Astrofísica Galáctica e Extragaláctica

AGA 299 – IAG/USP

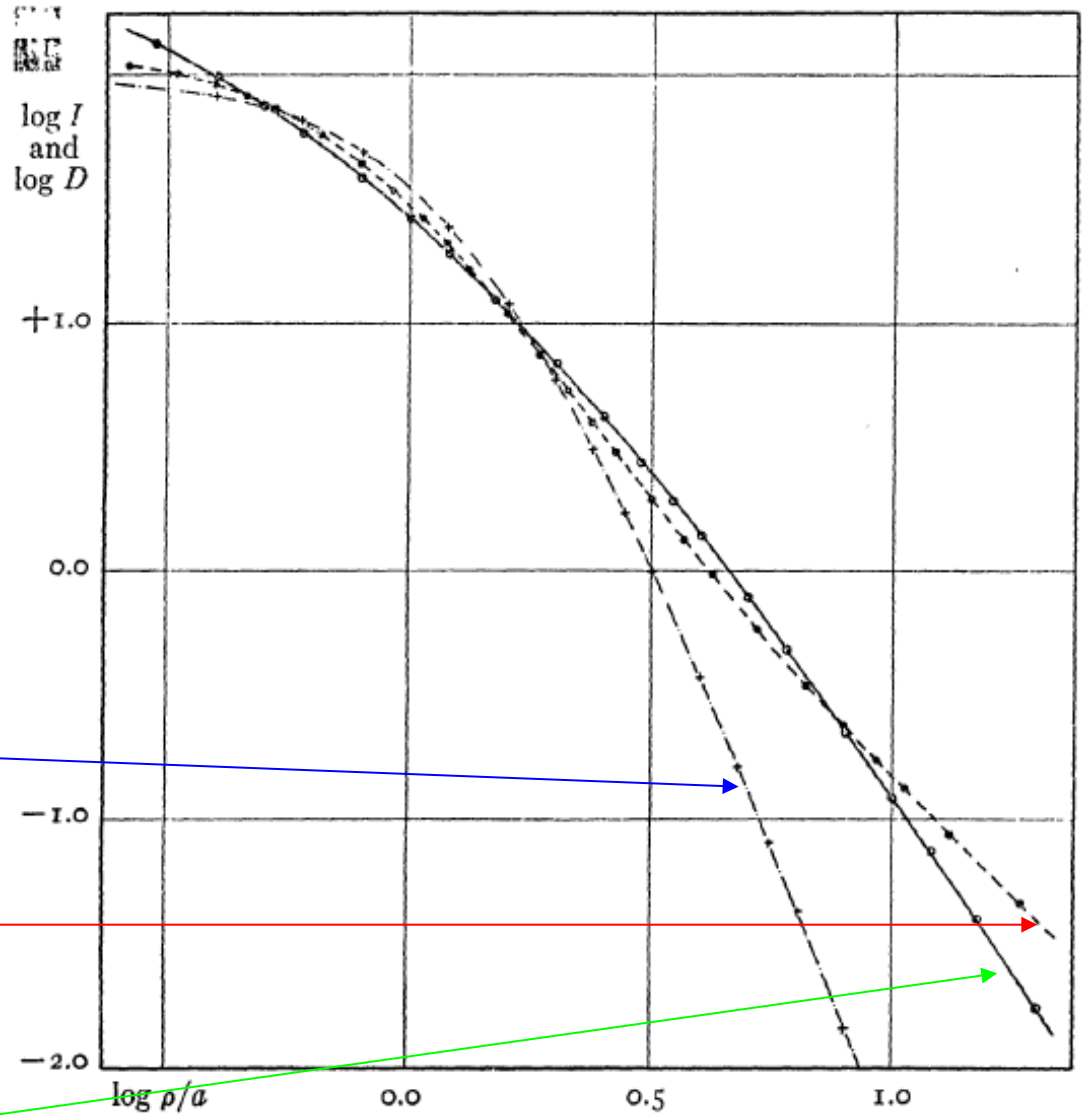
Ronaldo E. de Souza
redsouza48@usp.br
Junho, 2025

5 Galáxias Elípticas

Desde os anos de 1920 as galáxias elípticas eram vistas como objetos estruturalmente mais simples que as espirais e muito semelhante aos bojos. Recentemente, no entanto, esta visão tem sido dramaticamente alterada por novas evidências.

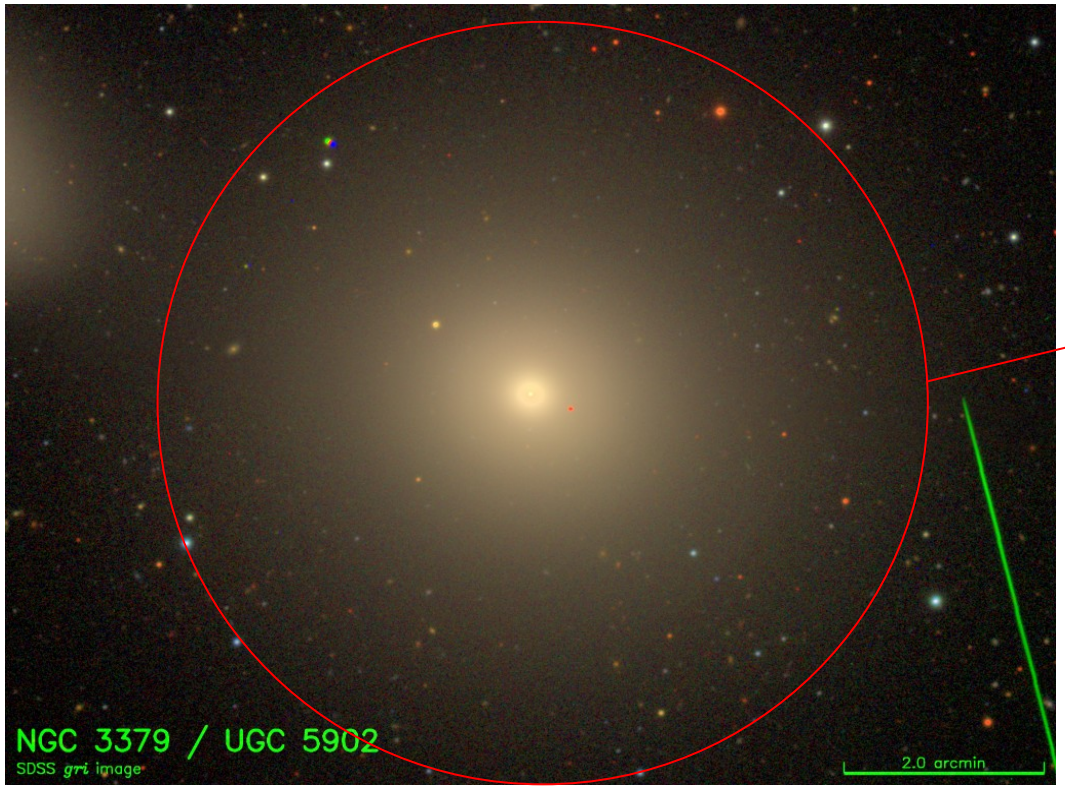
A estrutura das galáxias elípticas se assemelha à distribuição de brilho dos aglomerados globulares e ao brilho esperado para um esfera isotérmica.

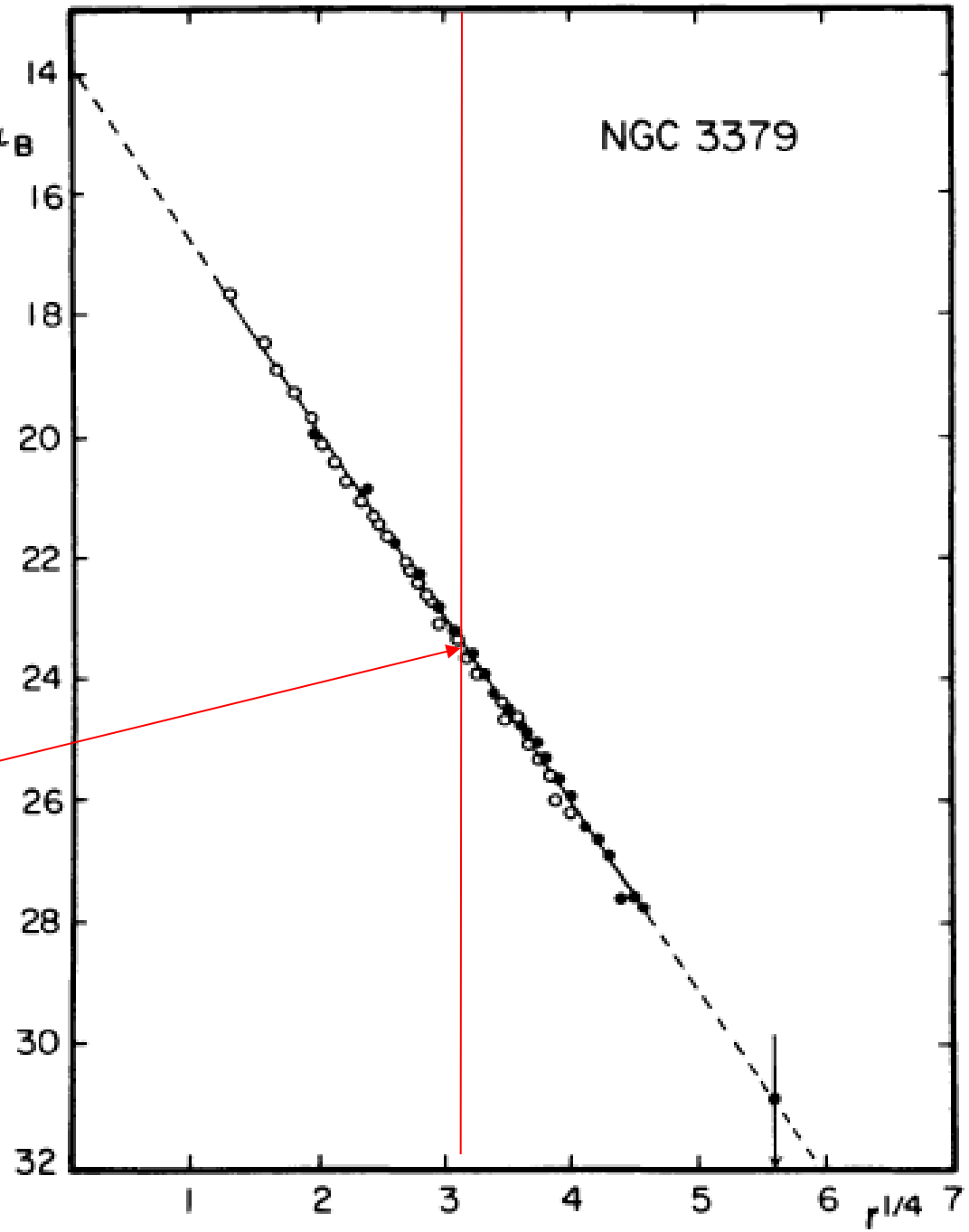
$I=I_0/(1+r/r_0)^2$



Distribuição de Brilho

de Vaucouleurs propôs a lei $r^{1/4}$ que representa com precisão o brilho superficial das galáxias elípticas.





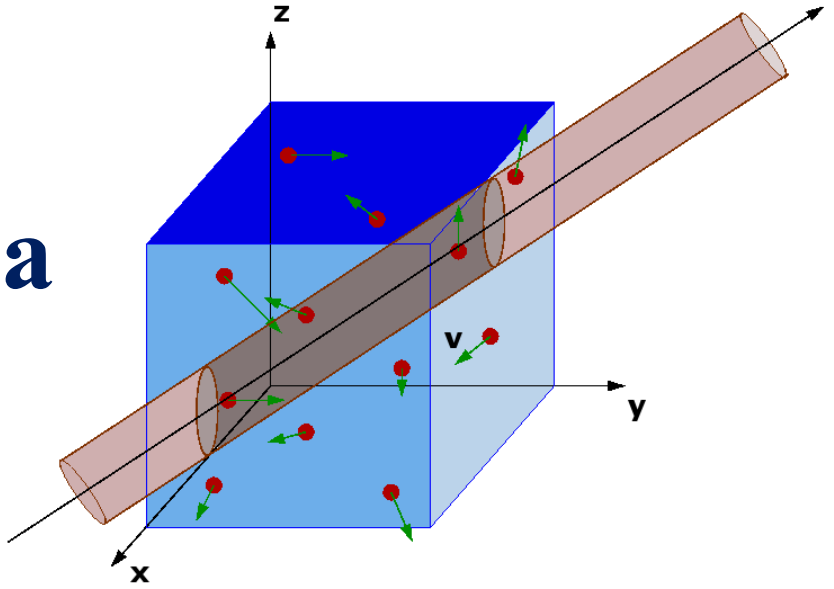
James Jeans adaptou a função distribuição da mecânica dos fluidos.

$$\rho(x, y, z) = \iiint f\left(x, y, z, v_x, v_y, v_z\right) dv_x dv_y dv_z$$

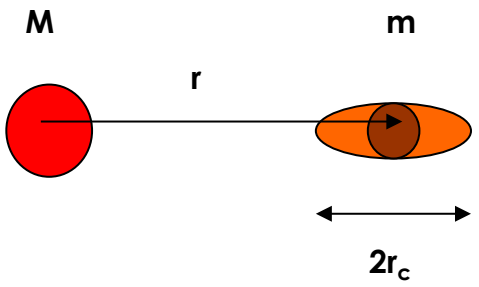
com uma distribuição Maxwelliana. O brilho superficial Σ(r,θ) é a integral da densidade volumétrica ponderada pela luminosidade

