



Astrofísica Galáctica e Extragaláctica

AGA 299 – IAG/USP

Ronaldo E. de Souza
redsouza48@usp.br
Julho, 2022

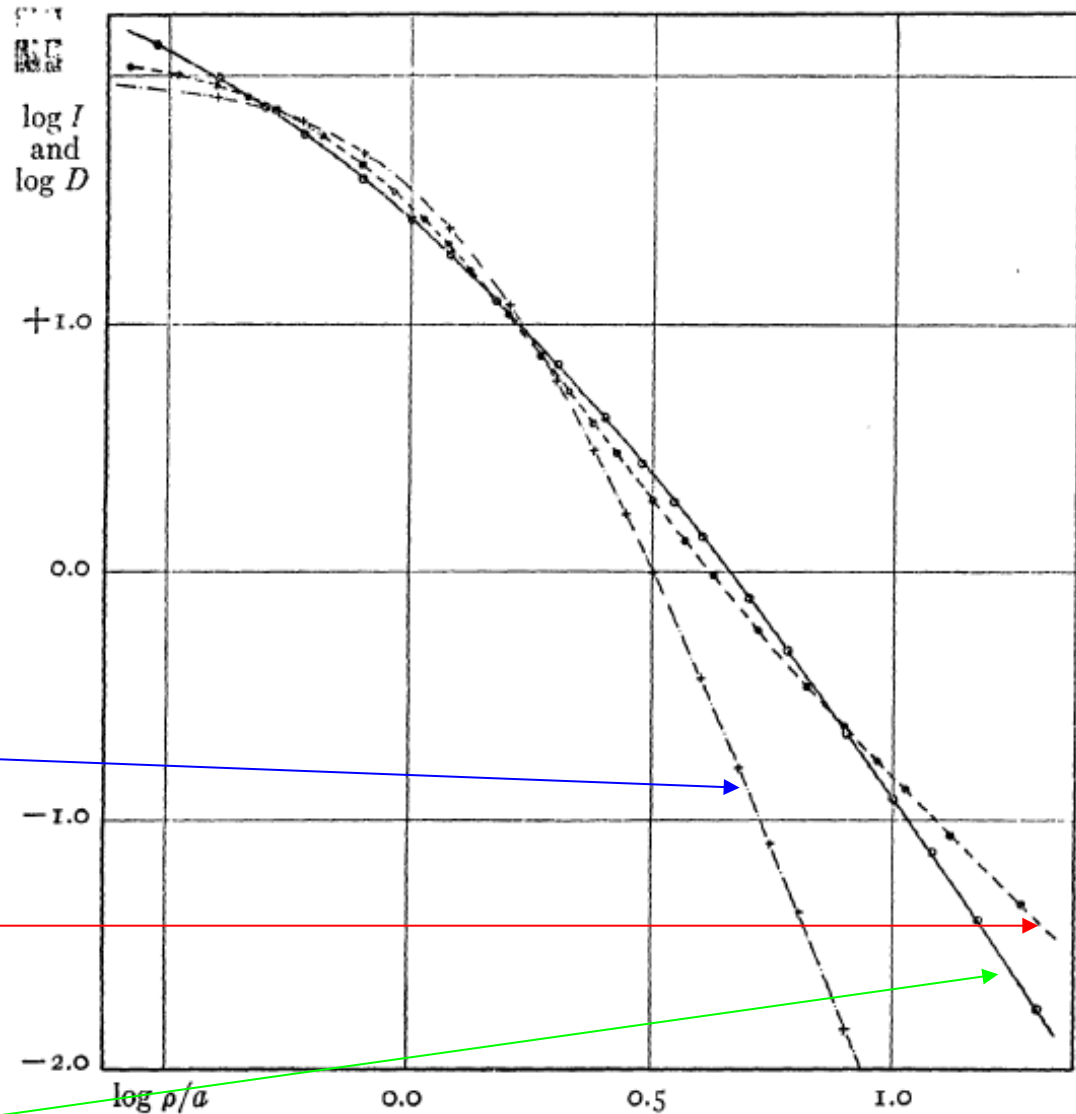
5 Galáxias Elípticas

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.



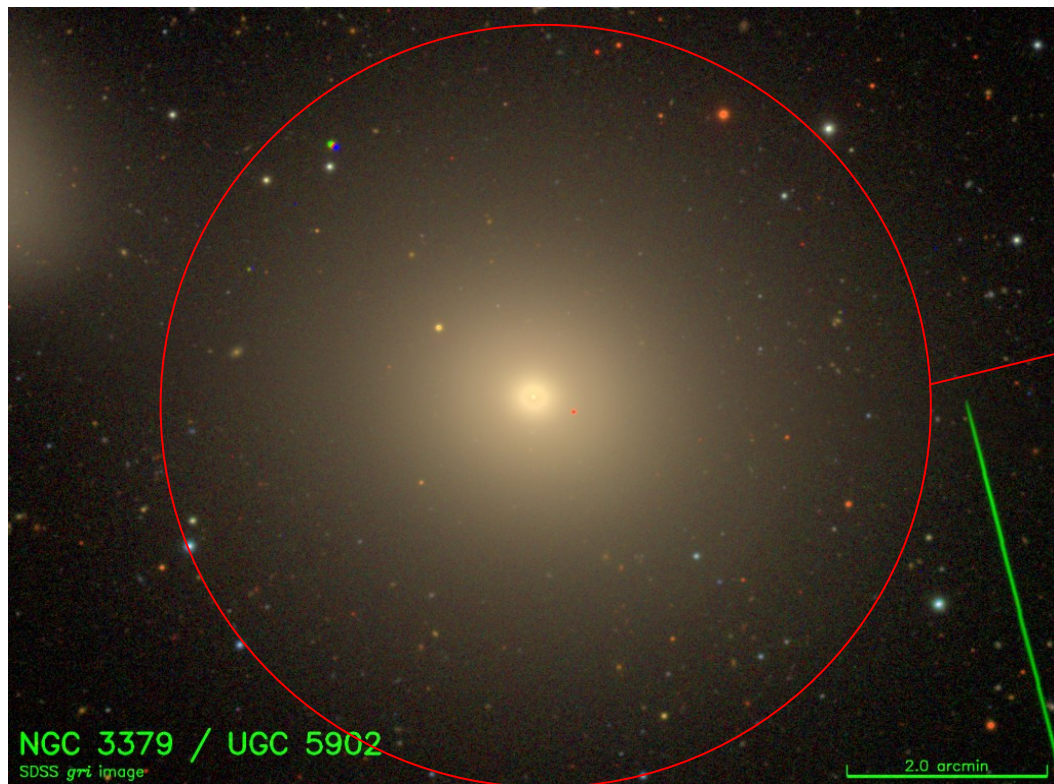
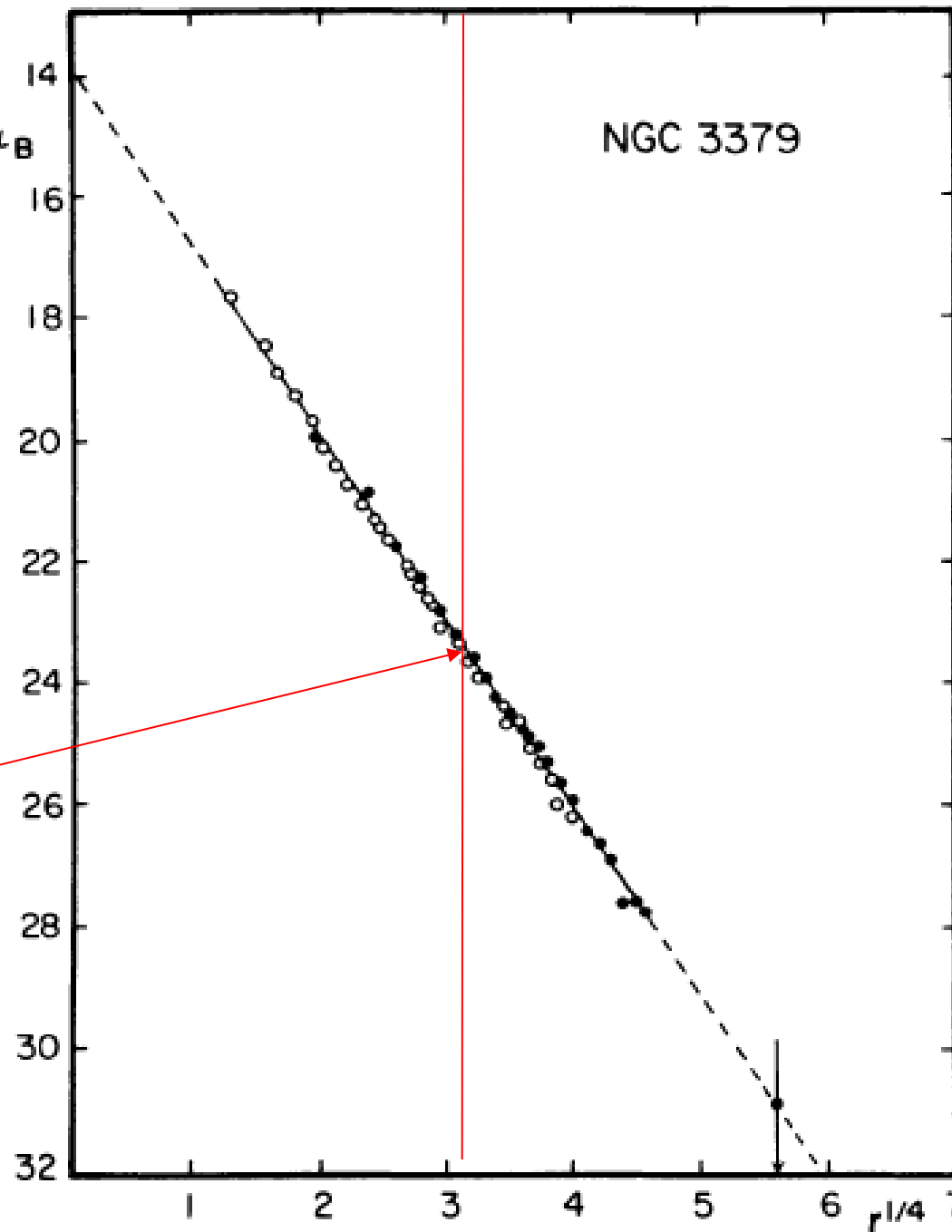
A estrutura das galáxias elípticas se assemelha à distribuição de brilho dos aglomerados globulares e ao brilho esperado para um esfera isotérmica.

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



Distribuição de Brilho

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



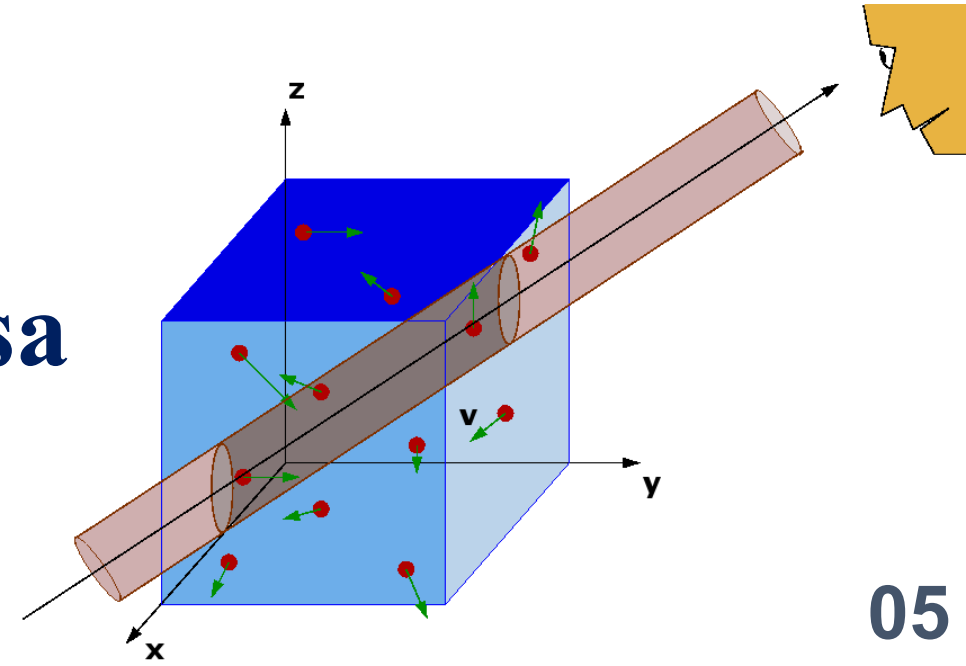
James Jeans adaptou a função distribuição da mecânica dos fluidos.

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

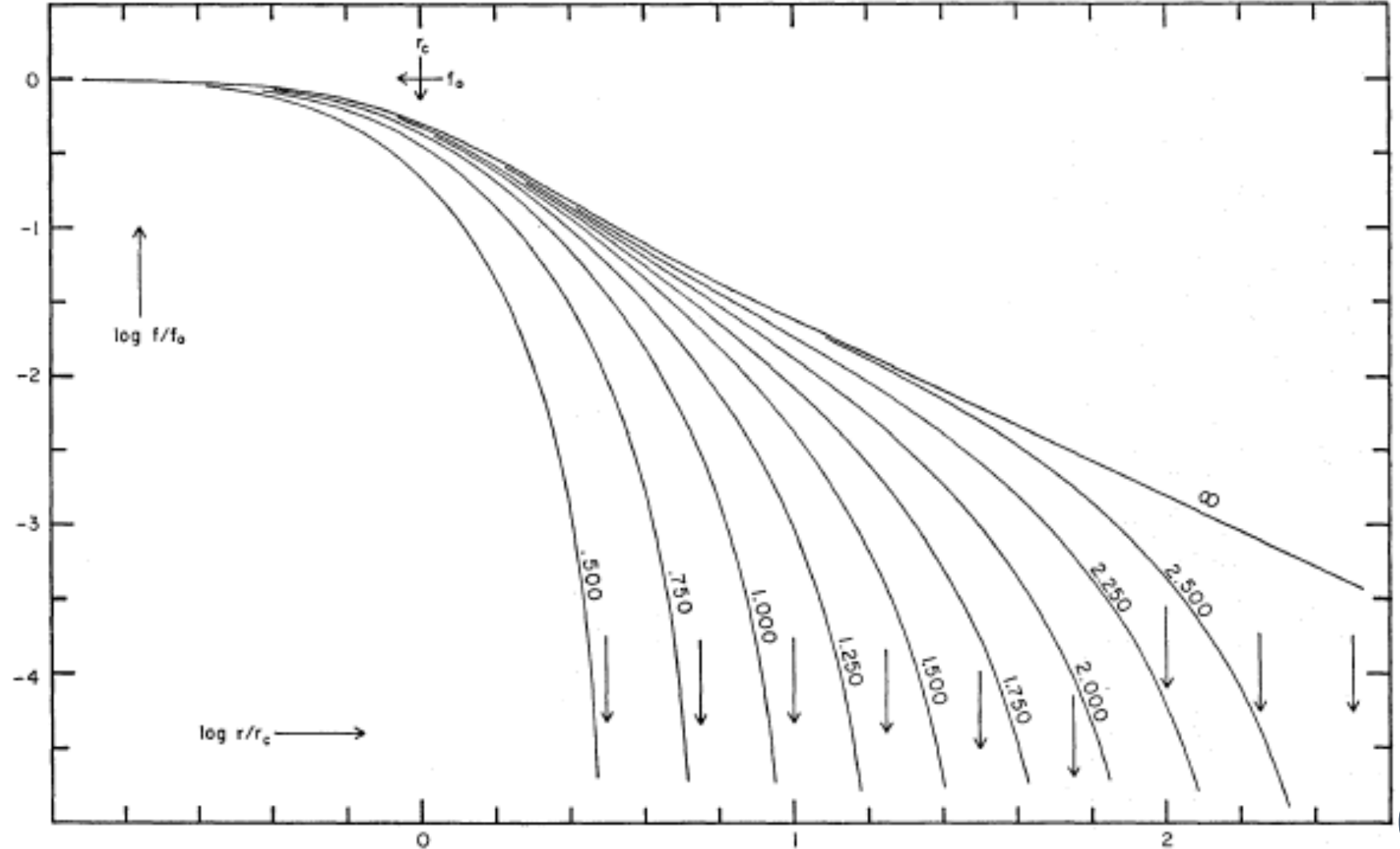
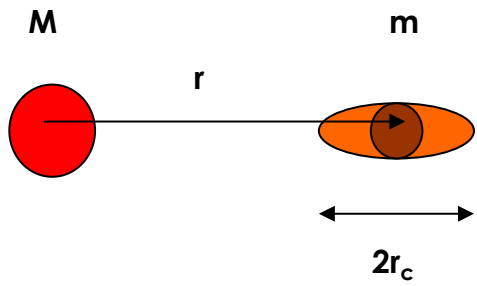
com uma distribuição Maxwelliana. O brilho superficial $\Sigma(r, \theta)$ é a integral da densidade volumétrica ponderada pela luminosidade

