

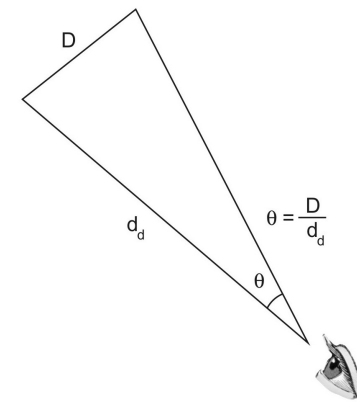
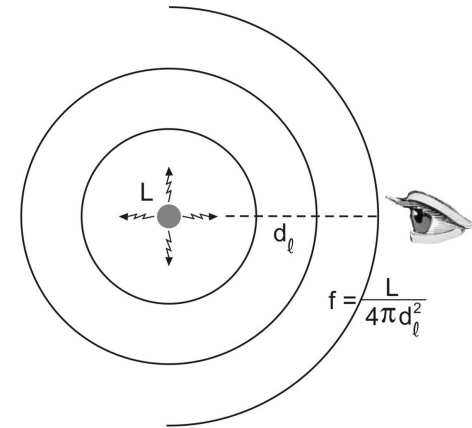


14. Determinação das distâncias das galáxias



Indicadores de distância

- relações entre grandezas que dependem da distância (como o fluxo ou o tamanho aparente) e grandezas que não dependem da distância (como uma velocidade)
- medindo-se a grandeza que depende da distância e a que não depende, pode-se, então, determinar a distância de diâmetro ou de luminosidade do objeto.



Indicadores de distância

- módulo de distância:
 $m - M = 5 \times \log d(\text{pc}) - 5$

ou,

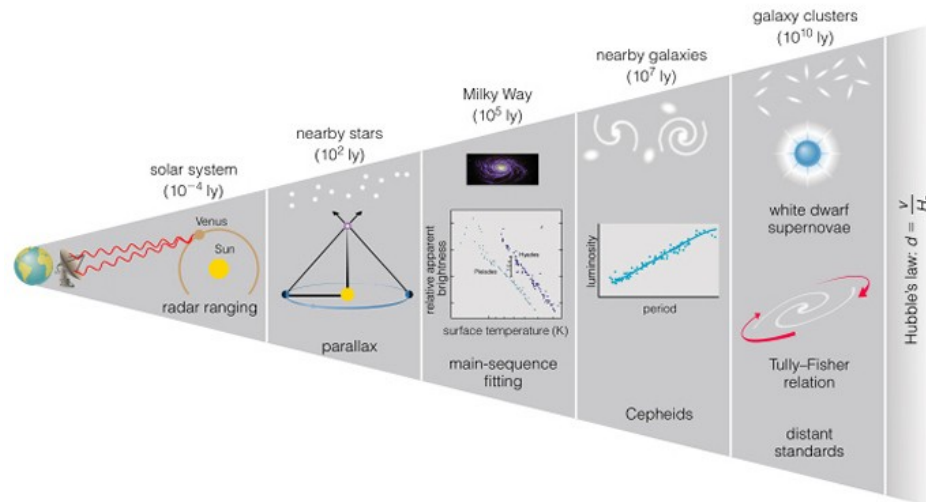
$$d(\text{pc}) = \text{dex}[0.2 (m - M + 5)]$$

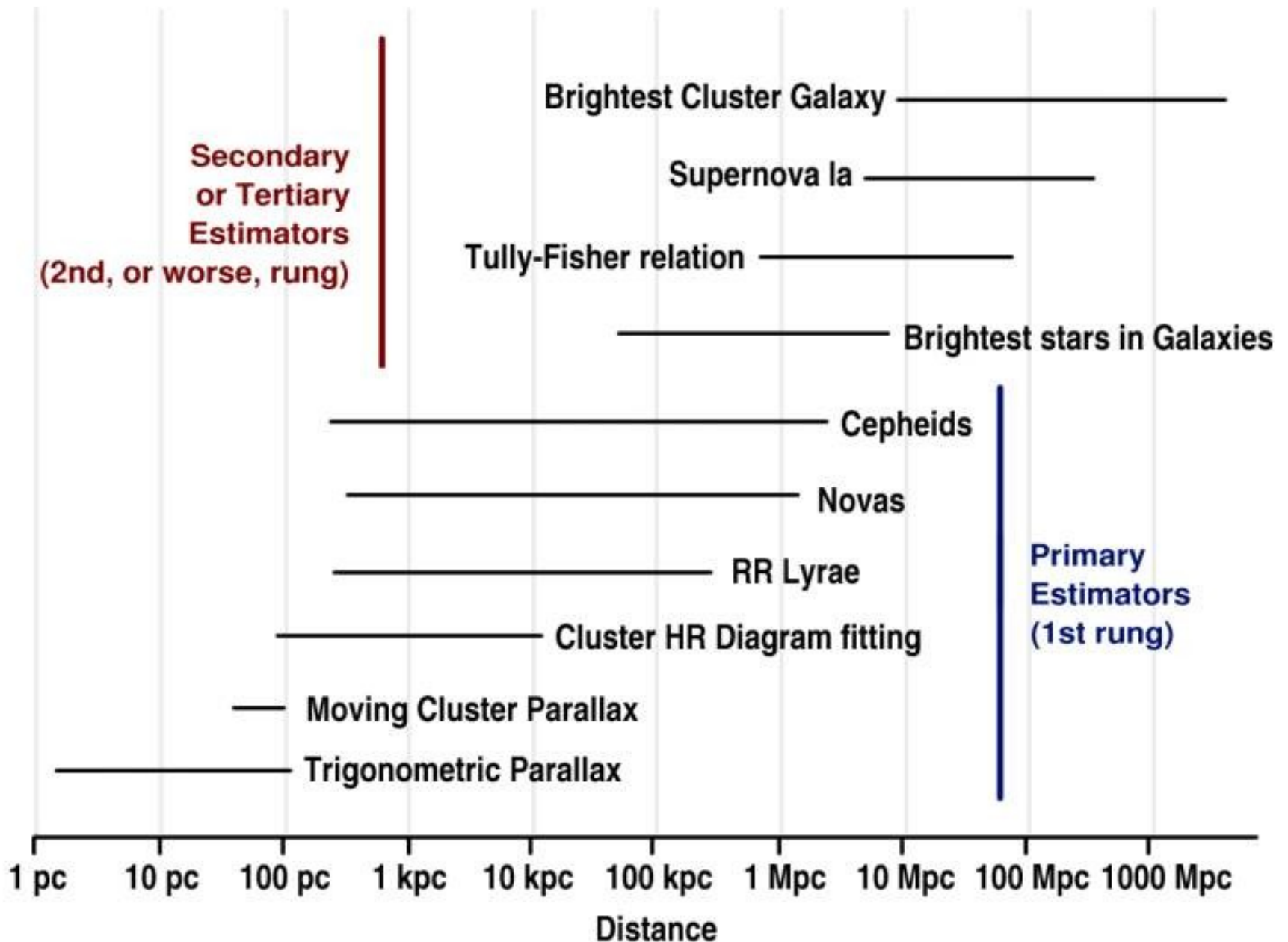
Indicadores de distância

3 tipos de indicadores de distância:

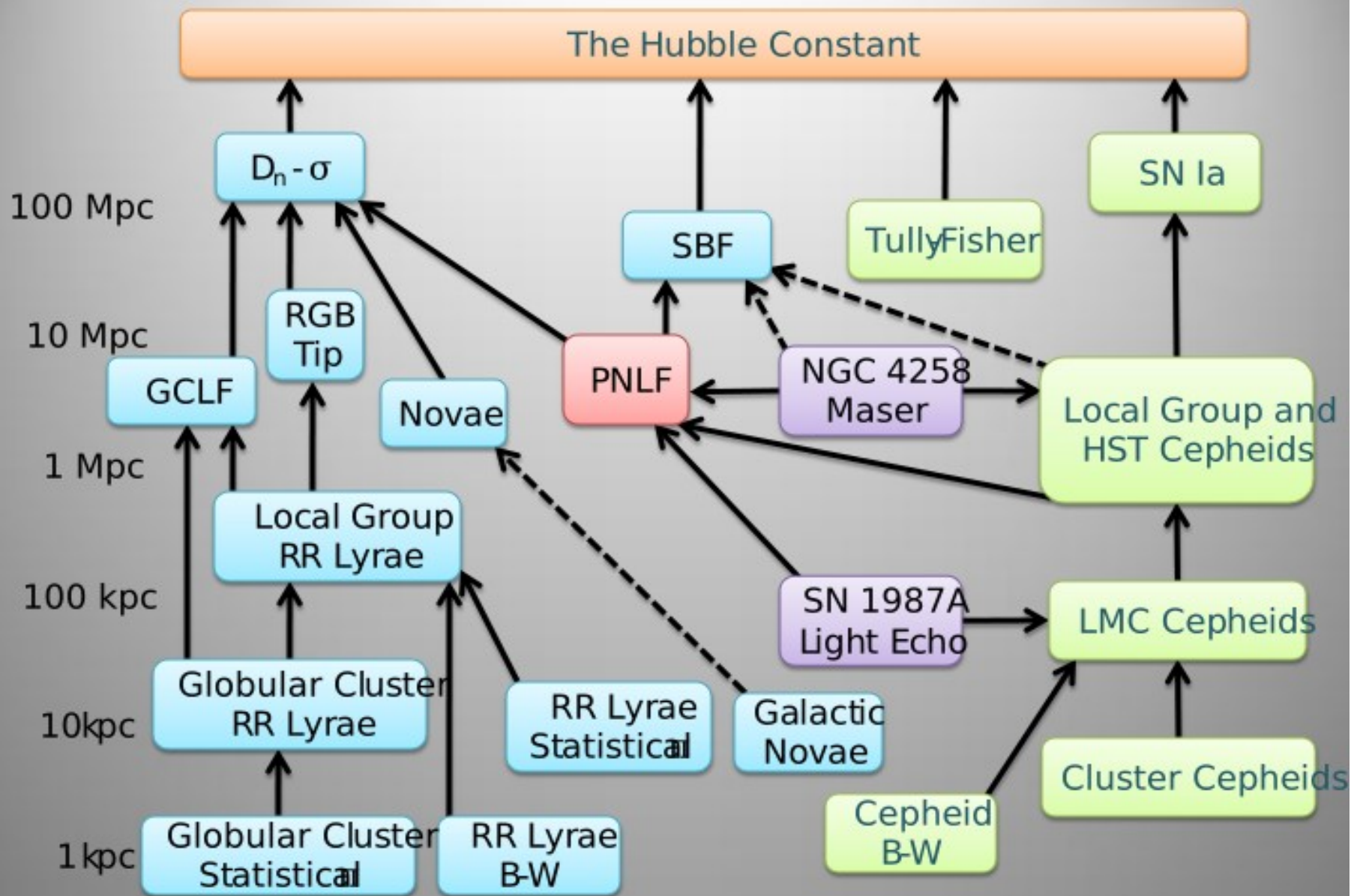
- primários: calibrados por observações na Galáxia ou por argumentos teóricos
Exemplos: cefeidas, RR Lyr, Novas, SN Ia
- secundários: calibrados em galáxias com distâncias determinadas por indicadores primários
Exemplos: relação de Tully-Fisher, $D_n - \sigma$
- terciários: calibrados em galáxias com distâncias obtidas com indicadores secundários
Exemplo: galáxias mais brilhantes dos aglomerados

as incertezas das distâncias obtidas com indicadores secundários são maiores que as obtidas com indicadores primários, e as obtidas com indicadores terciários são maiores que as obtidas com indicadores secundários....





