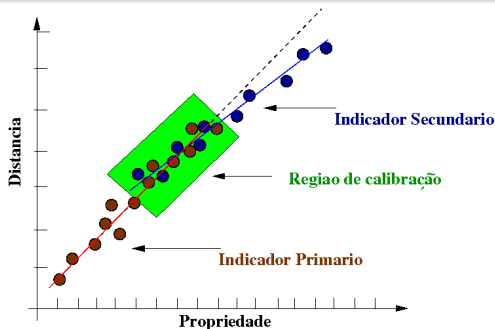
Supernovas

- Os Fundamentos
- Calibração das Curvas de Luz
- Supernovas e a Geometria do Universo
- O Universo Acelerado

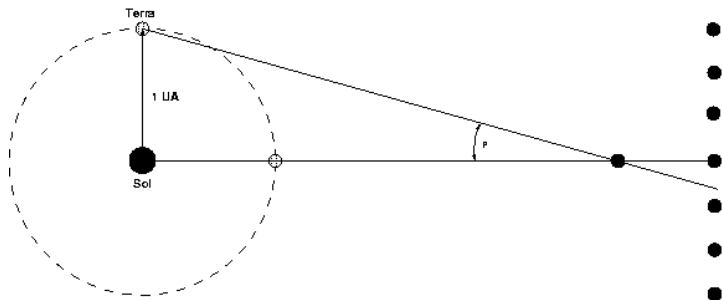
Como medir precisamente as distâncias utilizando padrões diferentes e que podem se modificar quando examinamos o passado distante? Esta questão básica praticamente impediu o desenvolvimento da astronomia desde o início do século XVII, quando surgiu o heliocentrismo, até meados do século XIX. Nesta fase a astronomia era considerada como uma ciência especulativa sem base experimental sólida.



Em um indicador primário ($d = KX$) o desvio quadrático médio deve depender apenas de erros amostrais diretos ($\overline{\delta^2 d}/d^2 = \overline{\delta K^2}/K^2$). Em um indicador secundário devemos esperar também uma propagação dos erros resultantes da calibração entre os indicadores ($\overline{\delta^2 d}/d^2 = \overline{\delta K^2}/K^2 + \overline{\delta K_{cal}^2}/K^2$).



A paralaxe é uma mudança na posição aparente das estrelas próximas em relação às estrelas de fundo, as quais permanecem praticamente fixas devido à enorme distância.

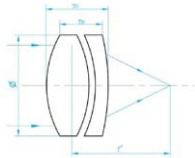


Somente em 1838 Friedrich W. Bessel anunciou a primeira medida confiável de paralaxe da estrela 61 Cygni, cerca de $0,31316'' \pm 0,0254''$, implicando em uma distância da ordem de 660 000 maior que a distância da Terra ao Sol.



1 segundo de arco corresponde aproximadamente ao ângulo sob o qual vemos a largura de um dedo humano à distância de 2 Kilômetros!

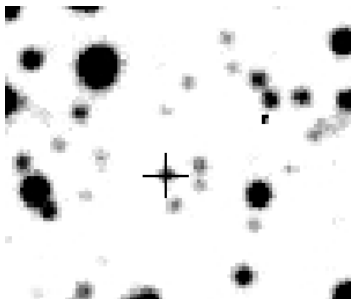
A medida da paralaxe dependeu do desenvolvimento das objetivas acromáticas, compondo vidros de diferentes índices de refração, realizado por Fraunhofer.



$$d = \frac{1 \text{ UA}}{\tan p} = \frac{1,4960 \times 10^{13} \text{ cm}}{\tan p}$$

1UA = $1,4960 \times 10^{13}$ cm denomina-se *unidade astronômica*, e corresponde à distância média da Terra ao Sol. Uma paralaxe de 1" corresponde a uma distância de $3,086 \times 10^{18}$ cm, definida como sendo o *parsec* ou pc. Pelos padrões terrestres esta é uma enorme distância correspondente a cerca de 3,26 anos-luz, mas do ponto de vista cosmológico essa dimensão ainda é muito reduzida. Com o satélite Hiparcos podemos estimar distâncias de até 100 pc, ou cerca de 300 anos-luz, com precisão da ordem de 10%. Mas isto ainda representa menos de 1% da dimensão da Galáxia.

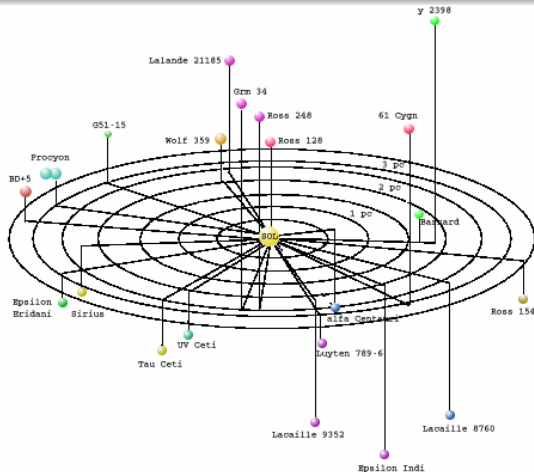
Próxima Centauri por exemplo tem uma paralaxe anual média de 0.76 segundos de arco e está a 1.32 pc. Mas veja a dificuldade de medir o efeito de paralaxe a partir de telescópios no solo mesmo no caso de estrelas próximas!