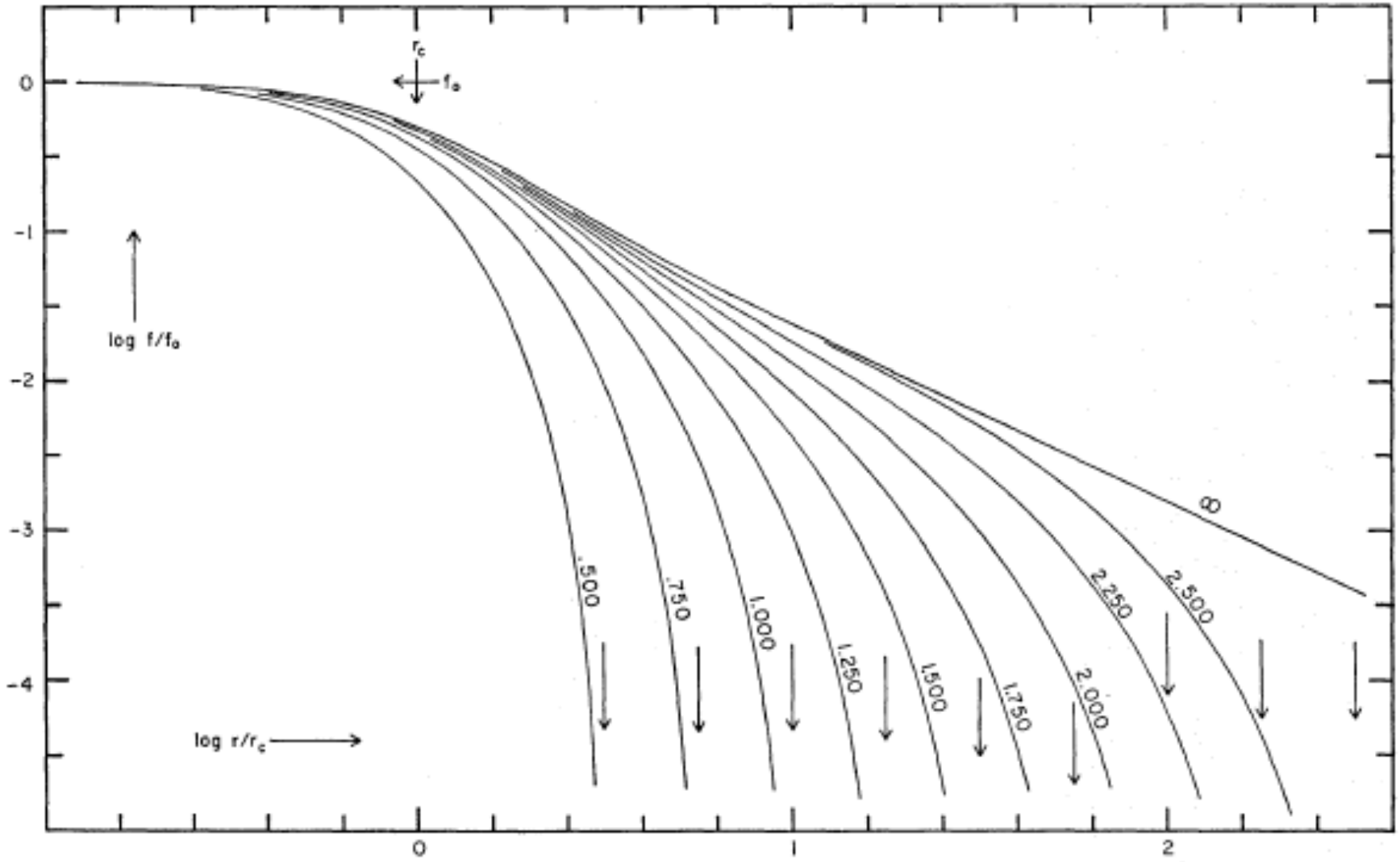
$$\Sigma(r, \theta) = \int \left(\frac{M}{L}\right)^{-1} \rho(x, y, z) dl$$

onde M/L representa a razão massa luminosidade

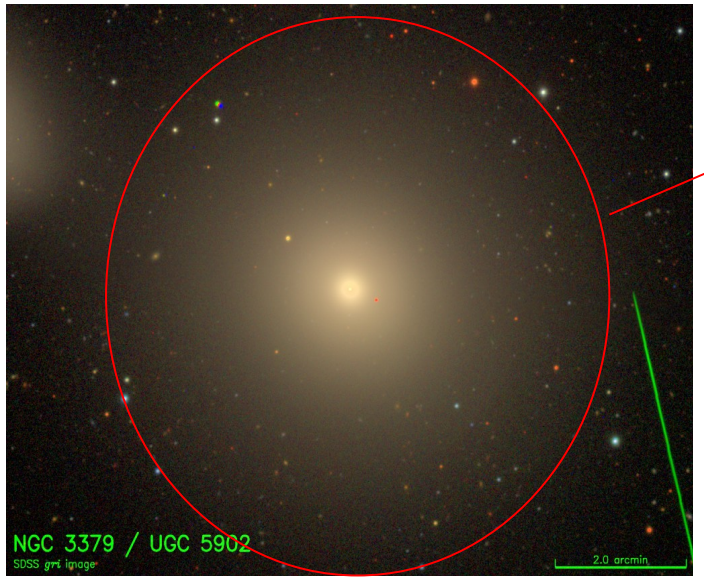


Em 1966 Ivan King (1966, AJ, 71, 64) apresentou uma representação dos aglomerados globulares, e algumas elípticas quase esféricas, como esferas isotérmicas truncadas. Como vimos antes as esferas isotérmicas apresentam a característica de ter uma massa infinita. Isto decorre de que a densidade na região externa varia com $1/r^2$. King considerou que em uma situação mais realista os objetos vizinhos exerceriam sobre o objeto em estudo um efeito de maré truncando a função de distribuição para as velocidades superiores à velocidade de escape. Por este motivo este modelo é também chamado de esfera isotérmica rebaixada. Consequentemente o seu perfil de densidade seria também truncado até uma distância máxima r_c identificada como o raio de maré, tornando assim a sua massa total finita. Quando r_c tende para o infinito recuperamos novamente a esfera isotérmica normal. Caso contrário o perfil seria truncado tendo necessariamente luminosidades e massas finitas.





Em NGC3379 podemos verificar que o modelo de king apresenta uma ótima concordância com as observações



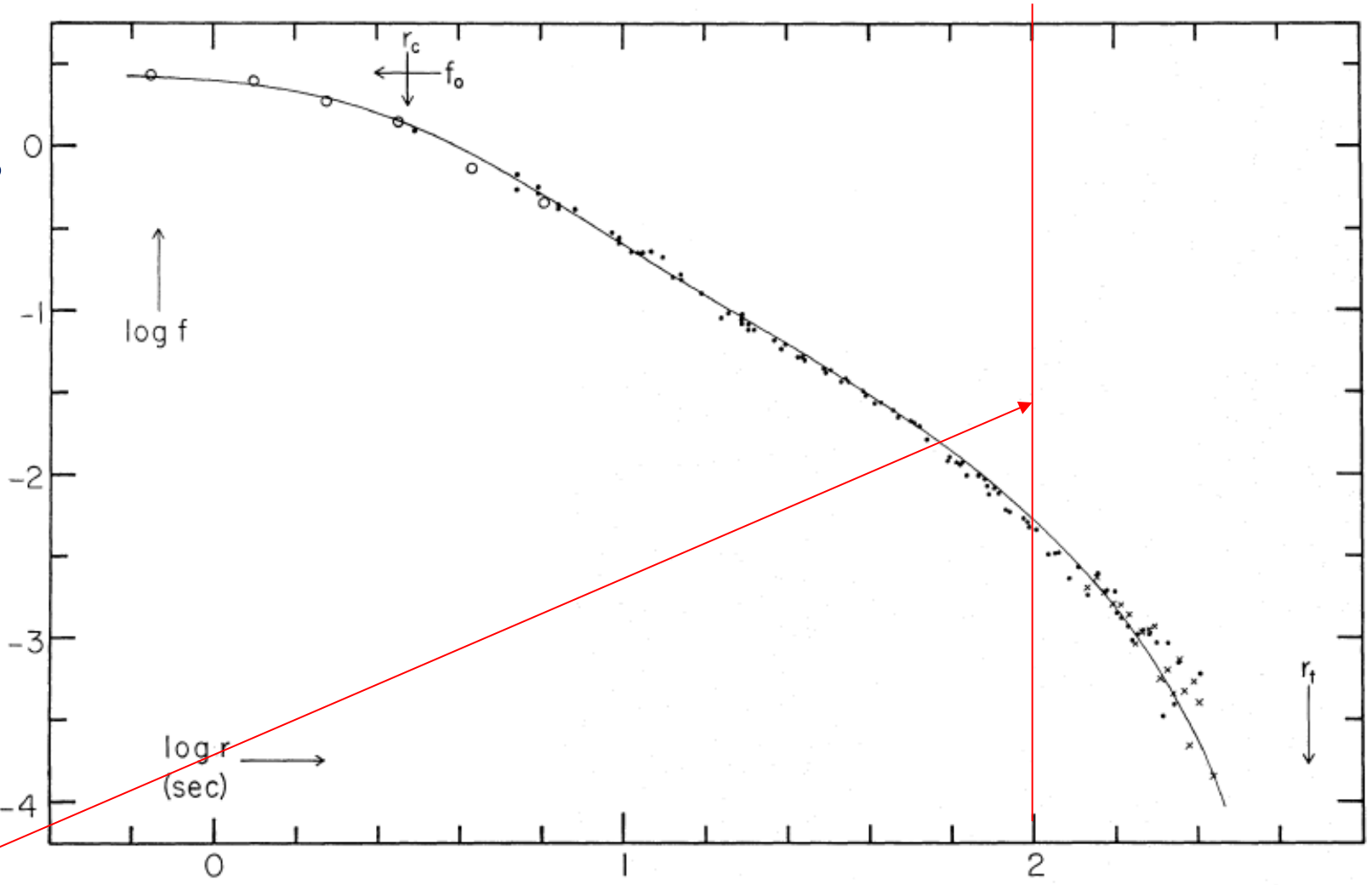
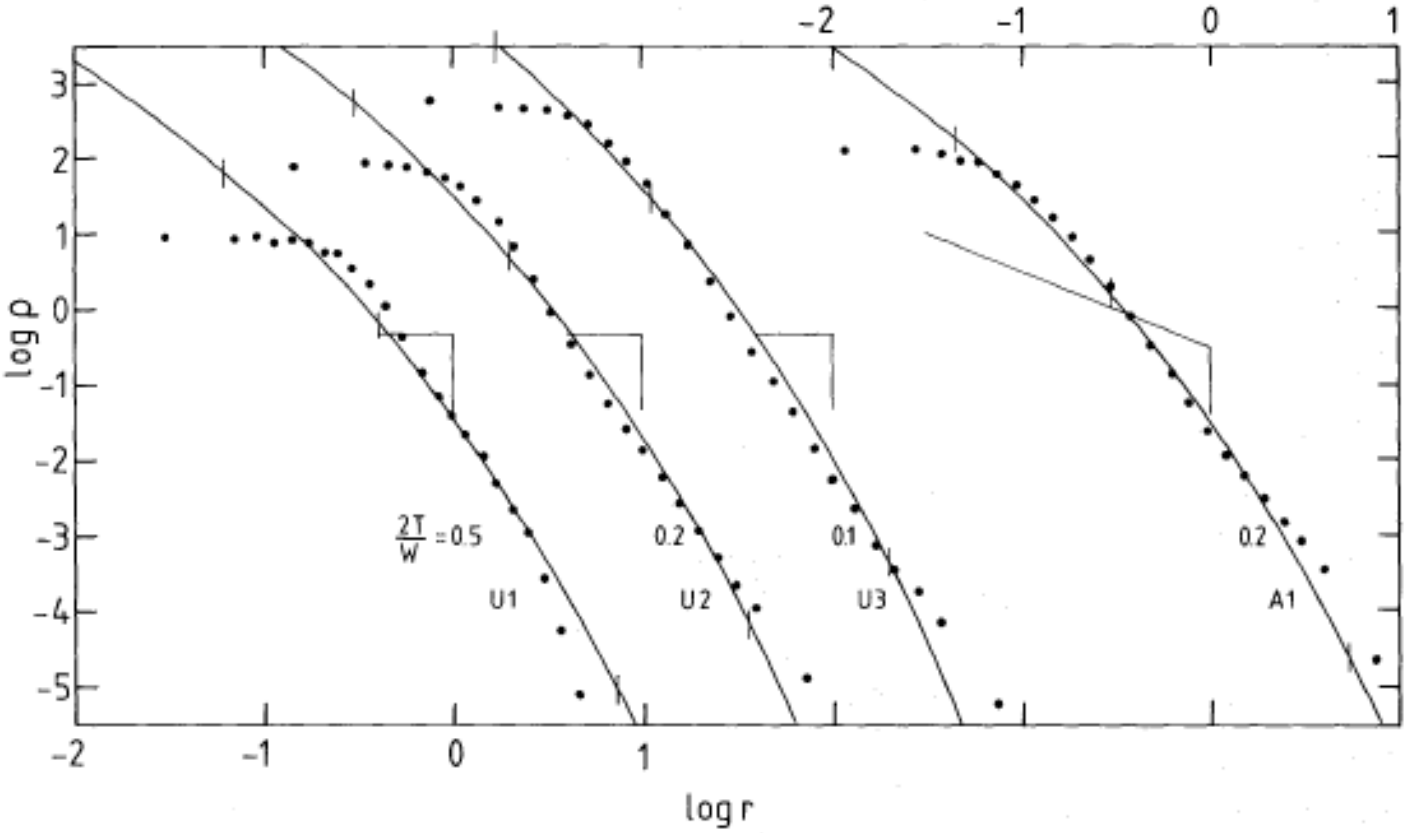
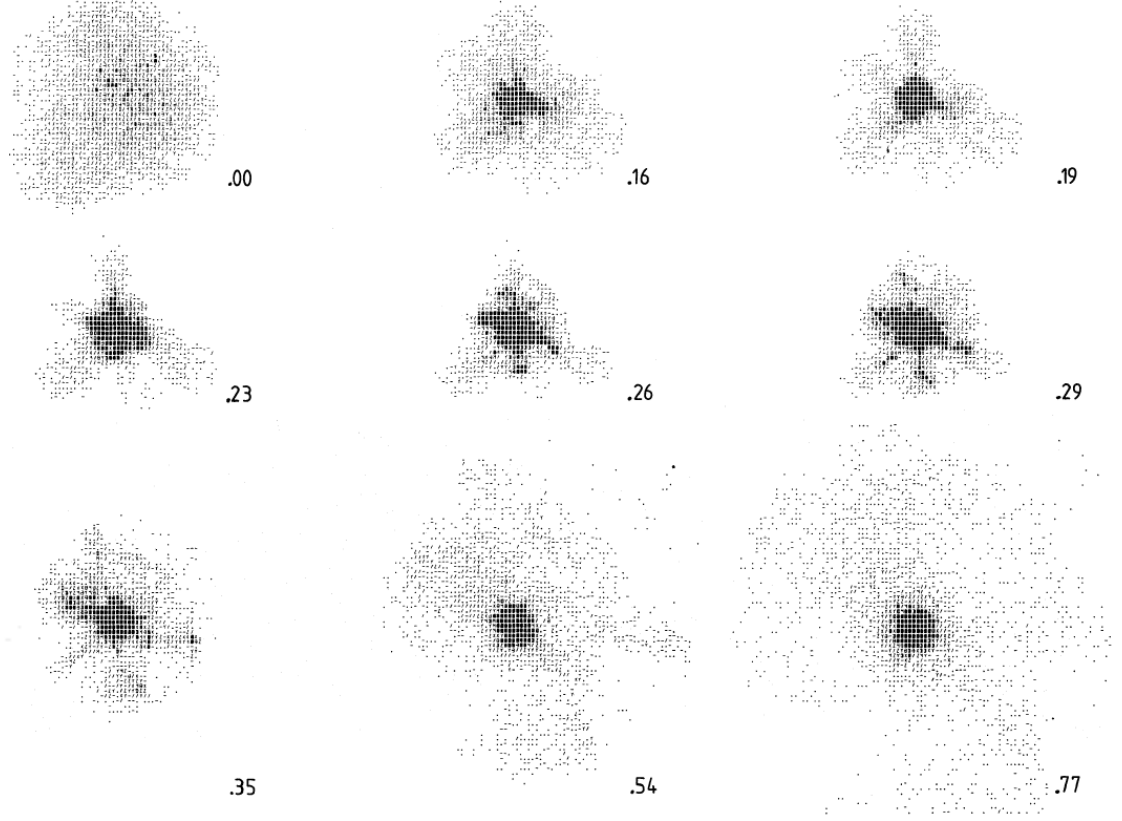


FIG. 4. Comparison of surface brightnesses in NGC 3379 with theoretical curve for $\log(r_t/r_c)=2.20$. Ordinate: logarithm of yellow surface brightness (unit is 16^m91/sq sec); abscissa: logarithm of radius in seconds. Open circles are values calculated from concentric circular measurements, dots are point measurements in the yellow, and crosses are blue measurements converted by assuming $B-V=0.96$.