Extragalactic Distance Ladder



Cefeidas

– são estrelas massivas evoluídas que pulsam por estarem na faixa de instabilidade do diagrama H-R

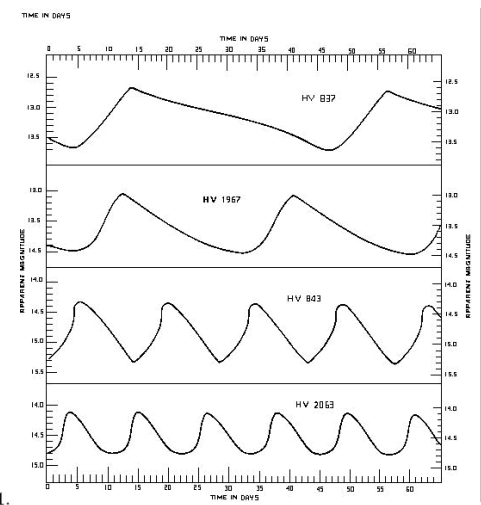
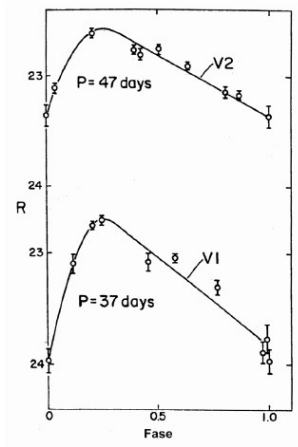
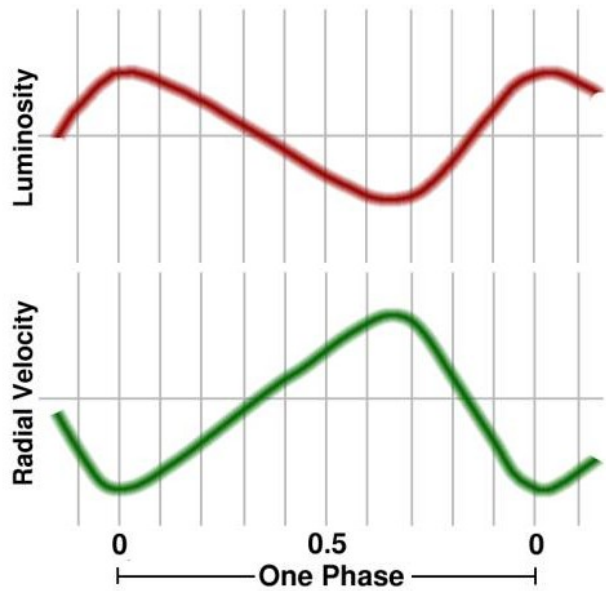
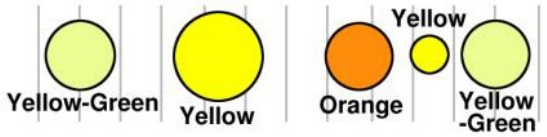
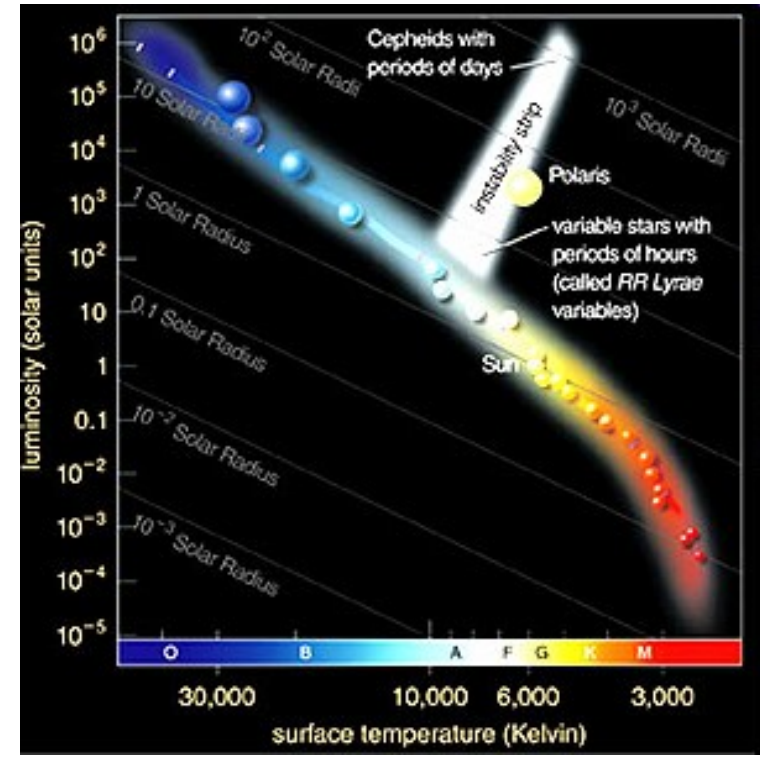
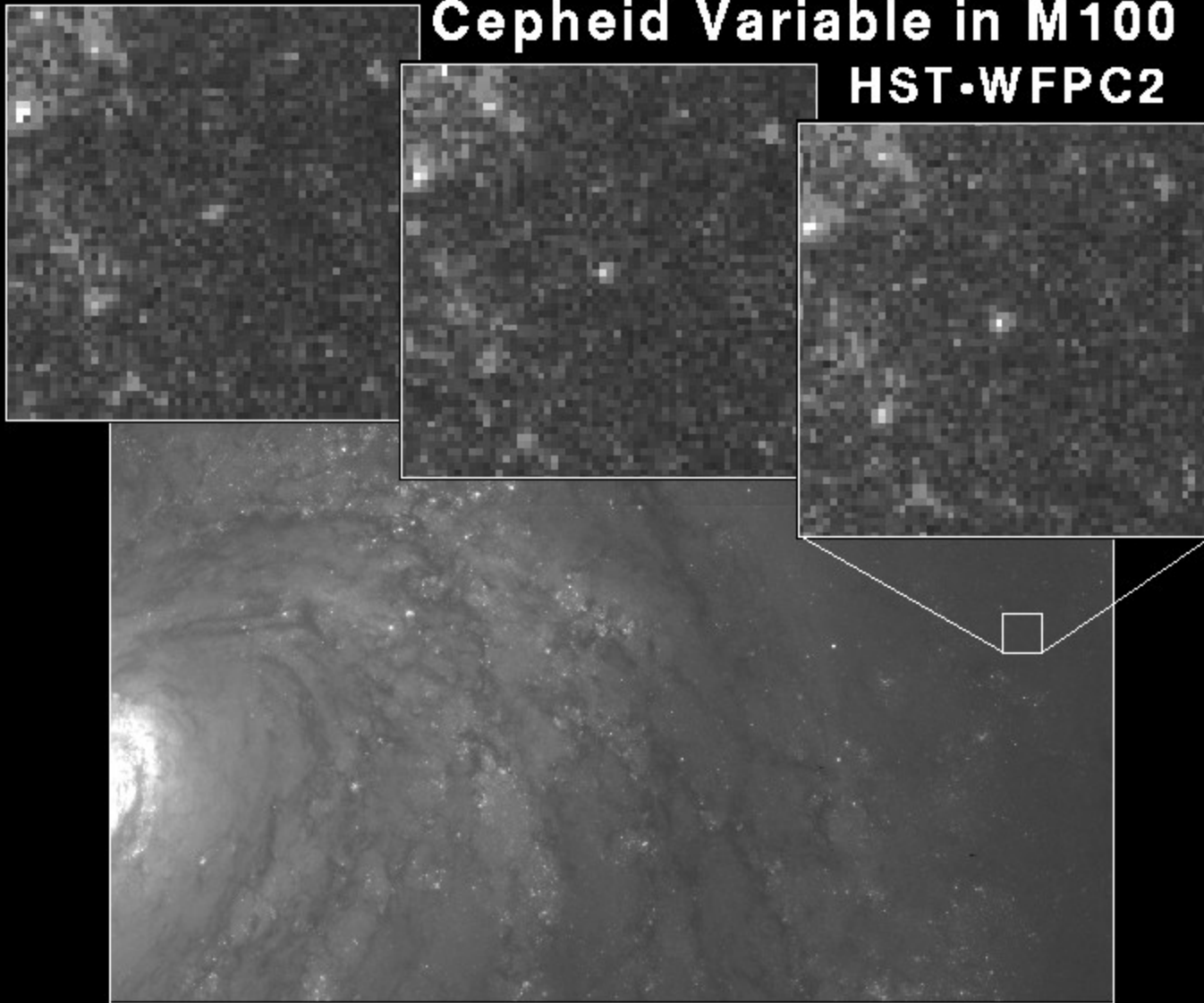


Figura 9.1: Variações da magnitude R com a fase para duas cefeidas em M101.