Próxima Centauri por exemplo tem uma paralaxe anual média de 0.76 segundos de arco e está a 1.32 pc. Mas veja a dificuldade de medir o efeito de paralaxe a partir de telescópios no solo mesmo no caso de estrelas próximas!



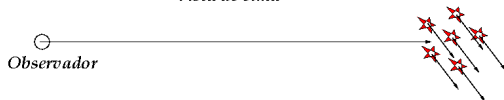
As medidas de paralaxe, mesmo realizadas do espaço, nos permitem conhecer as distâncias na vizinhança solar.



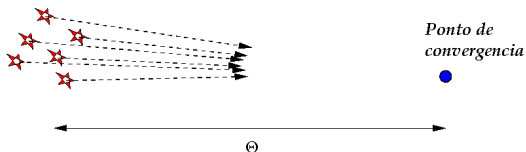
Devido ao efeito de projeção as estrelas de um aglomerado aberto próximo parecem ter um movimento convergente

$$d = \frac{V_{Transv}}{d\theta/dt} = \frac{V_{rad} \tan \theta}{d\theta/dt}$$

Vista de cima



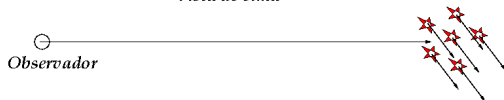
Vista no plano do céu



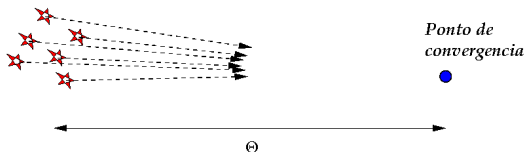
Devido ao efeito de projeção as estrelas de um aglomerado aberto próximo parecem ter um movimento convergente

$$d = \frac{V_{Transv}}{d\theta/dt} = \frac{V_{rad} \tan \theta}{d\theta/dt}$$

Vista de cima

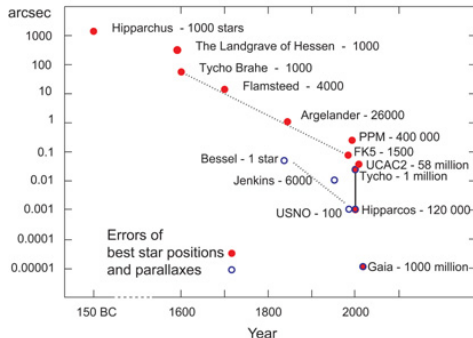
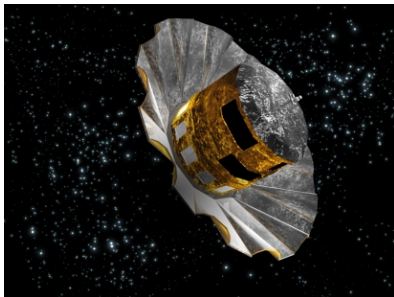


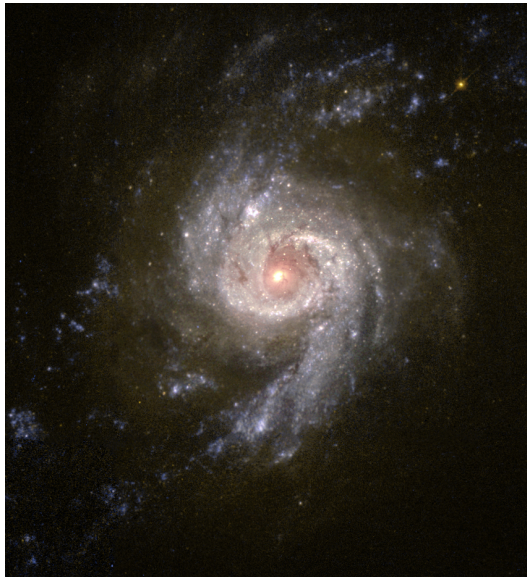
Vista no plano do céu



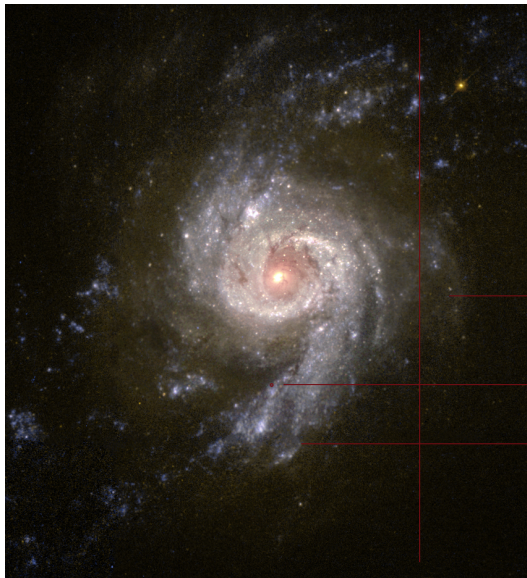
Este método aplicado às Hyades dá uma distância de 45.53 pc enquanto que o método direto dá uma distância de 46.34 pc