Desde 1980 sabe-se que o perfil de brilho das galáxias elípticas é uma consequência natural



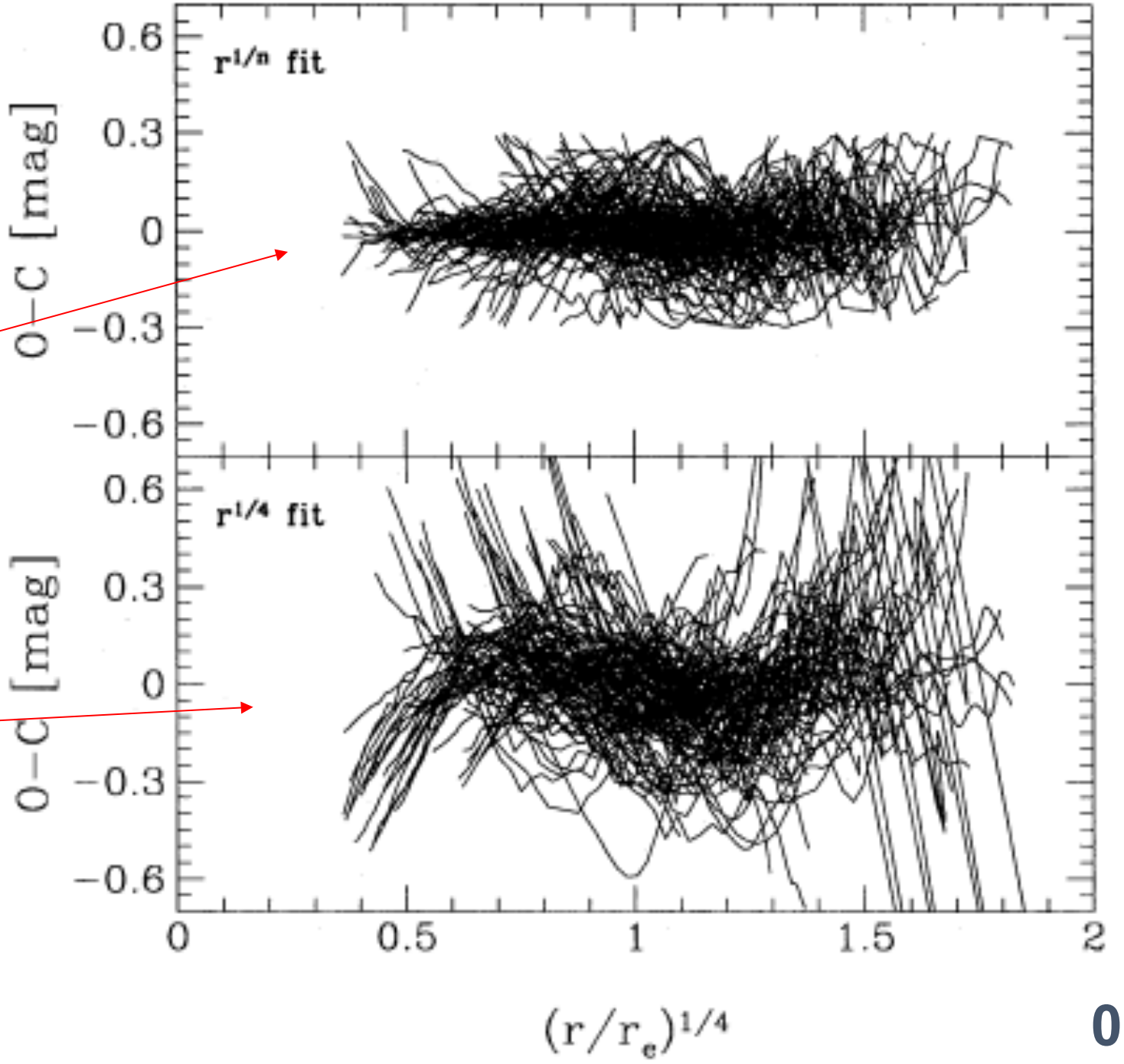


das condições iniciais existentes na época do colapso que formou o objeto!

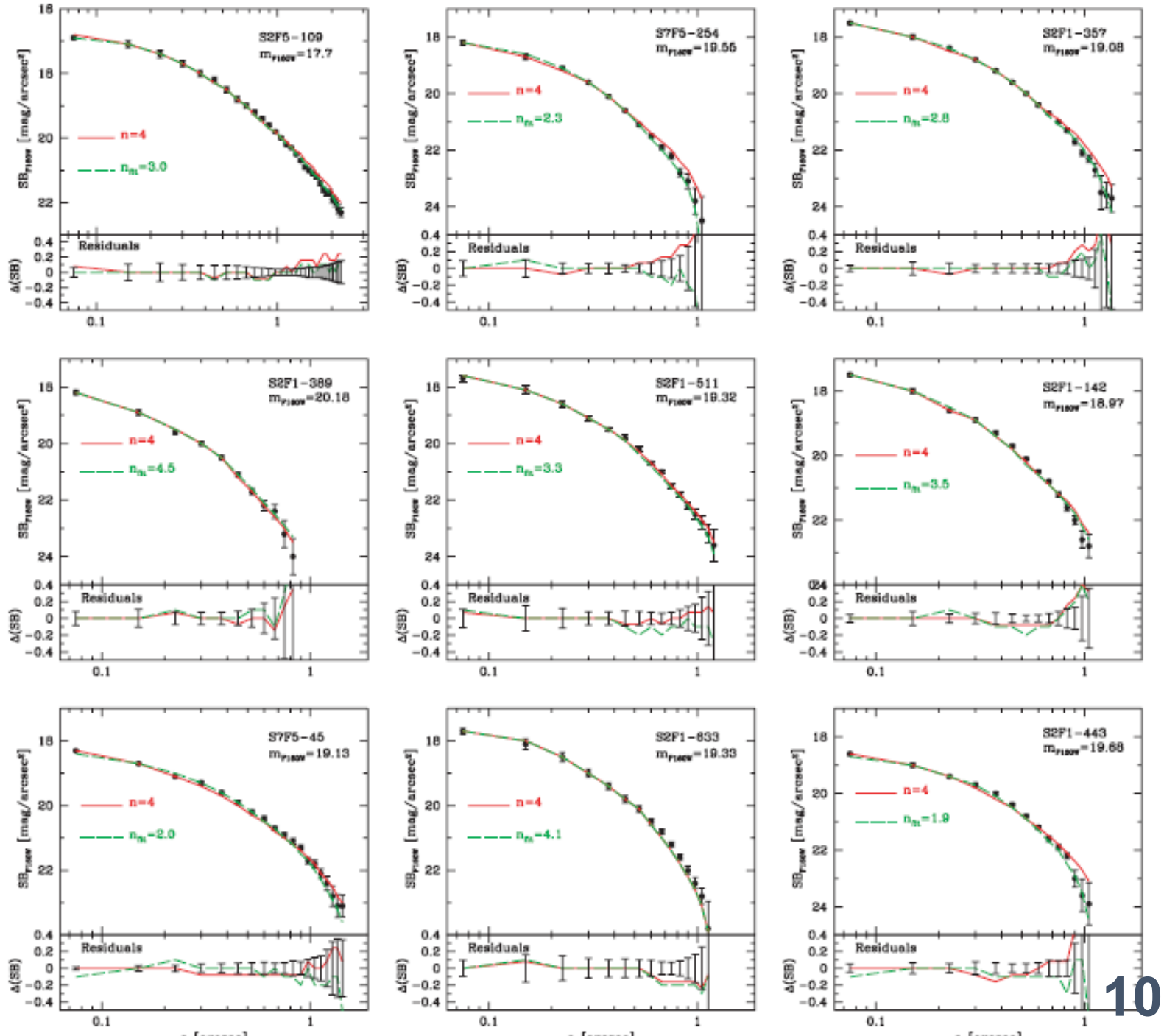
O perfil de Sérsic como como uma descrição alternativa

$$I(r)=I_0 \exp(-(r/r_0)^{1/n})$$

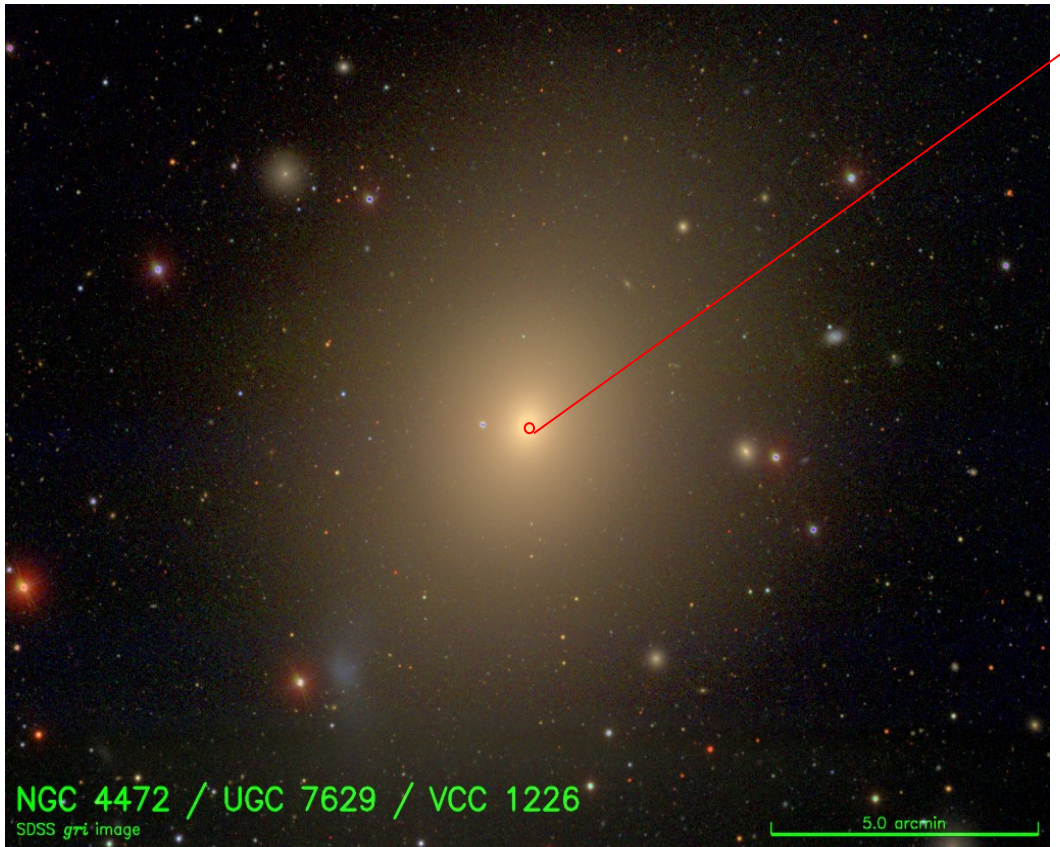
à lei $r^{1/4}$ de de Vaucouleurs.

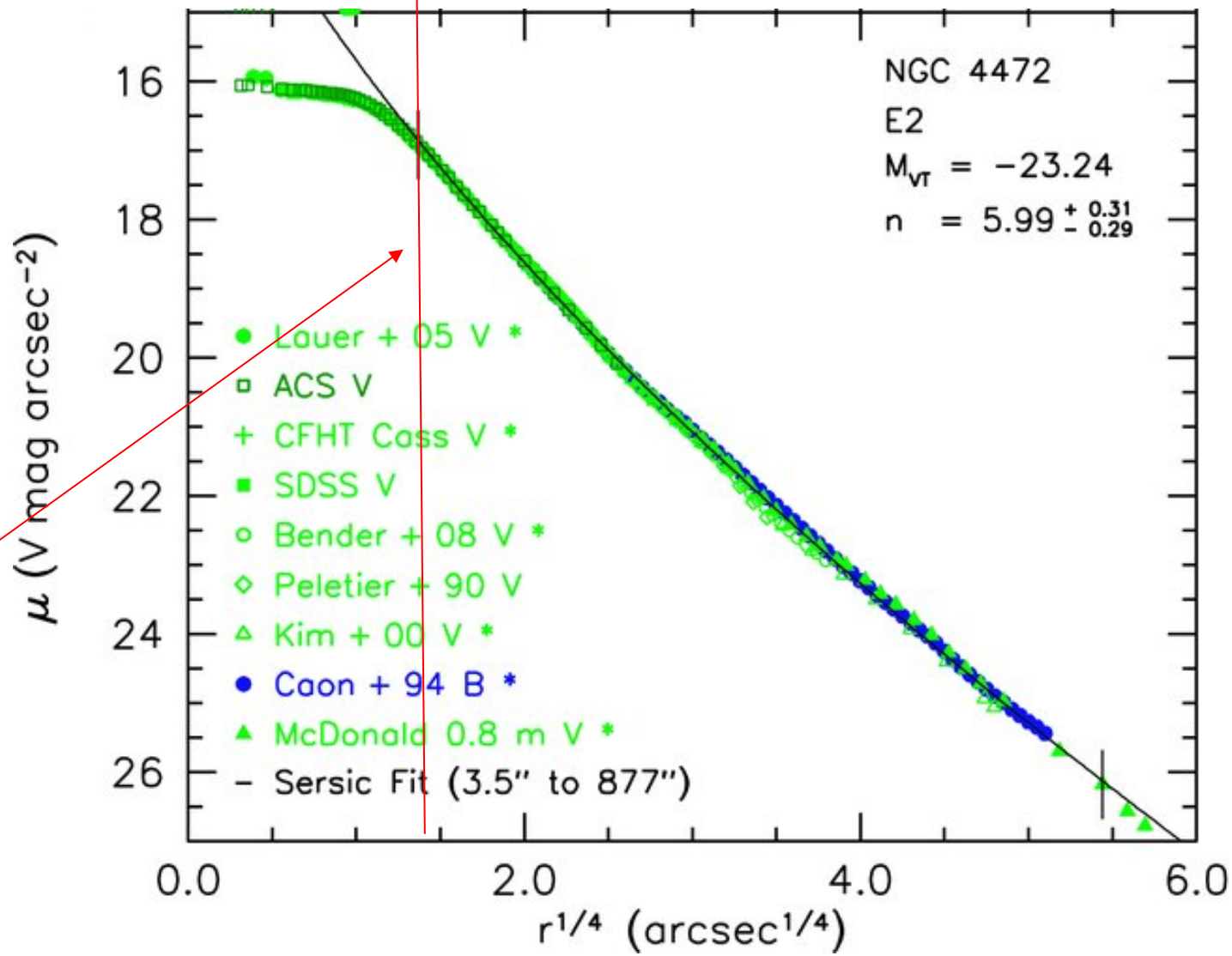


Em z=1,5 o perfil de brilho das elípticas já estava bem estabelecido a cerca de 4,3 Ganos após o big-bang.