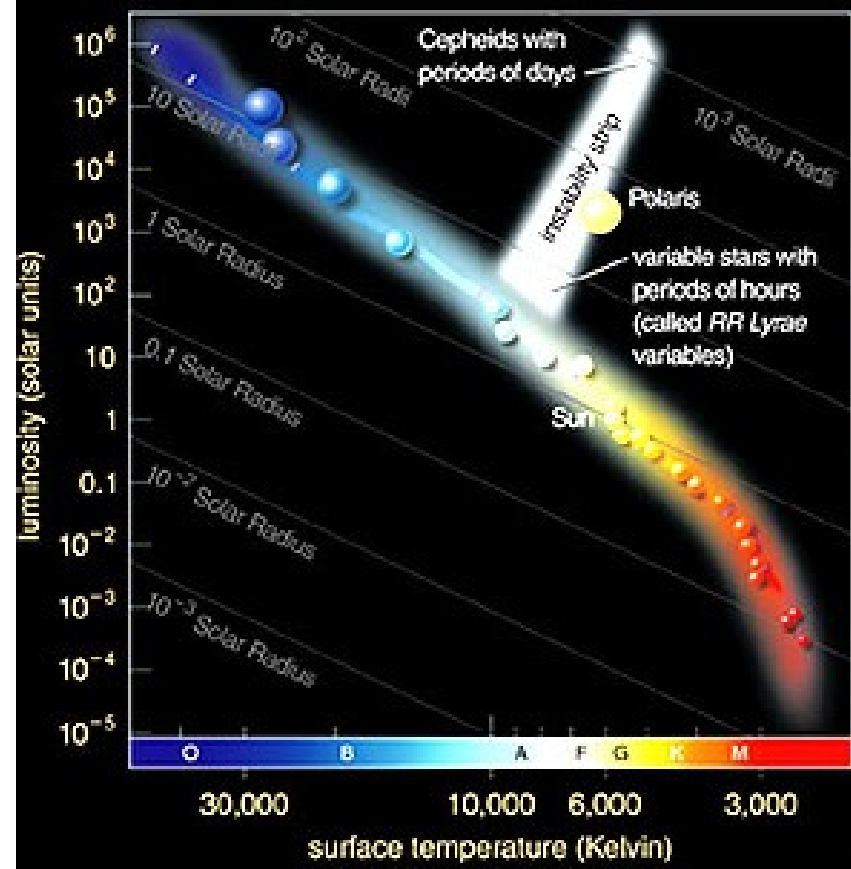
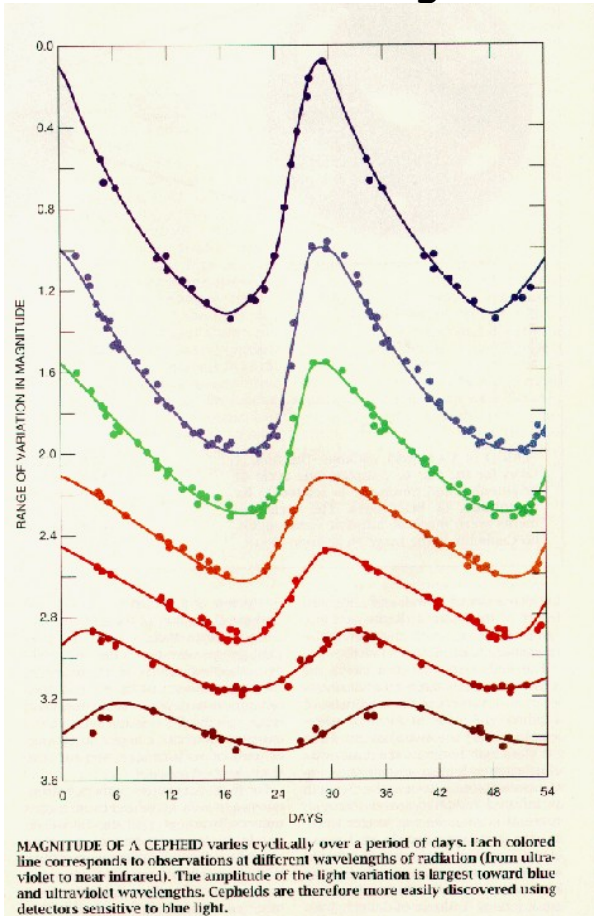
Cepheid Variable in M100

HST-WFPC2



Cefeidas

- são estrelas massivas evoluídas que pulsam por estarem na faixa de instabilidade do diagrama H-R



apresentam uma *relação período-luminosidade* bem definida

Cefeidas

- apresentam uma relação período-luminosidade bem definida:

$$\langle M_V \rangle = -2.78 \log P_{\text{dias}} - 1.35$$

- magnitudes absolutas: M_V : -2 a -7
- períodos: 2 - 150 dias

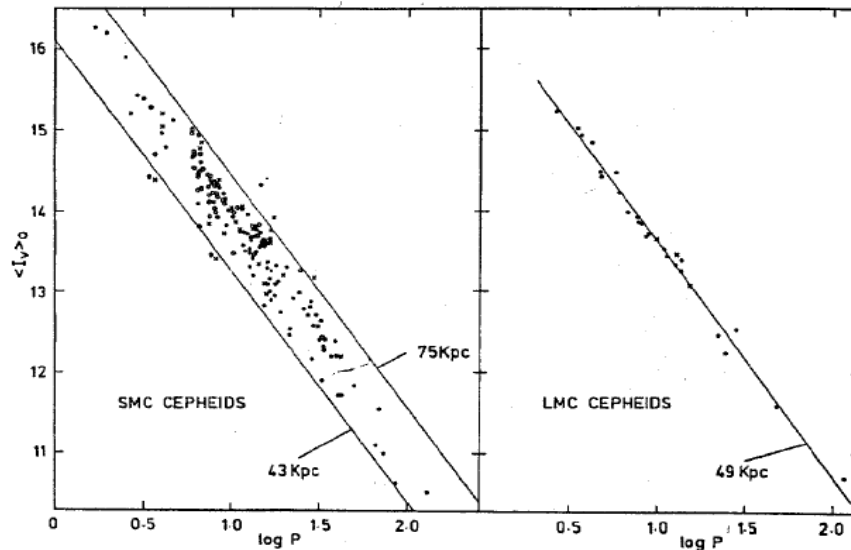
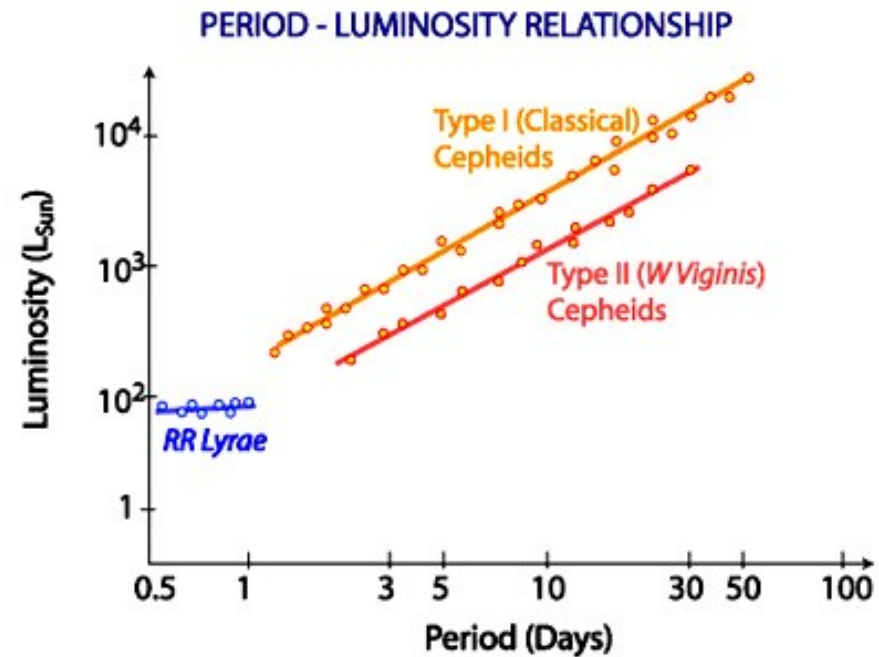
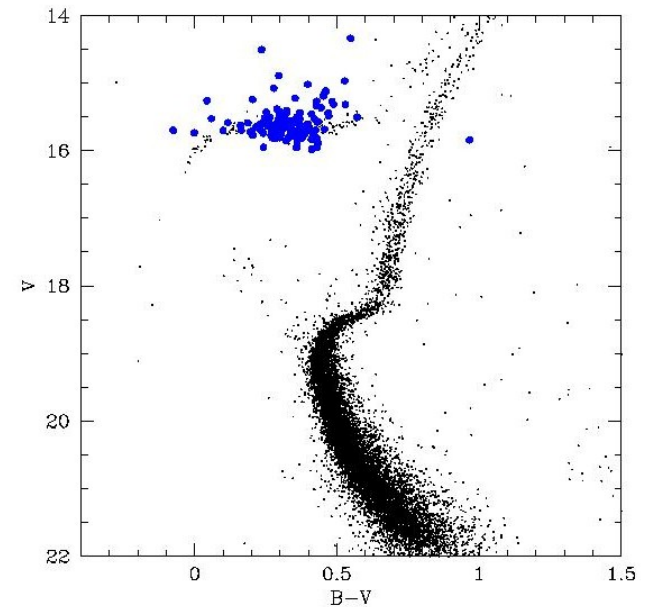
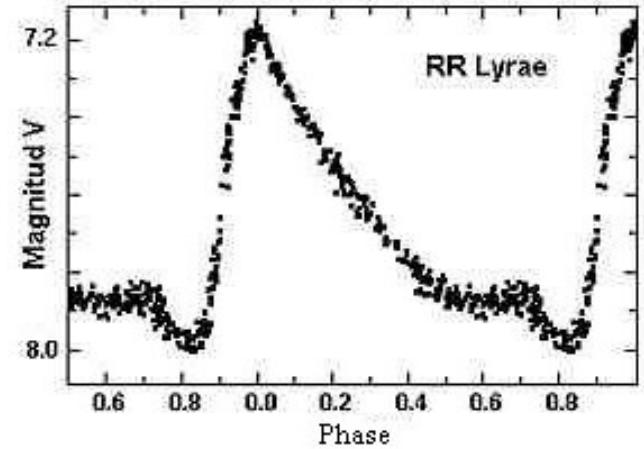
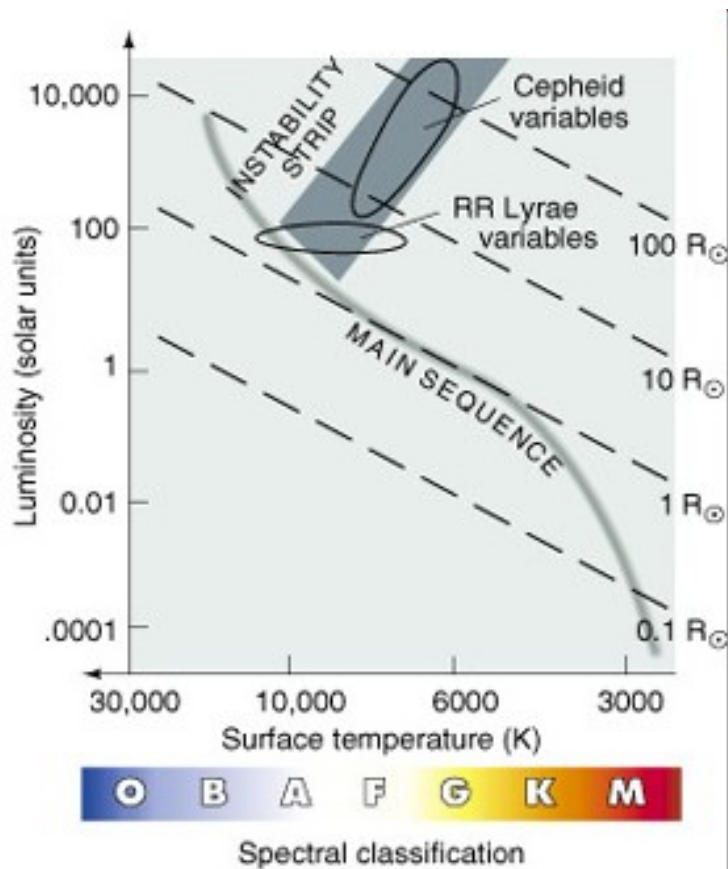


Figura 9.2: Relação período - luminosidade na banda I para cefeidas na LMC e na SMC, ilustrando a considerável profundidade da SMC.