No futuro próximo aguarda-se o lançamento da missão GAIA.





Apenas uma pequena região da Galáxia
pode ser acessada por medidas diretas de paralaxe



Apenas uma pequena região da Galáxia
pode ser acessada por medidas diretas de paralaxe

diâmetro óptico aproximado $\simeq 40$ Kpc

vizinhança solar $\simeq 200$ pc

A Missão GAIA vai observar
praticamente toda a Galáxia

Estrelas pulsantes que obedecendo o teorema do Virial ($Mc_s^2 = GM^2/R$) devem seguir a relação

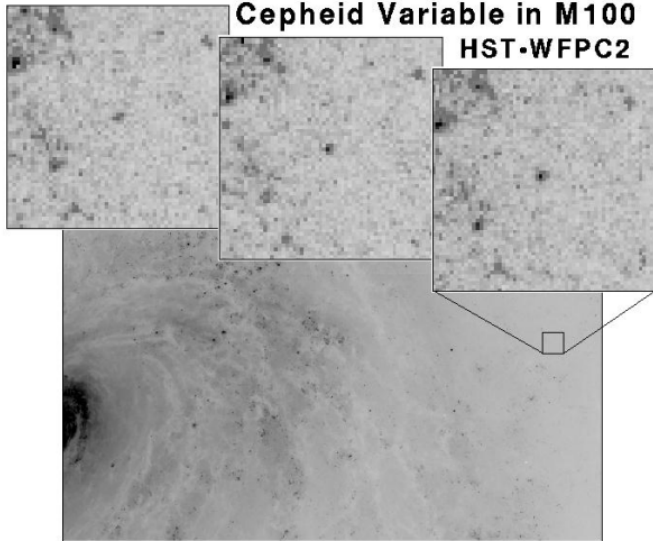
$$P \simeq 1/\sqrt{G\rho}$$

Como $L = 4\pi R_*^2 a T_e^4$, a temperatura é aproximadamente constante e $L \propto M^{4.5}$, nesta faixa de massas, resulta que $P \simeq L^{1.57}$ ou

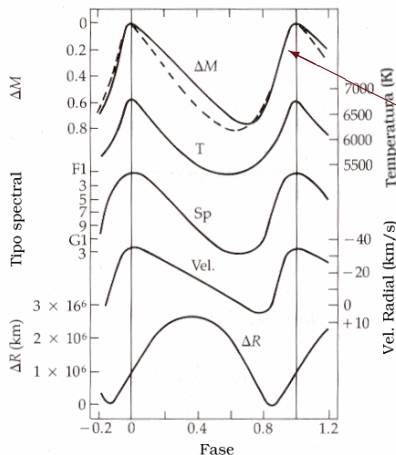
$$M_{abs} \simeq -3.9 \log P + C^{te}$$



Cepheid Variable in M100 HST-WFPC2



As principais variáveis físicas flutuam durante um período seguindo um padrão bastante regular facilmente identificável.



