

Indicadores de distancia extragalácticos e lei de Hubble

Capítulo 3

3.1.1 Indicadores de Distancia:

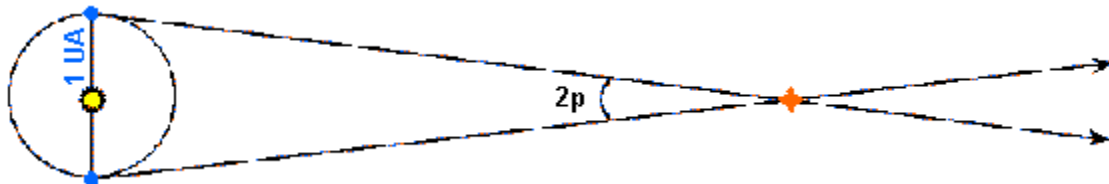
A determinação de distancia das galáxias é um problema que ainda esta em aberto e de sua solução dependem parâmetros importantes como a calibração da constante de Hubble H_0 , portanto das constantes cosmológicas. A escala de distancia extragaláctica estabelece uma serie de etapas cada um deles factíveis de ter erros que podem influenciar diretamente nas outras. **Características tais como: brilho, velocidade, período de variabilidade etc, de uma classe de objetos astronômicos que sejam facilmente medidas com pequeno desvio estatístico, são selecionados como indicadores de distancia.** Os indicadores de distancia podem ser primários ou secundários, os últimos precisam dos primeiros para ser calibrados.

3.1.2 Indicadores de distancia primários.

Paralaxe trigonométrica.

O método mais antigo de determinação de distancia é o método das paralaxes trigonométricas. As estrelas próximas sofrem um deslocamento angular (θ) respeito das estrelas mais distantes quando são observadas com um intervalo de tempo de um ano, como ilustra a figura 2.1. **Definimos como unidade de**

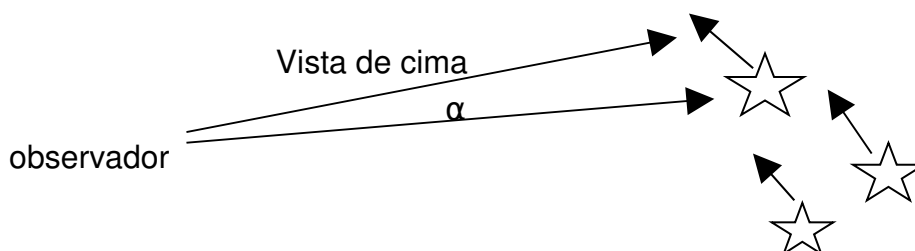
distancia de 1 parsec a estrela cujo deslocamento angular no céu corresponde a 1 segundo de arco.

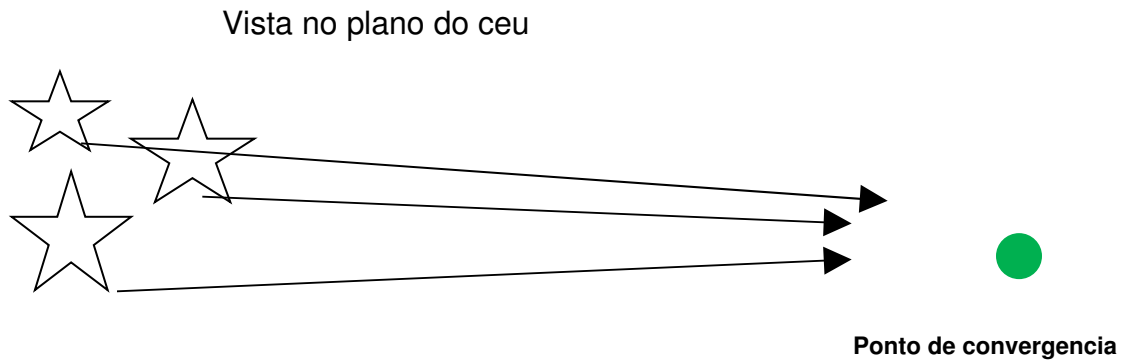


Um calculo simples demonstra que a paralaxe trigonométrica pode ser utilizada para estrelas distantes ate 500 parsecs que correspondem a limite de resolução das observções de paralaxe do satélite Hipparcos, que é de 0.002 “

Paralaxe Cinemática

As estrelas dos aglomerados abertos próximos, participam do movimento de rotação diferencial do plano Galáctico, estas estrelas, movem-se na mesma direção e seus movimentos convergem em um ponto chamado de Apex. Medindo a velocidade das estrelas do aglomerado em dois períodos diferentes pode-se determinar sua distancia mediante a relação entre a componente tangencial da velocidade circular da estrela e o movimento próprio.





$$\operatorname{tg} \alpha = \mu d / V_t \quad d = [\operatorname{tg} \alpha / \mu] V_t \mu = V_{\text{rad}} \operatorname{tg} \alpha$$

μ = movimento próprio da estrela; V_t componente tangencial da velocidade circular da estrela

$\operatorname{tg} \alpha$ = ângulo formado pela posição aparente da estrela no céu durante duas observações sucessivas. Desta forma foi determinada a distancia as Hyades em 46 parsecs.

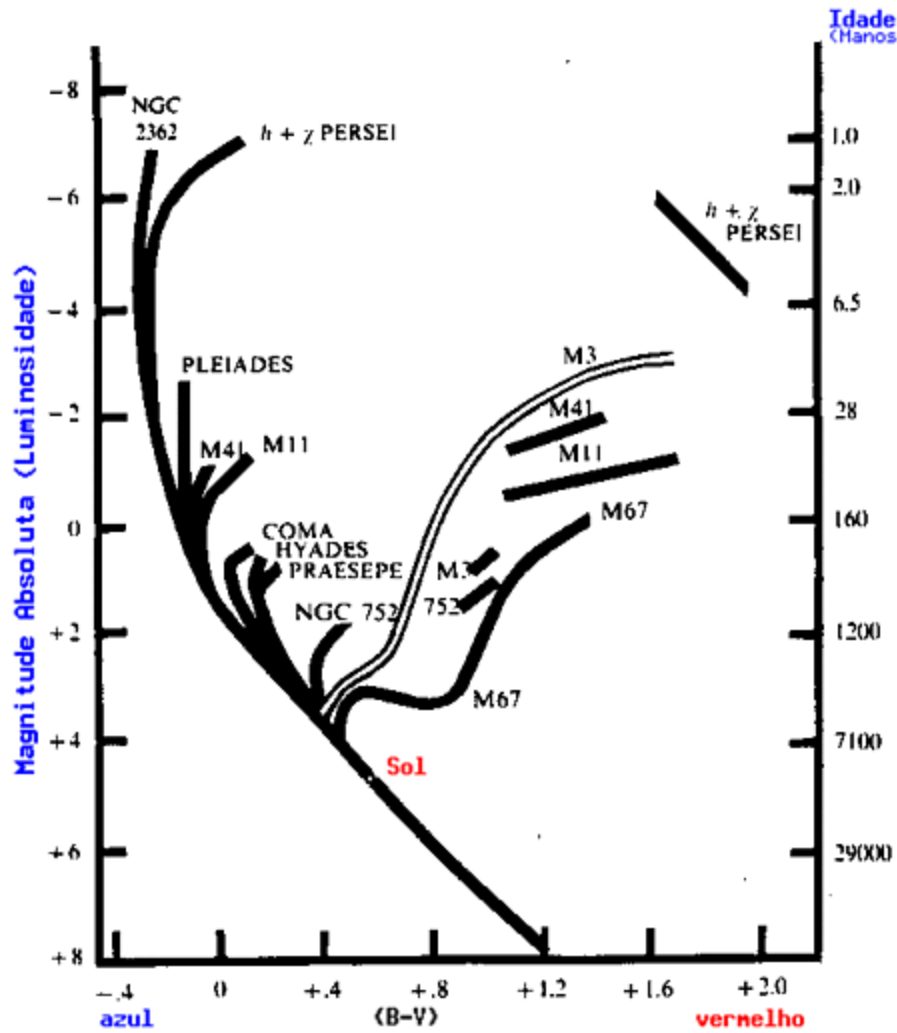
Método do ajuste da seqüência principal do diagrama HR