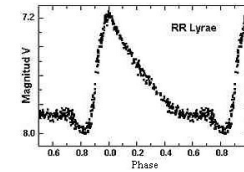
RR Lyr

- já foram confundidas com as cefeidas!
- são variáveis de curto período: horas - dias



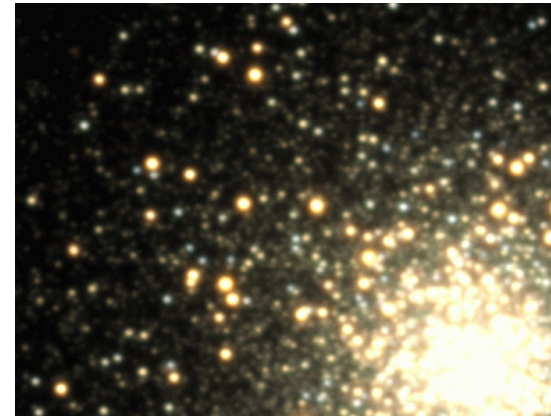
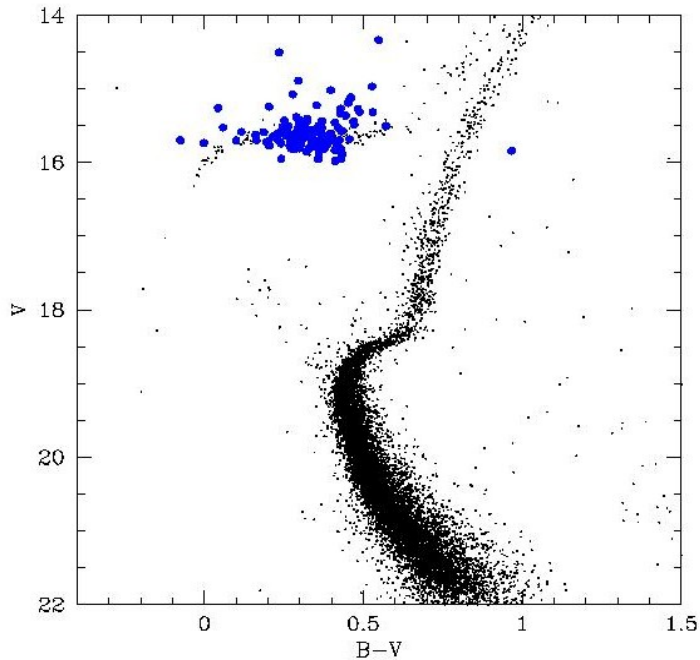
RR Lyr

- já foram confundidas com as cefeidas!
- são variáveis de curto período: horas - dias
- $\langle M_V \rangle \approx +0.6$



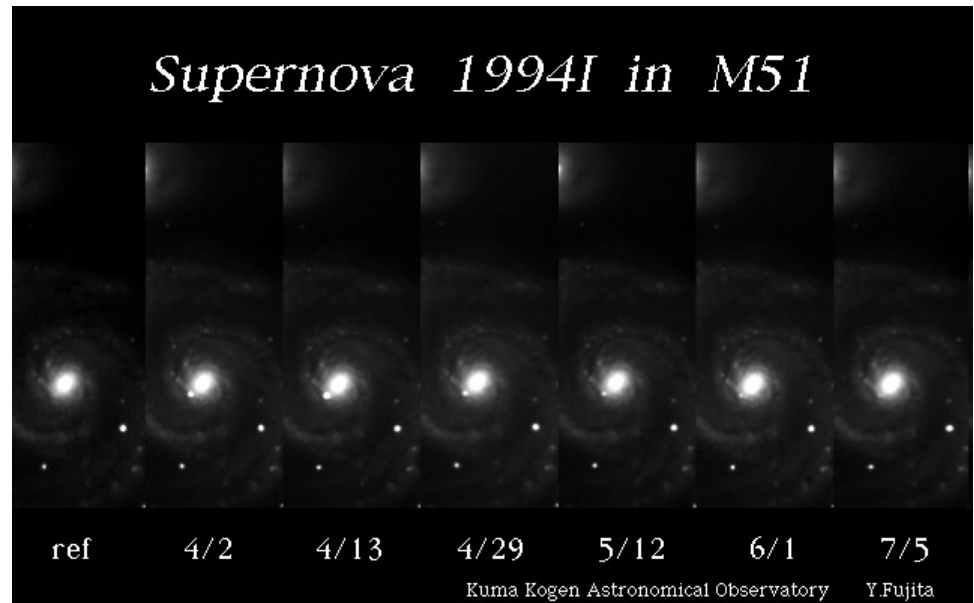
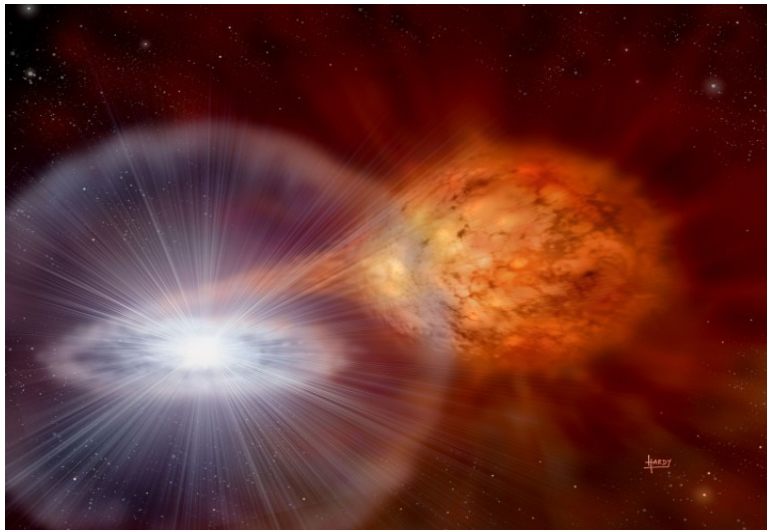
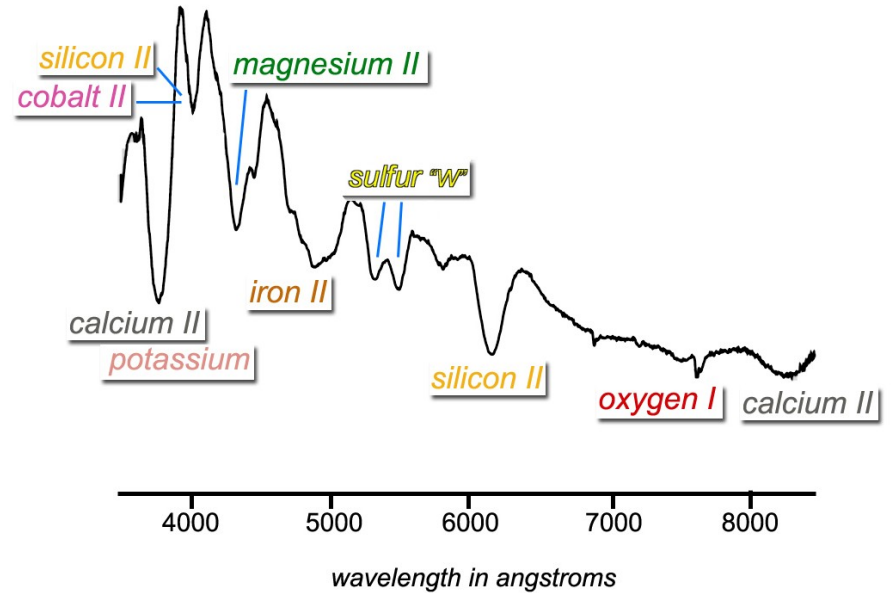
RR Lyr em M3

cfa-www.harvard.edu/~jhartman/M3_movies.html



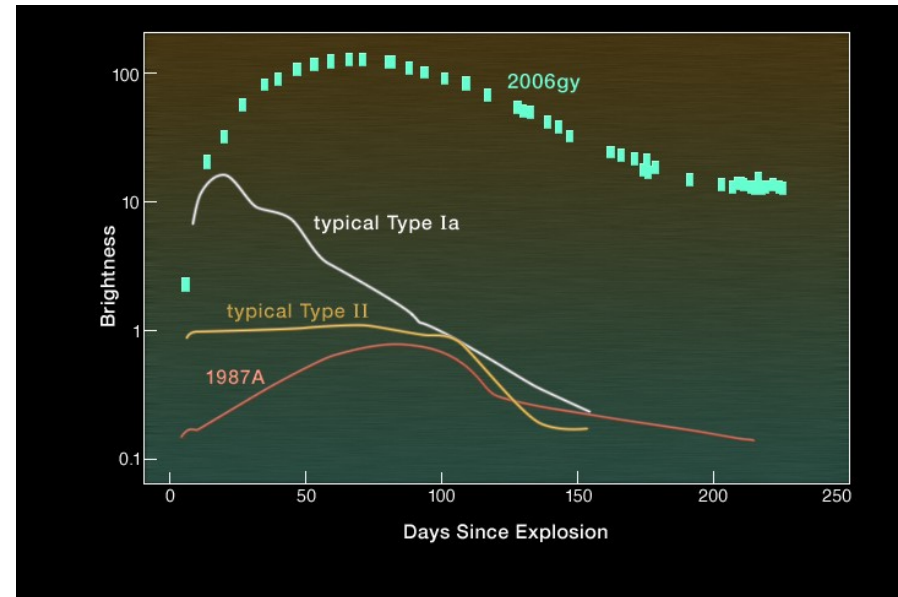
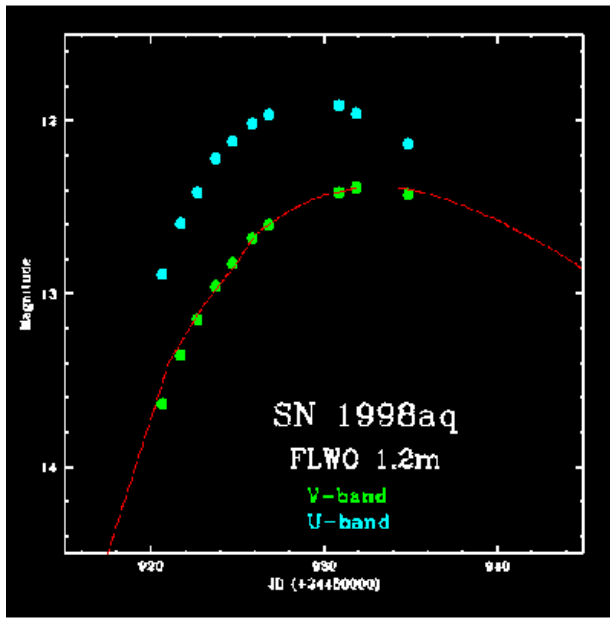
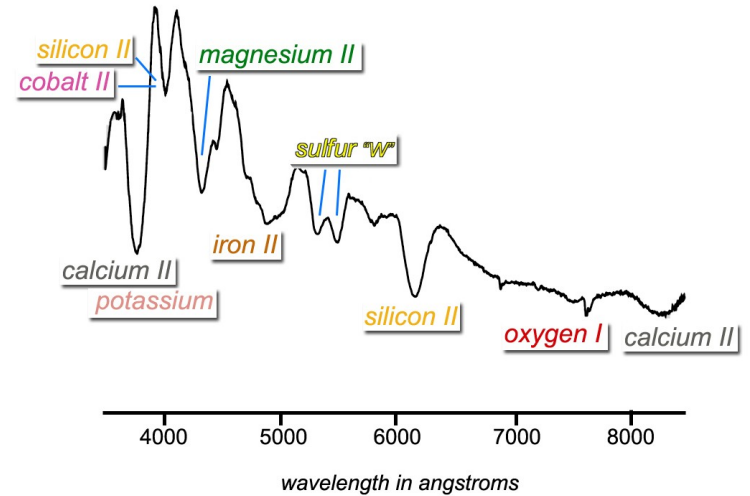
SN Ia