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

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. Conseqüentemente 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

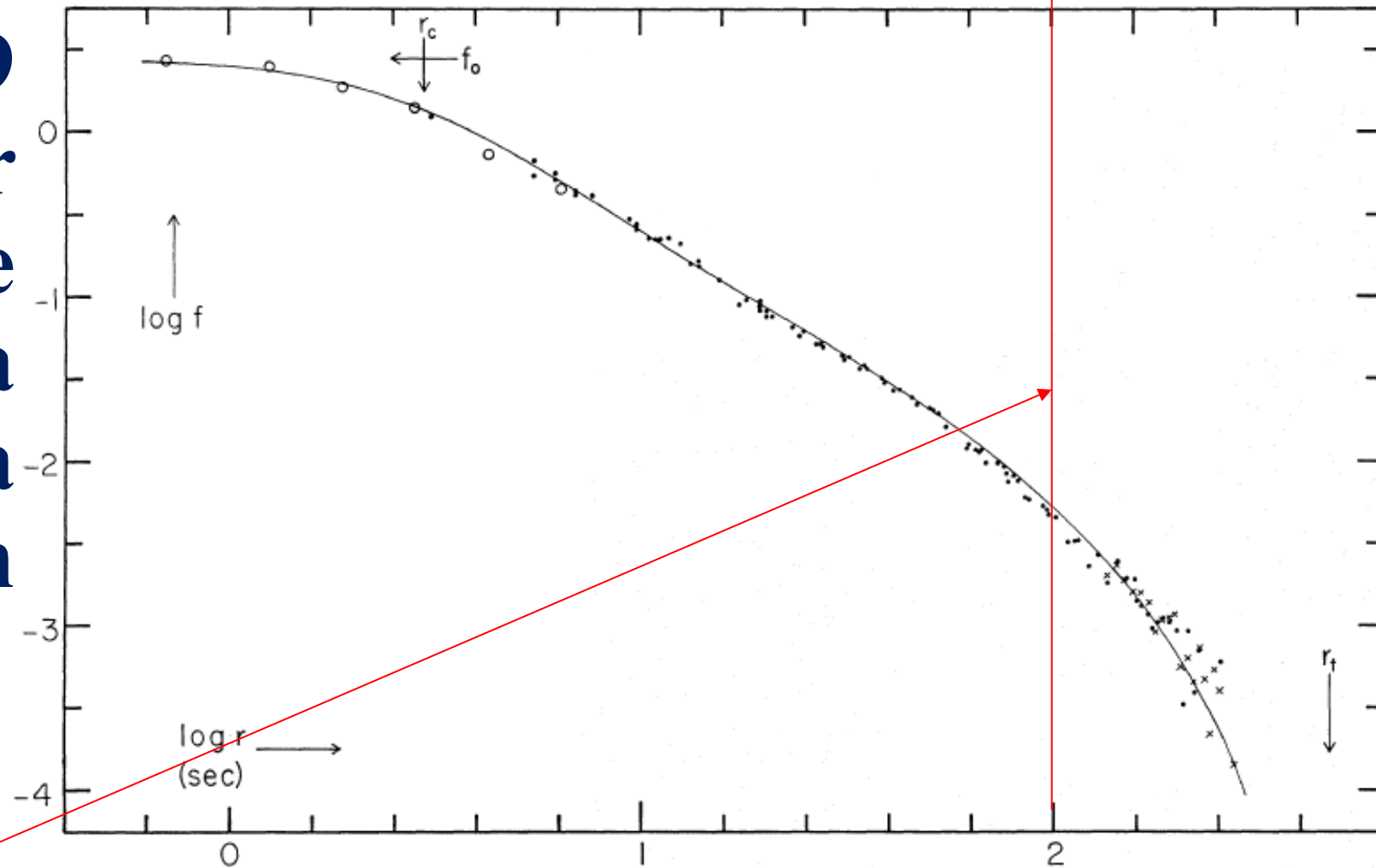
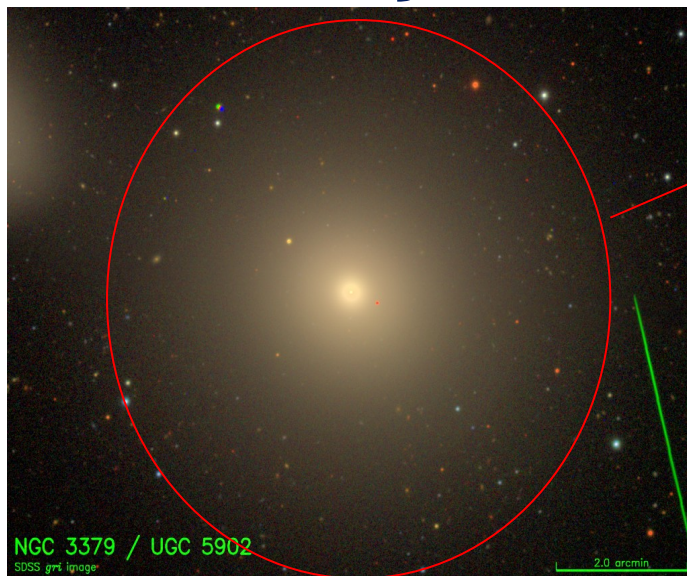
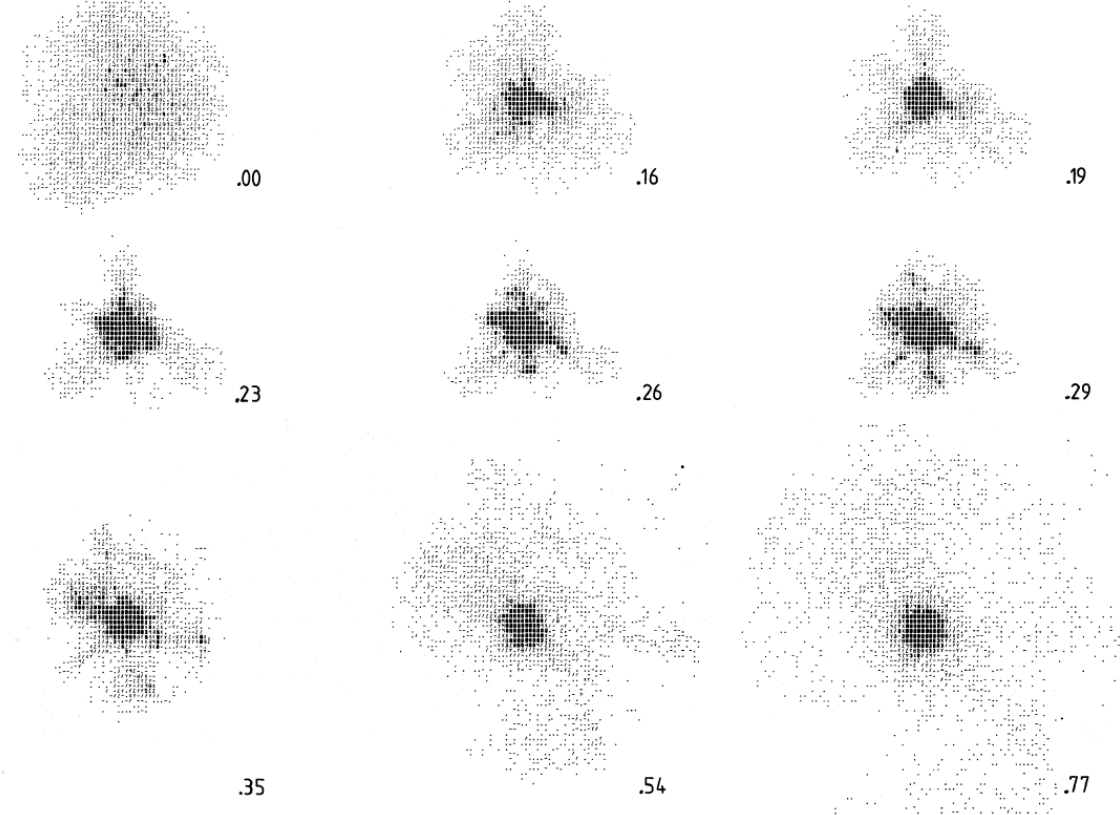
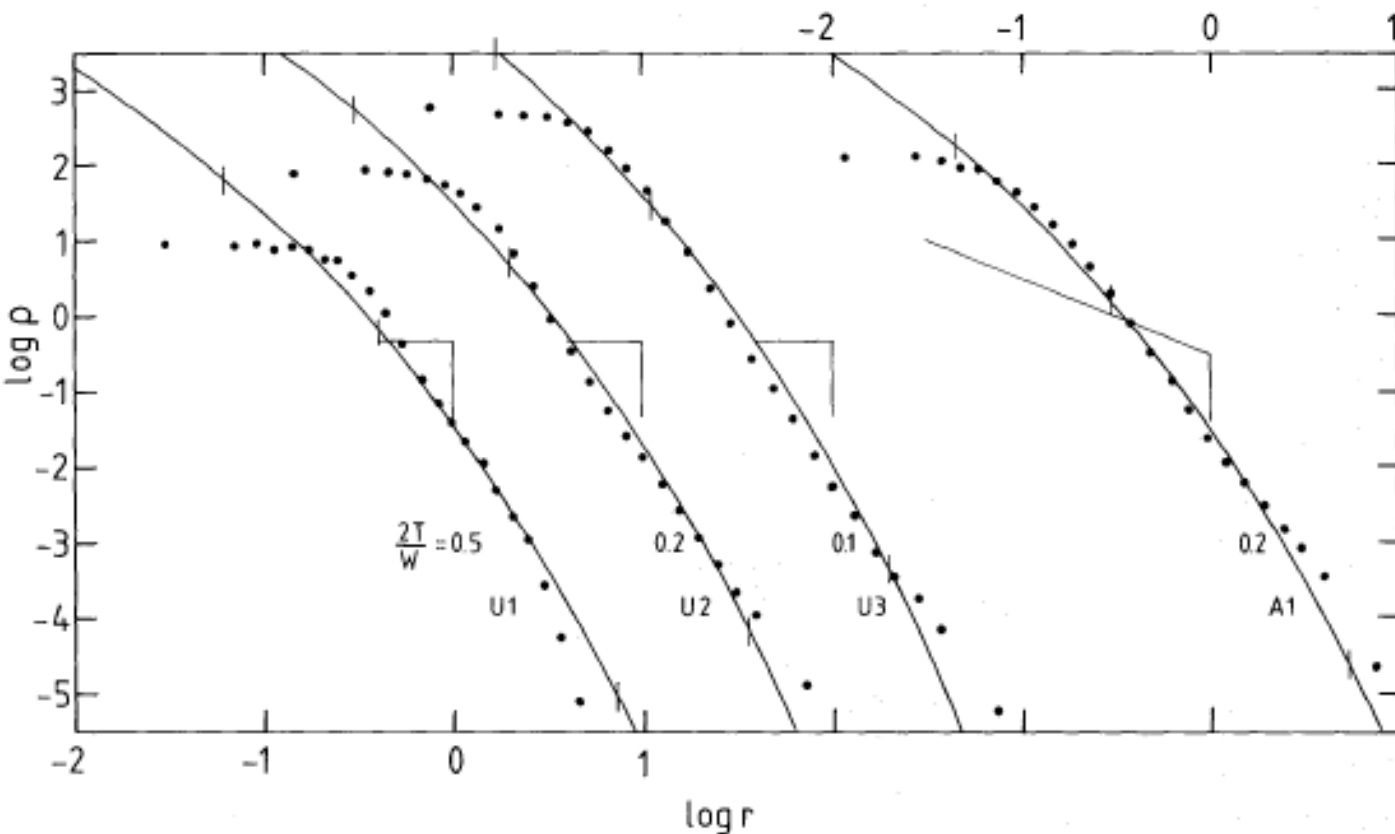


FIG. 4. Comparison of surface brightnesses in NGC 3379 with theoretical curve for $\log(r_t/r_c) = 2.20$. Ordinate: logarithm of yellow surface brightness (unit is $16^m91/\text{sq sec}$); abscissa: logarithm of radius in seconds. Open circles are values calculated from concentric circular measurements, 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