Utilizando as Hyades como base, adotamos a hipótese de que todas as estrelas da seqüência principal, de todos os aglomerados galácticos da galáxia tem a mesma magnitude absoluta M_v que as estrelas das Hyades portanto a distancia de uma aglomerado pode ser determinada como:

$$V - M_v = -5 + 5 \log d(\text{parsec})$$

Atualmente podemos estender este método a todos os aglomerados aberto das galáxias próximas, para os quais e' possível resolver em estrelas e observar seu diagrama

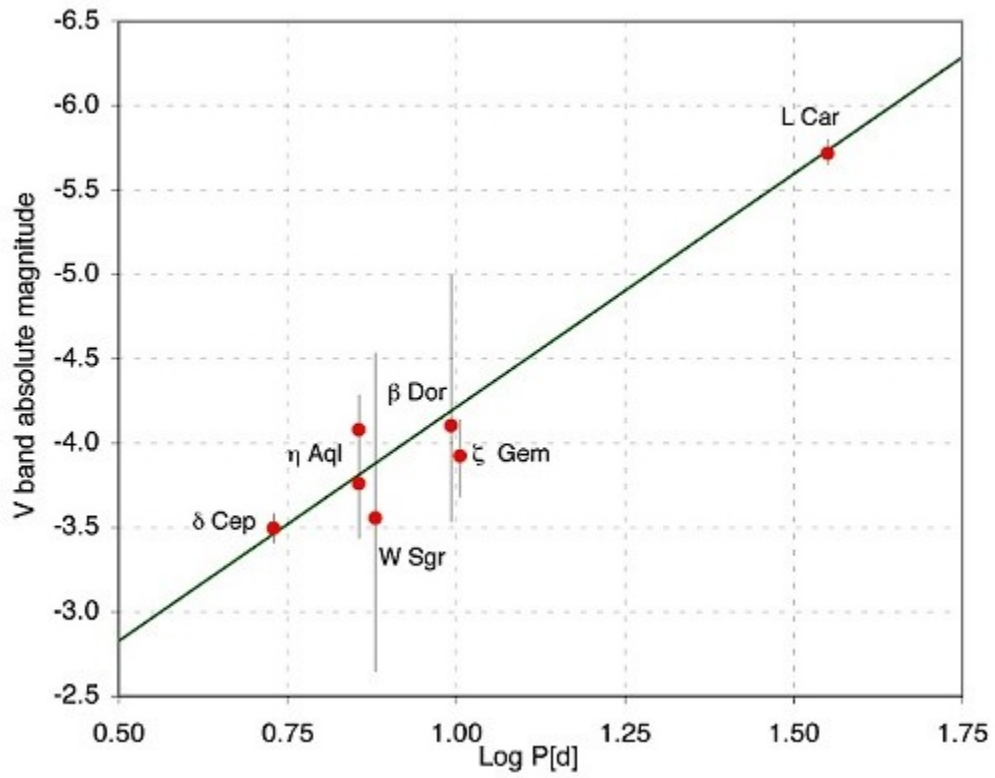
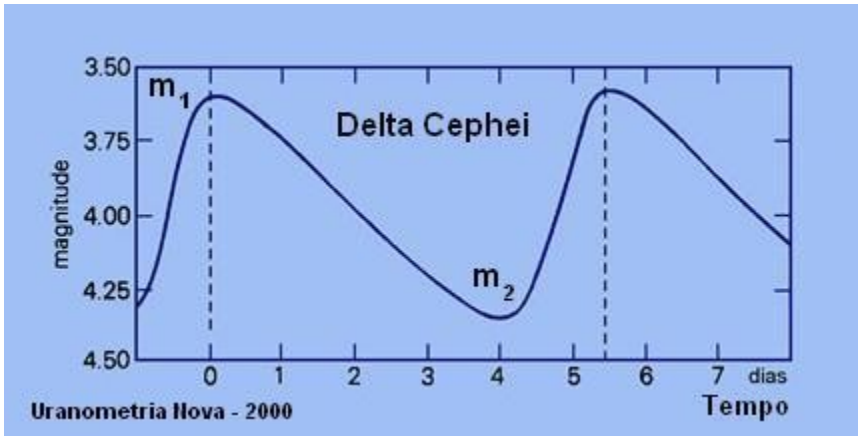
Color-magnitude .



Métodos fotométricos

Variáveis Cefeidas

Este método utiliza propriedades fotométricas de estrelas cuja magnitude absoluta está correlacionada com o período de variação de luz. Este é o caso de estrelas Cefeidas para as quais foi determinado uma relação entre o período de variabilidade de luz e sua magnitude absoluta:



$$M = a + b \log P$$

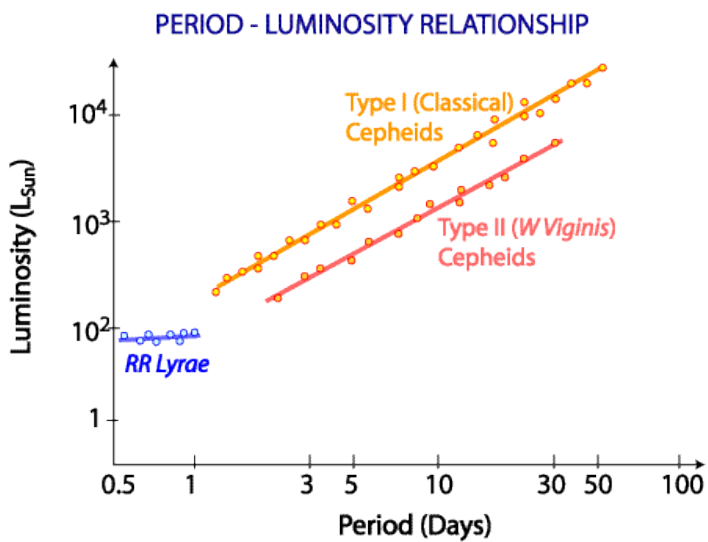
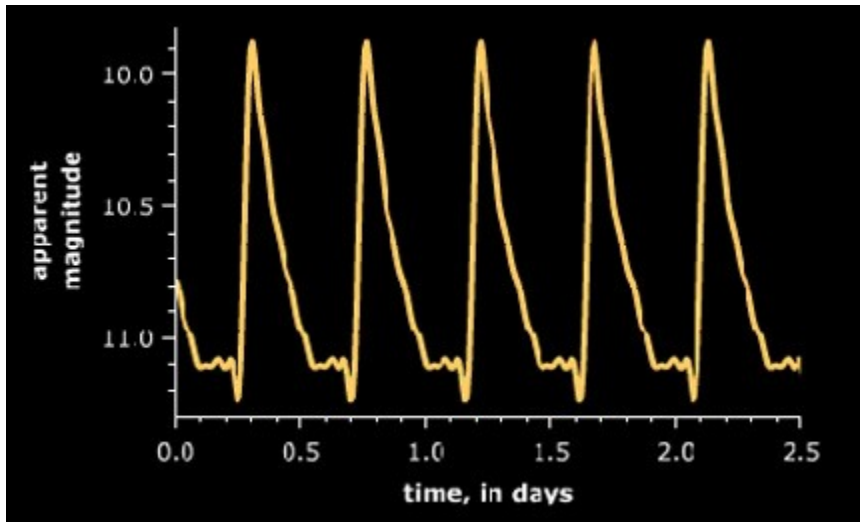
$$M_v = -3.425 \log P + 2.52(B-V) - 2.459$$