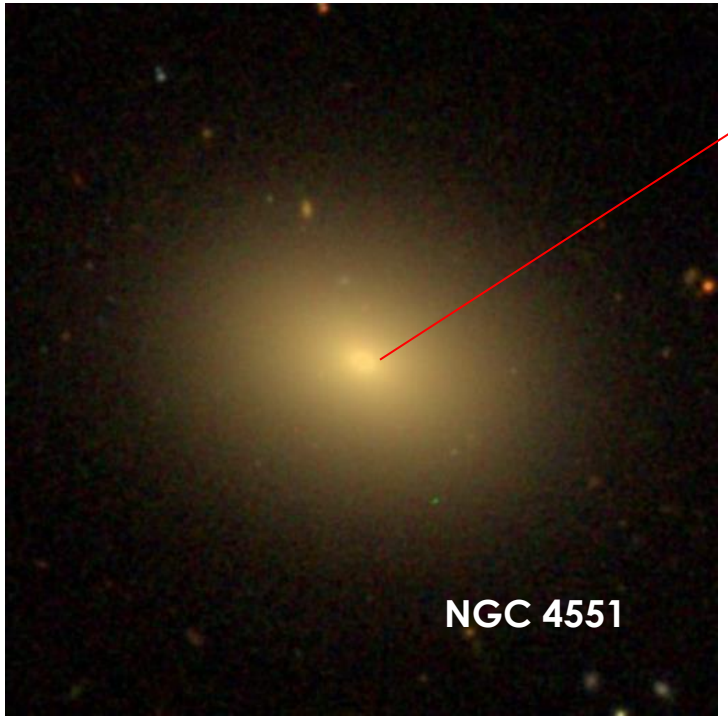
Alguns objetos mais brilhantes que (M_B< -21,66) seguem a lei de Sérsic mas tendem

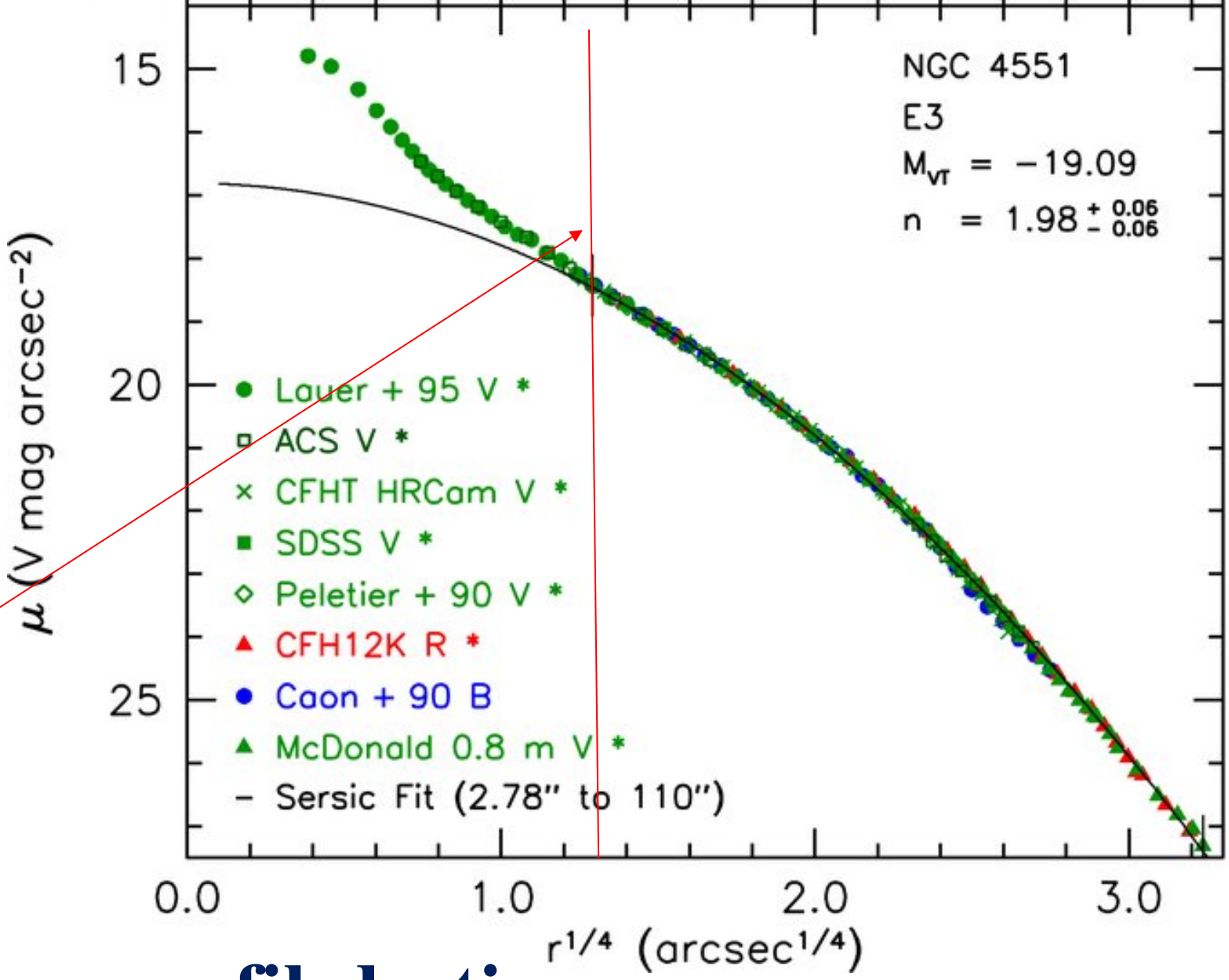




a apresentar uma estrutura de caroço central (core).

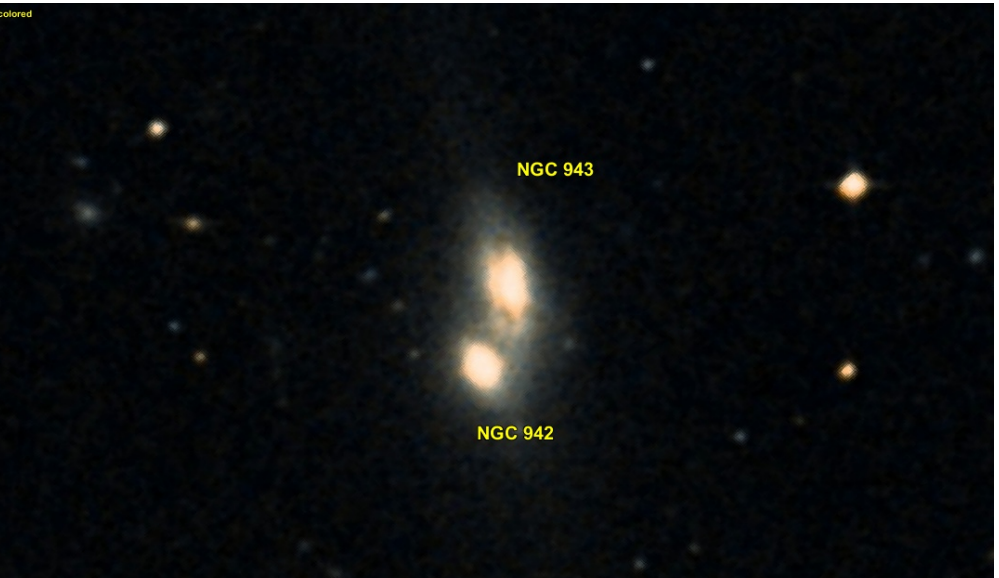
Ao contrário os objetos menos brilhantes também seguem a lei de Sérsic mas tendem a apresentar no núcleo

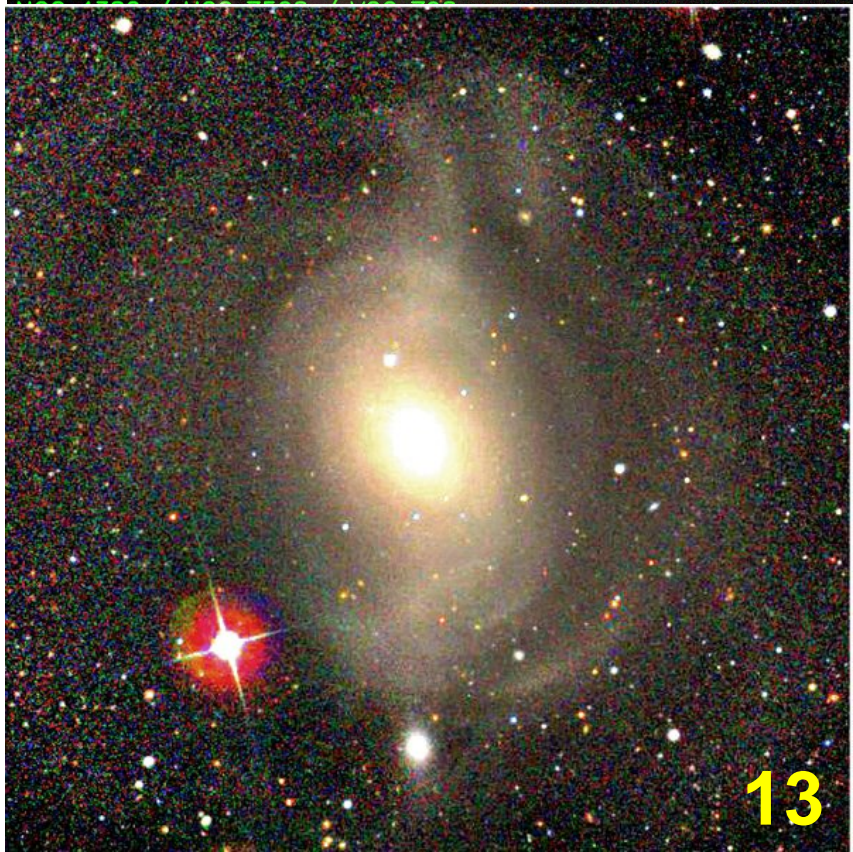


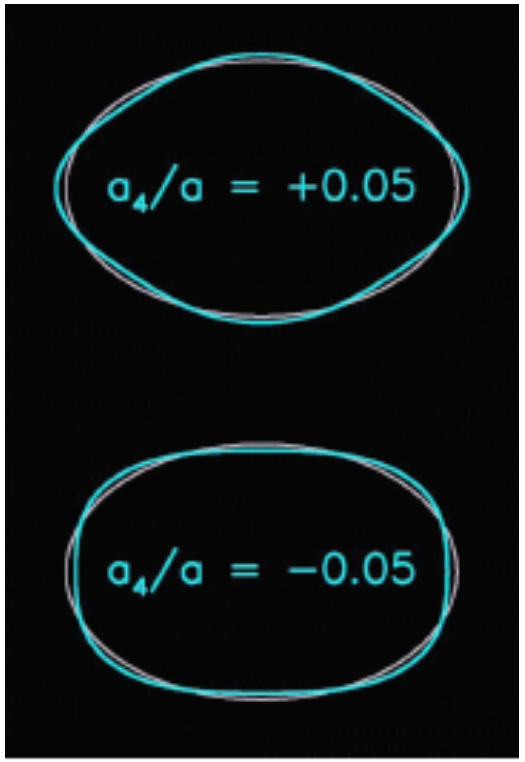


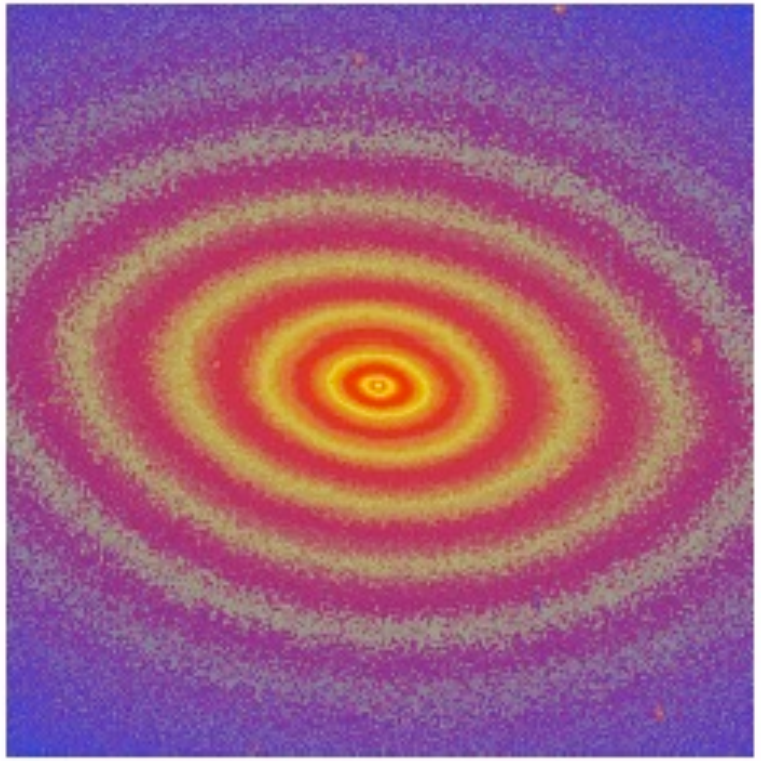
um perfil do tipo cuspy, com um excesso de brilho!