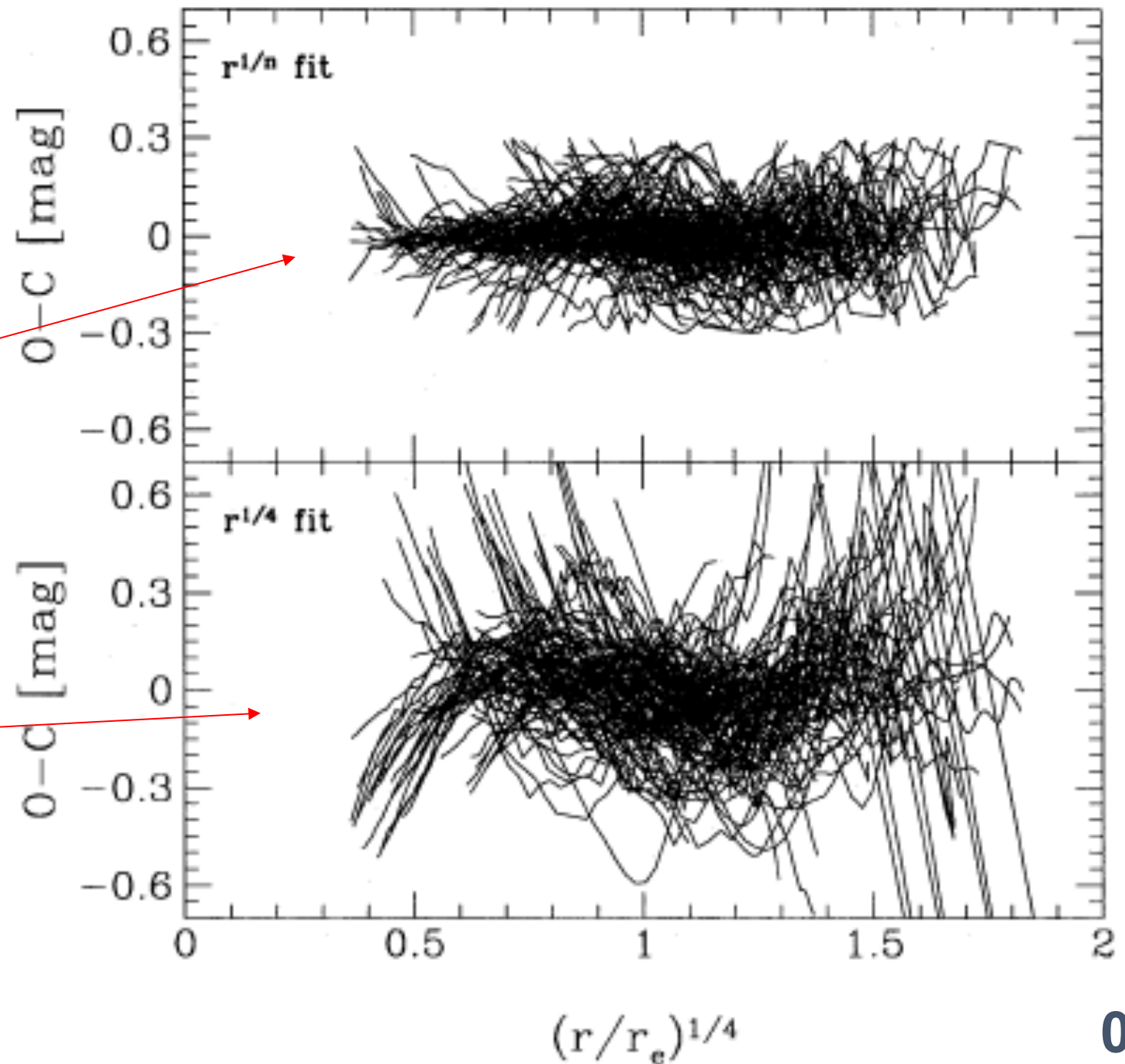


das condições iniciais existentes na época do colapso que formou o objeto!

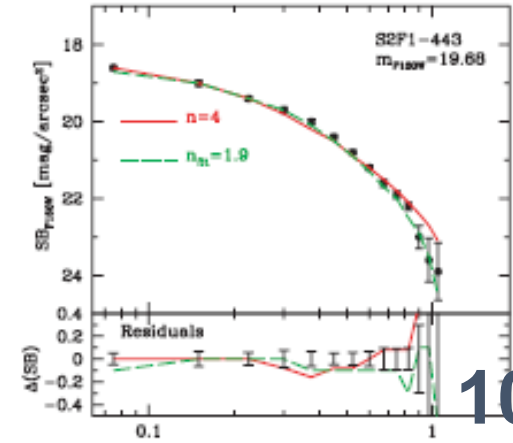
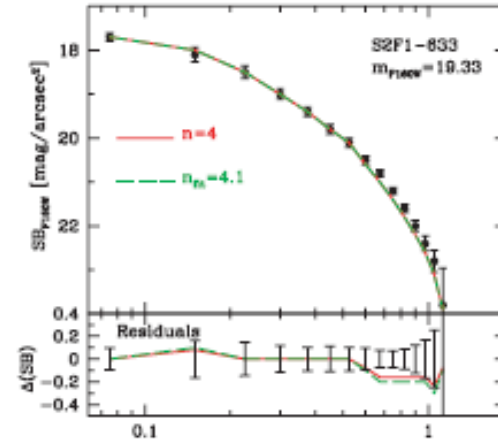
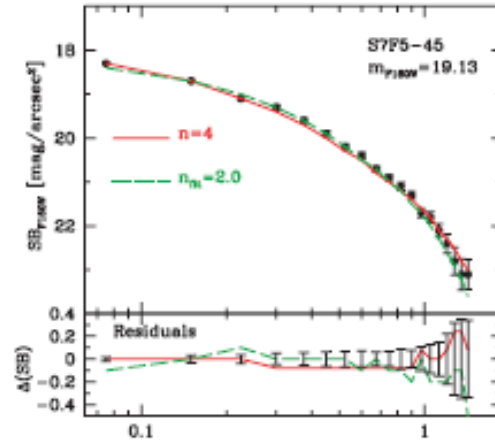
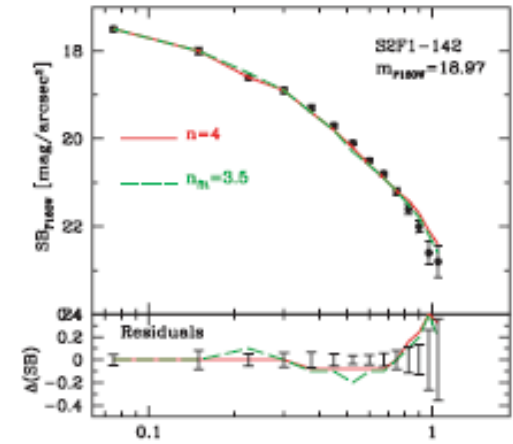
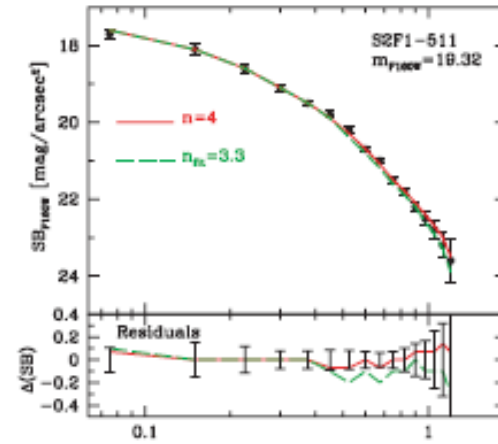
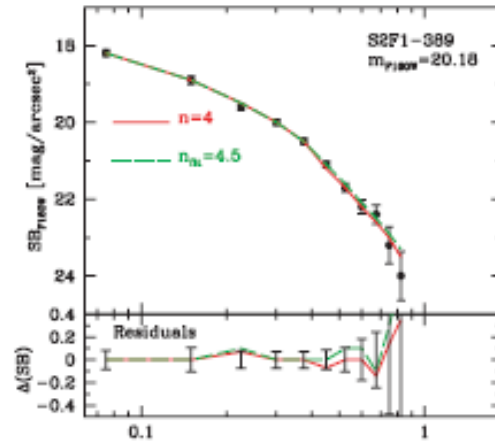
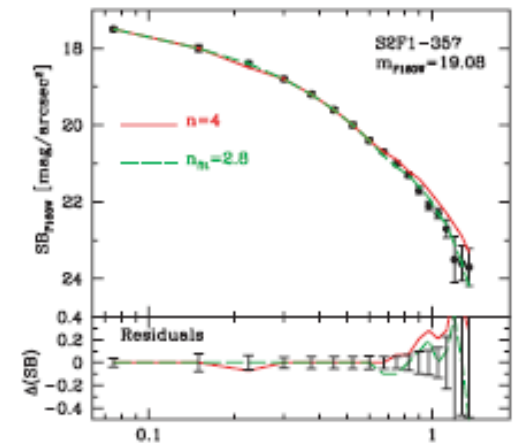
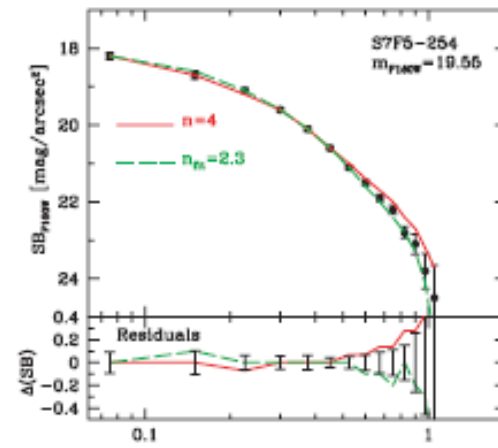
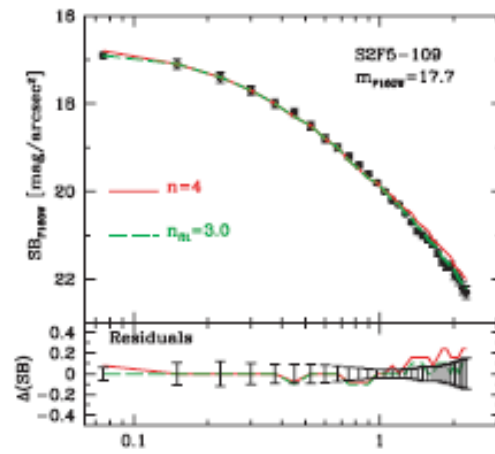
O perfil de Sérsic como uma descrição alternativa

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

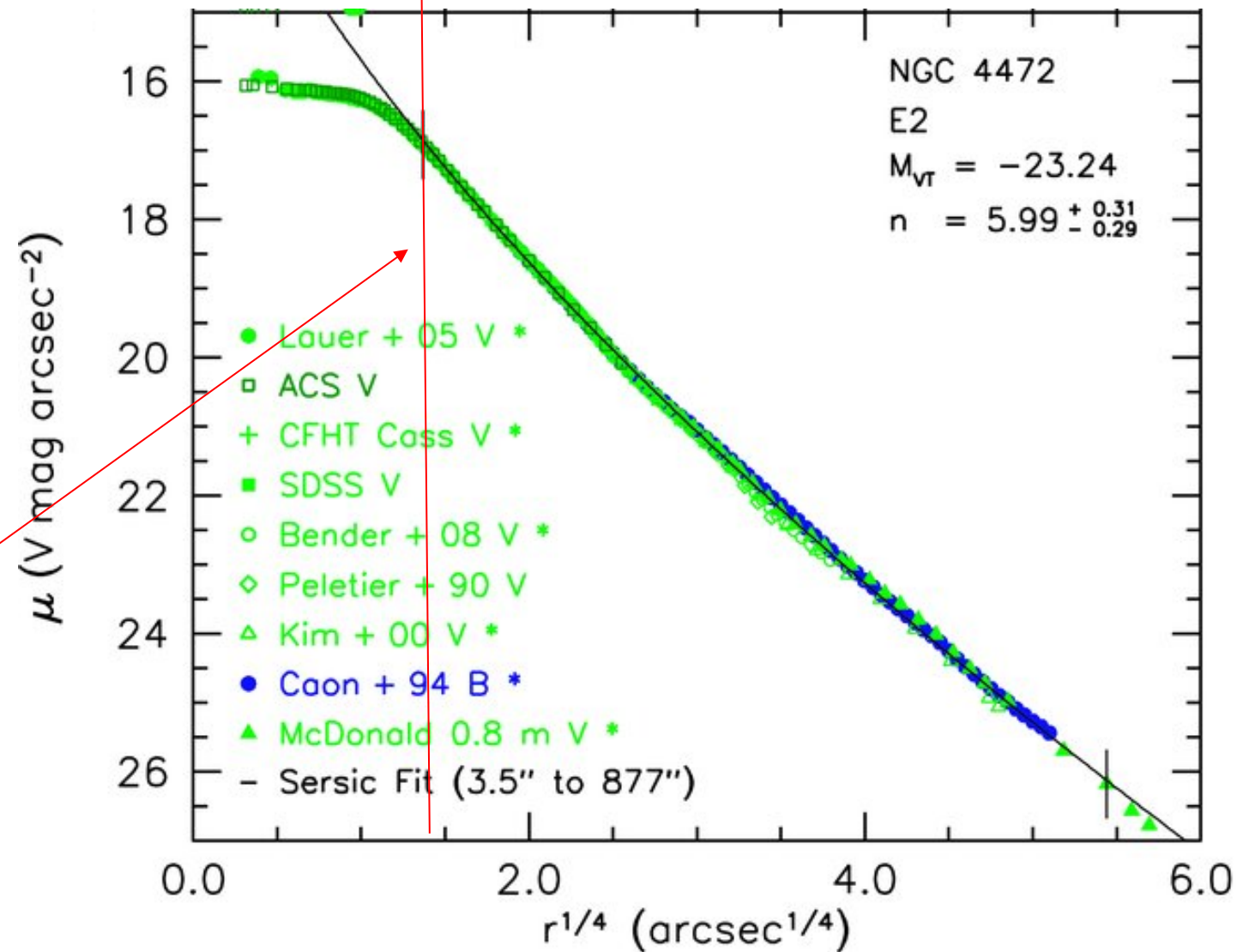
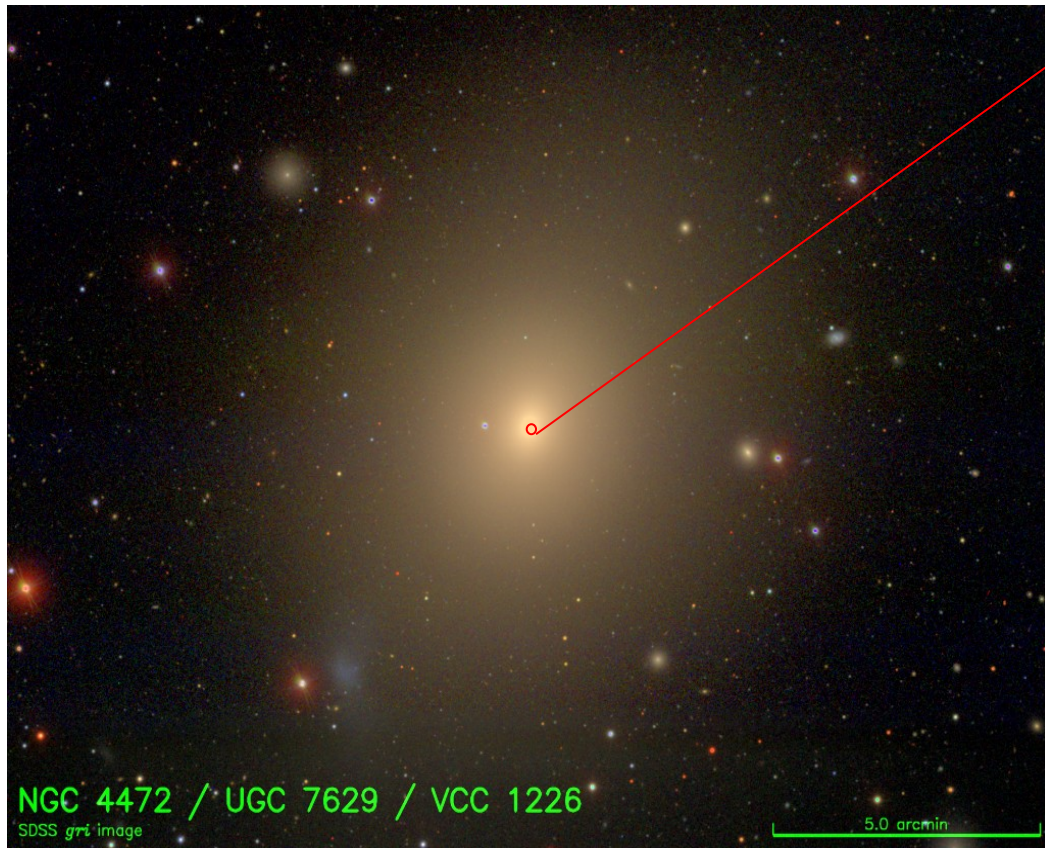
à lei $r^{1/4}$ de de Vaucouleurs.