Padrão da curva de luz fotométrica

$$m - M_{abs} = 5 \log d - 5$$

As calibrações empíricas indicam que

$$M_{abs} = -3.8 \log P + 2.7(B - V) - 2.21$$

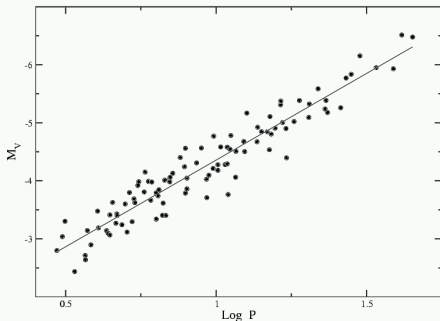
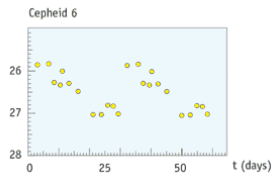
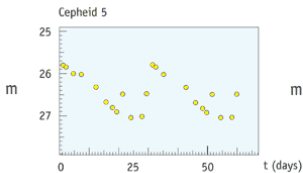
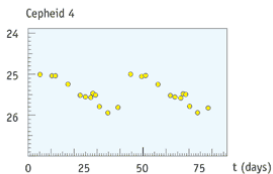
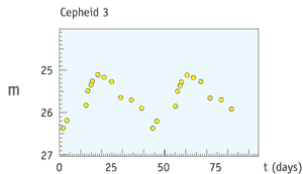
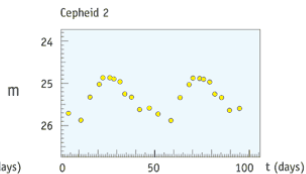
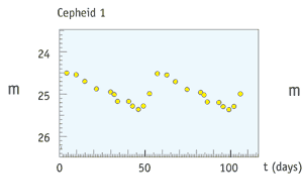
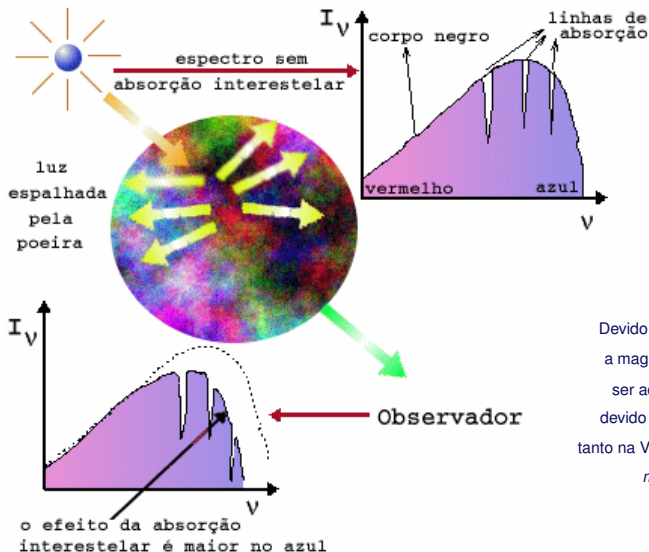


Figura 2.2 Exemplo de calibração da relação período-luminosidade (PL) de uma amostra de 100 cefeidas galácticas. Observe que a relação PL é acuradamente seguida num intervalo de quase 5 magnitudes, representando uma variação de brilho de um fator 100 entre a estrela mais brilhante e a mais débil. (Baseado em dados publicados por Gieren, Barnes & Moffett, 1993, *ApJ*, **418**, 141.)

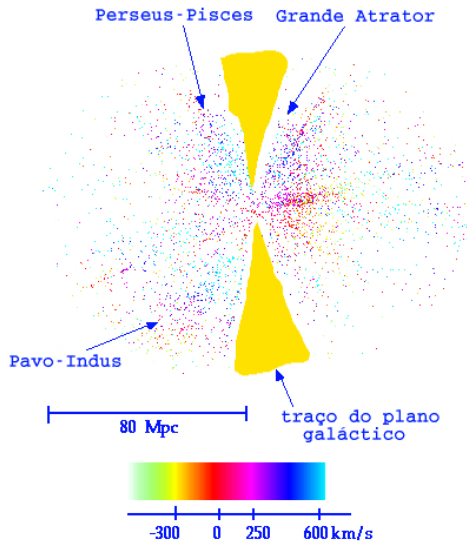


Exemplos de curvas de luz
de variáveis cefeidas em M100
observadas pelo HST
em Freedman et al. (1994).

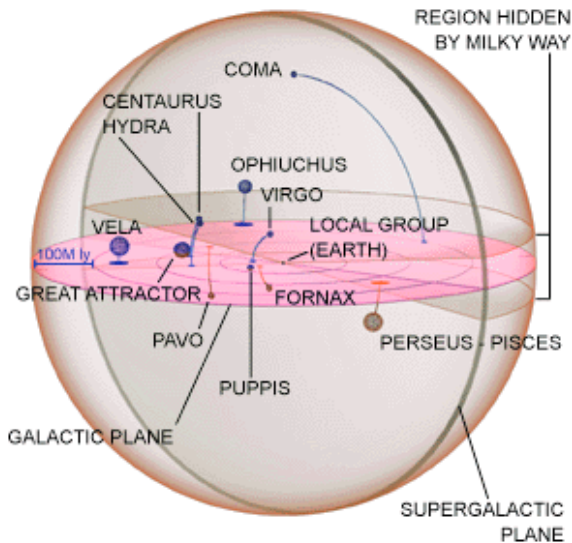


Devido à absorção interestelar a magnitude observada deve ser acrescida de um termo devido à absorção interestelar tanto na Via Láctea como na galáxia