- não têm linhas de H e He no espectro
- modelo padrão: destruição termonuclear de uma anã branca de C-O que capturou matéria de uma companheira até atingir a massa limite de Chandrasekhar

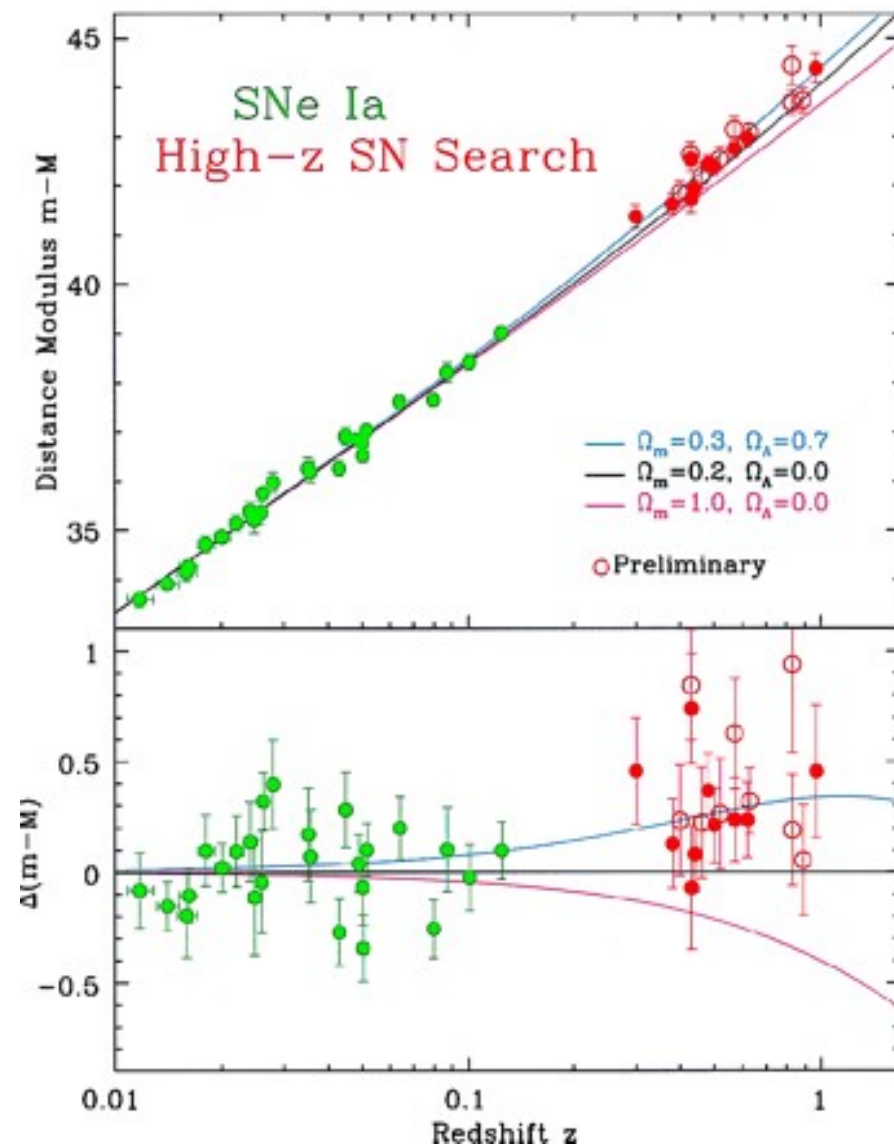


SN Ia

- curva de luz: energia produzida pelo decaimento do ^{56}Ni e ^{56}Co
 $\sim 0.5M_{\odot}$ de Ni é ejetada na explosão
- teoria: $M_B = -19.6$ no máximo da curva de luz



Evidência da energia escura



Relação de Tully-Fisher

- relação empírica aplicável a galáxias espirais



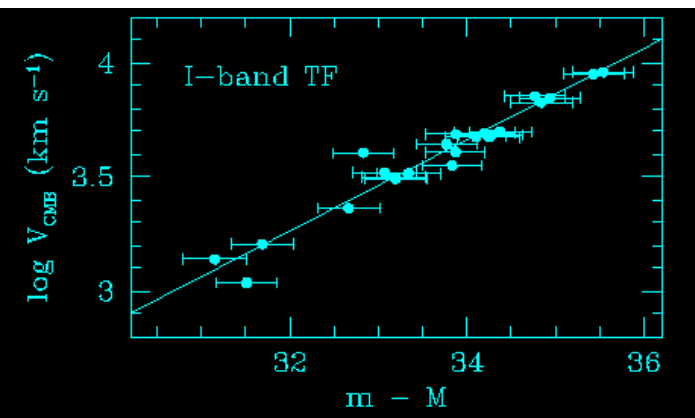
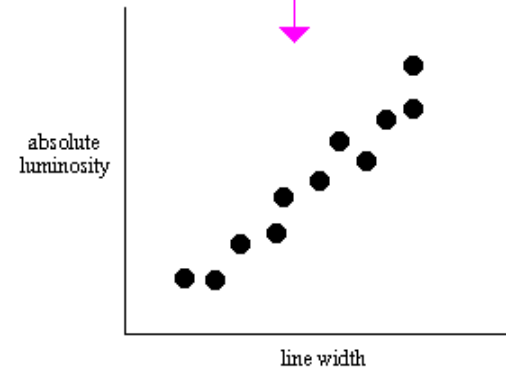
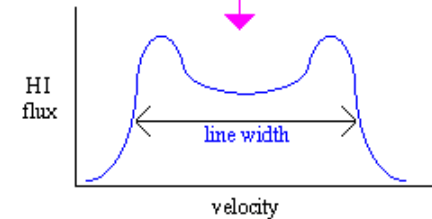
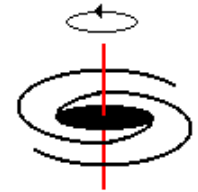
$$L \propto \Delta V_{corr}^\alpha = \left(\frac{\Delta V_{obs}}{\sin i} \right)^\alpha$$

A velocidade de rotação das espirais é proporcional à massa da galáxia

A largura da linha de 21cm do HI permite determinar a velocidade de rotação

A luminosidade absoluta da galáxia é determinada com a relação de TF, calibrada usando Cefeidas, SN Ia, etc.

Tully-Fisher relation



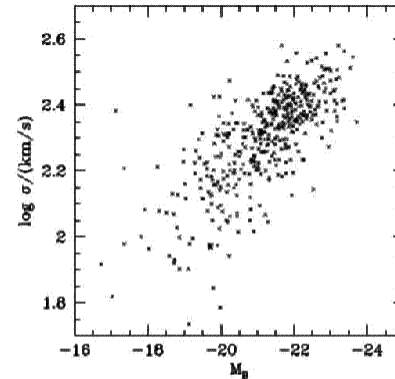
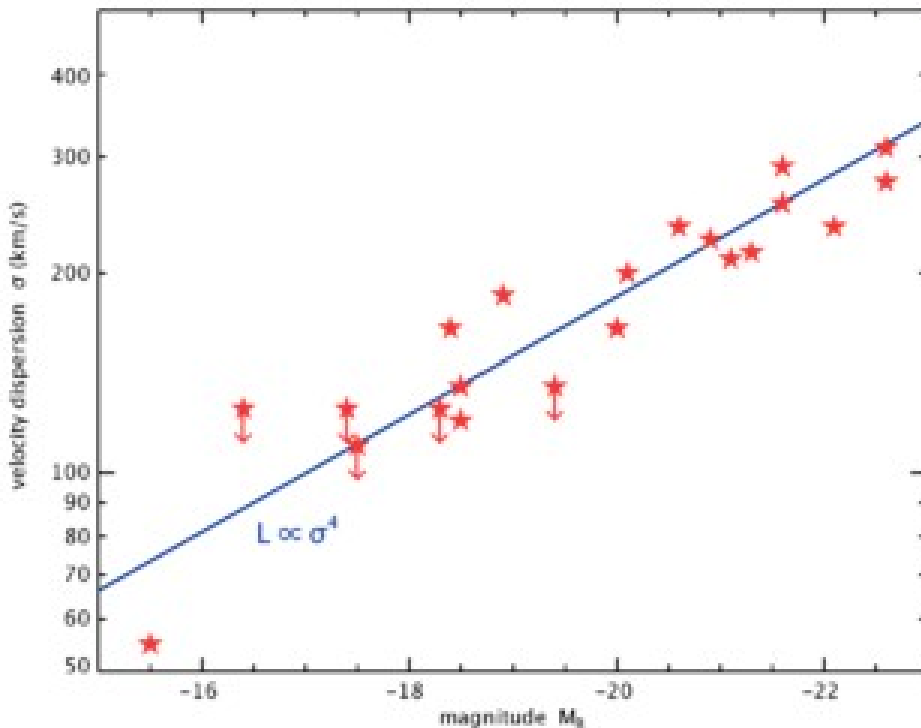
Relação de Faber-Jackson (1976)



– aplicável a E e S0

$$L \propto \sigma^4$$

- σ : dispersão central de velocidades da galáxia (medida por efeito Doppler a partir da largura de linhas de absorção)
- incerteza na distância de 1 galáxia: $\sim 32\%$



Faber-Jackson relation between central velocity dispersion and total magnitude of elliptical galaxies

$$L_B \propto \sigma^4$$

Distância de um grupo ou aglomerado de galáxias

- Considere um grupo com N galáxias com distâncias $\{d_i\}$ e erro individual na distância σ
- Erro na distância média: $\sigma / N^{1/2}$



$D_n - \sigma$



- aplicável a E e S0
 $\sigma^{1.2} / D_n \approx const.$

D_n :

diâmetro (medido com abertura circular) tal que o brilho superficial médio dentro desse diâmetro em B é $\langle \mu_B \rangle = 20.75 \text{ mag arcsec}^{-2}$

- incerteza na distância de uma galáxia: $\sim 23\%$
- esta relação é consequência do Plano Fundamental das E (Lynden-Bell et al 1987)

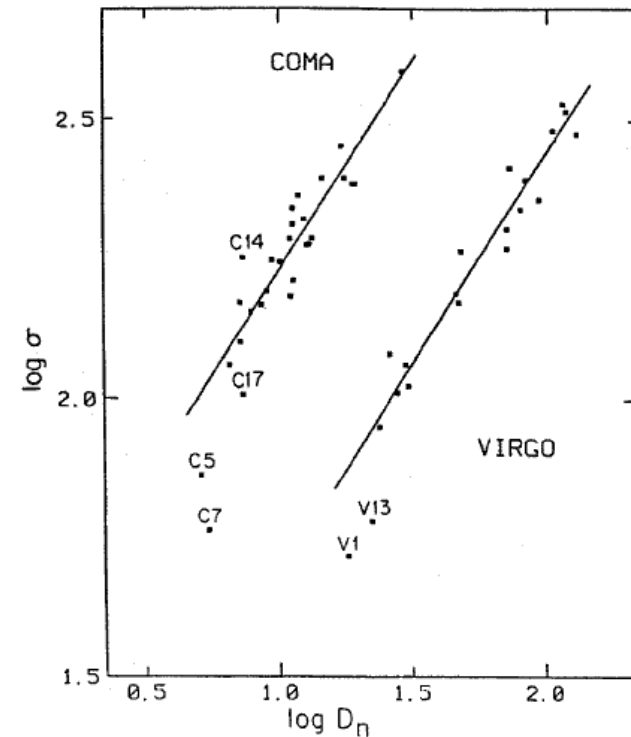


Figura 9.4: Log da dispersão de velocidades σ (km/s), versus o log do diâmetro isofotal aparente D_n , para galáxias nos aglomerados de Virgo e Coma (Dressler et al. 1987).