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

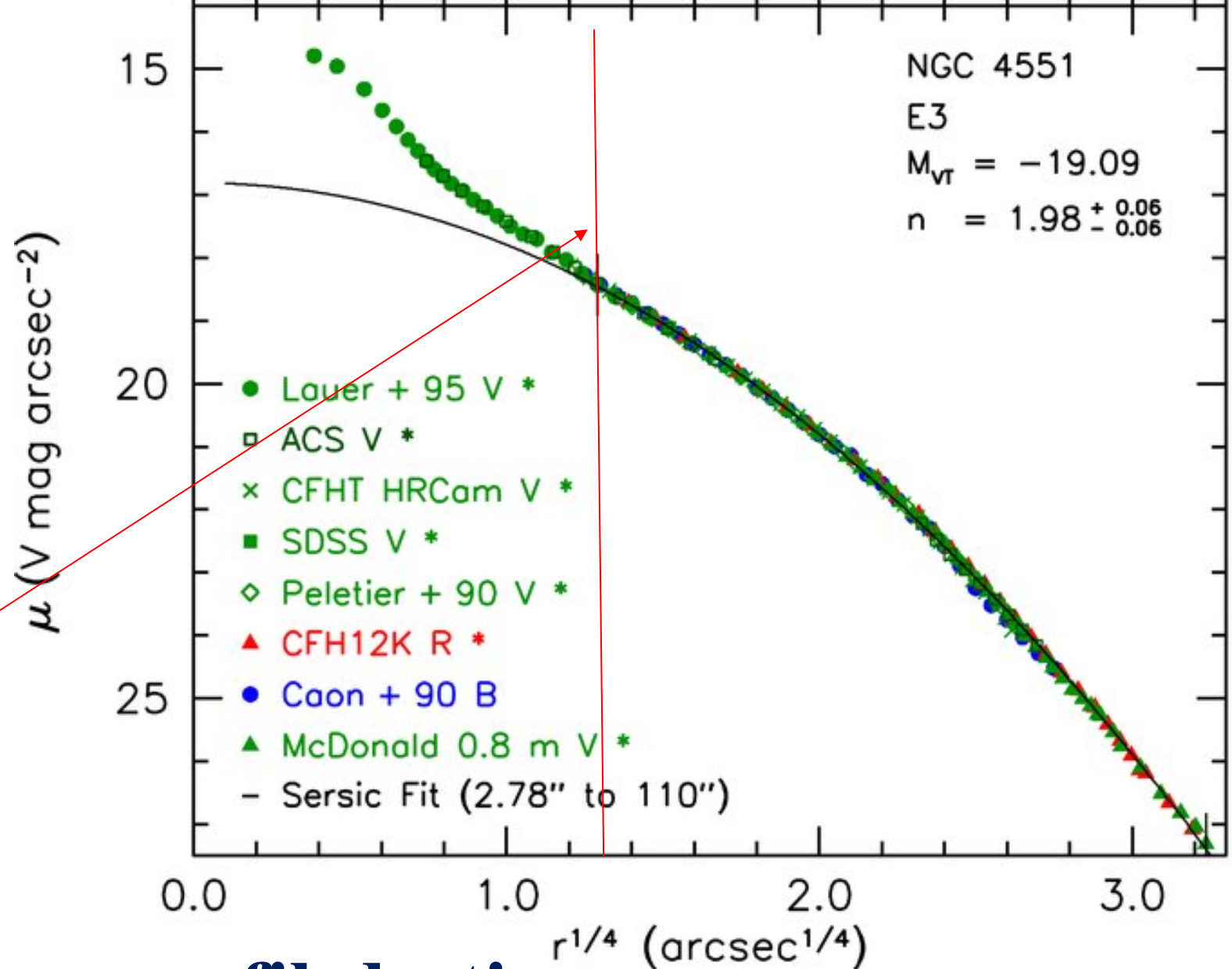
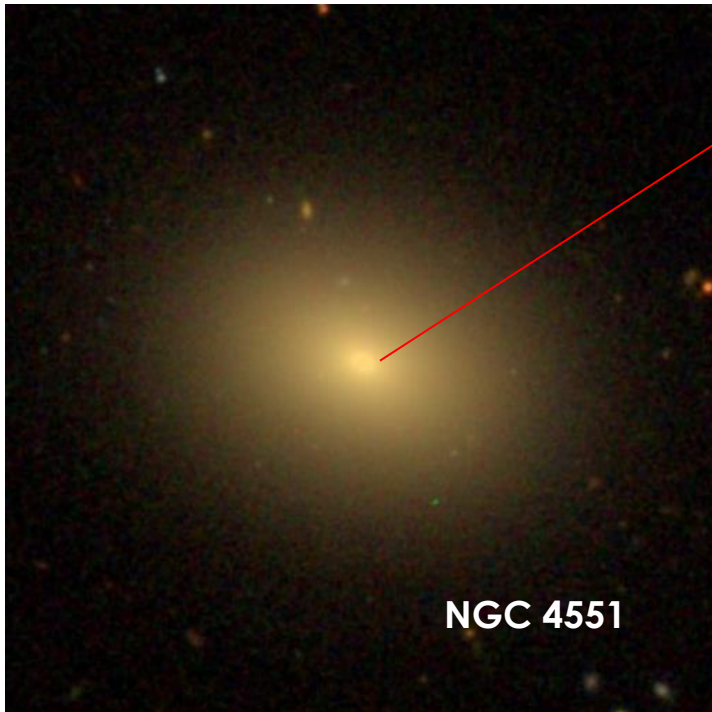


Alguns objetos mais brilhantes que ($M_B < -21,66$) seguem a lei de Sérsic mas tendem



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

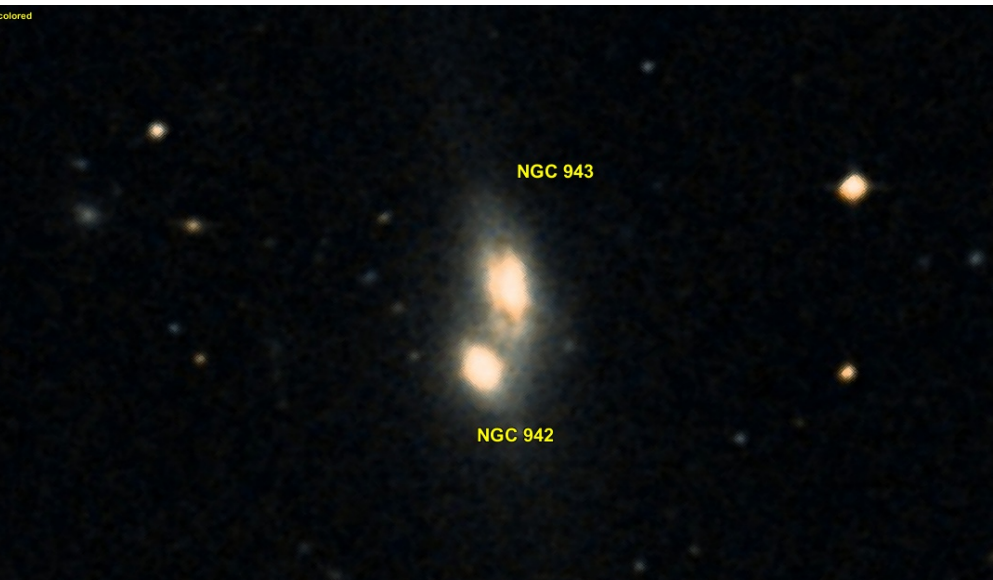
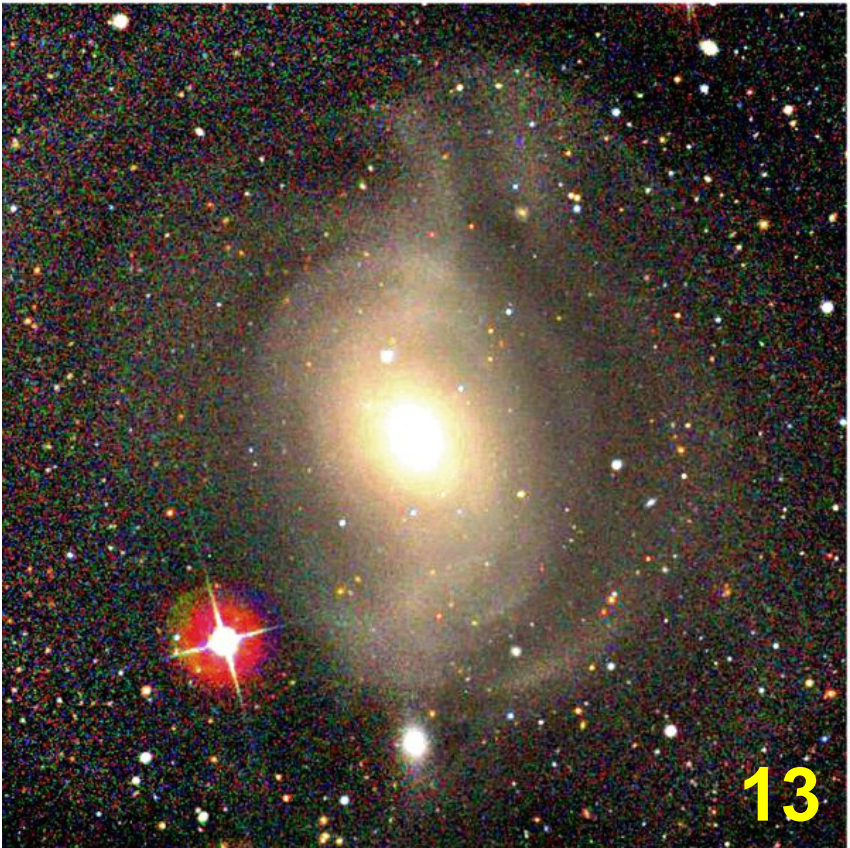
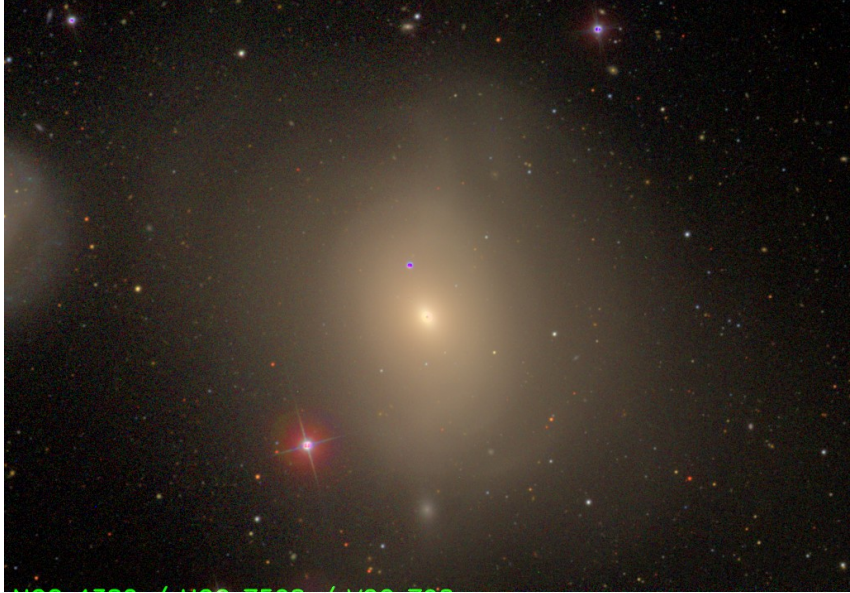


um perfil do tipo cuspy, com um excesso de brilho!



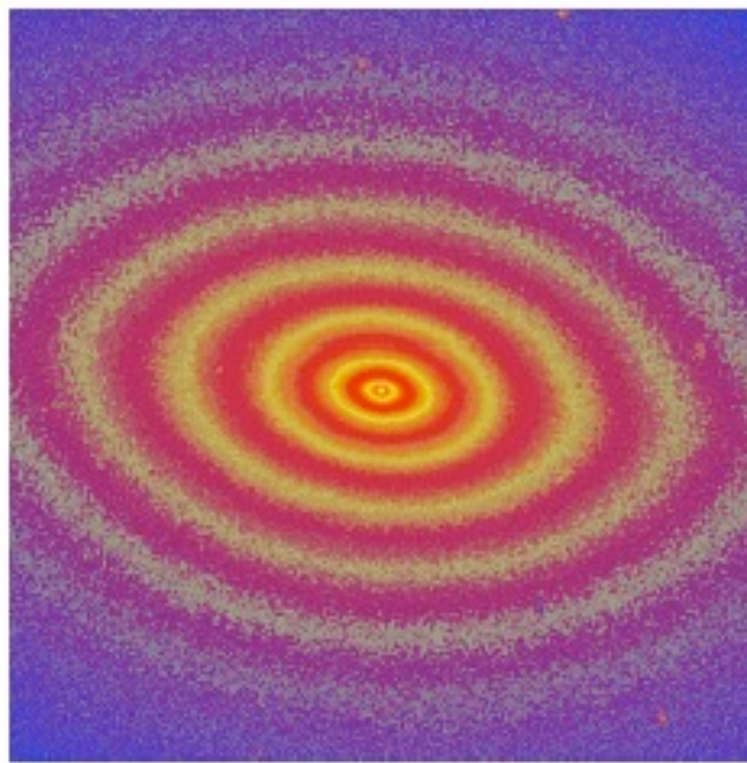
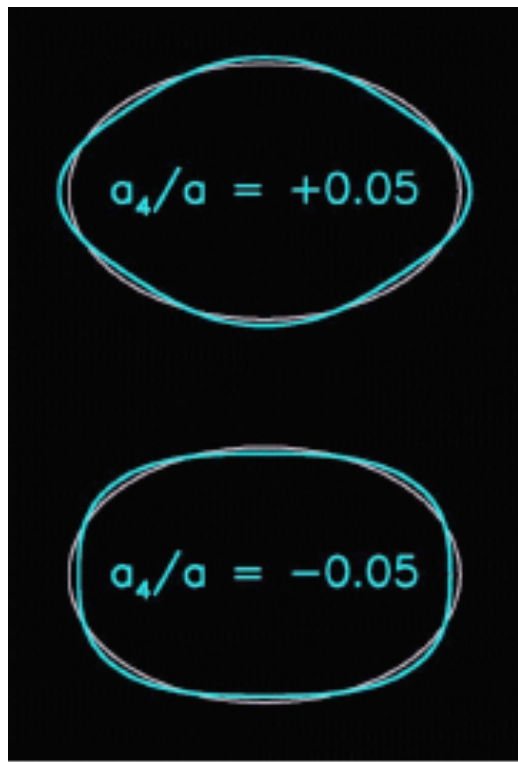
NGC 6166 VLA