$$m_{obs} = m_0 + A_\lambda$$



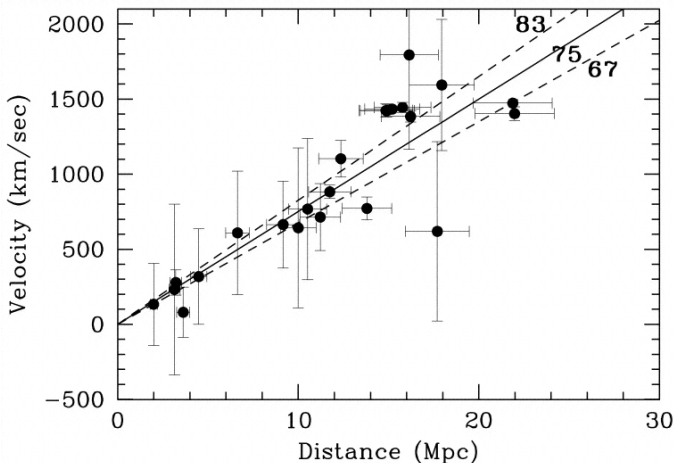
A aplicação das Cefeidas para estimar a constante de Hubble depende de uma correção cinemática a ser aplicada nas velocidades observadas devido ao movimento das galáxias locais em relação ao aglomerado de Virgo e ao Grande Atrator.



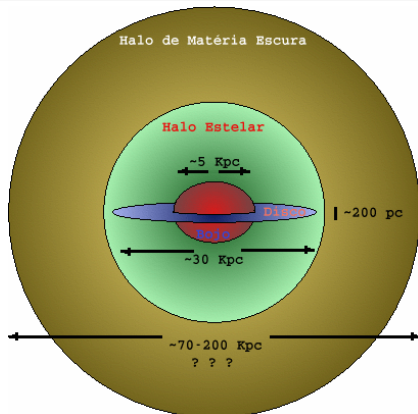
As melhores estimativas de H_0 baseadas nas Cefeidas resultam em $H_0 = (75 \pm 8) \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$.

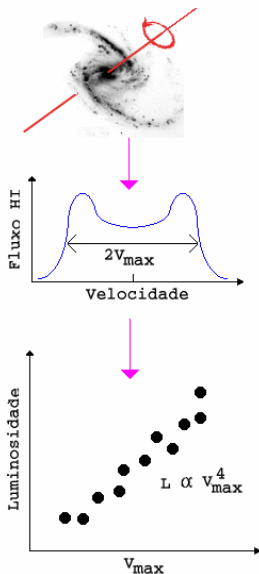
Estimativa de H_0 baseada somente nas Cefeidas

$H_0 = (75 \pm 8) \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ (Freedman *et al.* 2001).



A estrutura típica das galáxias espirais mostra a presença de um disco, bojo e halos estelares imersos em um halo estenso de matéria escura de dimensão ainda pouco conhecida.





Estando o disco estelar em equilíbrio dinâmico de rotação temos

$$V_{\text{rot}}^2 \simeq GM/R$$

además a sua densidade projetada de massa é aproximadamente constante

$$M/R^2 \simeq C^{\text{te}}$$

e para uma dada razão M/L resulta que

$$L \propto V^4$$

Galáxias espirais de diferentes tipos morfológicos seguem aproximadamente esta relação:

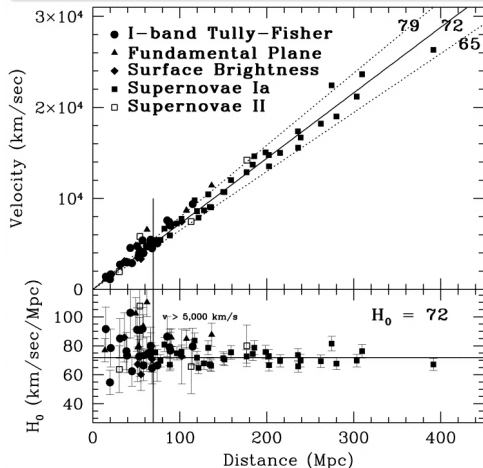
$$M_B \simeq -11,0 \log v_{rot}(\text{Km} \cdot \text{s}^{-1}) + 3,31, \quad \text{Sc}$$

$$M_B \simeq -10,2 \log v_{rot}(\text{Km} \cdot \text{s}^{-1}) + 2,71, \quad \text{Sb}$$

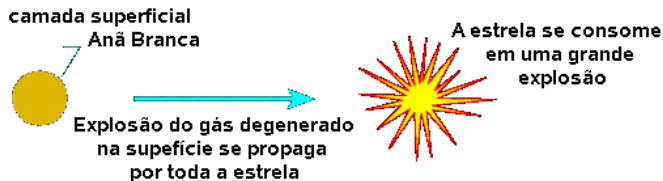
$$M_B \simeq -9,95 \log v_{rot}(\text{Km} \cdot \text{s}^{-1}) + 3,15, \quad \text{Sa}$$

M31 por exemplo tem um tipo morfológico Sb e $V_{rot} \simeq 200 \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1}$ e sua distância aproximada deve ser 676 Kpc.

Estimativa de H_0 baseada somente nos vários indicadores
 $H_0 = (72 \pm 7) \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ (Freedman *et al.* 2001).