Distorções e assimetrias

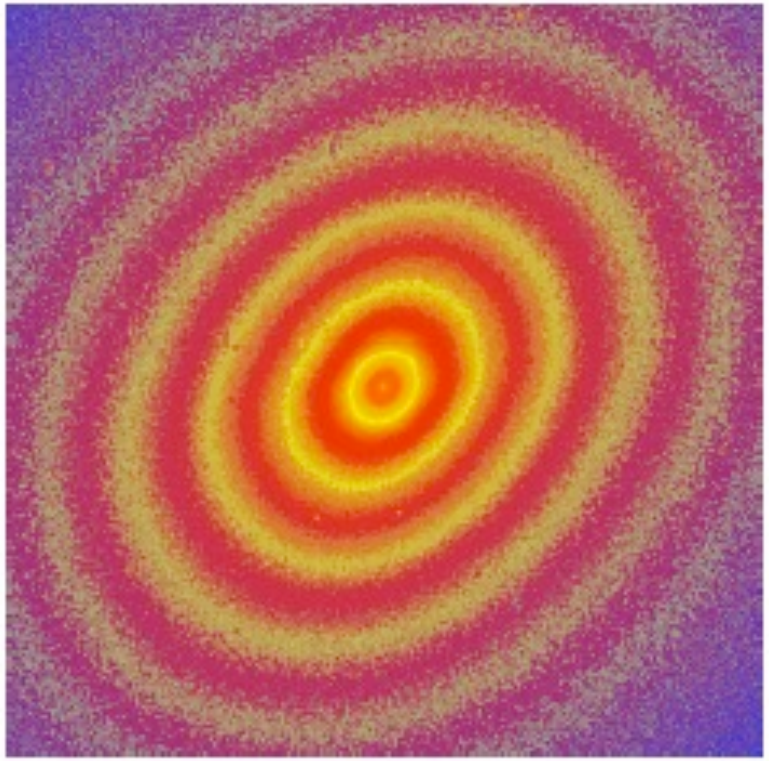








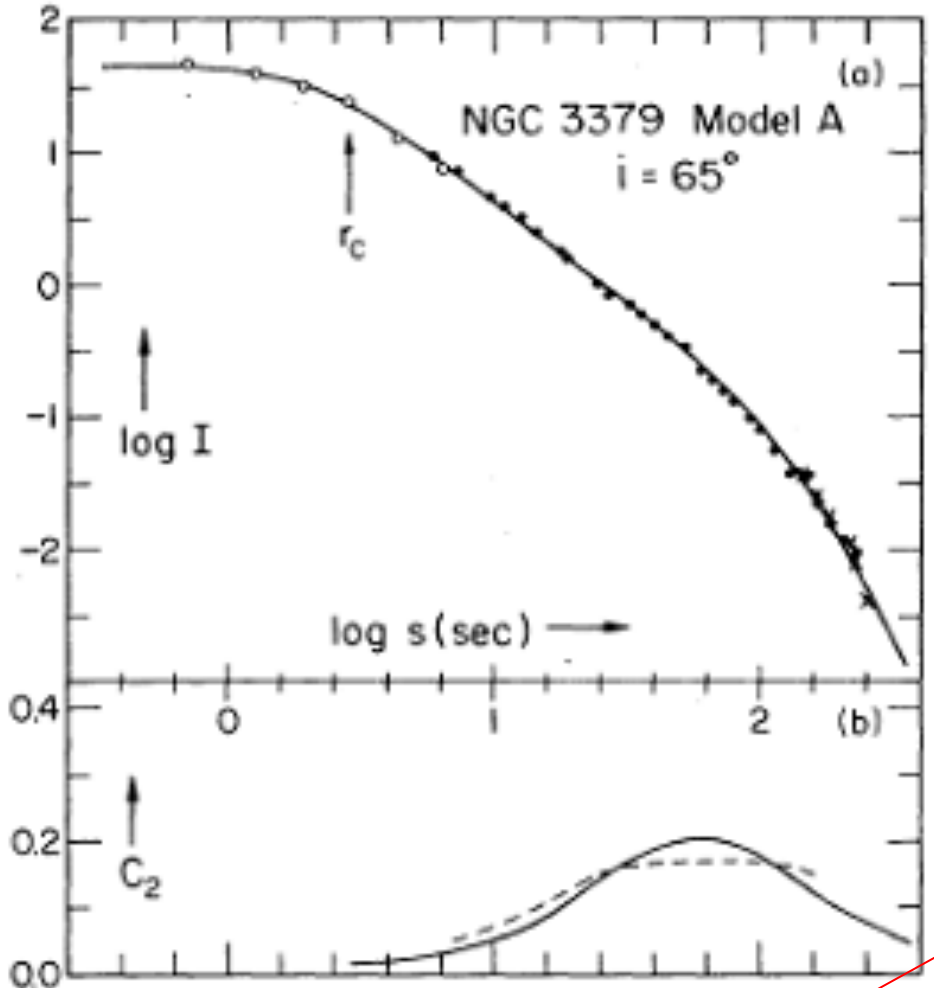
NGC 821: a_4/a ~ +0.02, disky

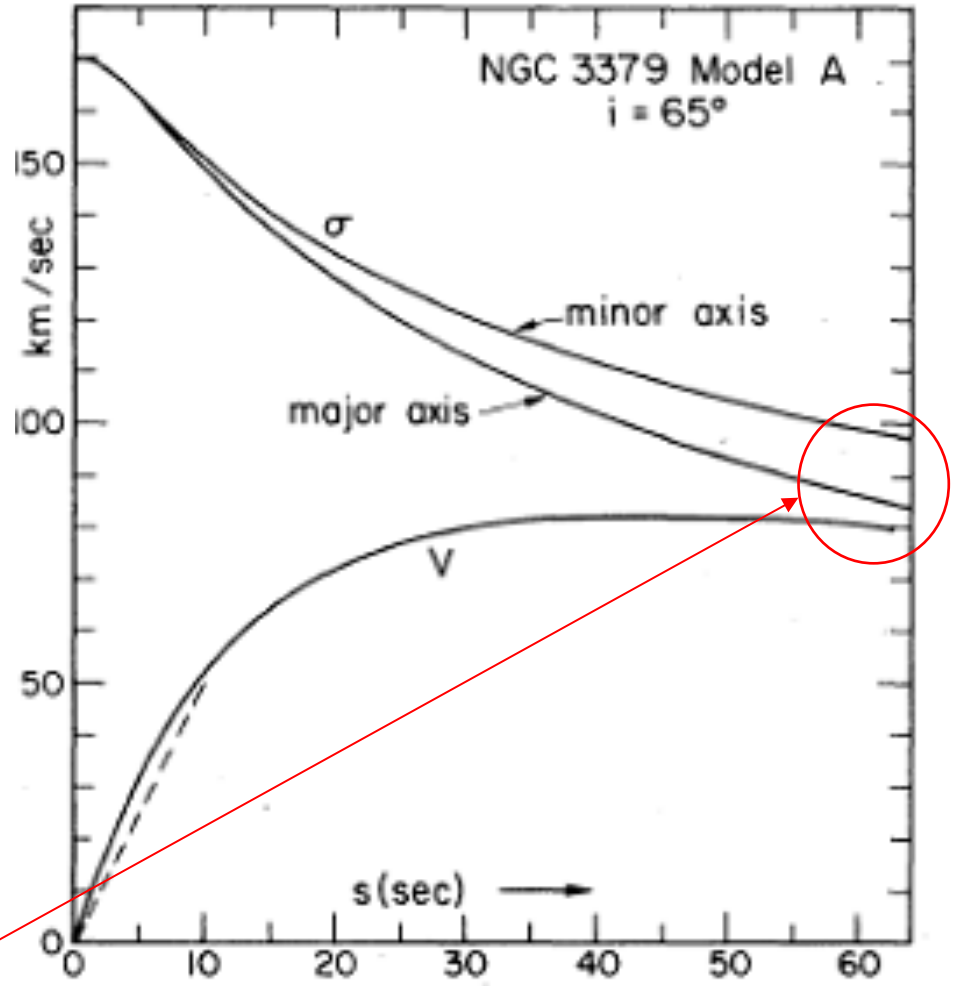


NGC 2300: a_4/a ~ -0.02, boxy

Distorções isofotais do tipo disco (a4>0) e do tipo caixa (a4<0).

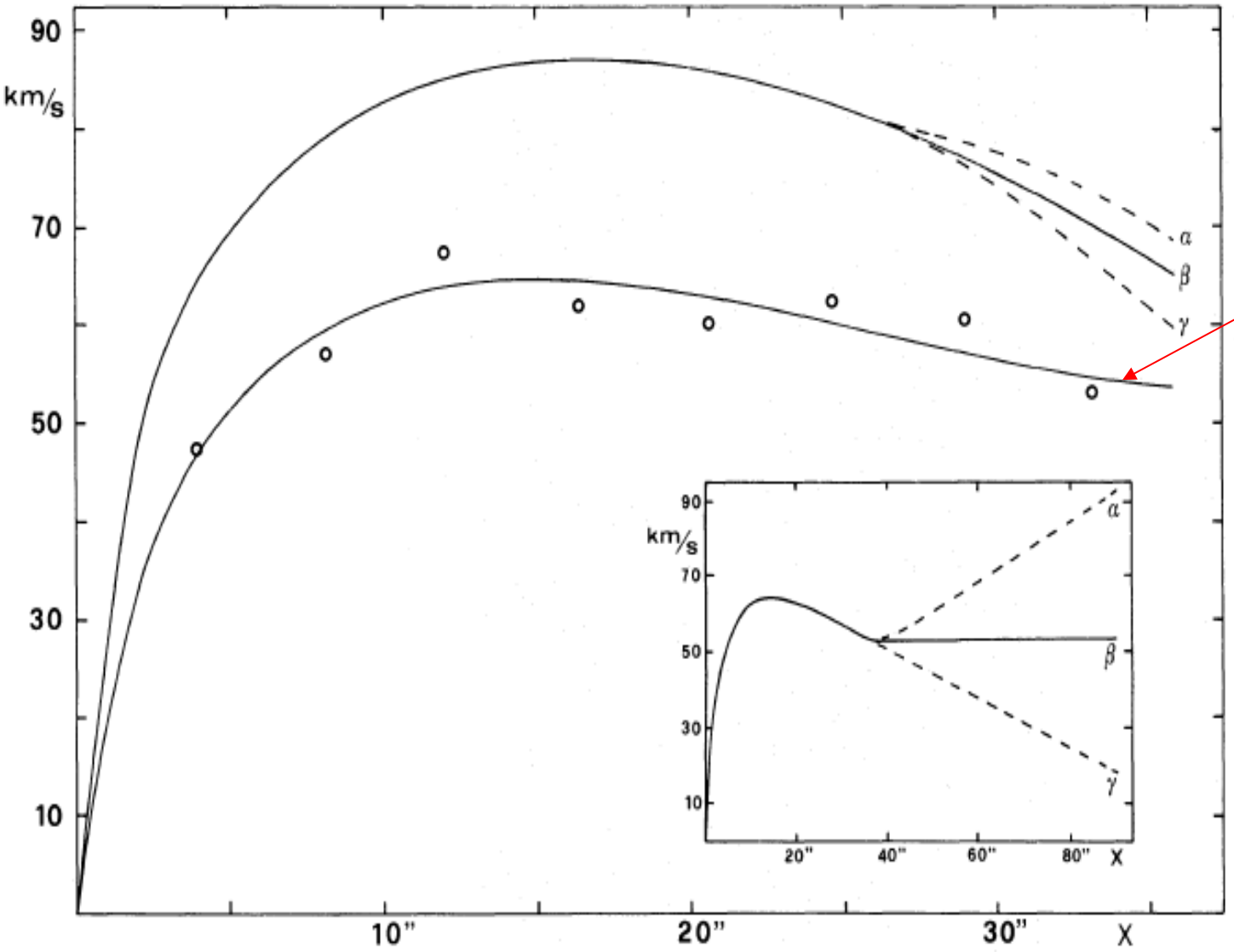
Velocidade de rotação

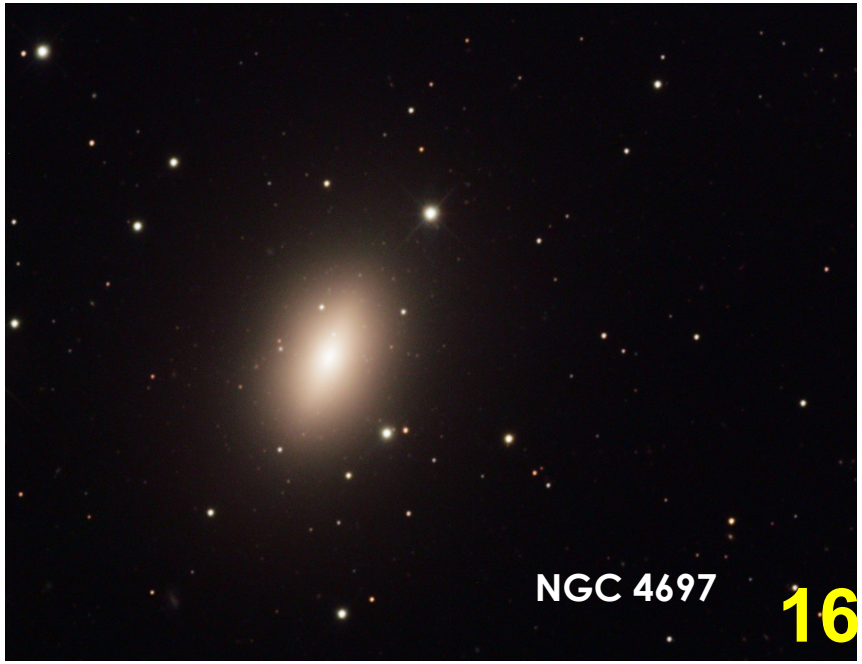




As galáxias elípticas apresentam velocidades de rotação insuficientes para uma sustentação dinâmica isotrópica destes objetos como ocorre nos discos das espirais!

Sabe-se que objetos como NGC 4697 apresentam uma dispersão de velocidades da ordem de 200 km/s e uma velocidade de rotação de somente 60 km/s!





Um elipsoide isotrópico em rotação não descreve as elípticas!

Modelos sustentados por rotação

Elipsóide oblato isotrópico

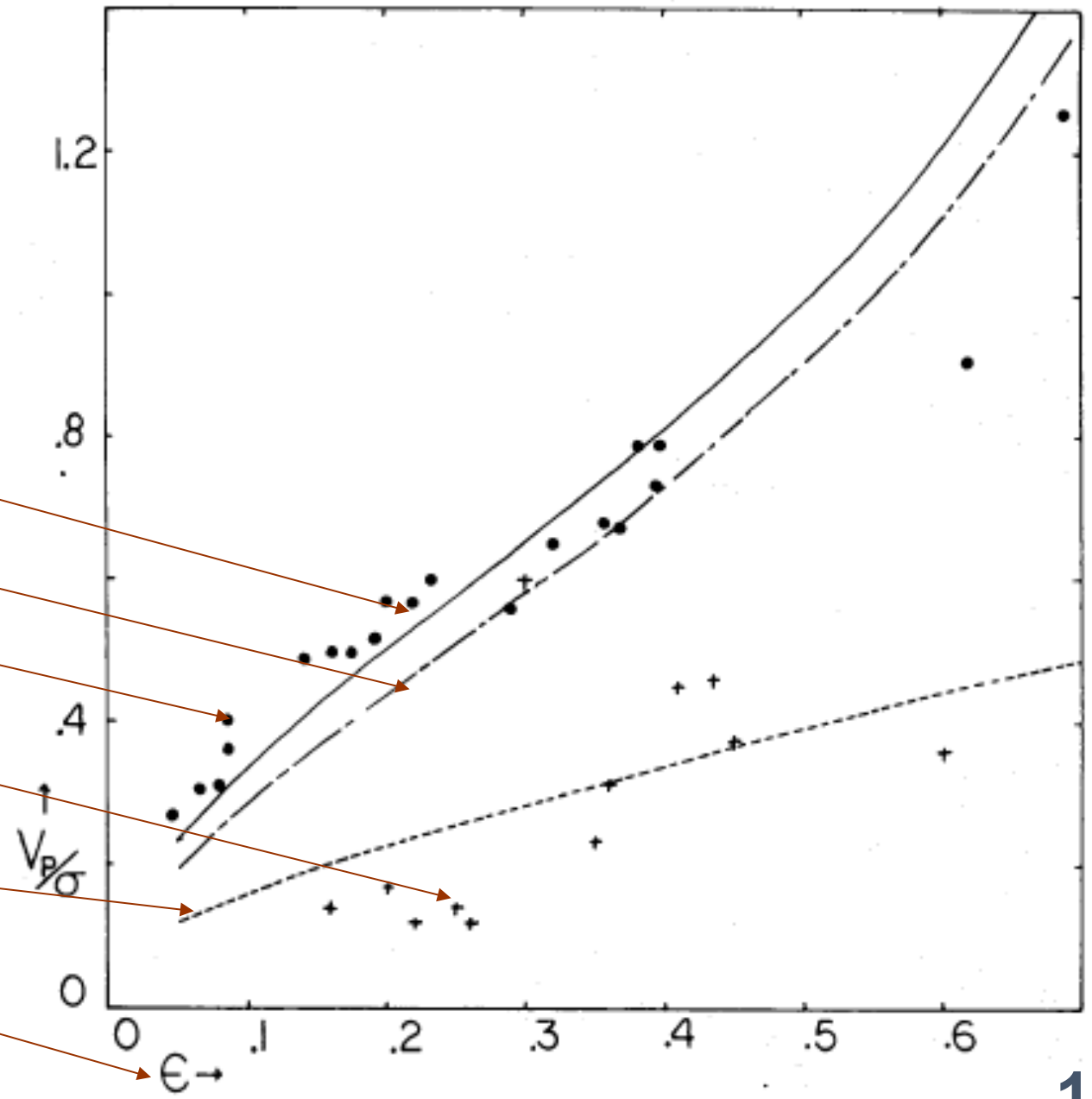
Elipsóide triaxial isotrópico

Modelos autoconsistentes isotrópicos

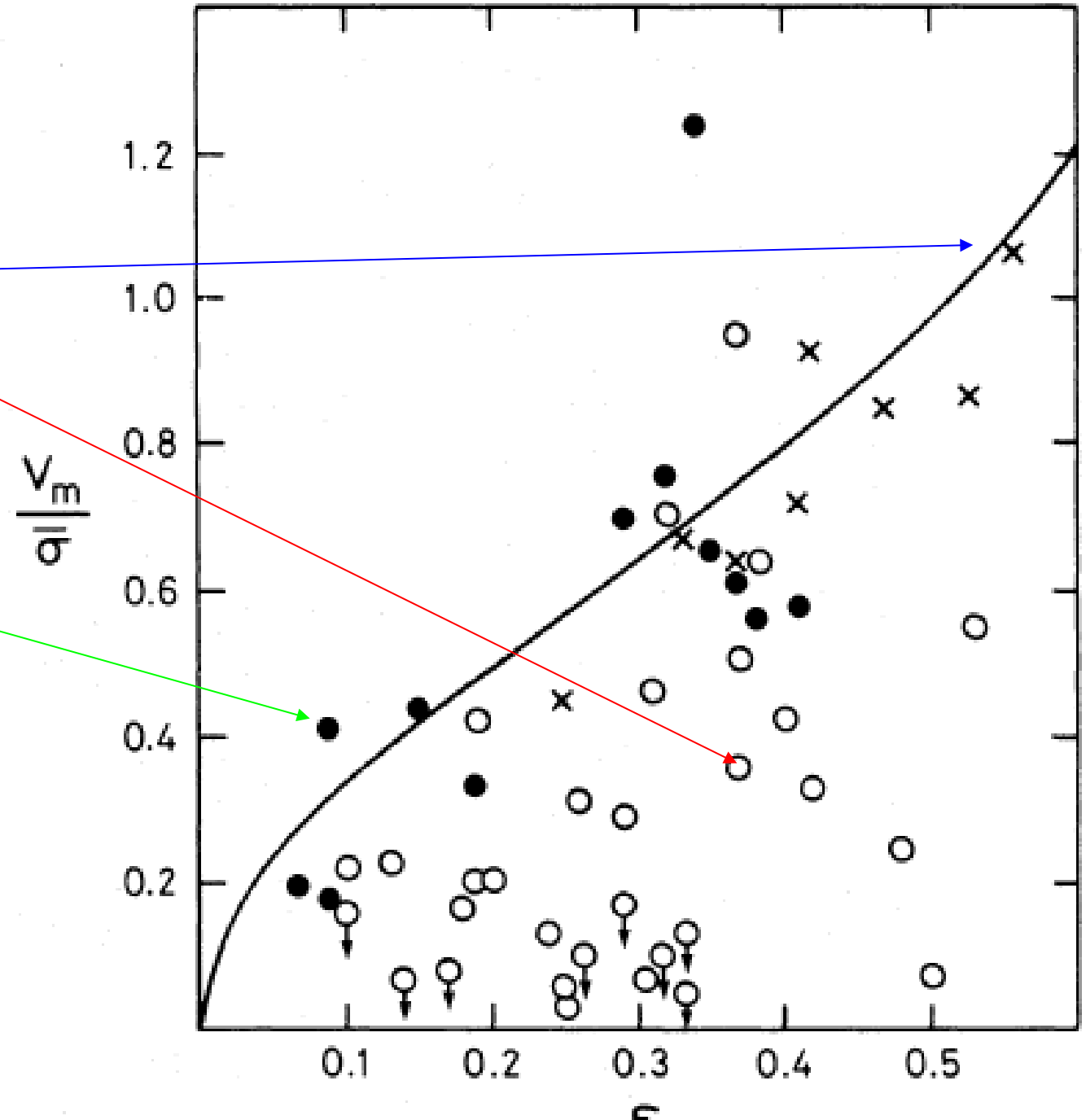
Elipsóide oblato não isotrópico
$\sigma^2_z=2\,\sigma^2_x$, $\sigma_x=\sigma_y$