$$M_b = -3.425 \log P + 3.52(B-V) - 2.459$$

A determinação de distancia de Andrômeda e de varias galáxias do Grupo local foram realizadas mediante observações de estrelas Cefeidas.

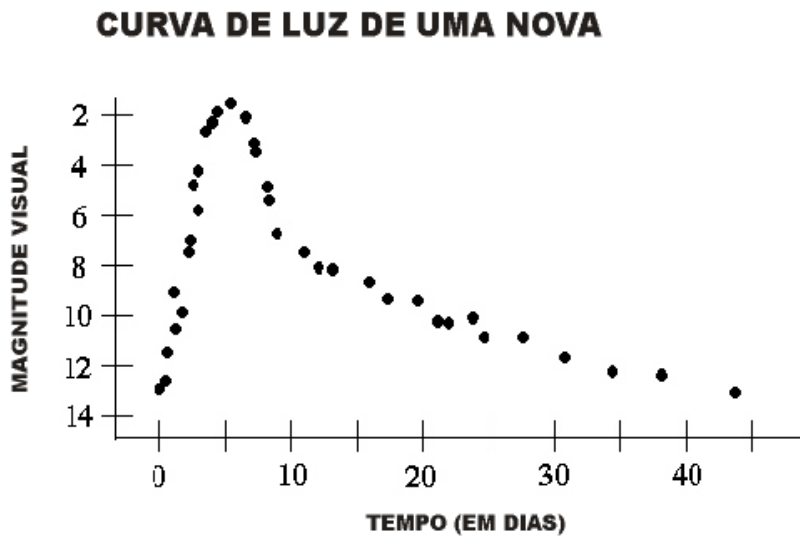
Outras estrelas variáveis, podem ser utilizadas como indicadores de distancia fotométricos :

RR Lyrae –



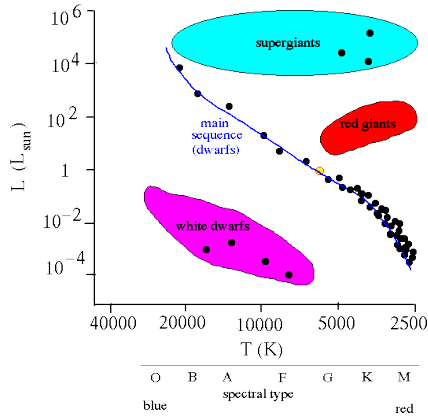
As RR Lyrae são estrelas de população II observada nos aglomerados globulares tem uma curva de luz de curto período. Pode ser utilizadas como indicadores de distância porém a relação período – luminosidade tem uma dispersão grande, portanto o erro na determinação de distância utilizando estas estrelas é maior que aquele determinado com as Cefeidas

Novas Existe correlação entre a magnitude absoluta das Novas e a forma do enfraquecimento da luz da estrela após o máximo de luz. Estas estrelas atingem uma magnitude absoluta $M_v = -8.0$, portanto observando estas estrelas podemos determinar a distância para aproximadamente 12 galáxias próximas.