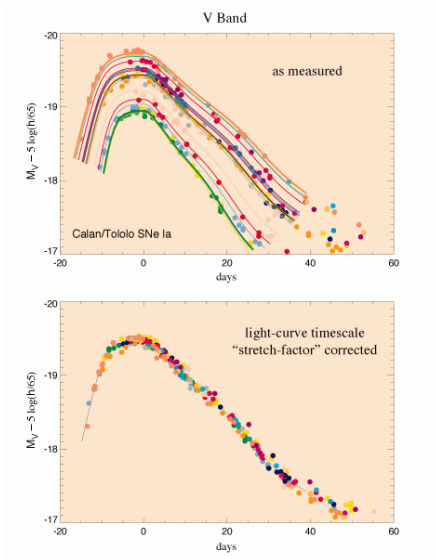


As supernovas do tipo Ia ocorrem quando uma anã branca em um sistema binário acreta massa e ultrapassa o limite de $1.44 M_{\odot}$. Sendo rompido este limite a estrela perde a sua condição de equilíbrio gravitacional e explode. Como este limite é muito bem definido a luminosidade do evento é praticamente constante, com flutuações da ordem de 20% garantindo a sua utilidade como indicador de distância.





Exemplo de supernova Ia identificada
na galáxia NGC 4526 do
aglomerado de Virgo



Exemplo de calibração das curvas de luz de objetos próximos. A curva sintética é utilizada posteriormente para identificar os eventos em galáxias distantes.

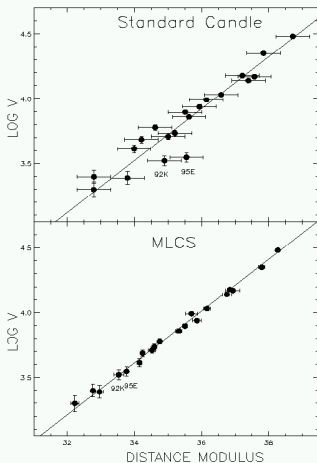
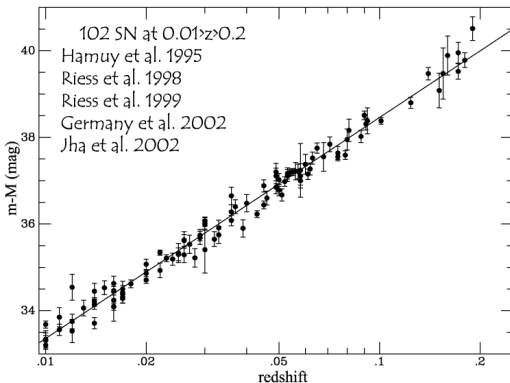


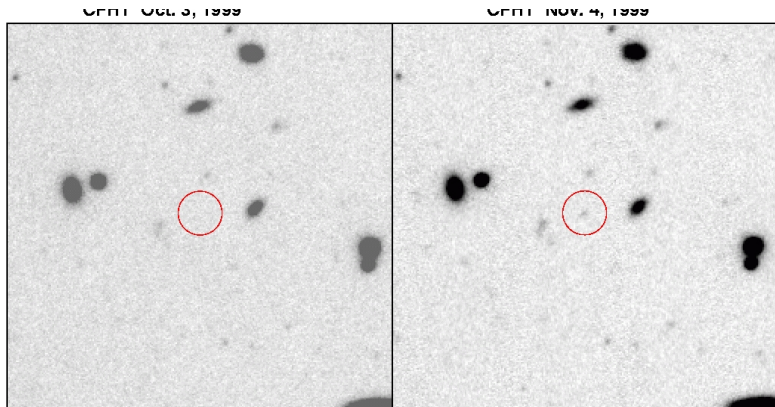
Figure 6: Hubble Diagrams for SN Ia with velocities in the COBE rest frame on the Cepheid distance scale (Sandage et al 1994, 1996). All velocity errors are 300 km s^{-1} reflecting a plausible estimate of random velocities with respect to the Hubble flow. (a) Distances estimated with a standard luminosity assumption and no correction for extinction. This method yields $\sigma_v=0.52$ and $H_0=52 \pm 8$ (statistical) $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ (b) Distances from the MLCS method which makes a correction for intrinsic luminosity variation and total extinction as determined from the light and color curve shapes. This method yields $\sigma_v=0.12$ and $H_0=65 \pm 3$ (statistical) $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$.