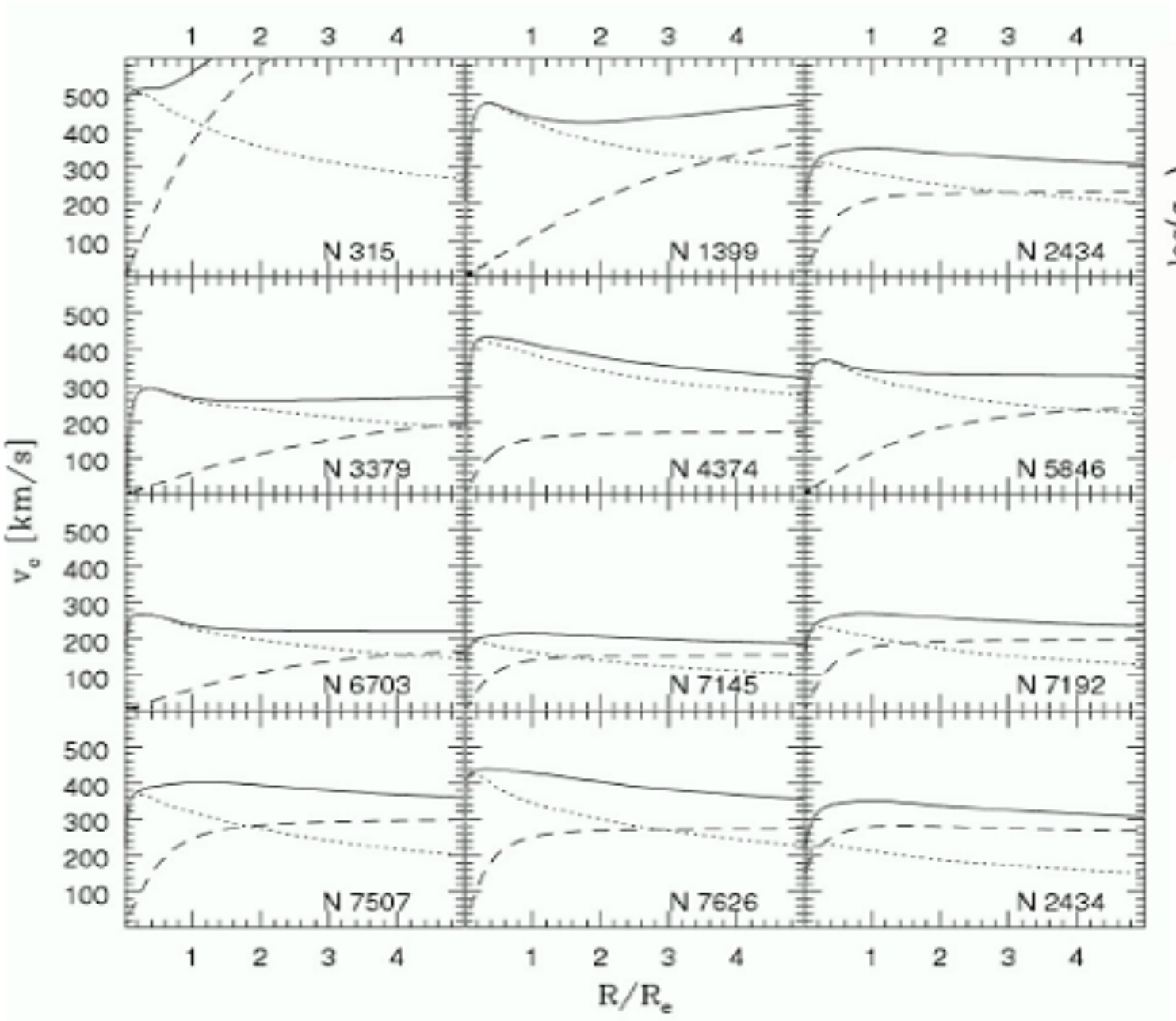
Galáxias elípticas gigantes

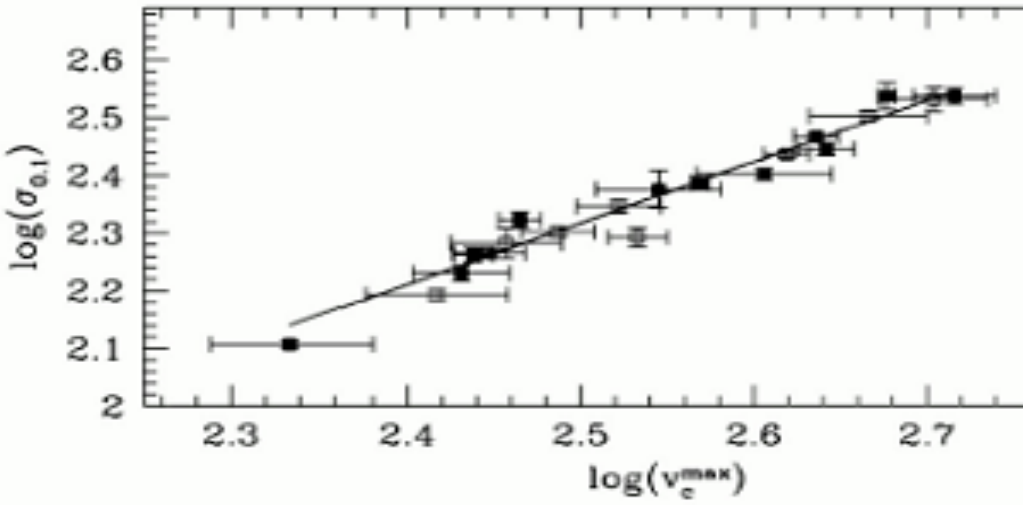
Elipticidade $=\varepsilon=1-a_z/a_x$



ao contrário das elípticas luminosas, os bojos, e as elípticas menos luminosas, podem ser descritos como elipsoides oblatos em rotação.







⇨ Circular rotation curves of ellipticals are flat!

⇨ $V_{c,max} \sim 0.68\ \sigma_{0.1}$

⇨ dark matter starts to dominate around two effective radii in E's.

Gerhard et al. (2001), Thomas et al. (2007)

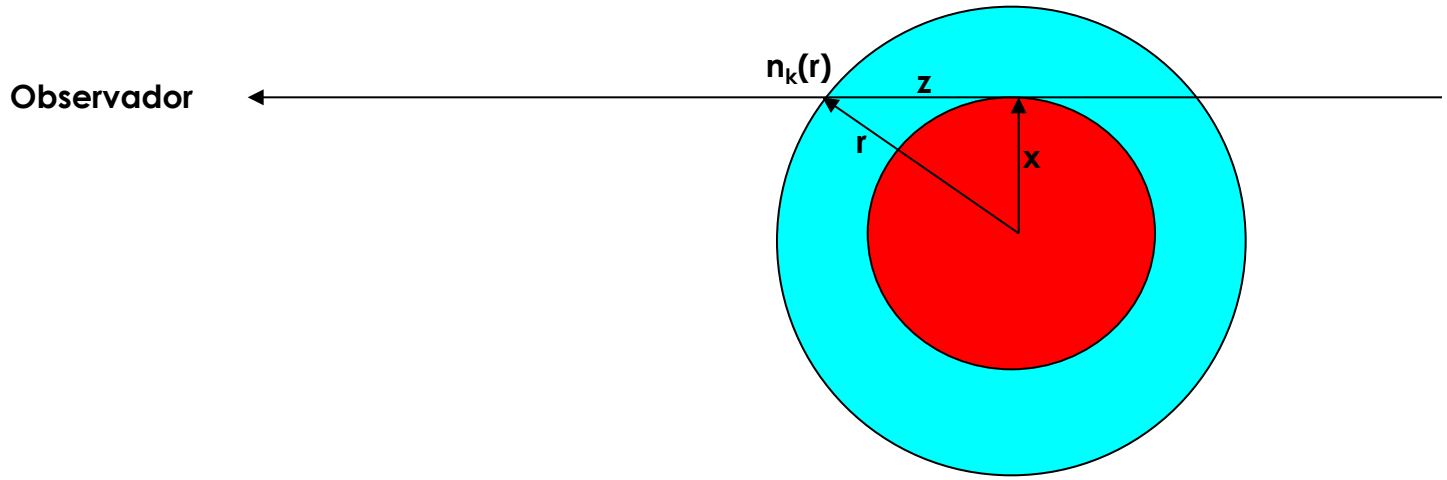
Dispersão de velocidades

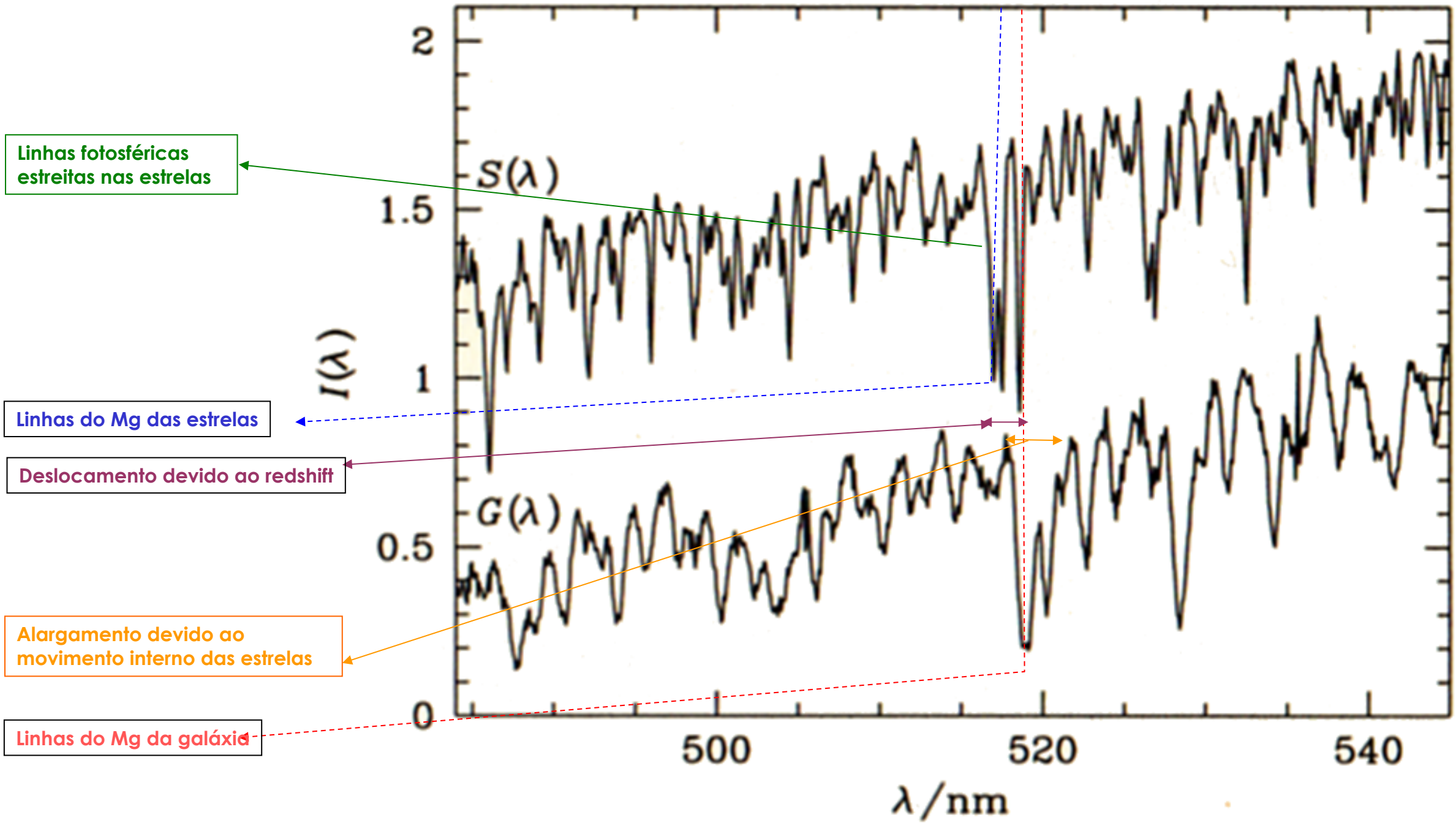
A estimativa da dispersão de velocidades em galáxias externas pode ser obtida através do espectro integrado destes objetos. Devido ao movimento interno (v_*) cada estrela emite um espectro $s(\lambda_0)$ que está deslocado do padrão de repouso devido ao efeito Doppler $\lambda=\lambda_0+\lambda_0 v_*/c$. Suponhamos que existam $f(v_*)dv_*$ objetos com uma dada velocidade entre v_* e v_*+dv_*. Neste caso a intensidade espectral observada em um certo comprimento de onda λ terá sido emitida aproximadamente em $\lambda/(1+v_*/c) \sim \lambda(1-v_*/c)$ e

$$g(\lambda)= \Sigma\, n_i(r) \int s_i(\lambda-\lambda v_*/c) f_i(v_*) dv_*$$

onde a somatória é realizada sobre o número, $n_i(r)$, de objetos de tipo i. Em primeira aproximação podemos considerar que a distribuição das velocidades internas seja aproximadamente gaussiana

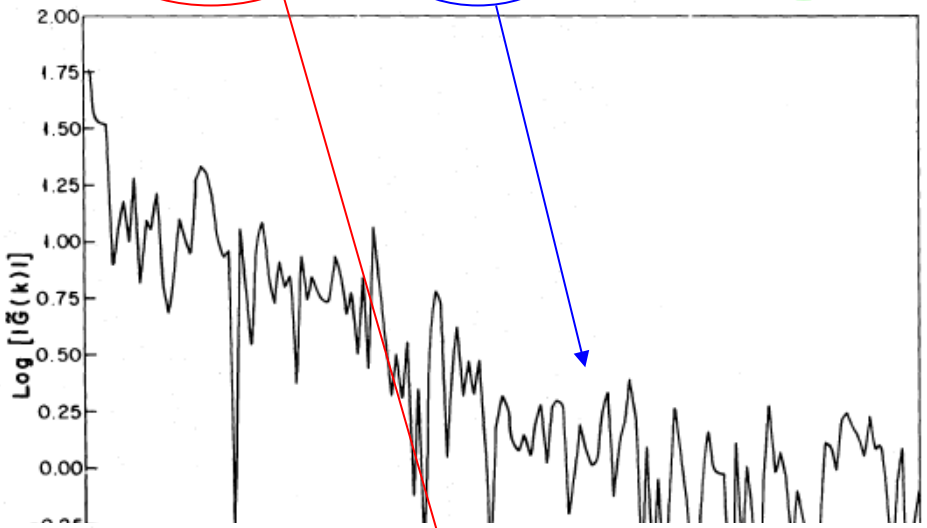
$$f_i(v_*)= 1/(2\pi\sigma_v^2)^{1/2} \exp\left(- (v_*-\langle v\rangle)^2/2\sigma^2\right)$$