Distorções e assimetrias

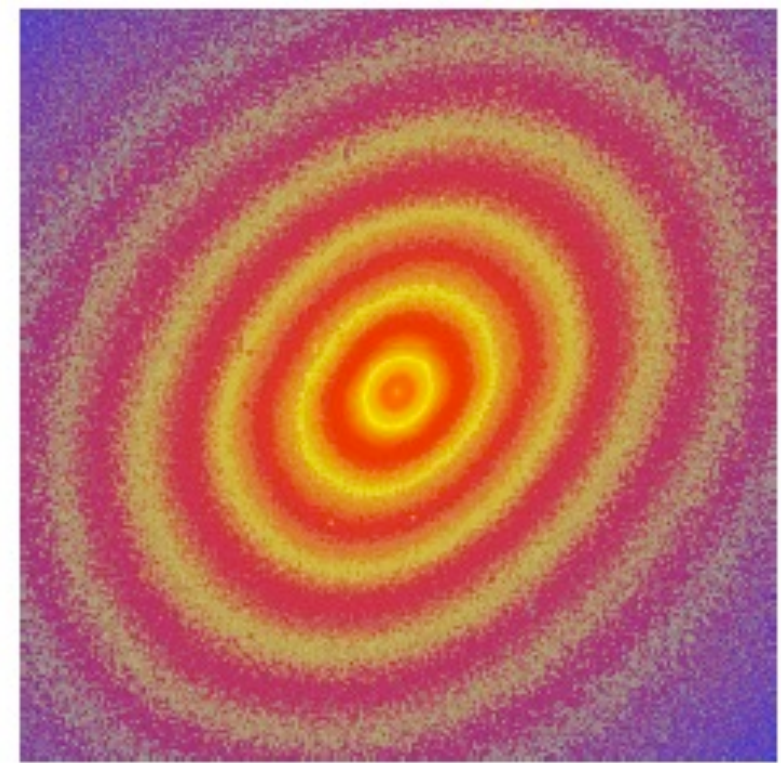


NGC 943

NGC 942



NGC 821: $a_4/a \sim +0.02$, disk



NGC 2300: $a_4/a \sim -0.02$, boxy

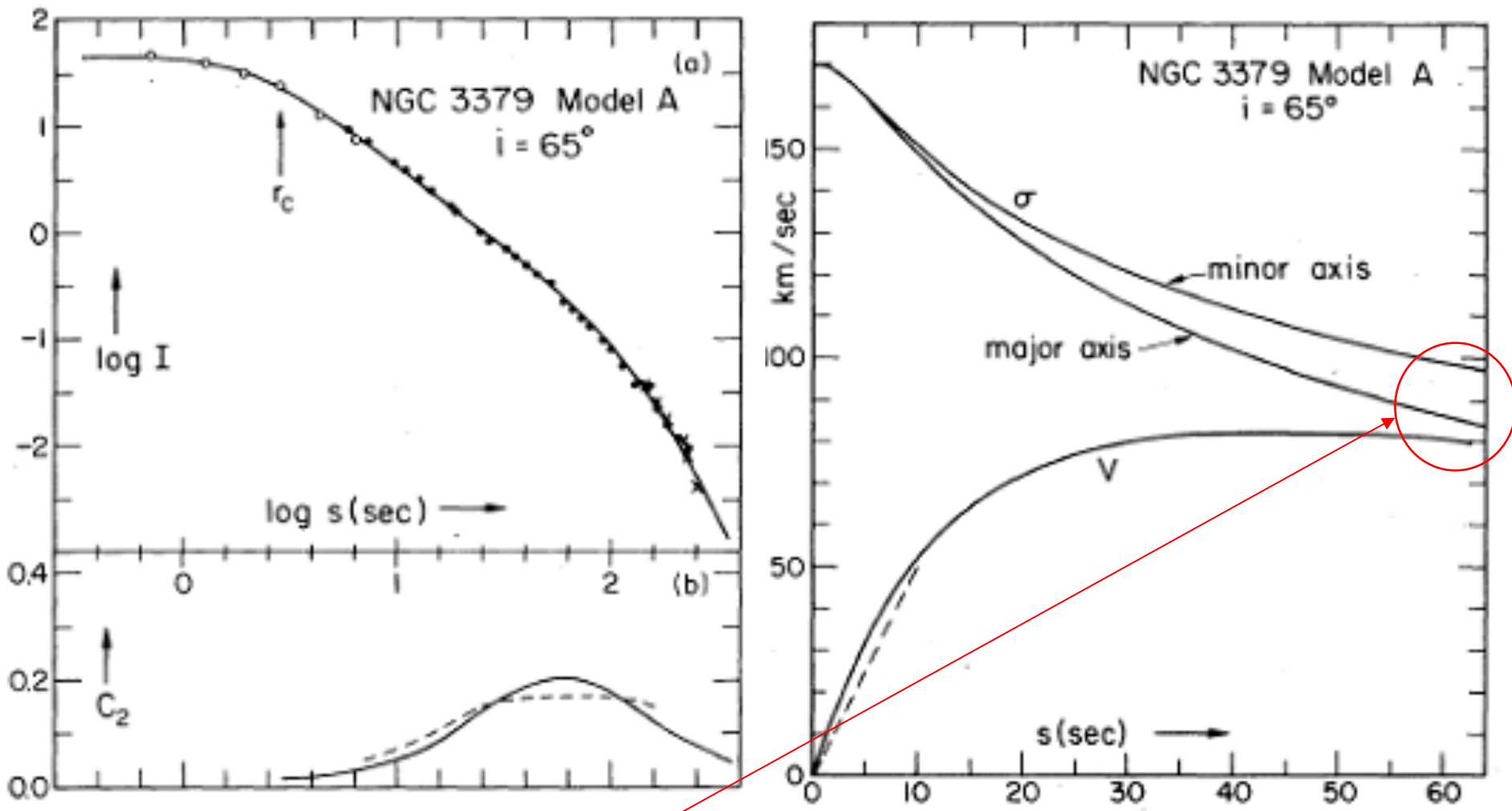
Distorções isofotais do tipo disco ($a_4 > 0$) e do tipo caixa ($a_4 < 0$).



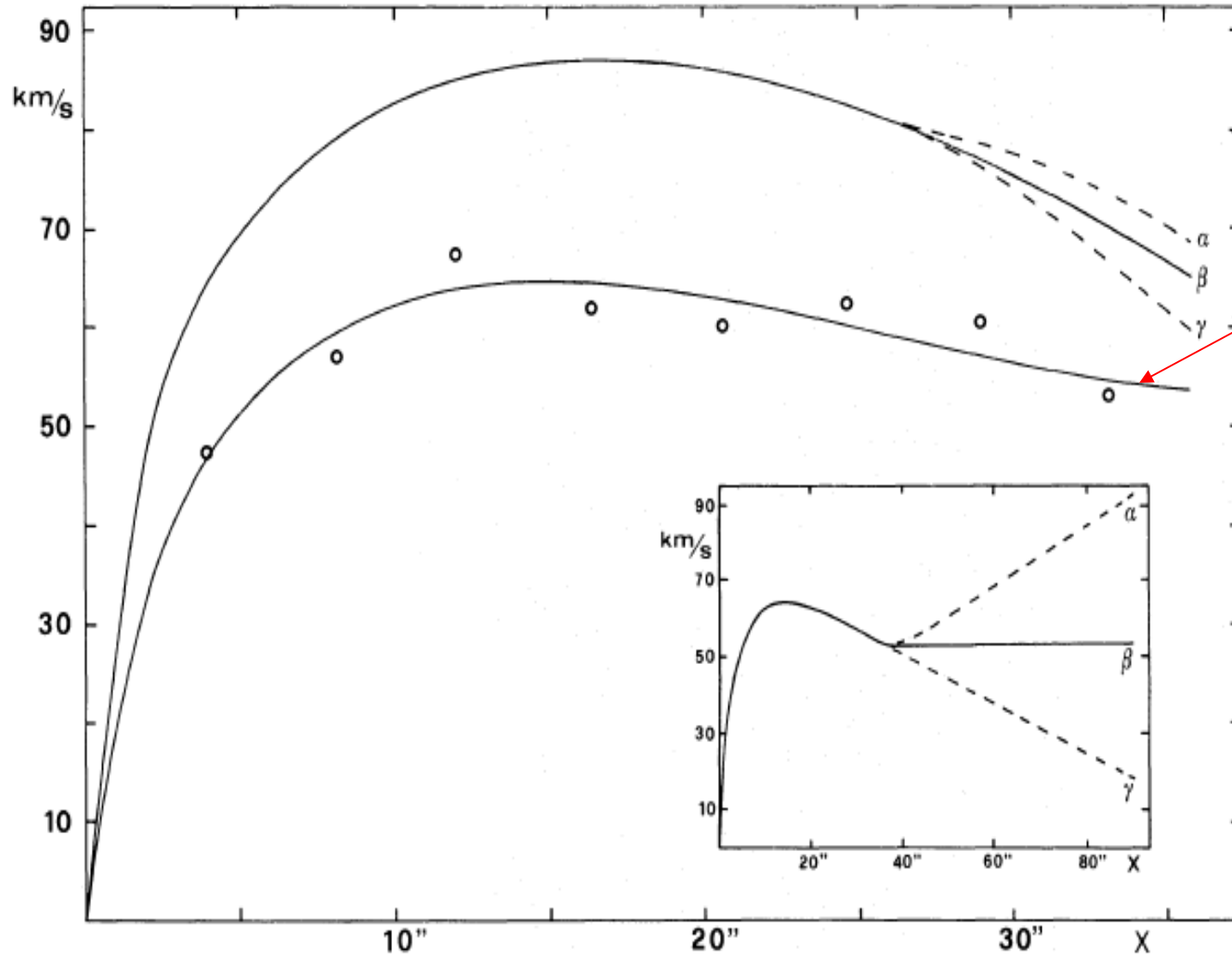
Velocidade de rotação

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!



velocidade de rotação de somente 60 km/s!



Um elipsoide isotrópico em rotação não descreve as elípticas!