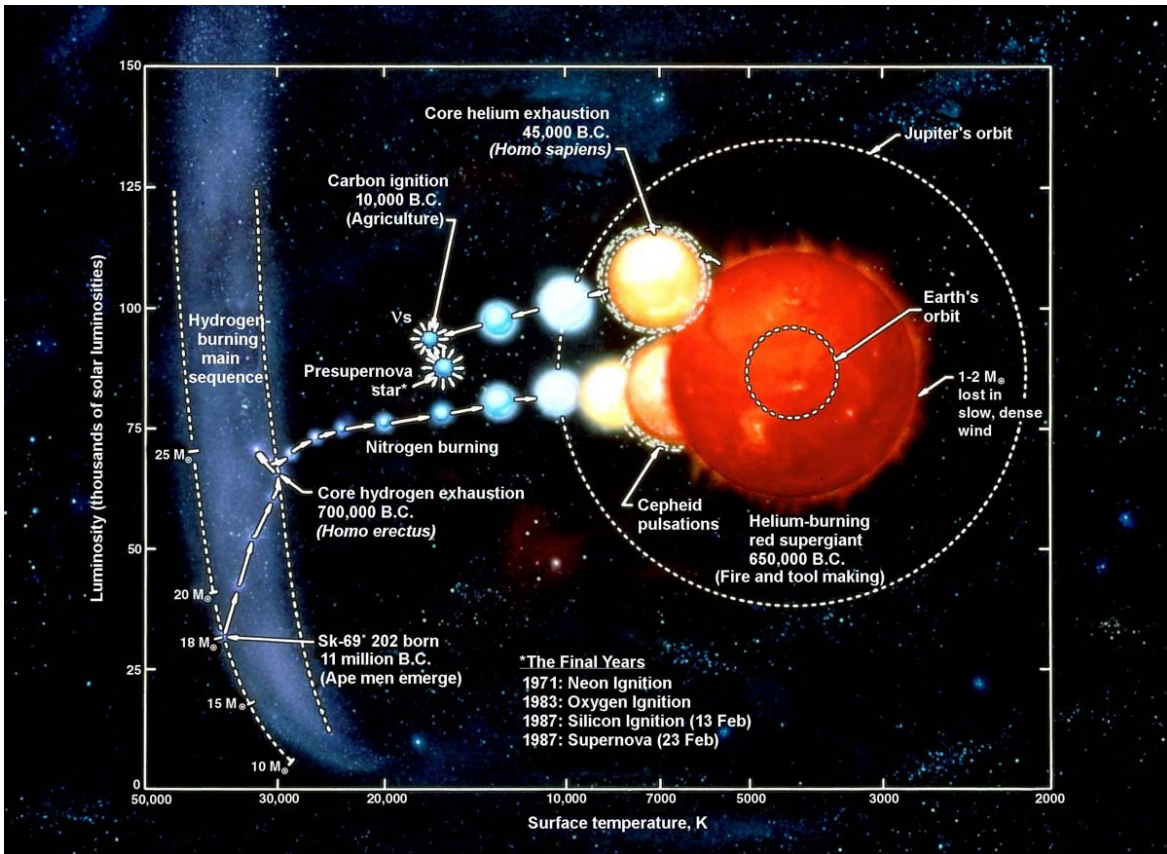
Gigantes Vermelhas

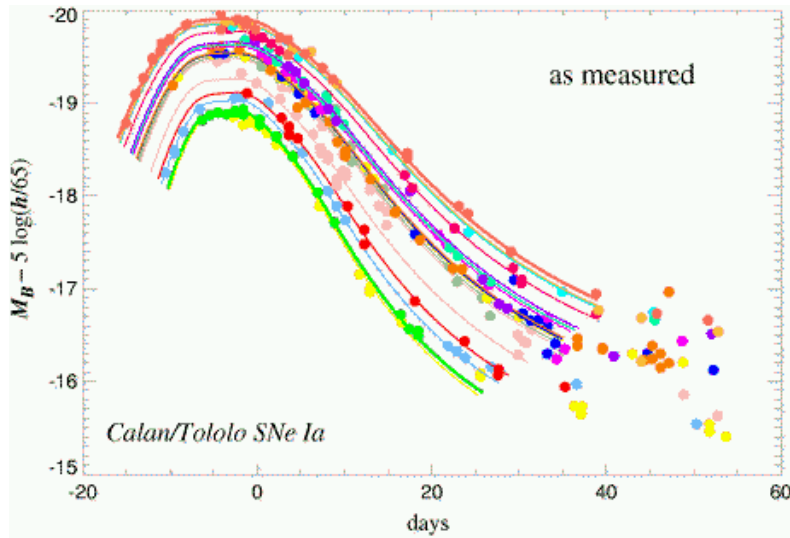
As estrelas Gigantes vermelhas tem $M_v = -3.3$ e podem ser detectadas atualmente com grandes telescópios até distâncias nas quais são observadas com $V = +22$



Supernovas

Apos a explosao da estrelas de massa $>10 M_{\text{sol}}$ atingem luminosidades de miles de vecces a luminosidade do Sol ($100000 L_{\text{sol}}$), podem ser detectadas em galaxias distantes.





3.1.3 Indicadores de Distancia Secundários

Estos indicadores são chamados de secundários ou terciários porque são calibrados respeito aos outros indicadores. Em esta categoria estão os diâmetros das regiões HII em galáxias espirais, diagramas HR de aglomerados abertas e globulares.

3.1.4 Métodos Recentes

Relação Tully-Fischer

O estudo da curva de rotação das galáxias espirais realizados com observações de rádio em 21 cm, de uma amostra cuja distância é conhecida, mostrou que existe uma relação entre a largura da linha de 21 cm emitida pelo Hidrogênio neutro da galáxia e sua luminosidade intrínseca . Esta relação empírica é chamada relação de Tully-Fischer e pode ser expressa como:

$$L = k \Delta V^\alpha \quad k = \text{cte de proporcionalidade e } \alpha \sim 4$$

Este método foi estendido ao infravermelho para minimizar o efeito de extinção interestelar. Observações realizadas para 11 aglomerados de galáxias da uma excelente correlação como a ilustrada na figura 3.19

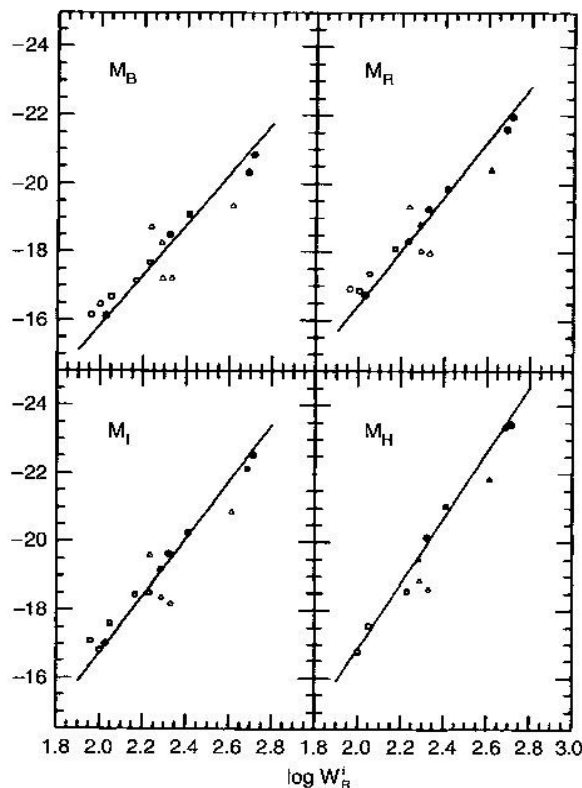


Fig. 3.19. The Tully-Fisher relation for galaxies in the Local Group (dots), in the Sculptor group (triangles), and in the M81 group (squares). The absolute magnitude is plotted as a function of the width of the 21-cm profile which indicates the maximum rotation velocity (see Fig. 3.20). Filled symbols represent galaxies for which independent distance estimates were obtained, either from RR Lyrae stars, Cepheids, or planetary nebulae. For galaxies represented by open symbols, the average distance of the respective group is used. The solid line is a fit to similar data for the Ursa-Major cluster, together with data of those galaxies for which individual distance estimates are available (filled symbols). The larger dispersion around the mean relation for the Sculptor group galaxies is due to the group's extent along the line-of-sight

other, in particular with regard to their flat behavior in the outer part. The flat rotation curve implies

$$M = \frac{v_{\max}^2 R}{G}, \quad (3.15)$$

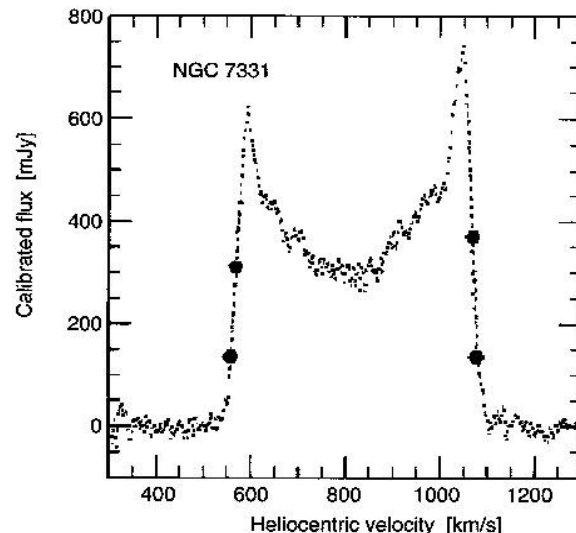


Fig. 3.20. 21 cm profile of the galaxy NGC 7331. The bold dots indicate 20% and 50% of the maximum flux; these are of relevance for the determination of the line width from which the rotational velocity is derived

where the distance R from the center of the galaxy refers to the flat part of the rotation curve. The exact value is not important, though, if only $v(R) \approx \text{const.}$ By re-writing (3.15),

$$L = \left(\frac{M}{L}\right)^{-1} \frac{v_{\max}^2 R}{G}, \quad (3.16)$$

and replacing R by the mean surface brightness $\langle I \rangle = L/R^2$, we obtain

$$L = \left(\frac{M}{L}\right)^{-2} \left(\frac{1}{G^2 \langle I \rangle}\right) v_{\max}^4. \quad (3.17)$$

This is the Tully-Fisher relation if M/L and $\langle I \rangle$ are the same for all spirals. The latter is in fact suggested by Freeman's law (Sect. 3.3.2). Since the shapes of rotation curves for spirals seem to be very similar, the radial dependence of the ratio of luminous to dark matter may also be quite similar among spirals. Furthermore, since the red or infrared mass-to-light ratios of a stellar population do not depend strongly on its age, the constancy of M/L could also be valid if dark matter is included.