Flutuações de brilho superficial

- método aplicável a E, SO e bojos (galáxias próximas)
- princípio: o fluxo que chega de uma E próxima em cada pixel de um detector CCD provém, principalmente, de umas poucas estrelas gigantes

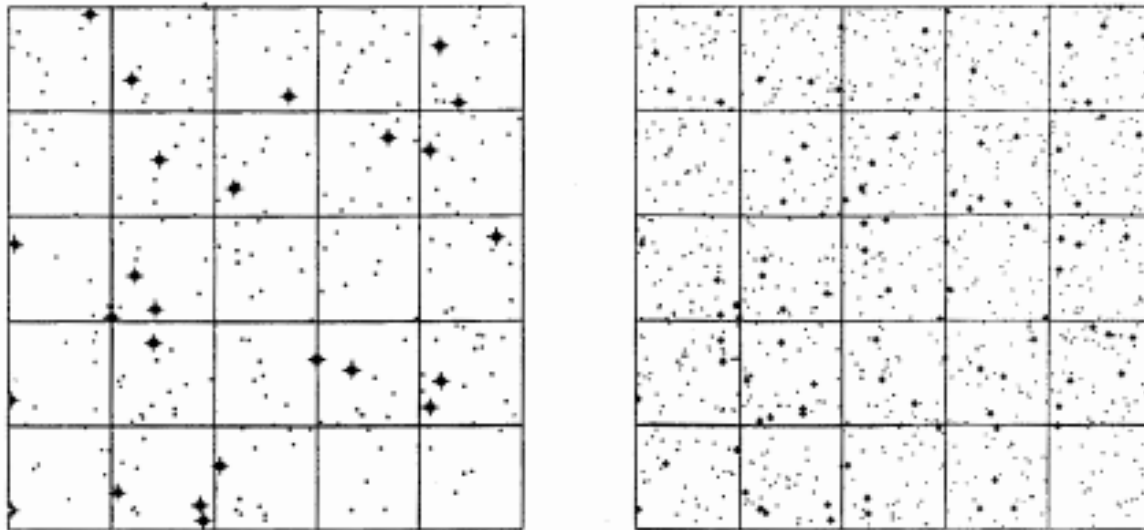


Figura 9.5: A galáxia fictícia à direita está duas vezes mais distante que a da esquerda. Símbolos maiores representam as gigantes e os pontos as estrelas da sequência principal. A grade representa os pixels de um CCD. Note que a flutuação relativa no número de gigantes diminui conforme a distância aumenta. A imagem da esquerda é similar ao que se esperaria da imagem na banda I no raio efetivo de uma galáxia a 200pc de distância com um CCD com pixels de $1''$.



Flutuações de brilho superficial

- N : número médio de gigantes por pixel
- f : fluxo médio de uma gigante
- o brilho superficial médio de um pixel de área A (em arcsec²) será
 $\Sigma = N f / A$
- o número de gigantes por pixel é um processo poissoniano: a incerteza em N é $N^{1/2}$ e a variância (que é o quadrado do desvio padrão) de N será
 $\sigma_N^2 = N$
- logo, combinando essas equações vem que
 $f = A \sigma_N^2 / \Sigma$
- assim, medindo-se o brilho superficial e sua flutuação, é possível estimar-se o fluxo médio de uma gigante e, conhecendo-se a magnitude absoluta média dessas estrelas, determina-se a distância da galáxia
- gigantes- magnitudes médias:
 $M_B = +2.5, M_V = +1.0, M_R = +0.0, M_I = -1.5$

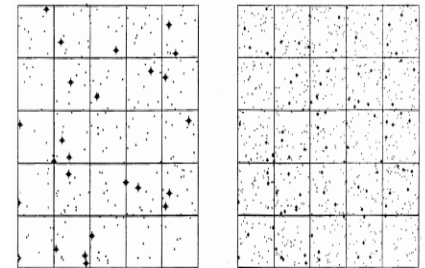


Figura 9.5: A galáxia fictícia à direita está duas vezes mais distante que a da esquerda. Símbolos maiores representam as gigantes e os pontos as estrelas da sequência principal. A grade representa os pixels de um CCD. Note que a flutuação relativa no número de gigantes diminui conforme a distância aumenta. A imagem da esquerda é similar ao que se esperaria da imagem na banda I no raio efetivo de uma galáxia a 200pc de distância com um CCD com pixels de 1".

Tabela 1 - Distâncias ao aglomerado de Virgo (Jacoby et al. 1992)

método	distância (Mpc) ^a
novas	21.1 ± 3.8
SN Ia	19.4 ± 5.0
Tully-Fisher	15.8 ± 1.5
$D_n - \sigma$	16.8 ± 2.4
flutuações de brilho superficial	15.9 ± 0.9

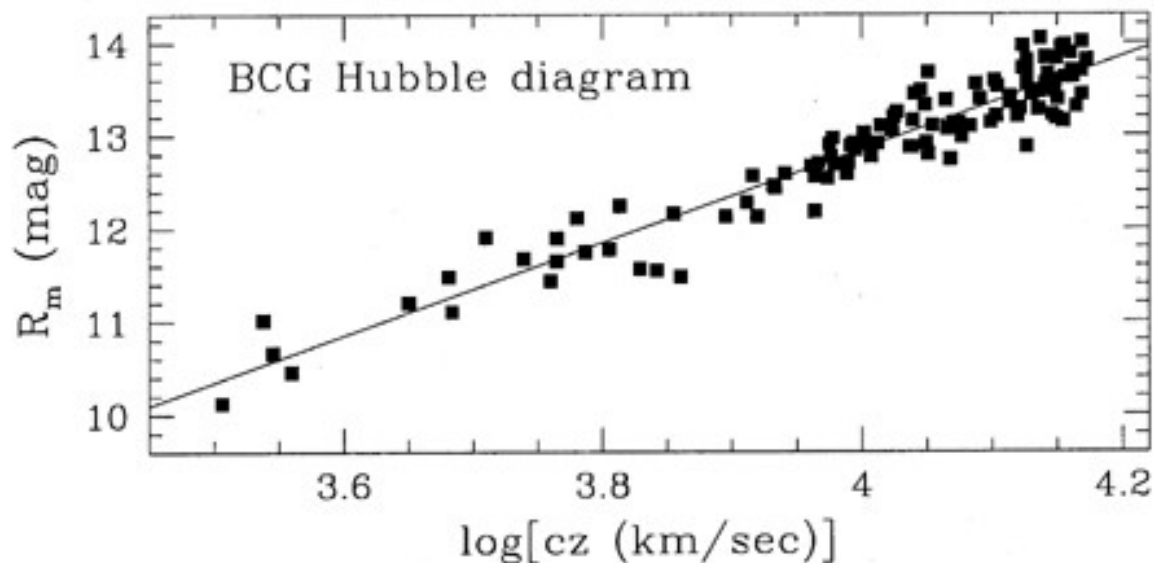
^a supondo distância a M31 de 770 kpc

Galáxias mais brilhantes dos aglomerados

- Sandage: as galáxias mais brilhantes dos aglomerados (cD) têm mais ou menos a mesma magnitude absoluta:



$$M_V \approx -22.2 + 5 \log h$$



Lei de Hubble

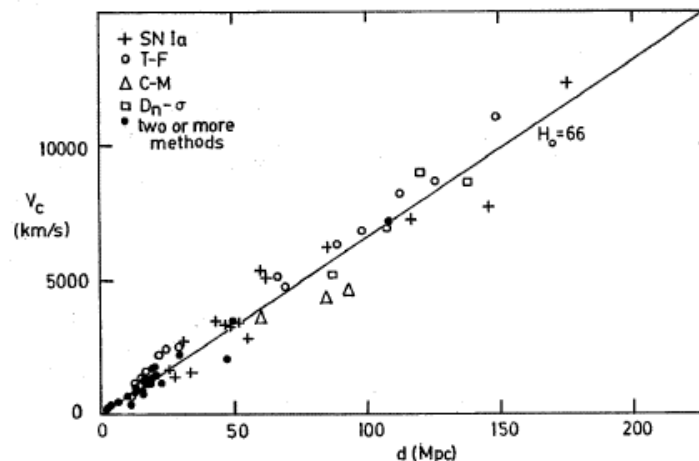
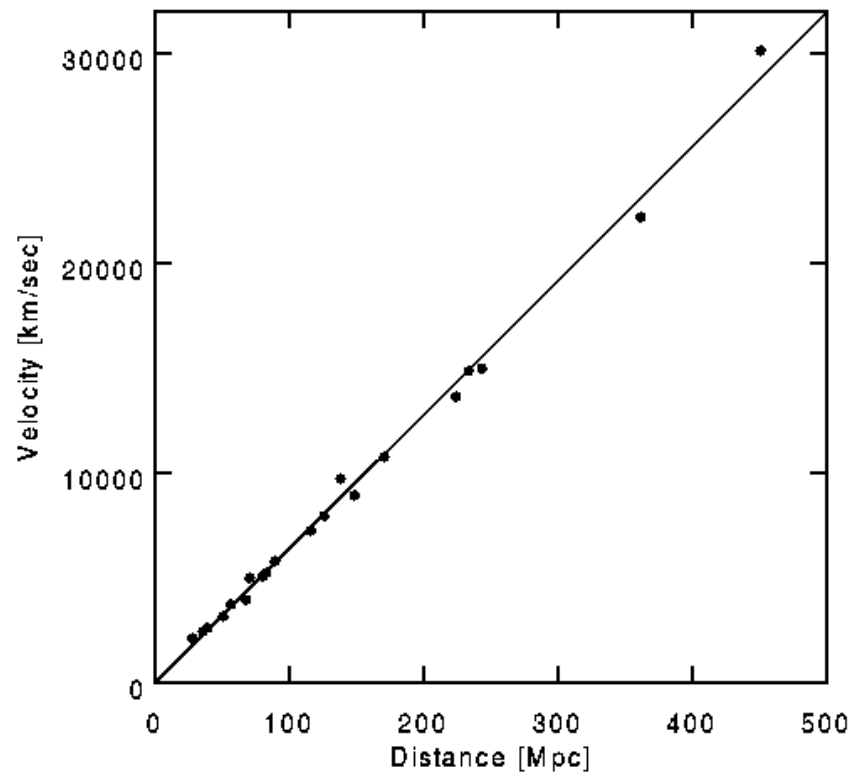