Modelos sustentados por rotação

Elipsóide oblato isotrópico

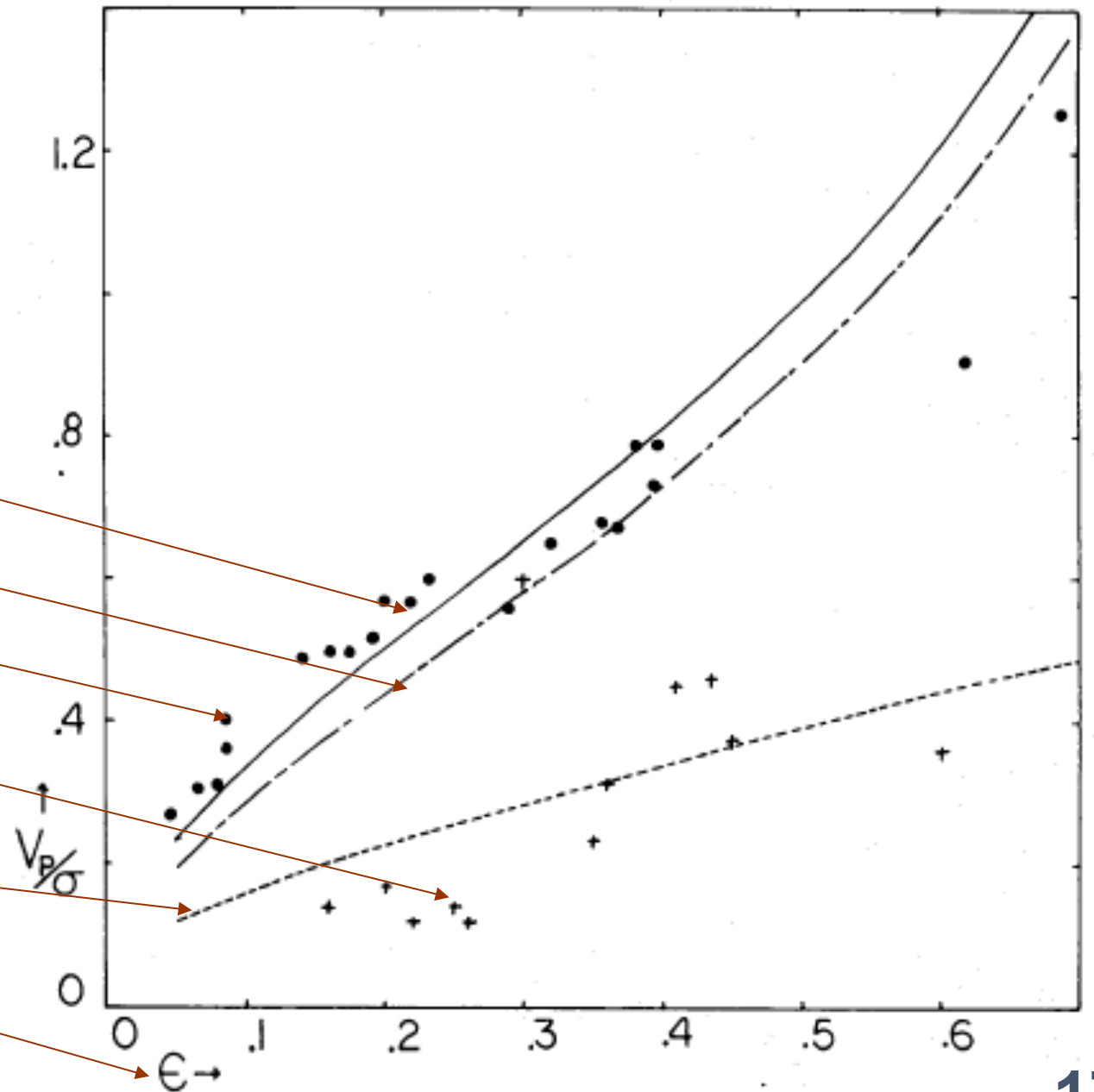
Elipsóide triaxial isotrópico

Modelos autoconsistentes isotrópicos

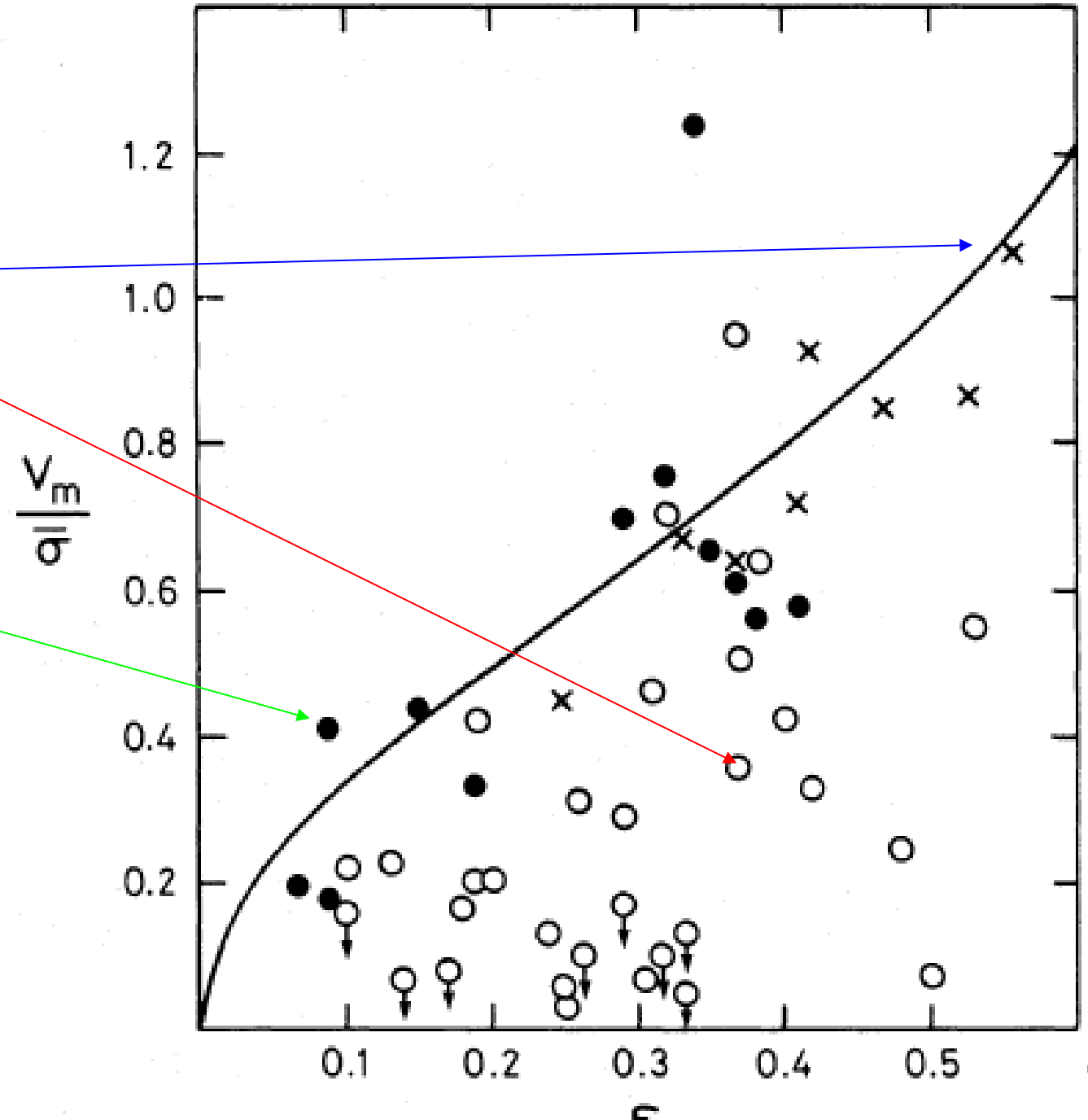
Elipsóide oblato não isotrópico
 $\sigma_z^2 = 2 \sigma_x^2, \sigma_x = \sigma_y$

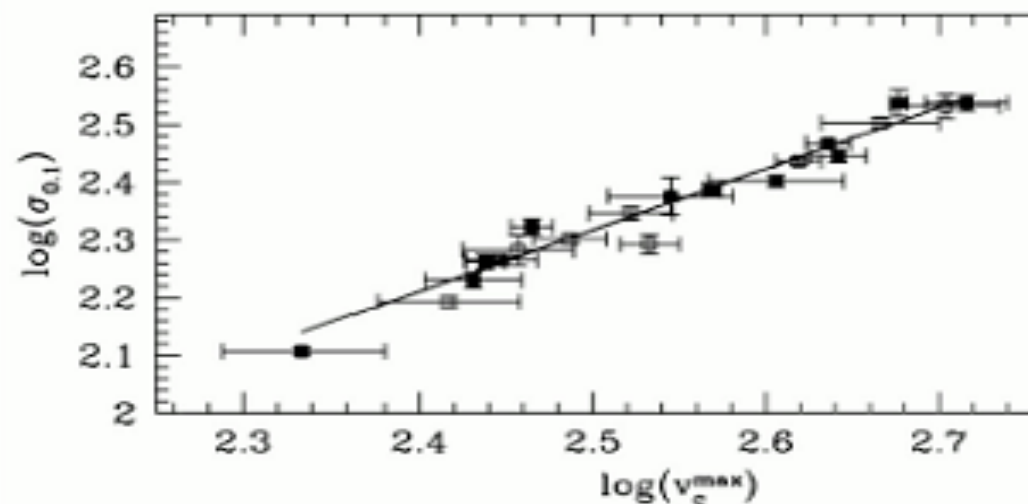
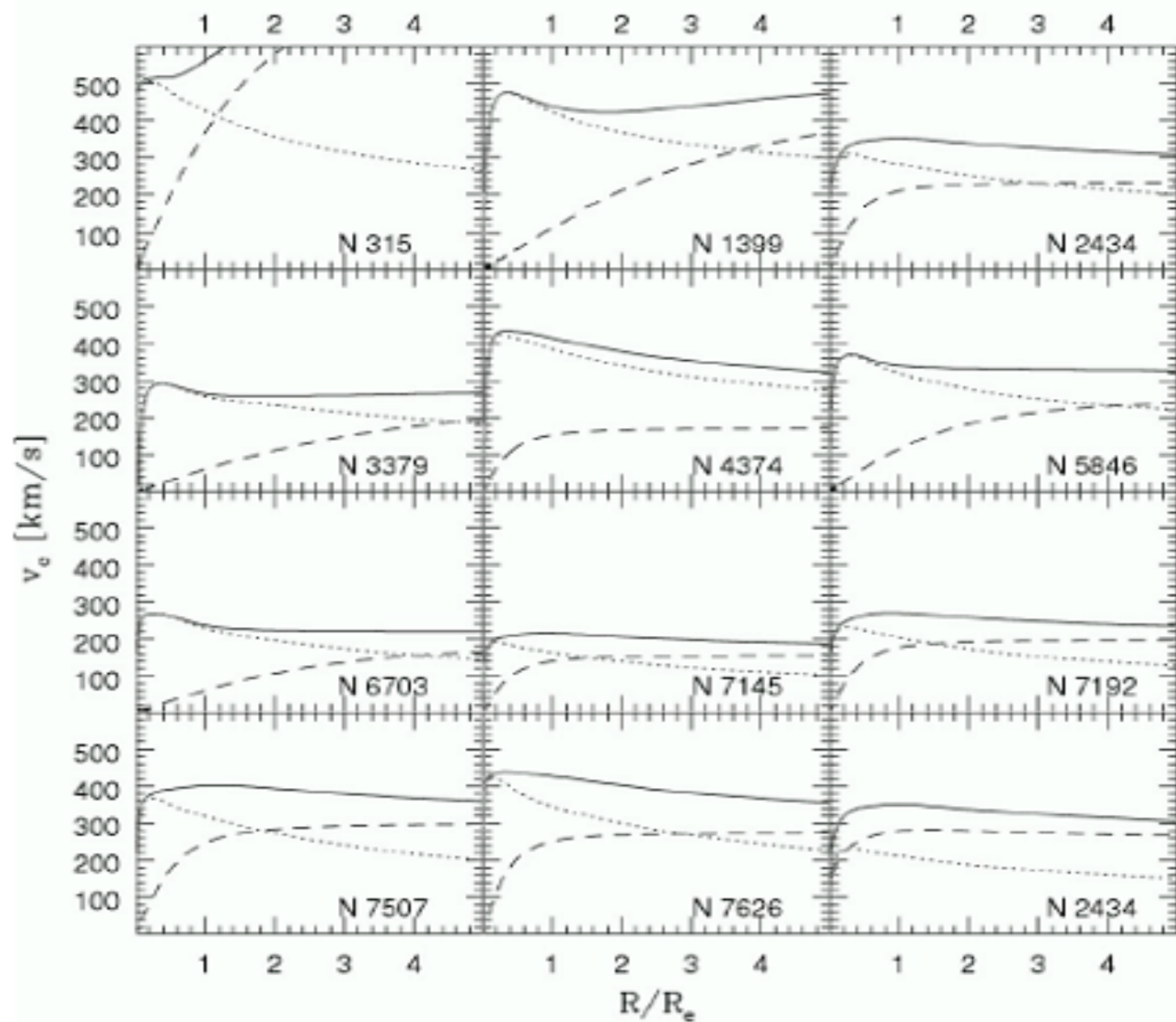
Galáxias elípticas gigantes

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



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.

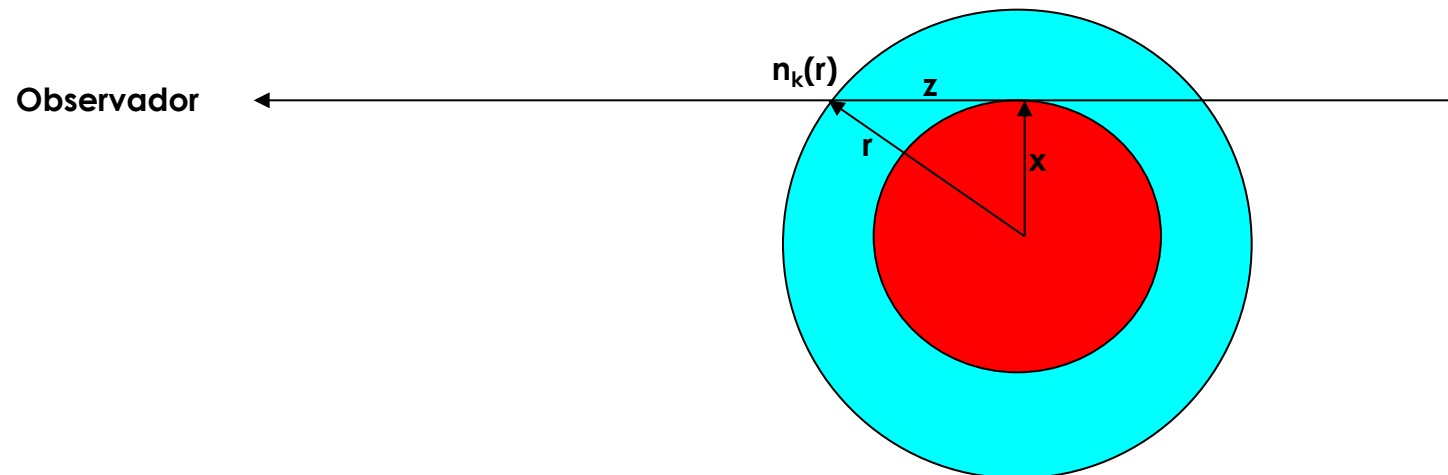
Dispersão de velocidades

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

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

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

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



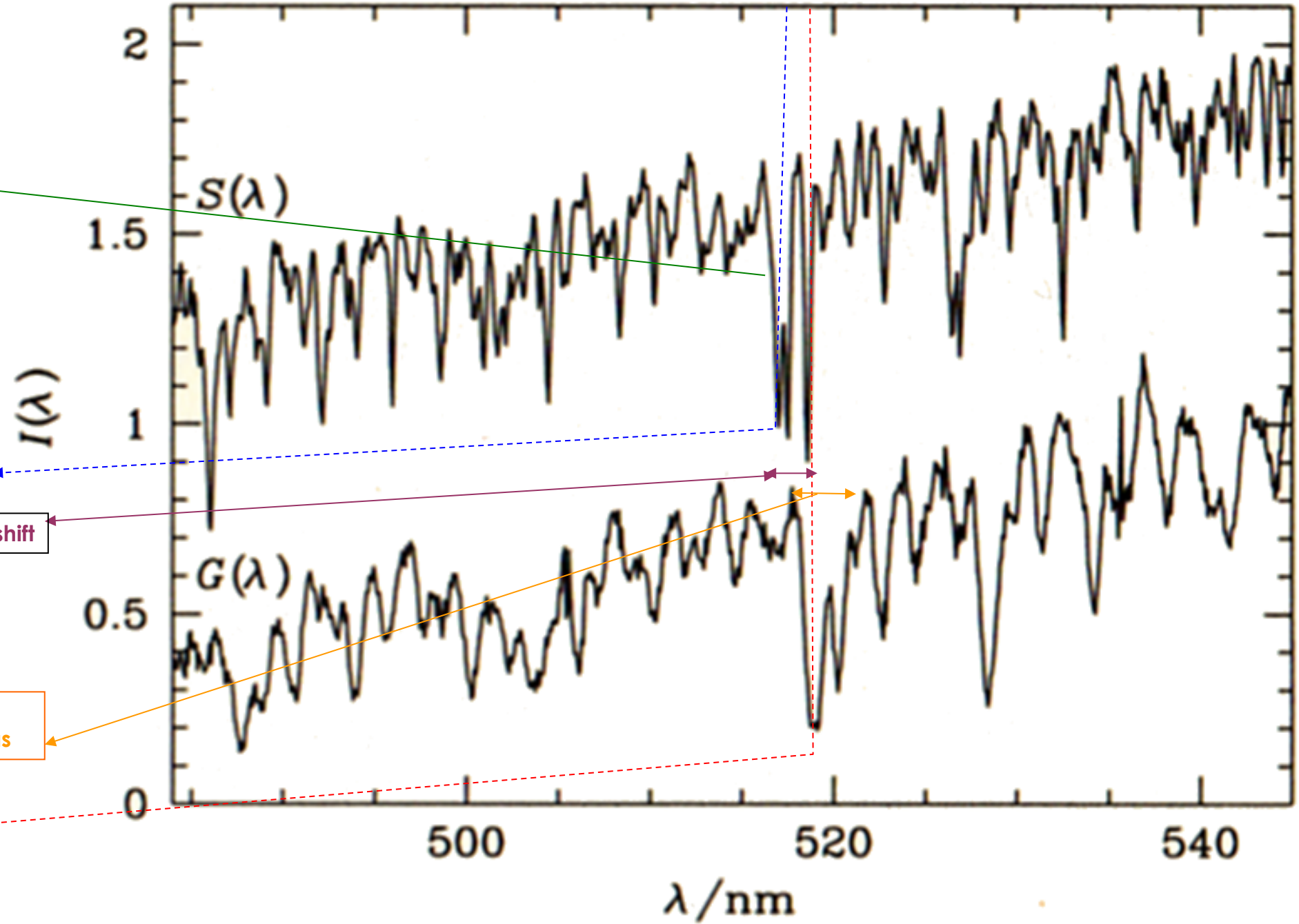
Linhas fotosféricas estreitas nas estrelas