Although the line of argument presented above is far from a proper derivation of the Tully-Fisher-relation, it nevertheless makes the existence of such a scaling relation plausible.

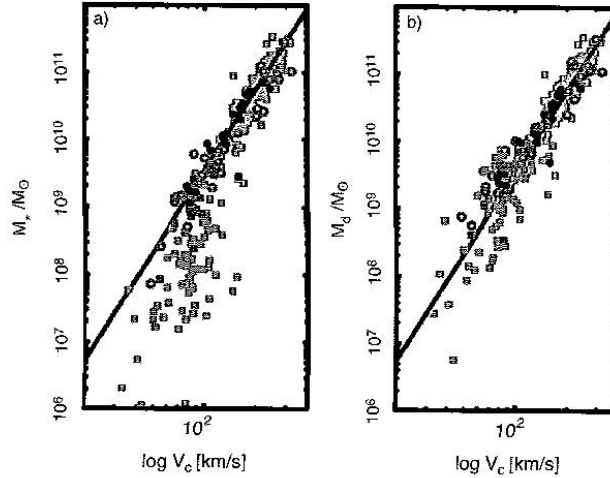


Fig. 3.21. Left panel: the mass contained in stars as a function of the rotational velocity V_c for spirals. This stellar mass is computed from the luminosity by multiplying it with a suitable stellar mass-to-light ratio which depends on the chosen filter and which can be calculated from stellar population models. This is the “classical” Tully–Fisher relation. Squares and circles denote galaxies for which V_c was determined from the 21-cm line width or from a spatially resolved rotation curve,

respectively. The colors of the symbols indicate the filter band in which the luminosity was measured: H (red), K' (black), I (green), B (blue). Right panel: instead of the stellar mass, here the sum of the stellar and gaseous mass is plotted. The gas mass was derived from the flux in the 21-cm line, $M_{\text{gas}} = 1.4M_{\text{HI}}$, corrected for helium and metals. Molecular gas has no significant contribution to the baryonic mass. The line in both plots is the Tully–Fisher relation with a slope of $\alpha = 4$

Mass-to-Light Ratio of Spirals. We are unable to determine the total mass of a spiral because the extent of the dark halo is unknown. Thus we can measure M/L only within a fixed radius. We shall define this radius as R_{25} , the radius at which the surface brightness attains the value of 25 mag/arcsec^2 in the B-band;⁵ then spirals follow the relation

$$\log \left(\frac{R_{25}}{\text{kpc}} \right) = -0.249M_B - 4.00 \quad (3.18)$$

independently of their Hubble type. Within R_{25} one finds $M/L_B = 6.2$ for Sa’s, 4.5 for Sb’s, and 2.6 for Sc’s. This trend does not come as a surprise because late types of spirals contain more young, blue and luminous stars.

⁵We point out explicitly once more that the surface brightness does not depend on the distance of a source.

The Baryonic Tully–Fisher Relation. The above “derivation” of the Tully–Fisher relation is based on the assumption of a constant M/L value, where M is the total mass (i.e., including dark matter). Let us assume that (i) the ratio of baryons to dark matter is constant, and furthermore that (ii) the stellar populations in spirals are similar, so that the ratio of stellar mass to luminosity is a constant. Even under these assumptions we would expect the Tully–Fisher relation to be valid only if the gas does not, or only marginally, contribute to the baryonic mass. However, low-mass spirals contain a significant fraction of gas, so we should expect that the Tully–Fisher relation does not apply to these galaxies. Indeed, it is found that spirals with a small $v_{\text{max}} \lesssim 100 \text{ km/s}$ deviate significantly from the Tully–Fisher relation – see Fig. 3.21(a).

Since the luminosity is approximately proportional to the stellar mass, $L \propto M_*$, the Tully–Fisher relation is a relation between v_{max} and M_* . Adding the mass of the

Relação Faber-Jackson

Esta relação estabelece a proporcionalidade entre a luminosidade da galáxia e a dispersão de velocidade das estrelas da região central das galáxias elípticas. A dispersão de velocidade deve ser medida a 1.6 kpc do centro da galáxia.

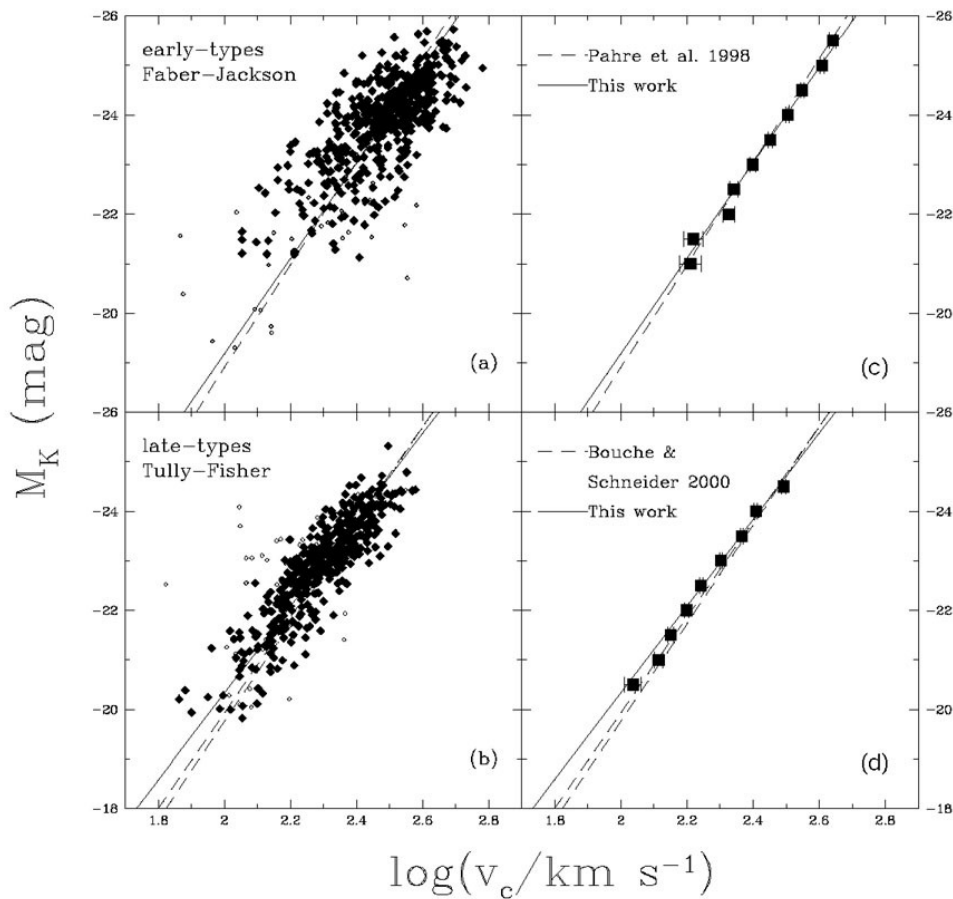
$$L = k' \Delta\sigma^\beta \quad k' = \text{constante} \quad 3 < \beta < 4$$

$$\text{Log } \sigma = -0.1M_B + \text{cte}$$

Estes dois últimos métodos permitem determinar a magnitude absoluta de qualquer galáxia uma vez medida a rotação ΔV ou dispersão de velocidades $\Delta\sigma$. Medida a magnitude aparente m da galáxia podemos determinar a distancia