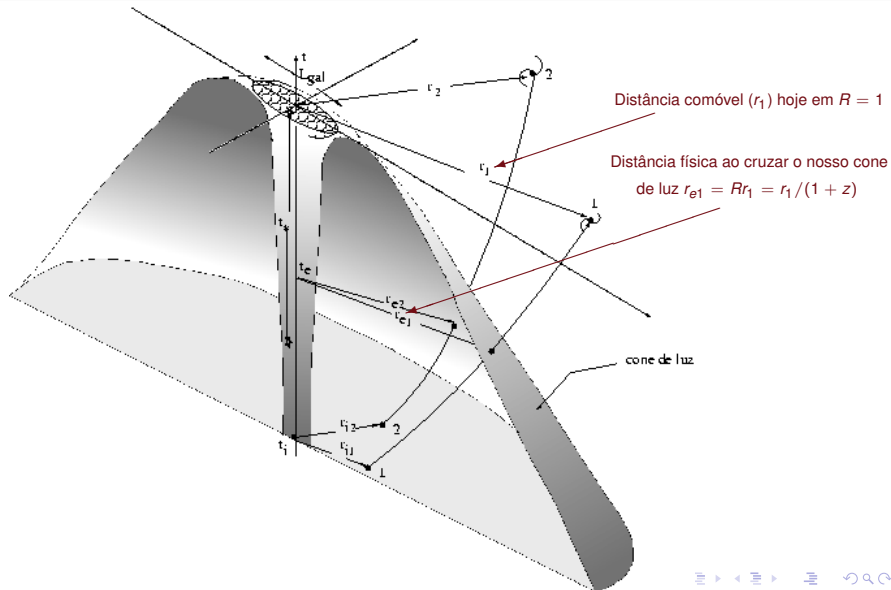
Apesar de todo o cuidado ainda permanecem discordâncias entre as estimativas de H_0 pelas Cefeidas e pelas supernovas

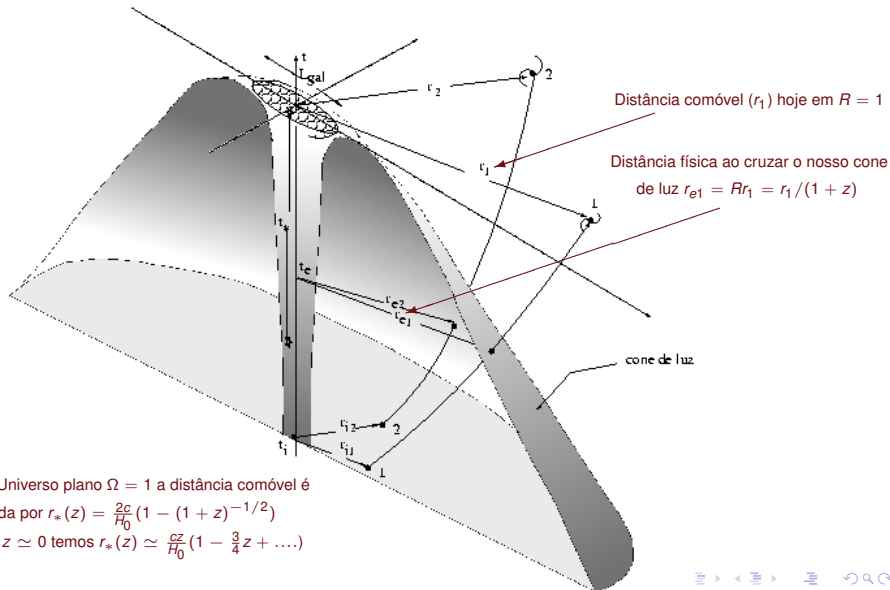
Acredita-se que a amostra local de SNIa componham um indicador de distância bastante acurado e cujas incertezas repousam no valor de H_0 e na calibração da relação período-luminosidade das Nuvens de Magalhães.



O que as supernovas a distâncias cosmológicas nos dizem sobre a geometria do Universo?







Em um Universo plano $\Omega = 1$ a distância comóvel é

$$\text{dada por } r_*(z) = \frac{2c}{H_0} (1 - (1+z)^{-1/2})$$

$$\text{e para } z \simeq 0 \text{ temos } r_*(z) \simeq \frac{cz}{H_0} (1 - \frac{3}{4}z + \dots)$$

Em um Universo plano, $\Omega = 1$, o fluxo observado é dado por

$$f_{obs} = \frac{1}{(1+z)^2} \frac{L}{4\pi r_*^2}$$

o que nos permite definir a *distância de luminosidade*

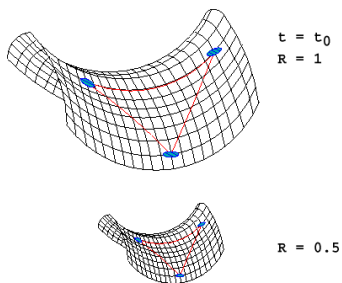
$$d_L = (1+z)r_*$$

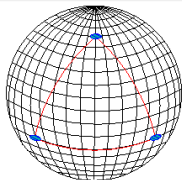
tal que

$$f_{obs} = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

Portanto medindo o fluxo de fontes de luminosidade conhecida estimamos d_L e inferimos a relação da distância comóvel com o redshift a qual depende da geometria do Universo.