Linhas do Mg das estrelas

Deslocamento devido ao redshift

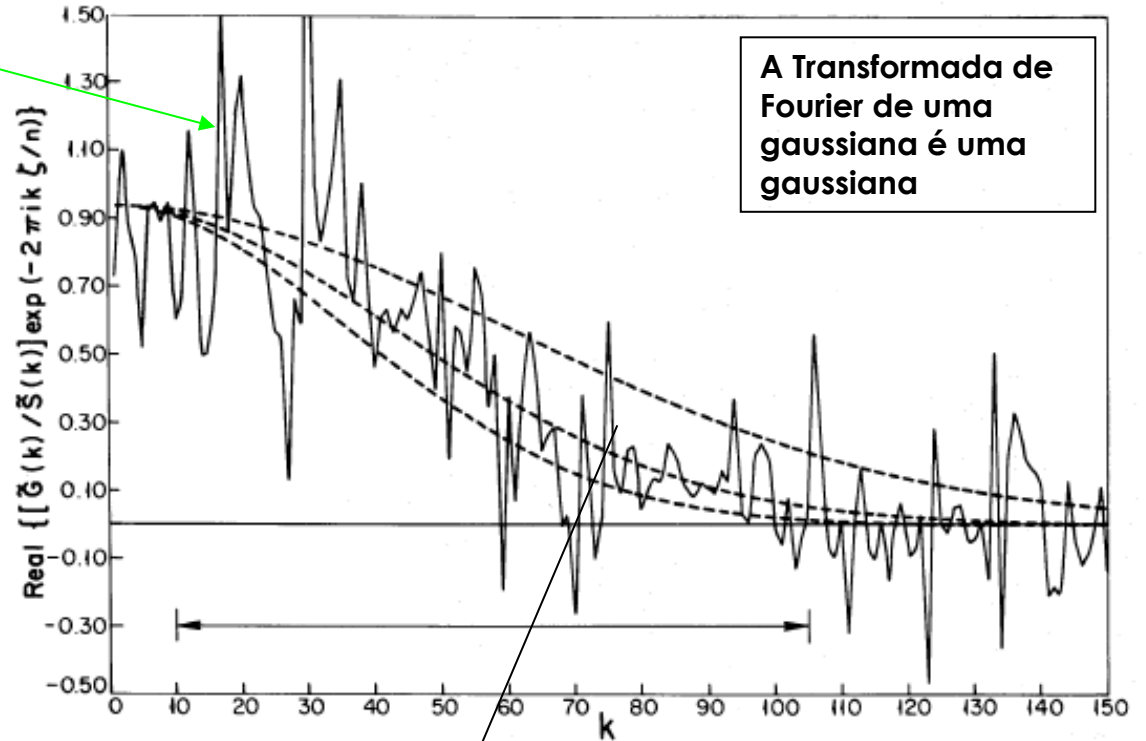
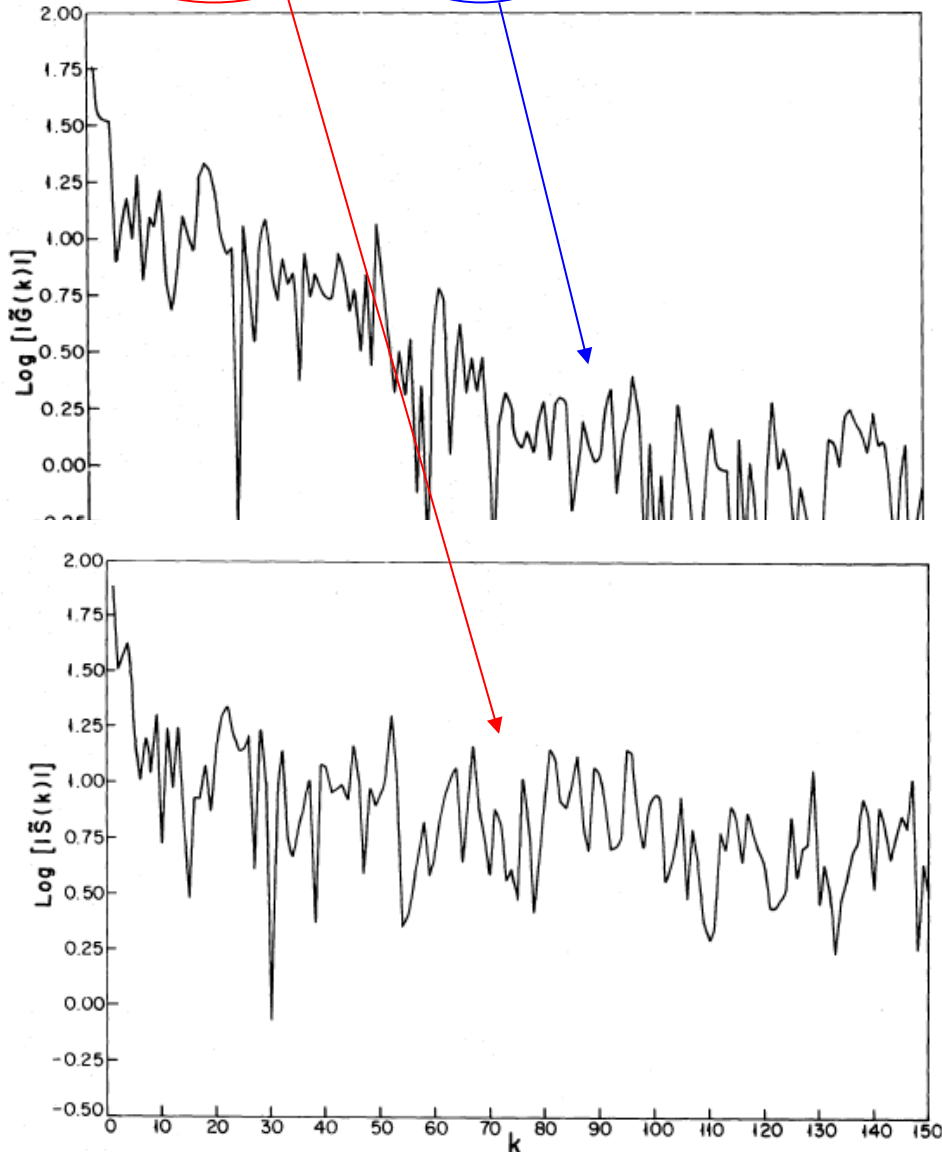
Alargamento devido ao movimento interno das estrelas

Linhas do Mg da galáxia



O produto da transformada de Fourier

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

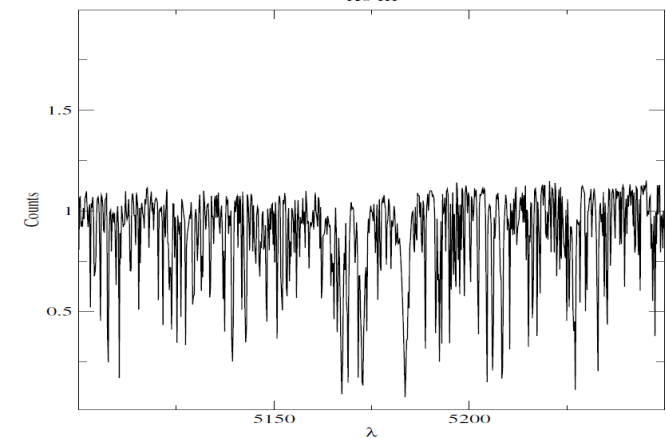


indica que a transformada de $F(v)$ é

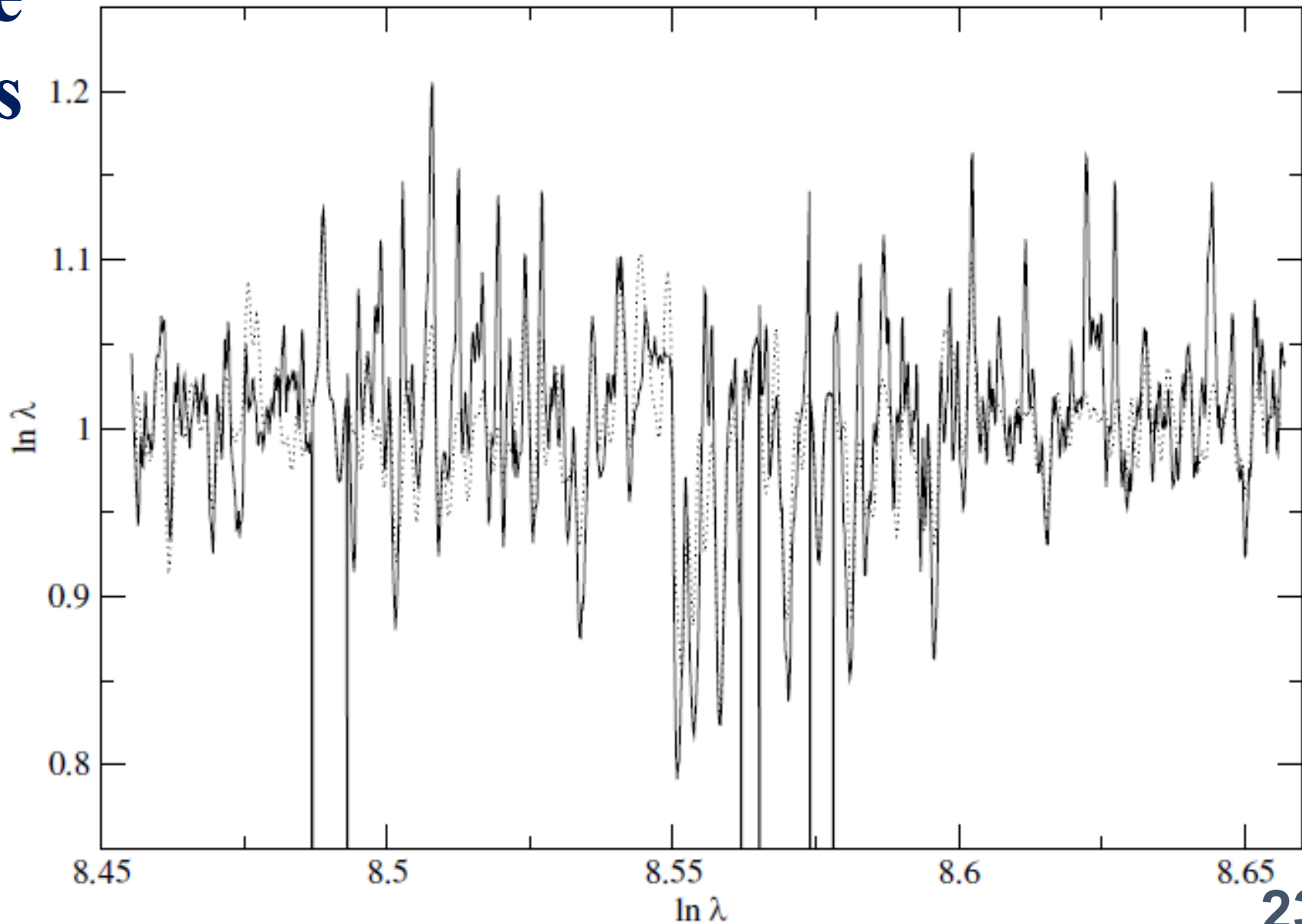
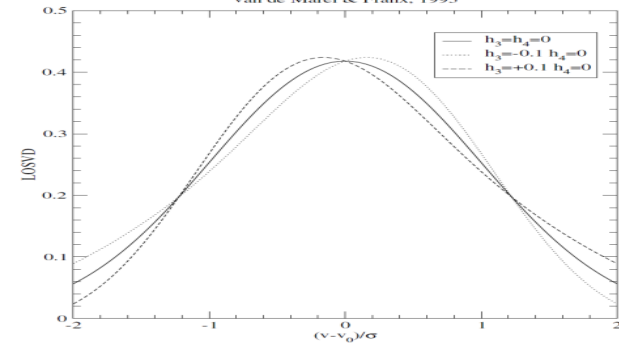
$$F(k; \sigma_v, \langle v \rangle) = G(k) / S(k)$$

Resolvendo a equação $G(k)=S(k) \times F(k;\sigma v, \langle v \rangle)$ usando um ajuste de mínimos quadrados!

HD19476
K0 III



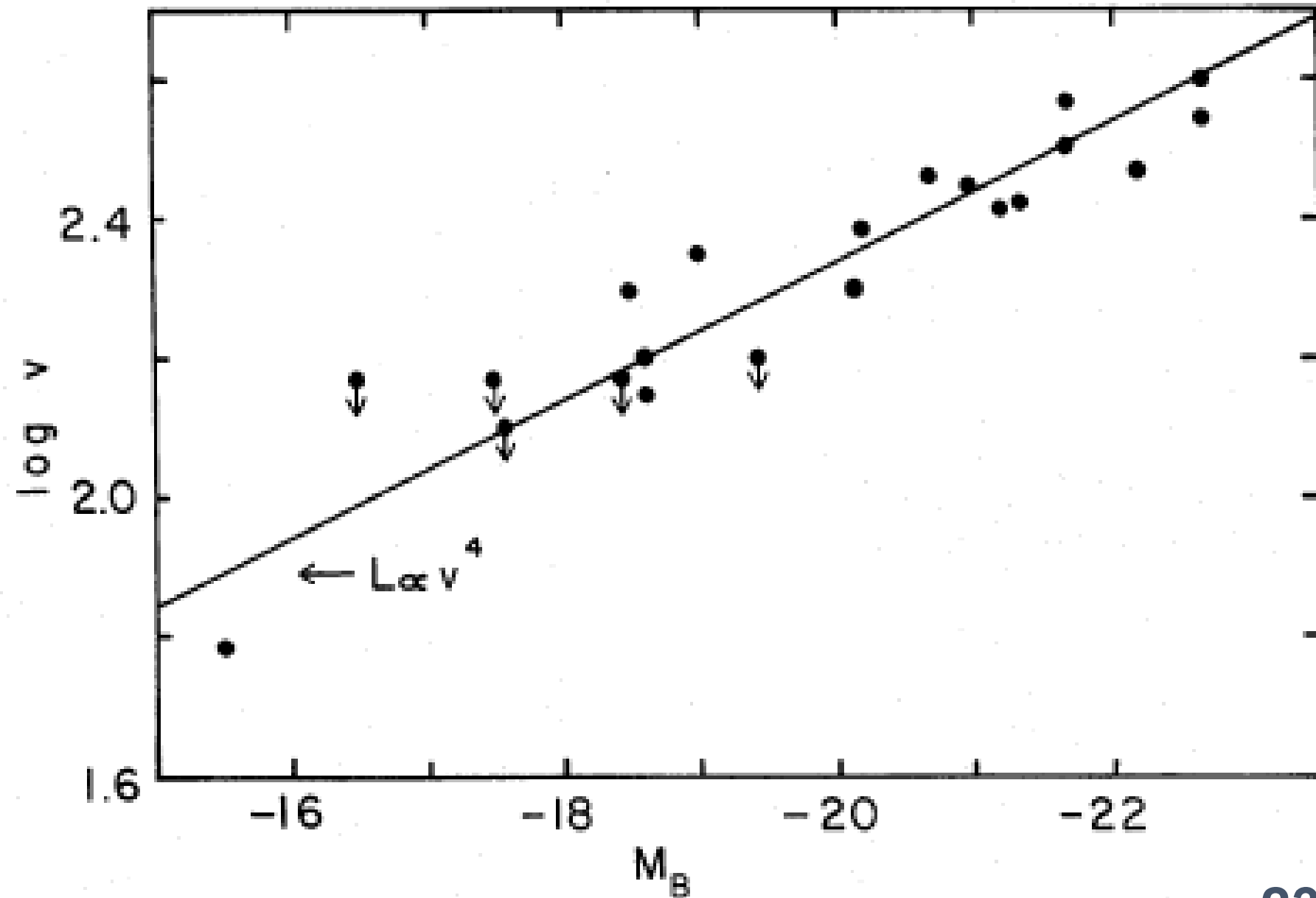
Normalized Velocity Distribution
van de Marel & Franx, 1993



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 $a \sim 4$. 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 $U = -\alpha GM^2/R \sim -3/5 GM^2/R$. A energia cinética, na ausência de rotação, é $K = 1/2 MV^2 = 3/2 M\sigma^2$. 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 $L \sim \text{Cte } R^2$ e resulta que $L \sim \text{cte } \sigma^4$.

