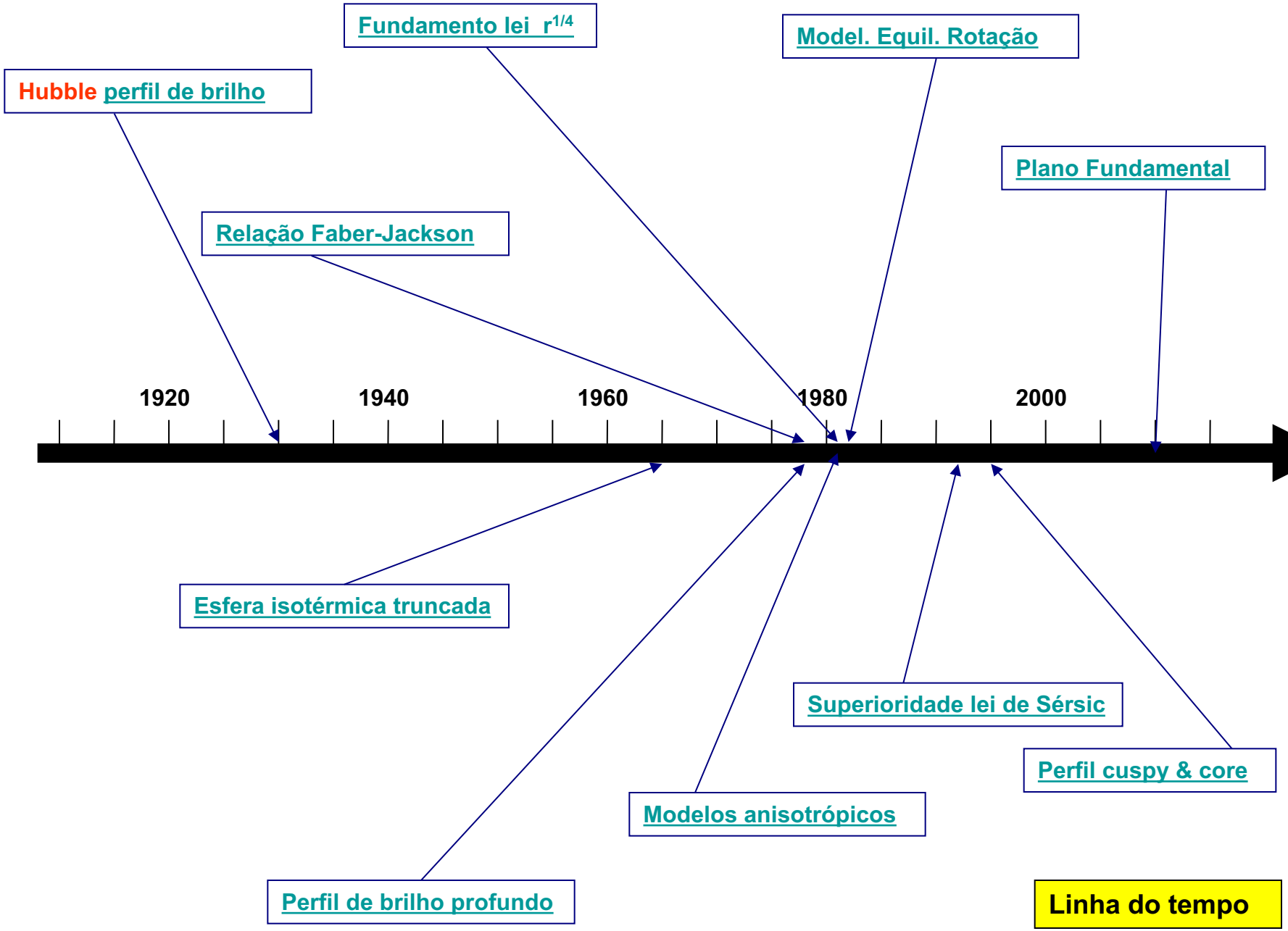
AGA 299 – IAG/USP
Ronaldo E. de Souza
Junho, 2025

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.