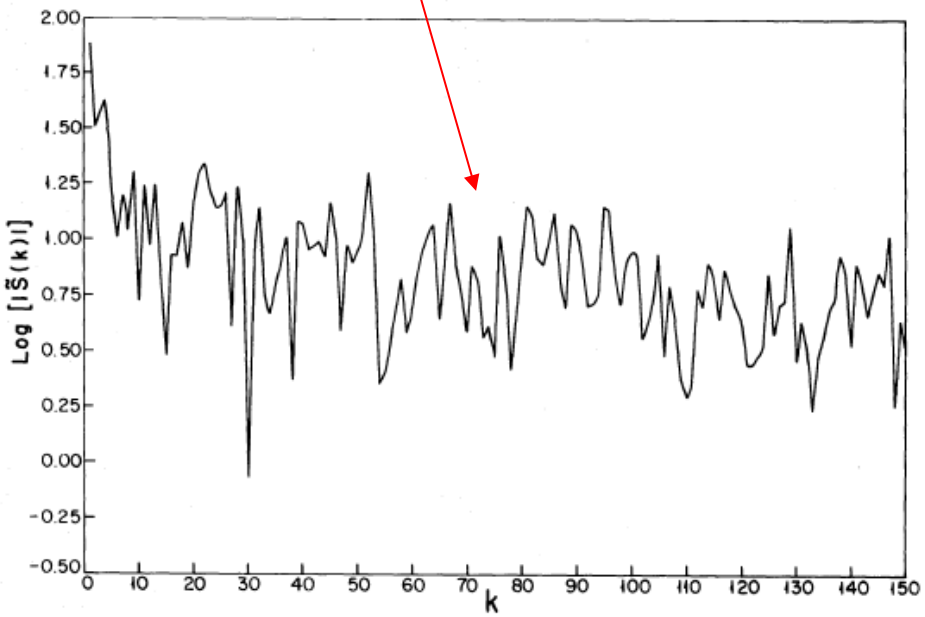


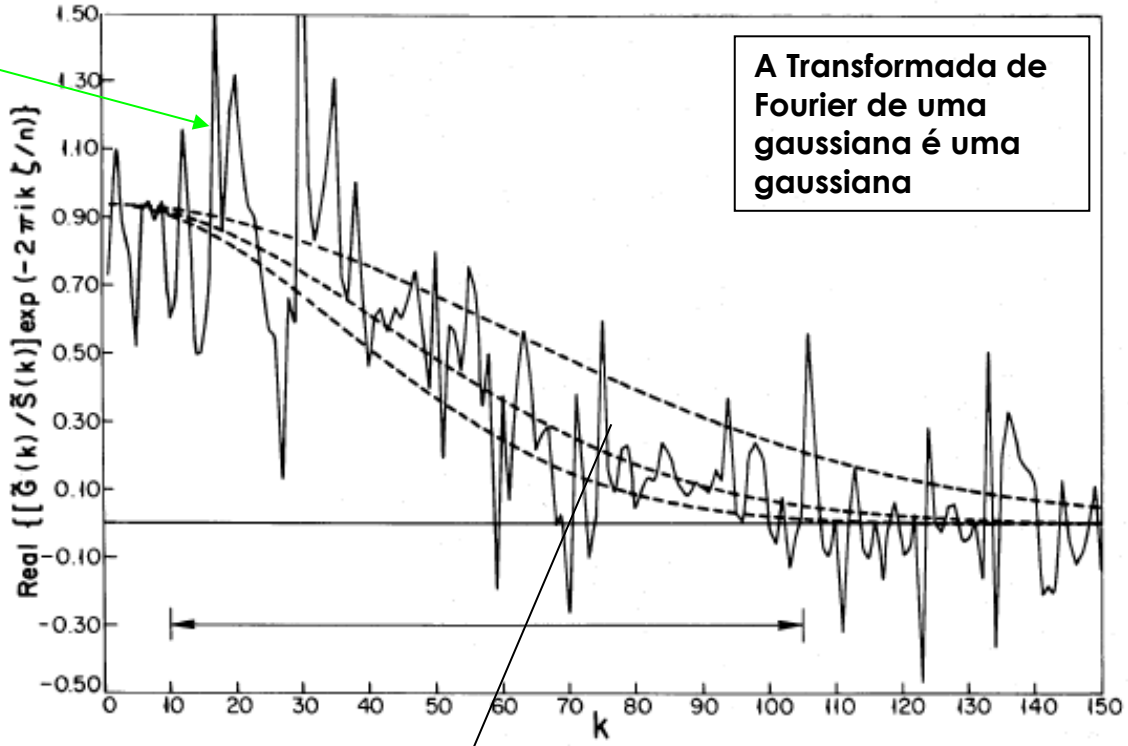

Linhas fotosféricas estreitas nas estrelas
Linhas do Mg das estrelas
Deslocamento devido ao redshift
Alargamento devido ao movimento interno das estrelas
Linhas do Mg da galáxia
S(λ)
G(λ)
I(λ)
2
1.5
1
0.5
0
500
520
540
λ/nm

O produto da transformada de Fourier

$$G(k)=S(k)\ X\ F(k)$$



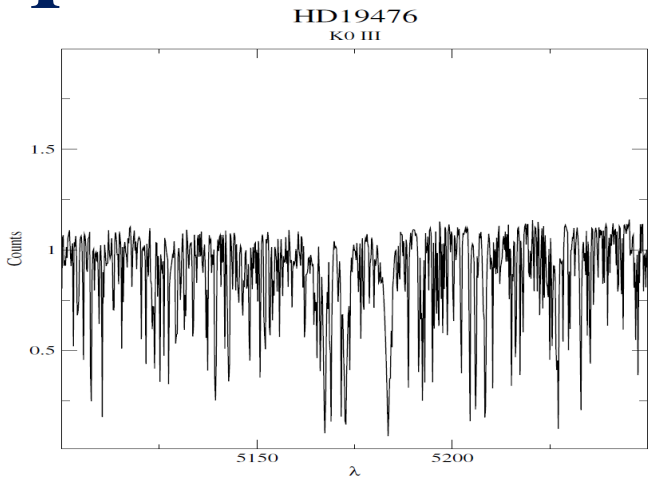


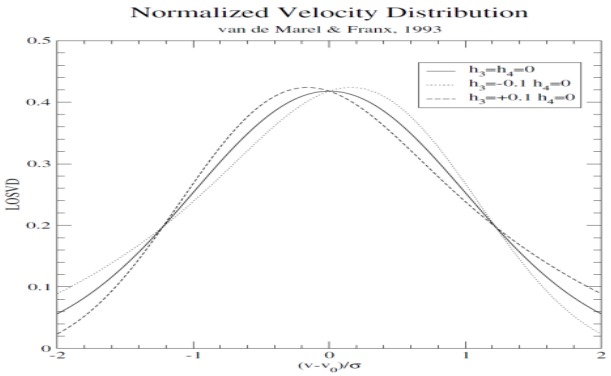


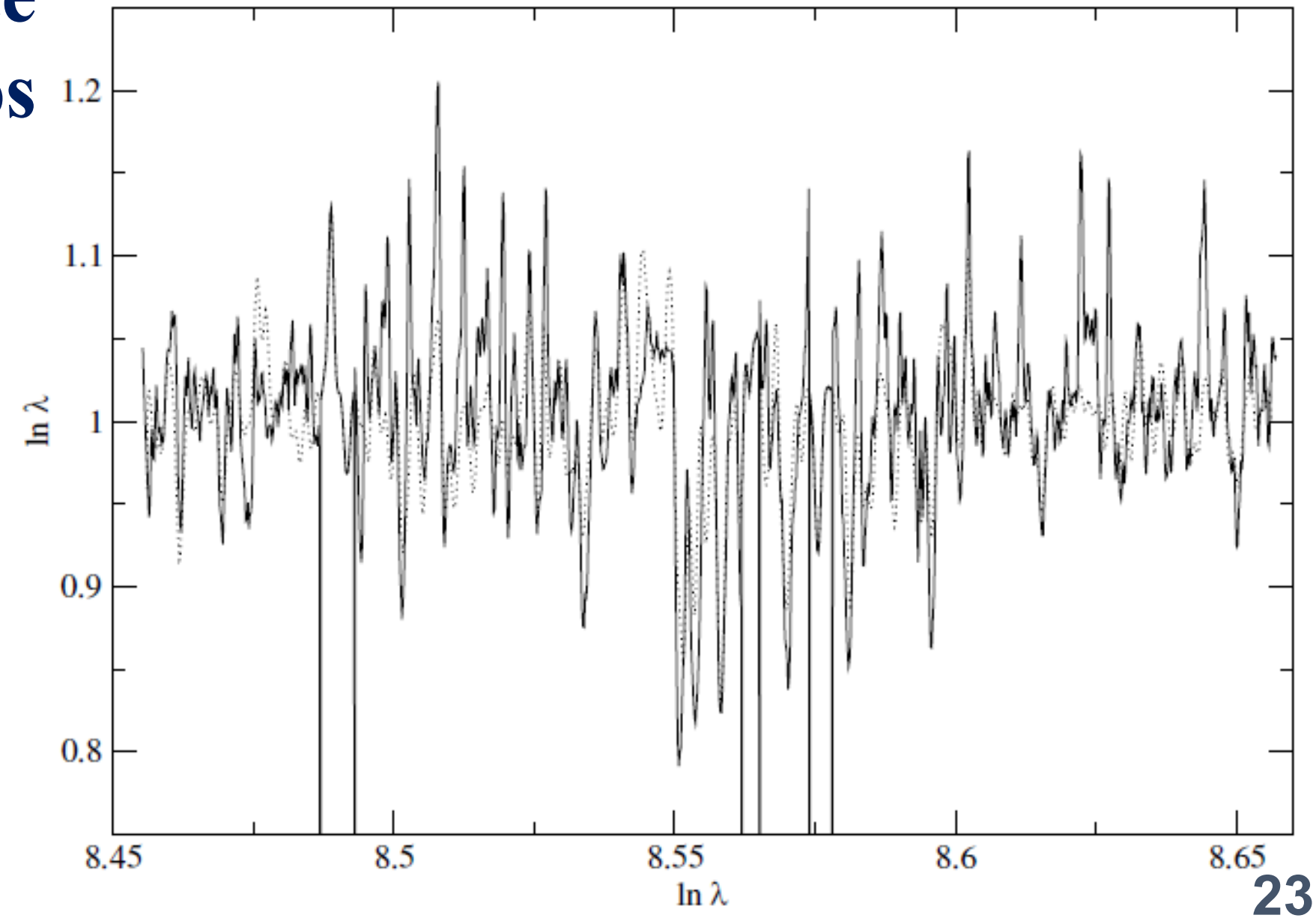
indica que a transformada de F(v) é

$$F(k;\sigma_v,\langle v\rangle)=G(k)/S(k)$$

Resolvendo a equação G(k)=S(k) X F(k;σv,<v>) usando um ajuste de mínimos quadrados!



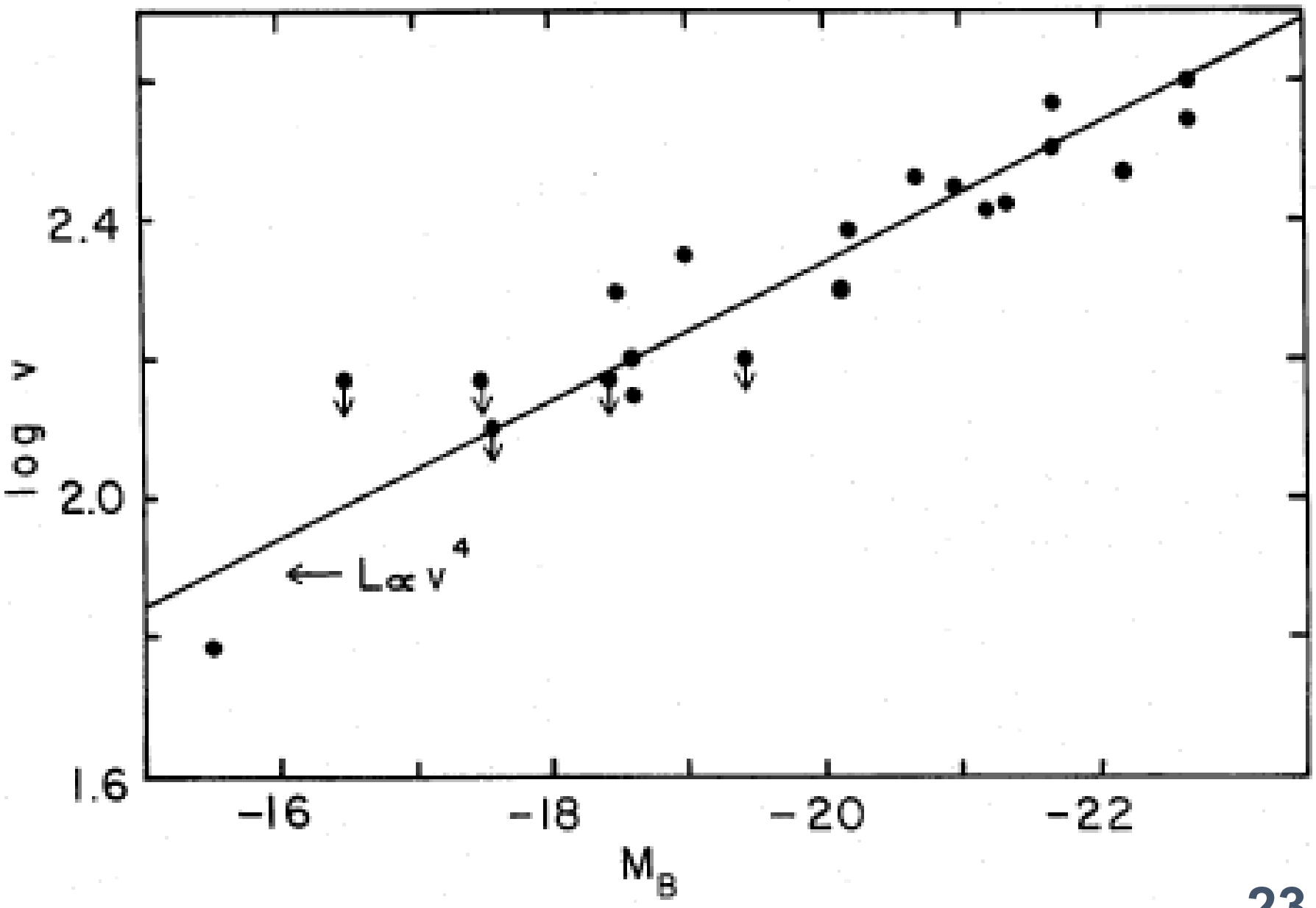




Em 1976 Faber & Jackson \perceberam a existência de uma estreita relação entre a luminosidade absoluta e a dispersão de velocidades

$L = k\,\sigma^{a}$

Onde a~4. Esta relação implica em que as galáxias elípticas mais luminosas também apresentam maior massa e portanto maior profundidade do poço de potencial gravitacional medido pelo valor de σ. O potencial gravitacional de uma galáxia elíptica pode ser expresso por $U=-\checkmark GM^2/R \sim -3/5\ GM^2/R$. A energia cinética, na ausência de rotação, é $K=1/2\ MV^2=3/2M\sigma^2$. Pelo teorema do Virial temos $2K+U=0$ ou $\sigma^2=1/5\ GM/R=\ 1/5\ f\ GL/R$, sendo f a razão massa-luminosidade. Como o brilho superficial das elípticas é aproximadamente constante $L \sim Cte\ R^2$ e resulta que $L \sim cte\ \sigma^4$.