No caso mais geral $d_L = d_L(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$
sendo $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$





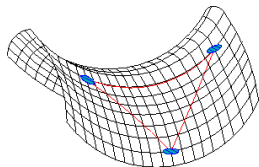
$$t = t_0$$

$$R = 1$$



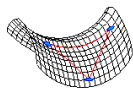
$$R = 0.5$$

No caso mais geral $d_L = d_L(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$
sendo $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$

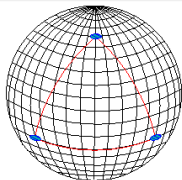


$$t = t_0$$

$$R = 1$$



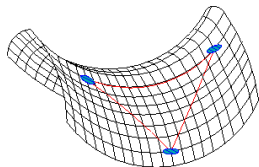
$$R = 0.5$$



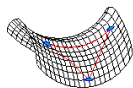
$$t = t_0$$
$$R = 1$$



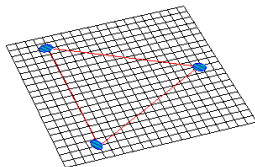
$$R = 0.5$$



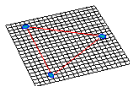
$$t = t_0$$
$$R = 1$$



$$R = 0.5$$

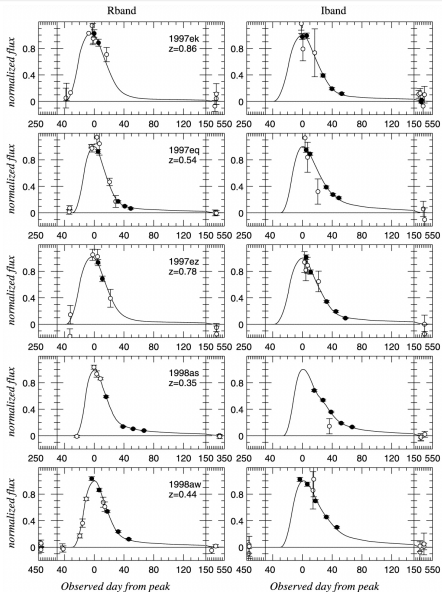


$$t = t_0$$
$$R = 1$$

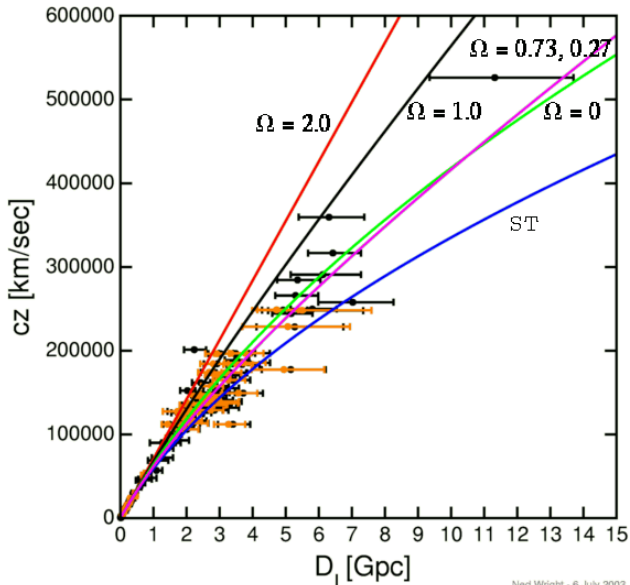


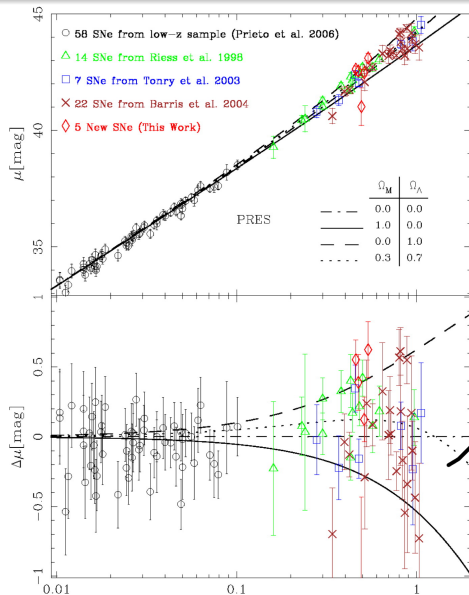
$$R = 0.5$$

No caso mais geral $d_L = d_L(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$
sendo $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$



Exemplos de curvas de luz de Knop et al. 2003





Resultados recentes de Clocchiati et al. 2006
confirmando a expansão acelerada

Existe uma teoria que diz que se em qualquer momento alguém descobrir exatamente qual a finalidade do universo e porque está aqui, ele desaparecerá e será instantaneamente trocado por algo ainda mais bizarro e inexplicável.

Tem uma outra teoria que diz que isto já aconteceu.

Douglas Adams