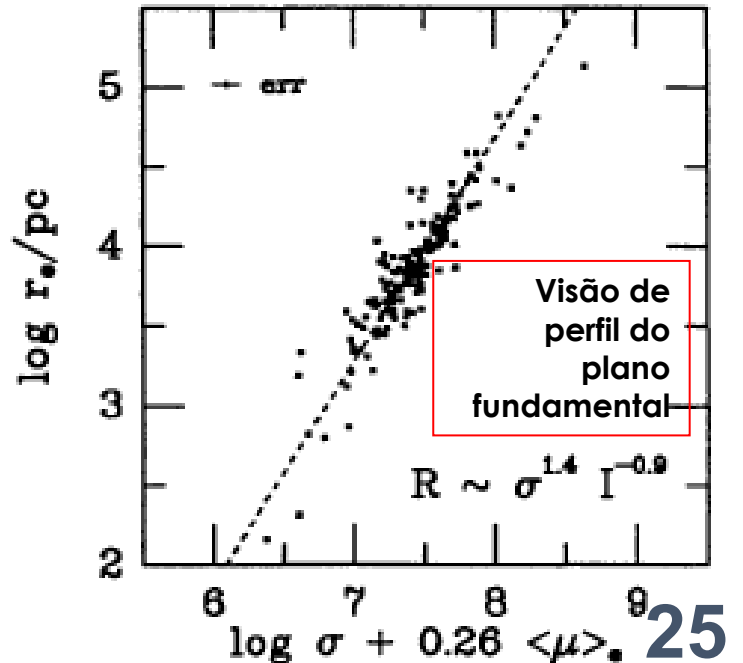
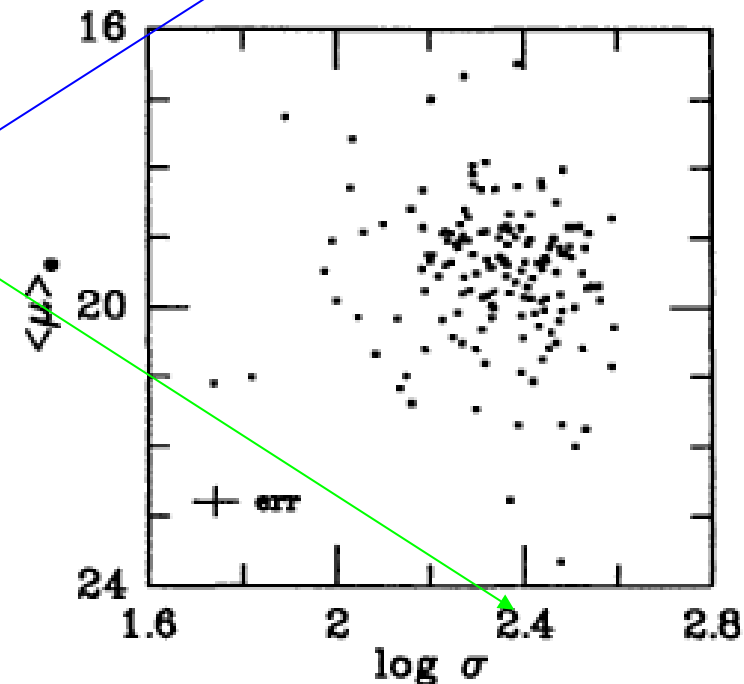
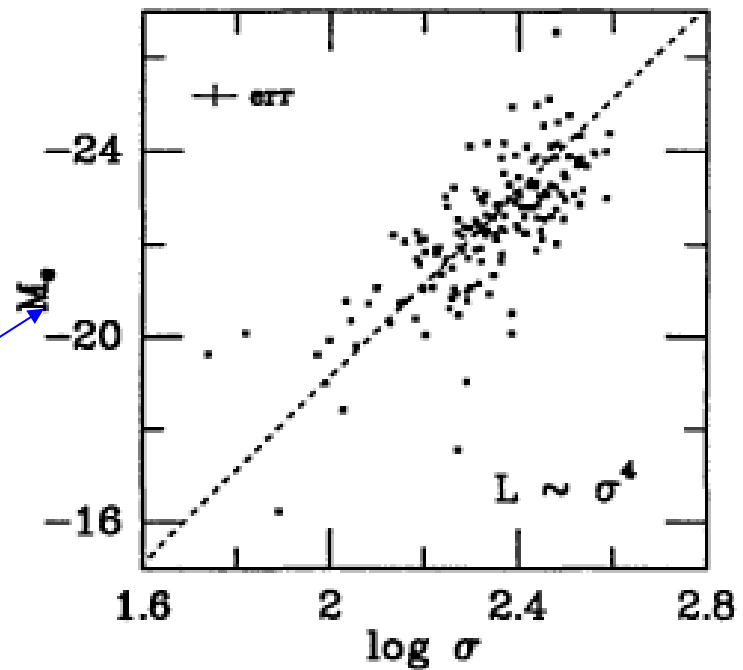
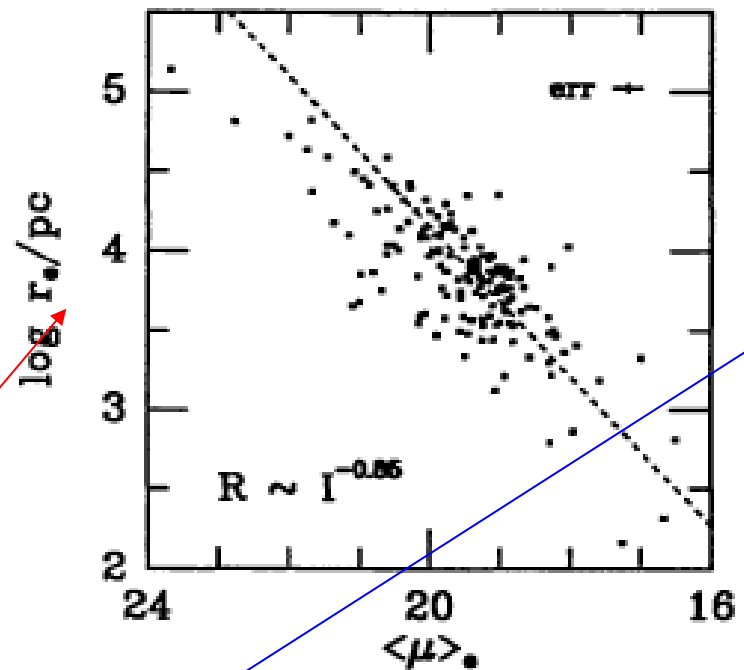
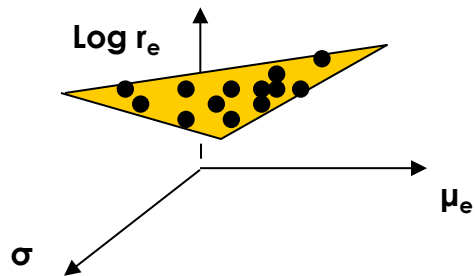


O Plano Fundamental

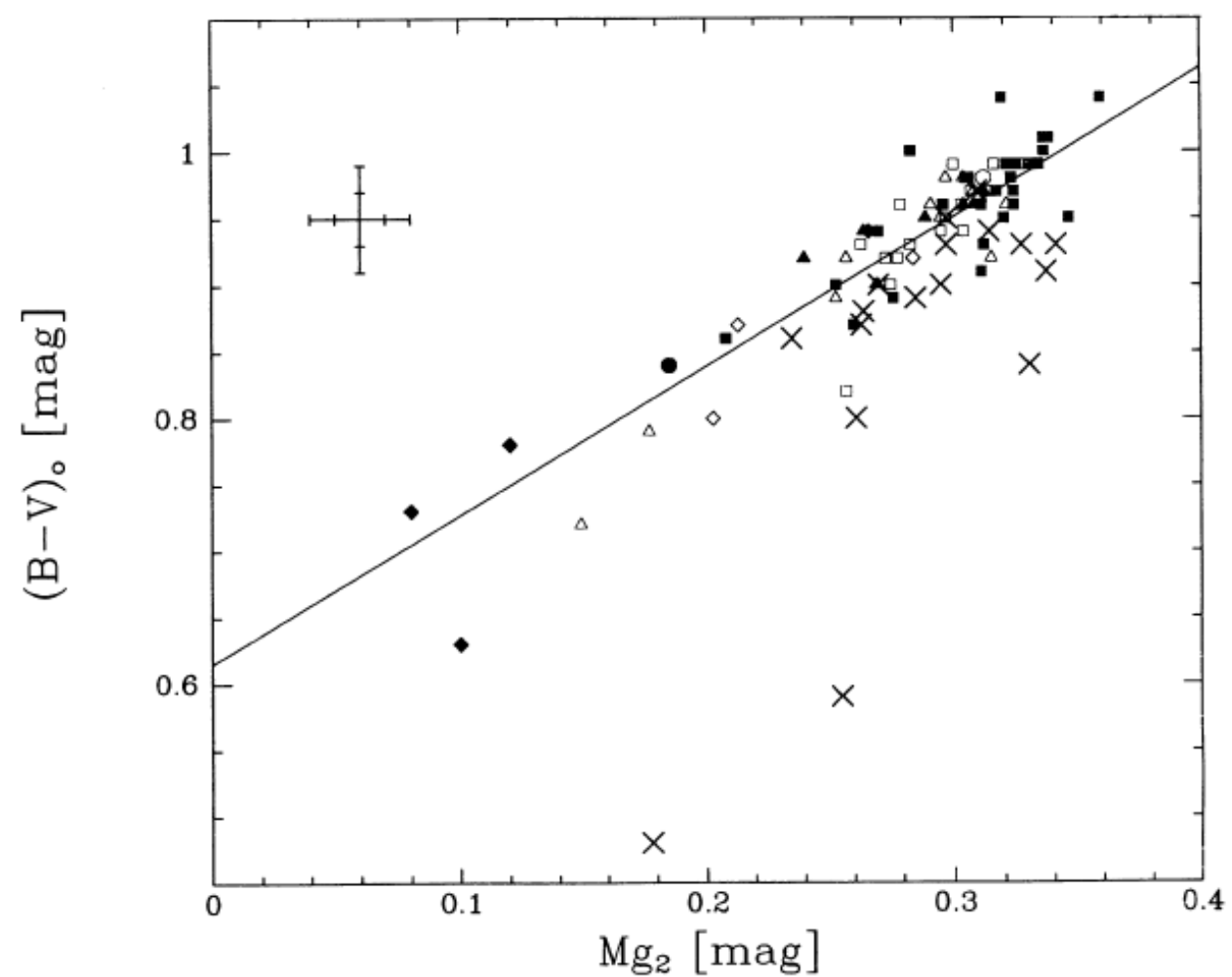
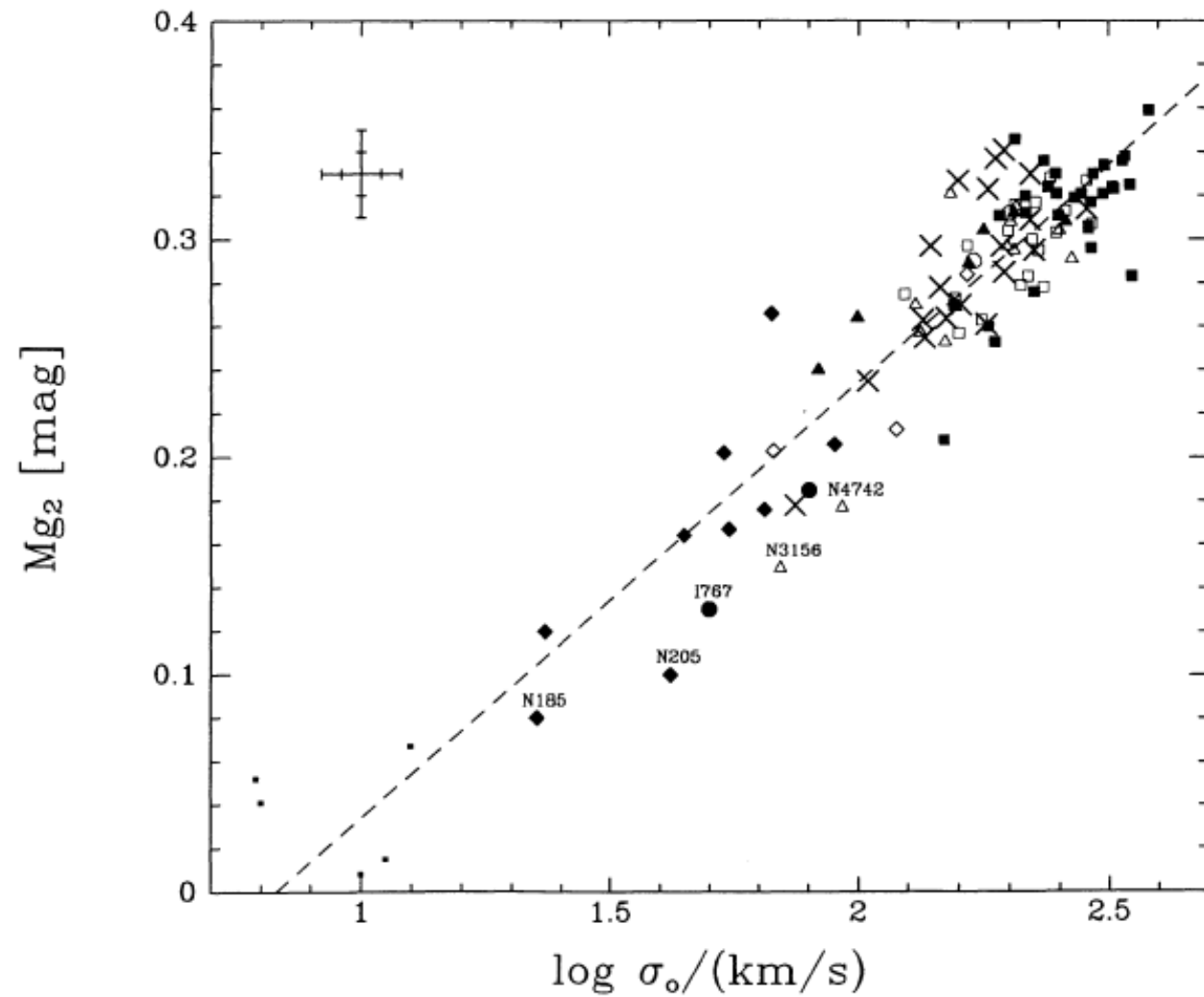
Nos anos de 1980 percebeu-se que os desvios na relação de Faber-Jackson eram superiores aos erros observacionais previstos tanto em luminosidade como na dispersão de velocidade. Ficou claro então que a necessidade de adotar uma relação mais compatível com os erros instrumentais conhecida como o Plano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

$$\text{Log } R = \text{Cte} + 1.4 \log \sigma - 0.9 \text{Log } I$$

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