Figura 9.6: Diagrama de Hubble para grupos e aglomerados, com diferentes símbolos correspondendo a diferentes métodos. (Rowan-Robinson, 1988)

- desvio espectral
 $z = (\lambda_{obs} - \lambda_e) / \lambda_e$
- interpretando o desvio espectral em termos do Efeito Doppler: fonte afastando-se com velocidade radial v ,
 $z \approx v/c$ (para $v \ll c$)
- Hubble (1929): as galáxias fora do Grupo Local afastam-se de nós (redshift, $z > 0$) com velocidades radiais diretamente proporcionais a suas distâncias:
 $v = H_0 d$
onde H_0 é a constante de Hubble, $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- “bom valor”: $h = 0.7$
- exemplo: galáxia com $z = 0.01$
afasta-se com $v \approx 3000 \text{ km s}^{-1}$ e está a uma distância de $30h^{-1} \text{ Mpc}$

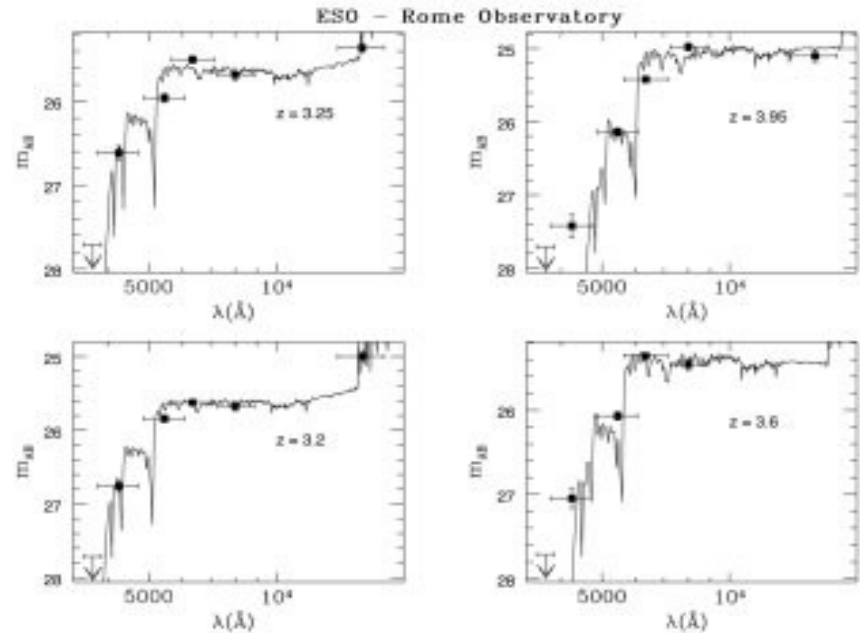
Lei de Hubble



- a Lei de Hubble é isotrópica: não depende da direção
isso é consistente com o *Princípio Cosmológico* : em grandes escalas o universo é homogêneo e isotrópico:
 - se a lei de Hubble vale para nós, deve valer para todos
 - é uma evidência da expansão do universo: o espaço se expande
- velocidades peculiares:
a velocidade radial de uma galáxia tem, em geral, duas componentes:
 - uma cosmológica, associada à expansão do universo, e que aumenta com a distância;
 - a outra (chamada *velocidade peculiar*) é induzida pela interação entre galáxias próximasExemplo: no Grupo Local, as interações entre a Via Láctea e Andrômeda são mais fortes que a expansão

redshifts fotométricos

- determinação de redshifts usando cores
- a cor de uma galáxia de um certo tipo varia com seu redshift (devido ao desvio espectral e à evolução)
- conhecendo-se muitas cores, é possível saber-se qual é o tipo espectral e o redshift da galáxia

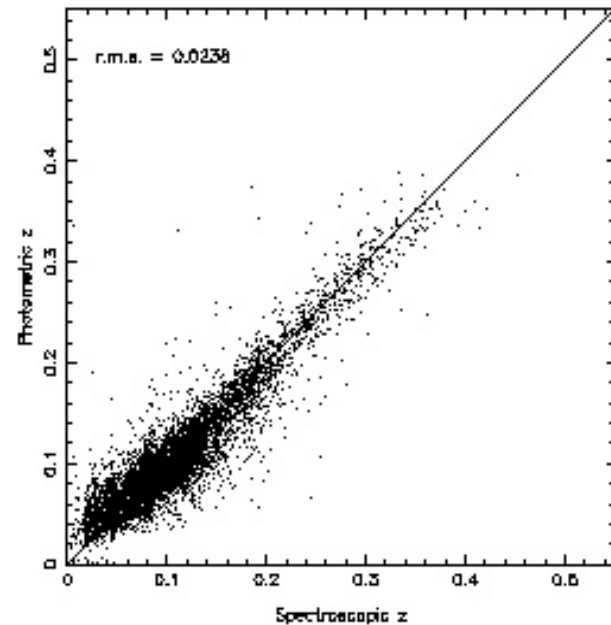
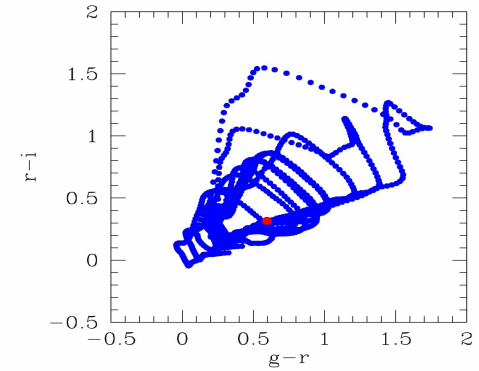
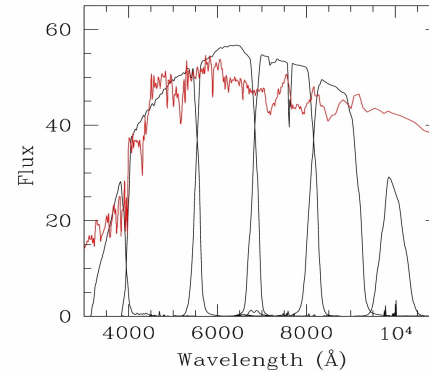


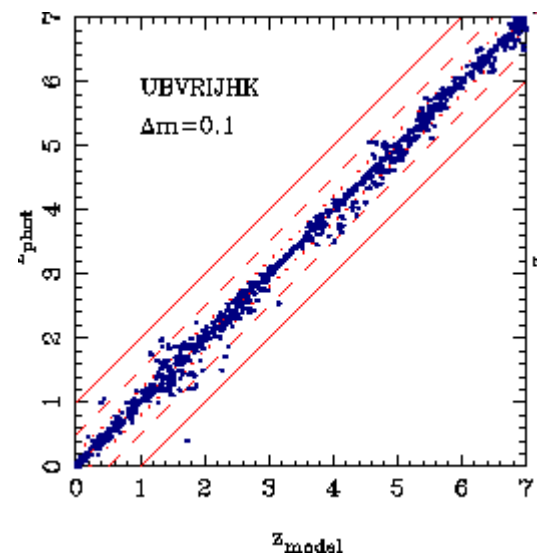
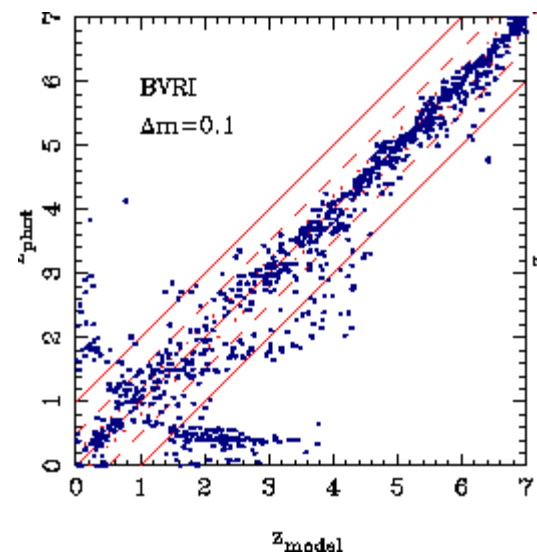
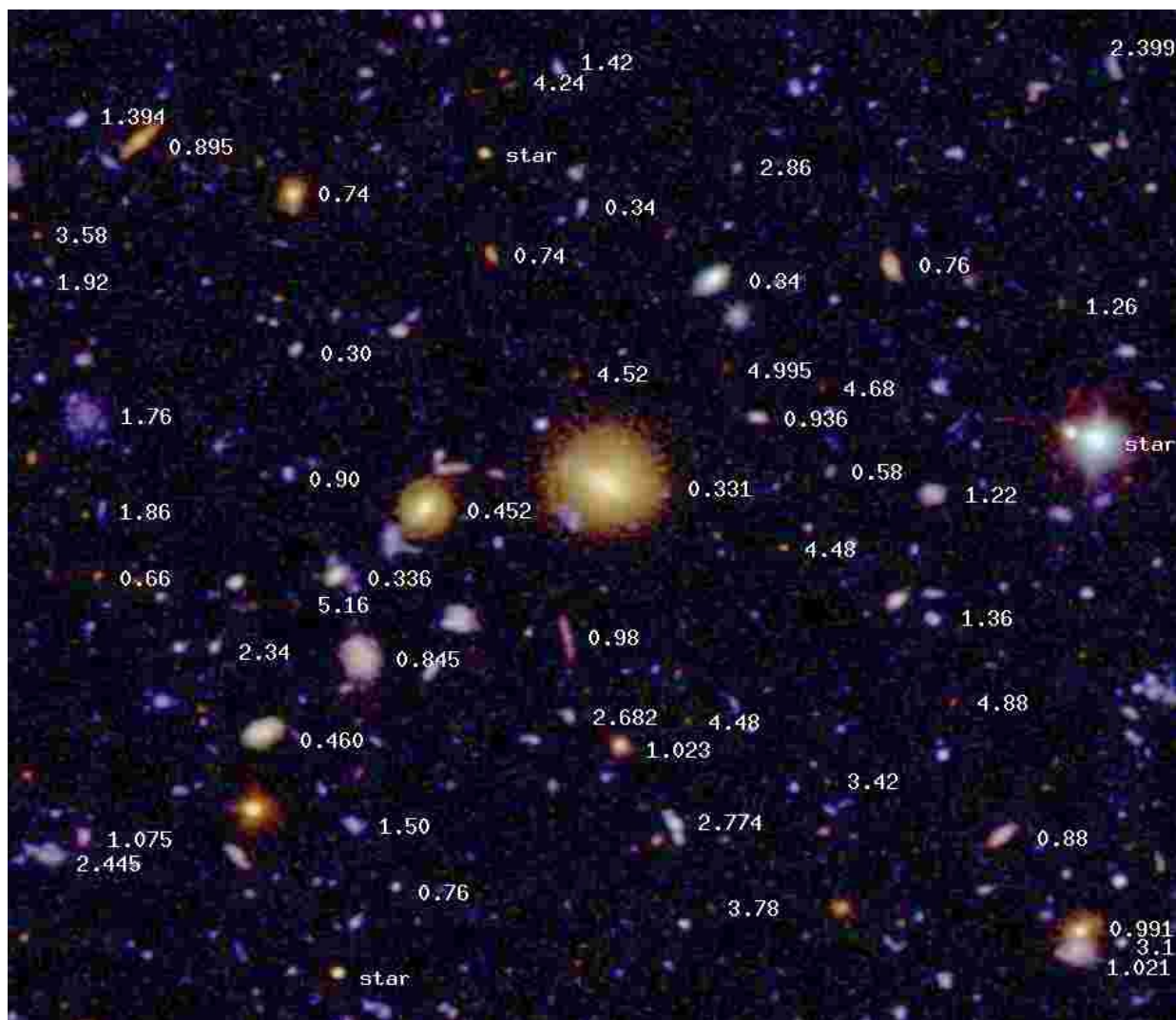
Photometric Redshifts of Galaxies in HDF-S NIC3 Field