Mediante a relação:

$$m - M = -5 + 5 \log d + A_\lambda$$



gas, which can be determined from the strength of the 21-cm line, to the stellar mass a much tighter correlation is obtained, see Fig. 3.21(b). It reads

$$M_{\text{disk}} = 2 \times 10^9 h^{-2} M_{\odot} \left(\frac{v_{\text{max}}}{100 \text{ km/s}} \right)^4, \quad (3.19)$$

and is valid over five orders of magnitude in disk mass $M_{\text{disk}} = M_{*} + M_{\text{gas}}$. If no further baryons exist in spirals (such as, e.g., MACHOs), this close relation means that the ratio of baryons and dark matter in spirals is constant over a very wide mass range.

3.4.2 The Faber–Jackson Relation

A relation for elliptical galaxies, analogous to the Tully–Fisher relation, was found by Sandra Faber and Roger Jackson. They discovered that the velocity dispersion in the center of ellipticals, σ_0 , scales with luminosity (see Fig. 3.22),

$$L \propto \sigma_0^4, \quad (3.20)$$

or

$$\log(\sigma_0) = -0.1 M_B + \text{const}.$$

“Deriving” the Faber–Jackson scaling relation is possible under the same assumptions as the Tully–Fisher relation. However, the dispersion of ellipticals about this relation is larger than that of spirals about the Tully–Fisher relation.

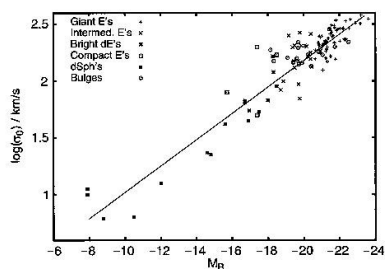


Fig. 3.22. The Faber–Jackson relation expresses a relation between the velocity dispersion and the luminosity of elliptical galaxies. It can be derived from the virial theorem

3.4.3 The Fundamental Plane

The Tully–Fisher and Faber–Jackson relations specify a connection between the luminosity and a kinematic property of galaxies. As we discussed previously, various relations exist between the parameters of elliptical galaxies. Thus one might wonder whether a relation exists between observables of elliptical galaxies for which the dispersion is smaller than that of the Faber–Jackson relation. Such a relation was indeed found and is known as the *fundamental plane*.

To explain this relation, we will consider the various relations between the parameters of ellipticals. In Sect. 3.2.2 we saw that the effective radius of normal ellipticals is related to the luminosity (see Fig. 3.7). This implies a relation between the surface brightness and the effective radius,

$$R_e \propto \langle I \rangle_e^{-0.83}, \quad (3.21)$$

where $\langle I \rangle_e$ is the average surface brightness within the effective radius, so that

$$L = 2\pi R_e^2 \langle I \rangle_e. \quad (3.22)$$

From this, a relation between the luminosity and $\langle I \rangle_e$ results,

$$L \propto R_e^2 \langle I \rangle_e \propto \langle I \rangle_e^{-0.66}$$

or

$$\langle I \rangle_e \propto L^{-1.5}. \quad (3.23)$$

Hence, more luminous ellipticals have smaller surface brightnesses, as is also shown in Fig. 3.7. By means of the Faber–Jackson relation, L is related to σ_0 , the central velocity dispersion, and therefore, σ_0 , $\langle I \rangle_e$, and R_e are related to each other. The distribution of elliptical galaxies in the three-dimensional parameter space (R_e , $\langle I \rangle_e$, σ_0) is located close to a plane defined by

$$R_e \propto \sigma_0^{1.4} \langle I \rangle_e^{-0.85}. \quad (3.24)$$

Writing this relation in logarithmic form, we obtain

$$\log R_e = 0.34 \langle \mu \rangle_e + 1.4 \log \sigma_0 + \text{const}. \quad (3.25)$$

where $\langle \mu \rangle_e$ is the average surface brightness within R_e , measured in mag/arcsec². Equation (3.25) defines a plane in this three-dimensional parameter space that is known as the *fundamental plane* (FP). Different projections of the fundamental plane are displayed in Fig. 3.23.

How can this be Explained? The mass within R_e can be derived from the virial theorem, $M \propto \sigma_0^2 R_e$. Combining this with (3.22) yields

$$R_e \propto \frac{L}{M} \frac{\sigma_0^2}{\langle I \rangle_e}, \quad (3.26)$$

which agrees with the FP in the form of (3.24) if

$$\frac{L}{M} \frac{\sigma_0^2}{\langle I \rangle_e} \propto \frac{\sigma_0^{1.4}}{\langle I \rangle_e^{0.85}},$$

or

$$\frac{M}{L} \propto \frac{\sigma_0^{0.6}}{\langle I \rangle_e^{0.15}} \propto \frac{M^{0.3} R_e^{0.3}}{R_e^{0.3} L^{0.15}}.$$

Hence, the FP follows from the virial theorem provided

$$\left(\frac{M}{L}\right) \propto M^{0.2} \quad \text{or} \quad \left(\frac{M}{L}\right) \propto L^{0.25}, \quad \text{respectively,} \quad (3.27)$$

i.e., if the mass-to-light ratio of galaxies increases slightly with mass. Like the Tully-Fisher relation, the fundamental plane is an important tool for distance estimations. It will be discussed more thoroughly later.

3.4.4 The D_n - σ Relation

Another scaling relation for ellipticals which is of substantial importance in practical applications is the D_n - σ relation. D_n is defined as that diameter of an ellipse within which the average surface brightness I_n corresponds to a value of 20.75 mag/arcsec² in the B-band. If we now assume that all ellipticals have a self-similar brightness profile, $I(R) = I_e f(R/R_e)$, with $f(1) = 1$, then the luminosity within D_n can be written as