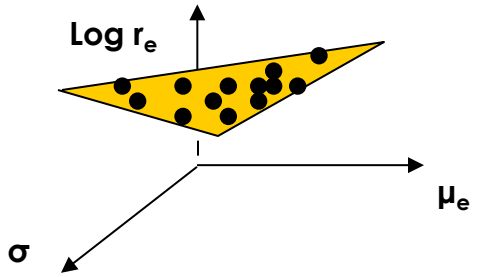


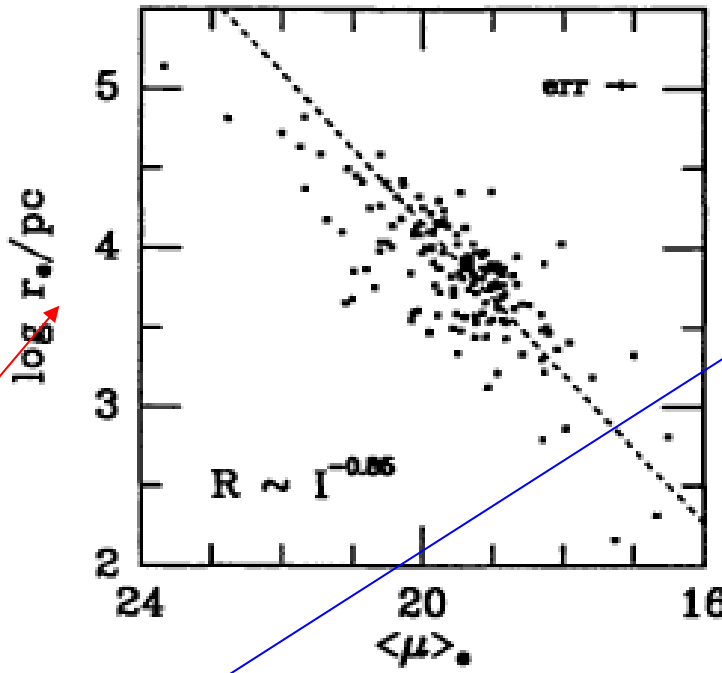
O Plano Fundamental

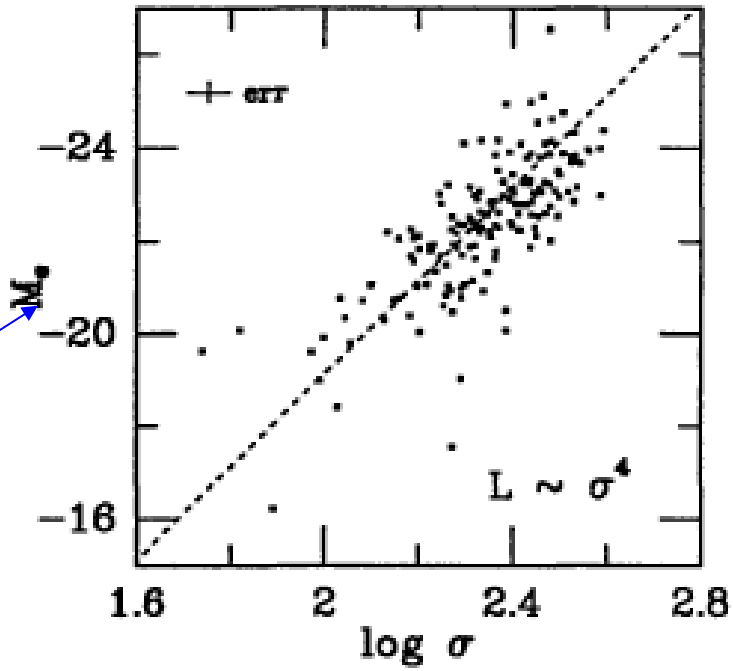
Nos anos de 1980 percebeu-se que os desvios na relação de Faber-Jackson eram superiores aos erros observacionais previstos tanto em luminosidade como na dispersão de velocidade. Ficou claro então que a necessidade de adotar uma relação mais compatível com os erros instrumentais conhecida como o Plano Fundamental das galáxias elípticas.

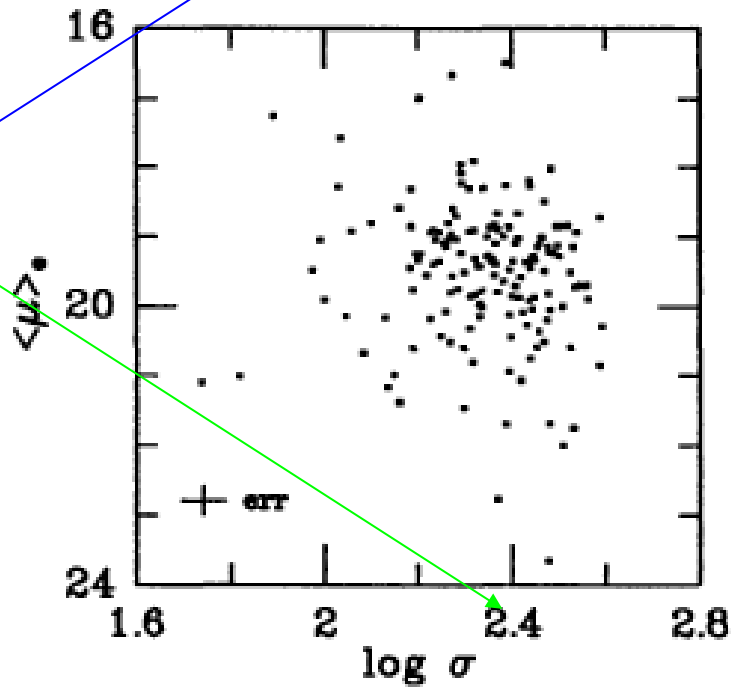
Log R =Cte +1.4logσ -0,9 Log I

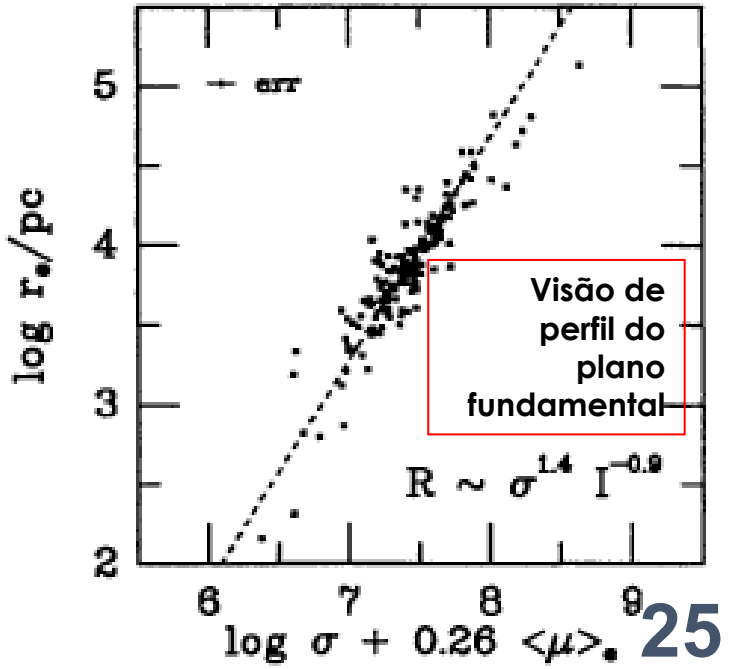
sendo R uma escala de dimensão radial, por exemplo o raio efetivo, σ a dispersão de velocidade e I uma escala de brilho como o brilho superficial efetivo.



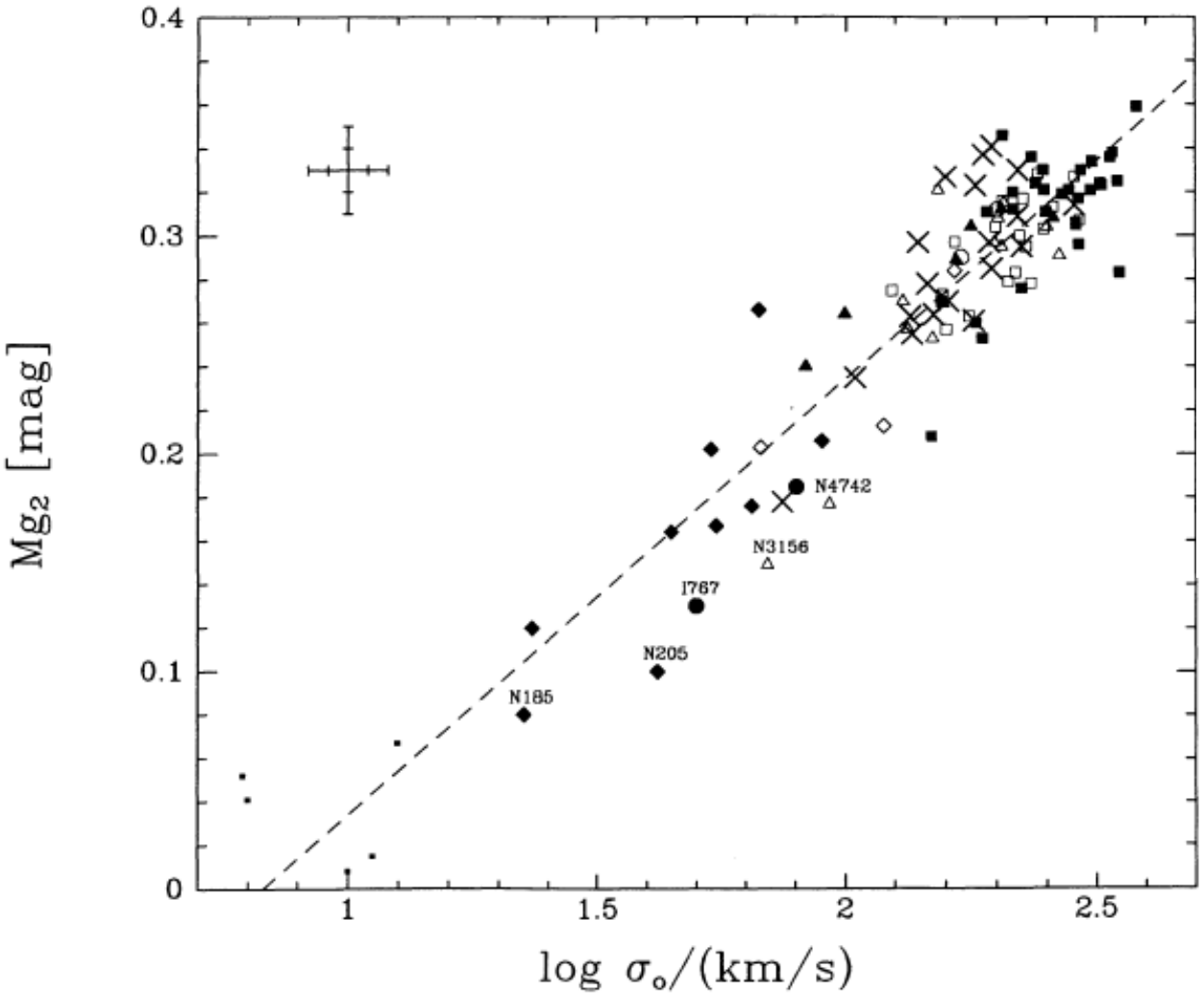


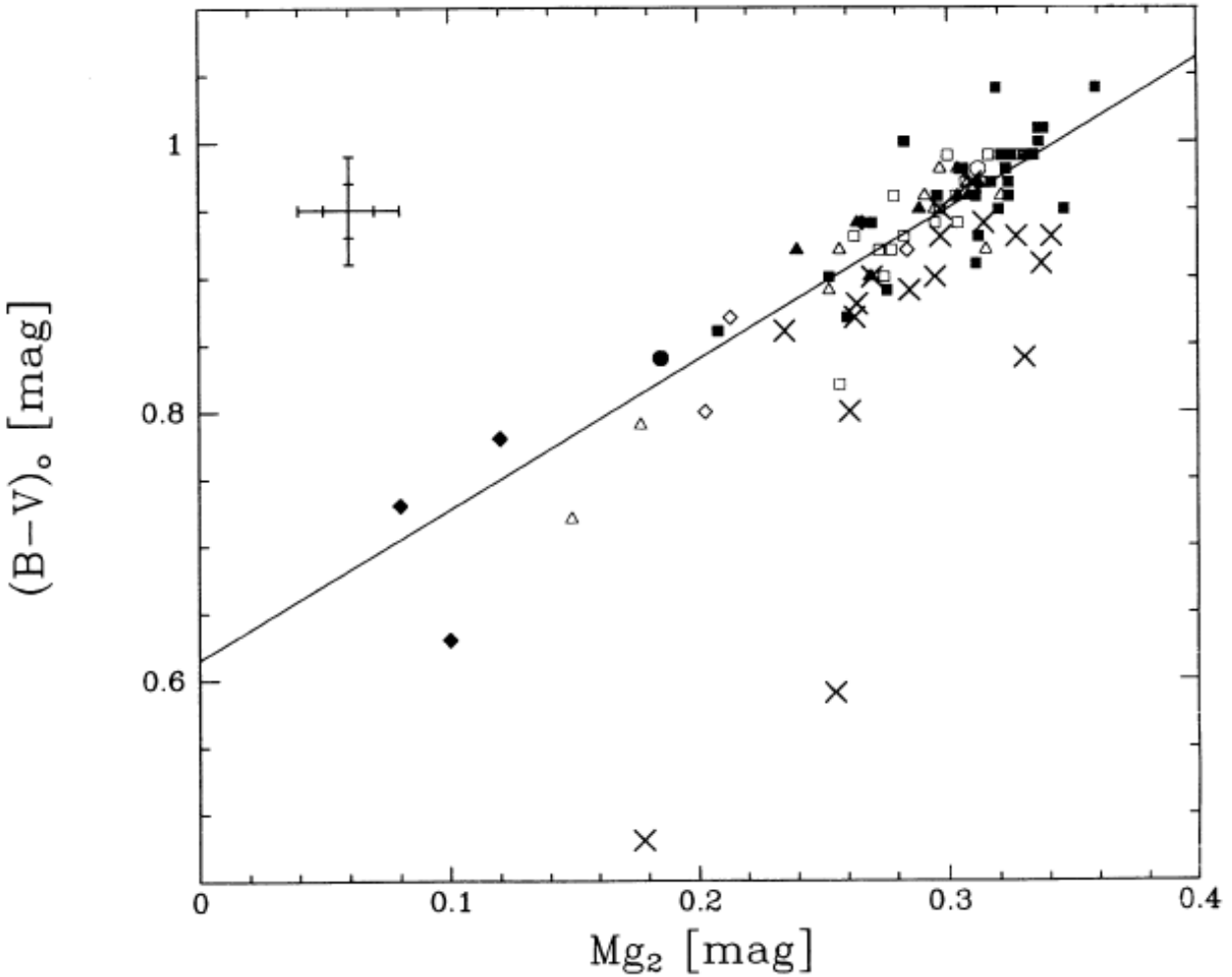






As galáxias elípticas obedecem ainda a uma relação muito interessante, provavelmente também relacionada com o seu processo de evolução, já que objetos com maior dispersão de velocidade apresentam uma maior quantidade de metais conforme indica o índice Mg2.





A interpretação é que as elípticas mais luminosas, e portanto mais massivas, apresentam o poço de potencial maior (maior σ) e conseguem reter uma maior quantidade de metais. Os ventos gerados por supernovas não conseguem expelir o material enriquecido ao contrário do que ocorre nas elípticas menos luminosas.

FIM