redshifts fotométricos

- determinação de redshifts usando cores
- modelos de evolução espectral prevêm cores em função de z
- O erro depende do número de bandas fotométricas e do redshift:

$$\sigma_z \sim 0.02(1+z)$$





Relação distância-redshift para galáxias distantes

- Distância de Hubble: $D_H = c/H_0 = 3000 h^{-1} \text{ Mpc}$

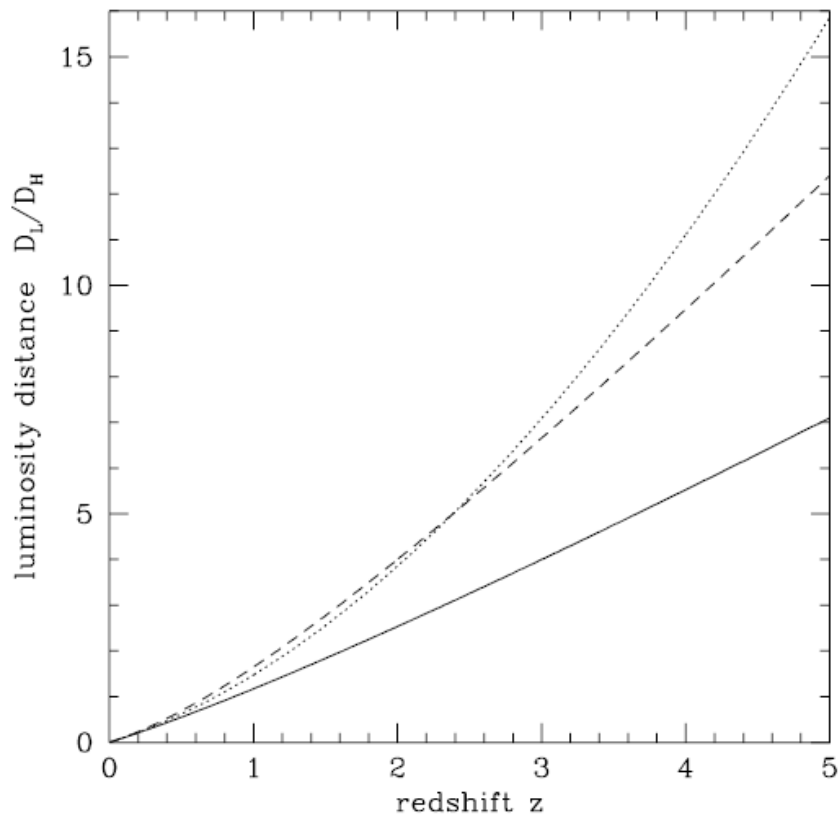


Figure 3: The dimensionless luminosity distance D_L/D_H . The three curves are for the three world models, $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (1, 0)$, solid; $(0.05, 0)$, dotted; and $(0.2, 0.8)$, dashed.

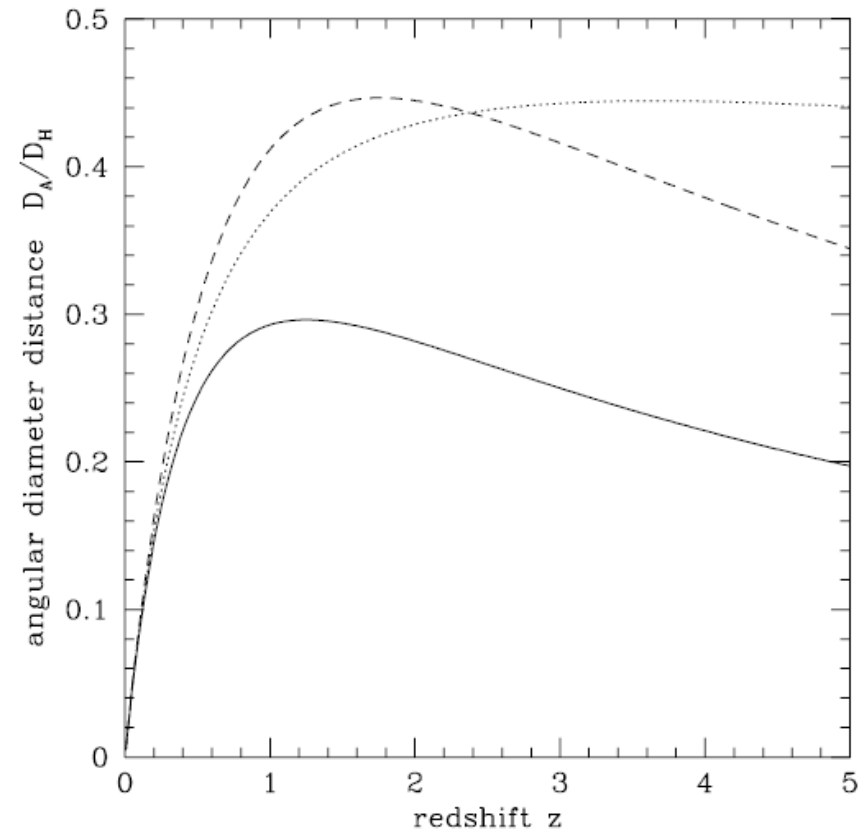


Figure 2: The dimensionless angular diameter distance D_A/D_H . The three curves are for the three world models, $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (1, 0)$, solid; $(0.05, 0)$, dotted; and $(0.2, 0.8)$, dashed.

Exercícios

1. Uma cefeida é observada em M81 com o Hubble Space Telescope. Ela tem uma magnitude média $m_V = 25.6$ e um período de 5 dias. Estime a distância de M81. (Elmegreen p.287)
2. Supernovas tipo I são um indicador de distância importante pois a magnitude no máximo da curva de luz destes objetos é mais ou menos constante e igual a $M_B = -19.12$. A supernova 1974g, que explodiu na galáxia NGC4414, apresentou magnitude $m_B = 12.5$. Qual é a distância desta galáxia?
3. Use a relação $D_n - \sigma$ (pg. 18) para estimar a distância relativa entre os aglomerados de galáxias de Virgo e Coma. Note que na figura D_n é o diâmetro isofotal aparente.
4. O aglomerado de galáxias de Coma tem um tamanho aparente de $\sim 5^\circ$ e uma velocidade radial média de 6000 km/s. Qual seu tamanho em Mpc?
5. Porque aparece o termo $\cos(i)$, onde i é a inclinação da galáxia em relação ao plano do céu, na relação de Tully-Fisher?
6. Porque o método de flutuação de brilho superficial é mais eficiente para galáxias próximas que distantes?
7. A quanto corresponde, em $L_\odot \text{ pc}^{-2}$, o brilho superficial $\mu_V = 21 \text{ mag arcsec}^{-2}$? Se esse brilho é produzido por gigantes, qual é o número delas por pc^2 ? A que distância estaria a galáxia se a flutuação relativa de brilho superficial σ_Σ / Σ fosse igual a 0.1 em 1 arcsec^2 ?

Exercícios

8. Na transição entre o primeiro estado excitado e o estado fundamental de um átomo de hidrogênio é emitido um foton Lyman- α , com comprimento de onda de 1215 Å. Em um certo quasar esta linha é observada em 4860 Å. Qual é o desvio espectral desse quasar?
9. Qual é a luminosidade (em unidades solares e com $h = 0.75$) de uma cD? A que distância estaria uma galáxia deste tipo se sua magnitude aparente fosse $m_V = 18$? Qual seria seu desvio espectral e sua velocidade de recessão? Se seu diâmetro é ~ 50 kpc, qual seria seu diâmetro angular aparente (em segundos de arco) nessa distância?
10. Se uma certa classe de galáxias tem magnitude absoluta M , como $\log z$ se relaciona com a magnitude aparente m ? (relação magnitude - redshift).
11. Calcule a que distância, pela Lei de Hubble, as galáxias se afastariam com a velocidade da luz. Esta distância é conhecida como raio de Hubble ou raio efetivo do Universo.
12. Suponha que Virgo está a 15 Mpc e tenha uma velocidade radial média de 1024 km s⁻¹. Estime nossa velocidade peculiar em relação a Virgo se $h = 0.75$.
13. A tabela da página seguinte contém dados obtidos num estudo para calibrar a relação de Tully-Fisher. Mostre que
$$MB = -6.39 \times \log V(\text{km/s}) - 3.80 \quad (\sigma = 0.44)$$

Name	Hubble- type	$(m - M)$ mag	Source	M_B mag	i_{RC3} °	$\log w$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
N224 (M31)	3	24.44	Madore & Freedman (1991)	-21.10	78	2.739
N300	5	26.67	Madore & Freedman (1991)	-18.14	44	2.344
N598 (M33)	5	24.63	Madore & Freedman (1991)	-18.89	55	2.373
N2403	5	27.51	Tammann & Sandage (1968) Madore & Freedman (1991)	-19.19	62	2.484
N3031 (M81)	3	27.80*	Freedman & Madore (1994)	-20.49	65	2.697
N3368 (M96)	2	30.32*	Tanvir et al. (1995)	-20.55	50	2.656
N4321 (M100)	5	31.16*	Freedman et al. (1994)	-21.25	36	2.786
N4496A	5	31.13*	Saha et al. (1996b)	-19.46	43	2.428
N4536	4	31.11*	Saha et al. (1996a)	-20.64	66	2.546
N4639	3	32.00*	Sandage et al. (1996)	-20.10	50	2.626
N5204	7	29.30	like M101	-17.93	57	2.146
N5457 (M101)	5	29.30*	Kelson (1995)	-21.11	27	2.588
N5585	7	29.30	like M101	-18.26	52	2.290

* Cepheid distance from HST