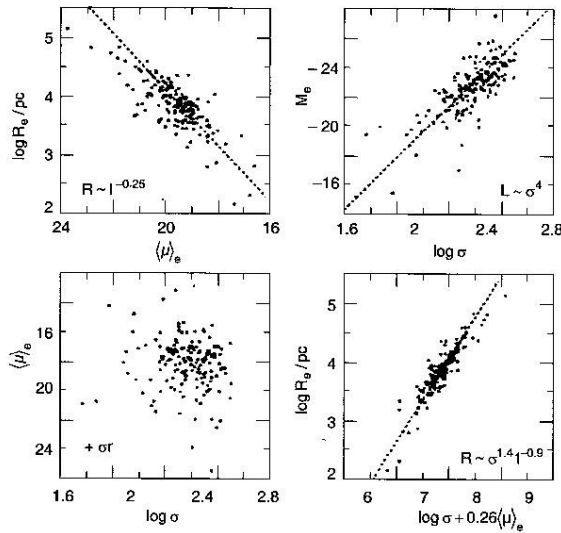
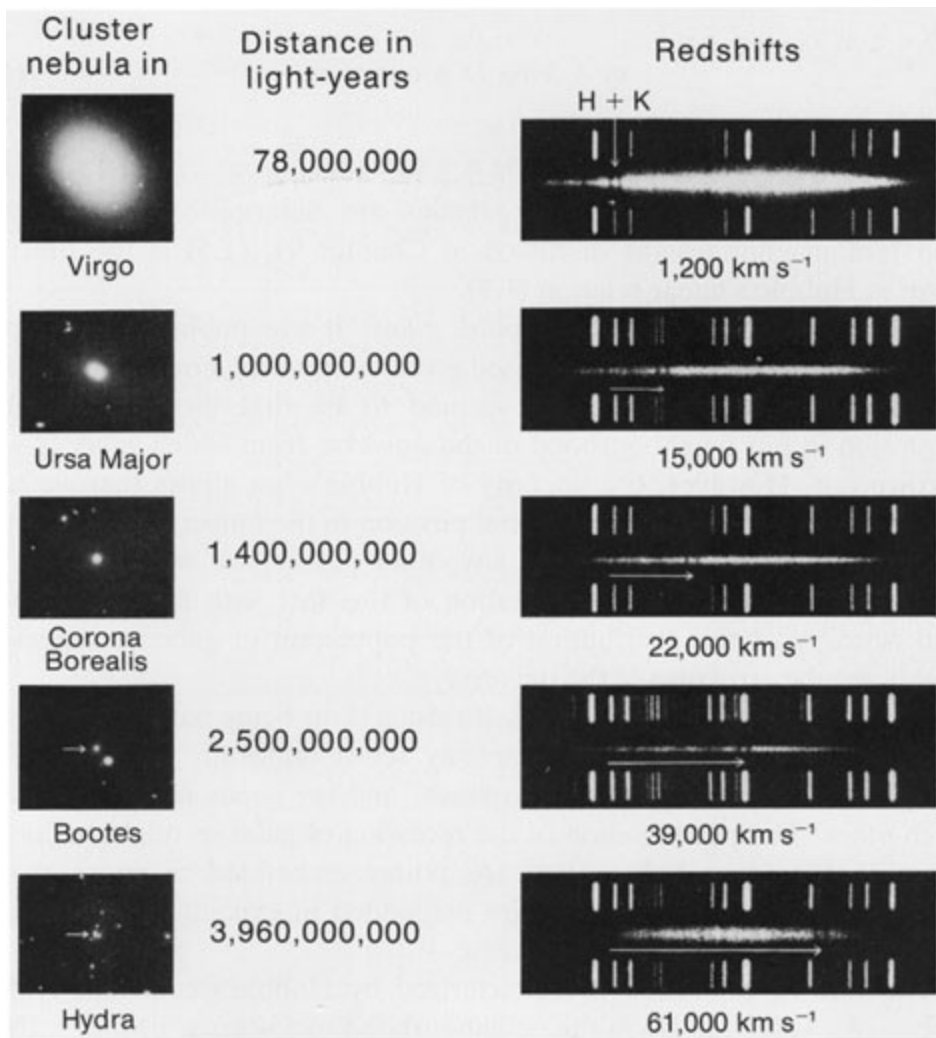


Fig. 3.23. Projections of the fundamental plane onto different two-parameter planes. Upper left: the relation between radius and mean surface brightness within the effective radius. Upper right: Faber-Jackson relation. Lower left: the relation between mean surface brightness and velocity dispersion shows the fundamental plane viewed from above. Lower right: the fundamental plane viewed from the side – the linear relation between radius and a combination of surface brightness and velocity dispersion

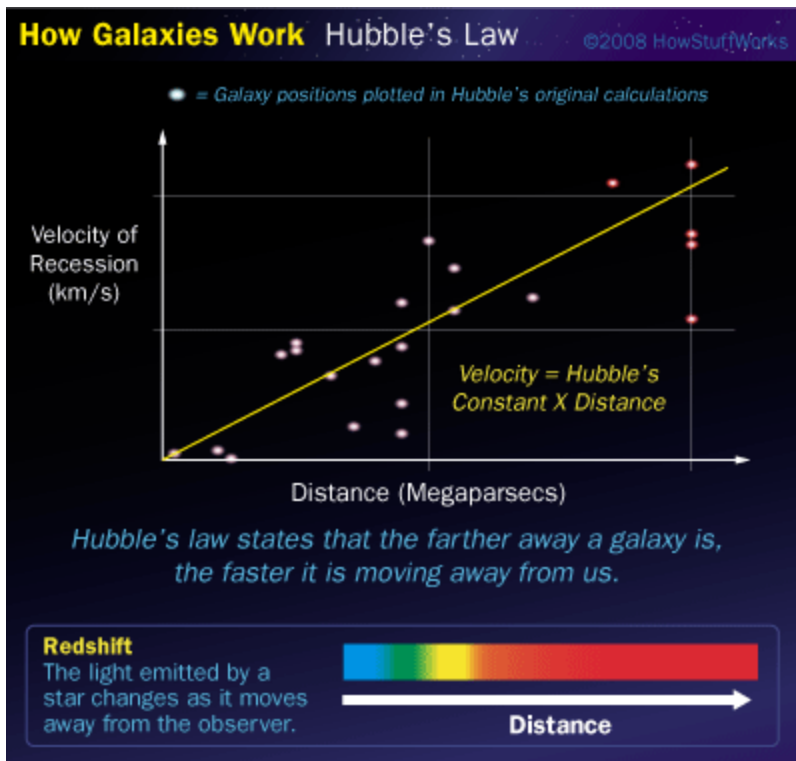
Lei de Hubble

Com observações realizadas com o telescópio de Mount Wilson em 1930 Hubble demonstrou que a velocidade de recessão das galáxias medida pelo deslocamento Doppler das linhas espectrais das galáxias, esta correlacionada com a distancia da galáxia:



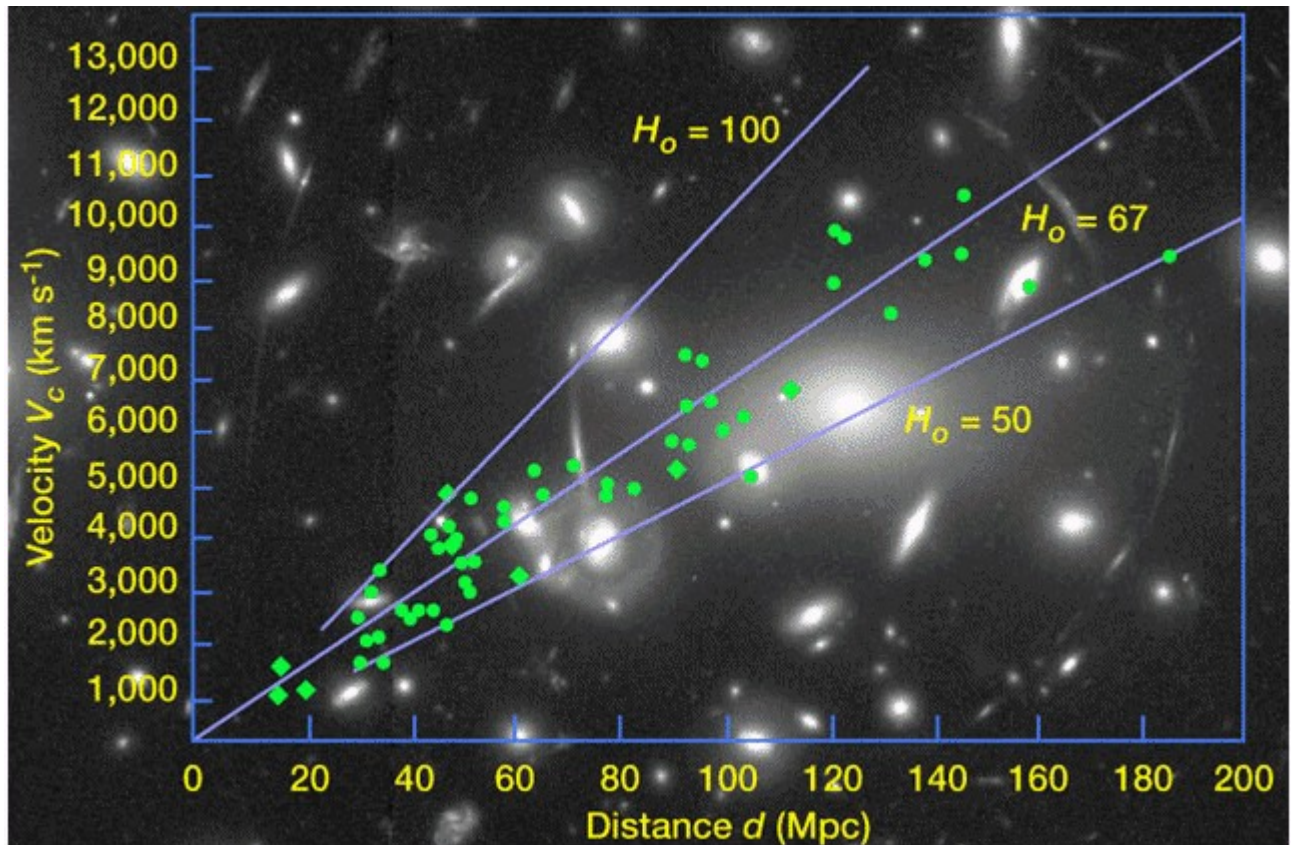
$$V_{\text{velocidade de recessão}} = [(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0] * c$$

c = velocidade da Luz



$$V = H d(\text{Mpc}) \quad \rightarrow \quad H = V(\text{km/seg}) / d(\text{Mpc})$$

O valor da constante de Hubble (H) inicialmente foi estimada em ~ 500 [km/(seg xMpc)], durante varias décadas no século XX, os grupo de pesquisa seguidores de de Voucouleurs adotavam $H= 100$ [km/(seg xMpc)], e os de Sandage utilizavam $H=50$ [km/(seg xMpc)]. A Figura abaixo mostra um valor intermediário para H porem existe uma grande dispersão dos pontos.

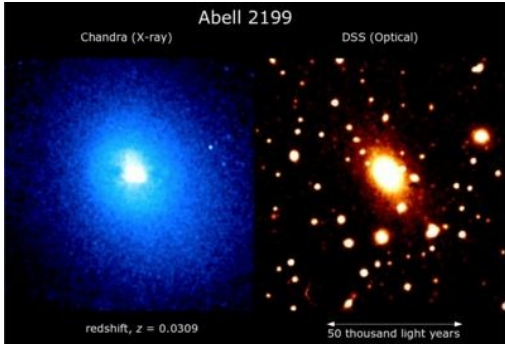


H a constante de Hubble é independente da direção no céu. Esta lei sugere que existe uma expansão isotrópica do Universo.

Esta relação é muito valiosa porque permite determinar a distancia a partir de um simples espectro de uma galáxia, porem o problema reside na determinação de H atualmente adotamos : $H = h \cdot 100 \text{ km/s Mpc}$ o parâmetro $0.5 < h < 1$ ou $H \sim 75 \text{ km/seg Mpc}$

Relação Sunyaev-Zeldovich

Observações com satélites detectaram emissão de raios X em aglomerados de galáxias proveniente de um gás intergaláctico muito quente ($T=10^8\text{K}$) como mostra a imagem do aglomerado Abell 2199.



Os elétrons deste plasma de densidade N_e podem difundir fótons de baixa energia (efeito Thompson) a seção eficaz da interação é : $\sigma = (8\pi/3)(e^2/m_e c^2)^2$

A espessura ótica que gera este gás dentro do aglomerado: $\tau = \int \sigma N_e dl$

Adotando : $N_e = 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ (numero de elétrons), $l = 1 \text{ Mpc}$ (diâmetro do aglomerado)

$$\tau = 10^{-2.3}$$

Portanto uma fração de fótons de uma radio fonte localizada atrás do aglomerado e que passam através do mesmo, sofrem o efeito da difusão pelos elétrons do gás quente do aglomerado. Uma possível fonte pode ser a radiação de fundo de 3K na direção do aglomerado. O espectro de corpo negro de 3 K vai ser modificado em um ΔT esta variação e o efeito Sunyaev-Zeldovich :

$$\Delta T/T = - \int 2kT_e/m_e c^2 d\tau \quad (h\nu \ll kT_e)$$

A combinação das características da emissão em raios X do aglomerado com a medida de $\Delta T/T$ permite determinar a distancia ao aglomerado:

A luminosidade X de uma esfera de gás de raio R, de densidade N_e e temperatura T_e e dada pela formula $L_x = N_e^2 T_e^{1/2} R^3$ $\Delta T/T = - (4kT_e/m_e c^2) \sigma N_e R$

O fluxo observado $F_x = L_x / D^2 = N_e^2 T_e^{1/2} O^3$ O (diâmetro angular da fonte) = R/D

$$F_x = (\Delta T/T)^2 / O/T^{3/2} D$$

Medidas de $\Delta T/T$, F_x e T_e permitem determinar distancia e realizar uma determinação indireta da constante de Hubble H, e comparar com valores determinados a partir da velocidade de recessão do aglomerado.

FIM

Trabalhos para apresentar :

1- Type Ia Supernovae as Standard Candles

David Branch & G. A. Tammann

1992 Annu. Reviews. Astron. and Astroph. 30 359

2- The Absolute Magnitude of Type I SN

Phillips M.

1993 Ap J 413 L115

3- DETERMINATION OF THE HUBBLE CONSTANT USING A
TWO-PARAMETER LUMINOSITY CORRECTION FOR TYPE Ia SUPERNOVAE

Robert Tripp

David Branch Astro-Ph 1999

4- The Cepheid distance to M96 and the Hubble constant

N. R. Tanvir,¹ H. C. Ferguson² and T. Shanks³

Mon. Not. R. Astron. Soc. 310, 175±188 (1999)

5- The Cepheid distance to M96 and the Hubble
constant

N. R. Tanvir,¹ H. C. Ferguson² and T. Shanks³

6) A test of the nature of cosmic acceleration using galaxy redshift
distortions

L. Guzzo et al. Nature 2008

7) The Cepheid distance to M96 and the Hubble constant

N. R. Tanvir,¹ H. C. Ferguson² and T. Shanks³

Mon. Not. R. Astron. Soc. 310, 175±188 (1999)