Cap. 4 Cap. 6



Linha do tempo

Tópicos

- 5.1 Distribuição de Brilho
- 5.2 Distorções
- 5.3 Rotação
- 5.4 Dispersão de Velocidades
- 5.5 Plano Fundamental
- 5.6 Problemas

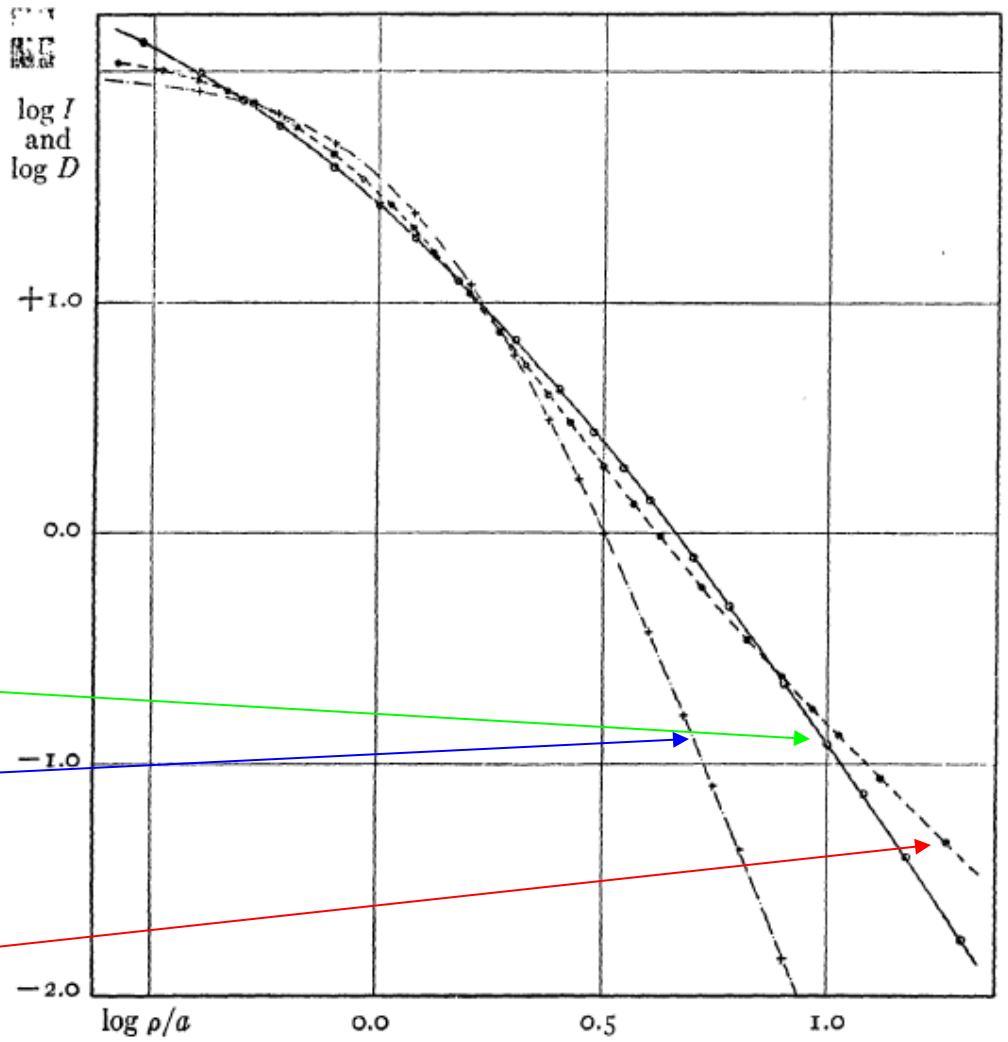
5.1 Distribuição de Brilho

Existem várias possíveis formas de representar o perfil de brilho das galáxias elípticas. Mas qual seria a mais adequada? Qual a mais informativa?

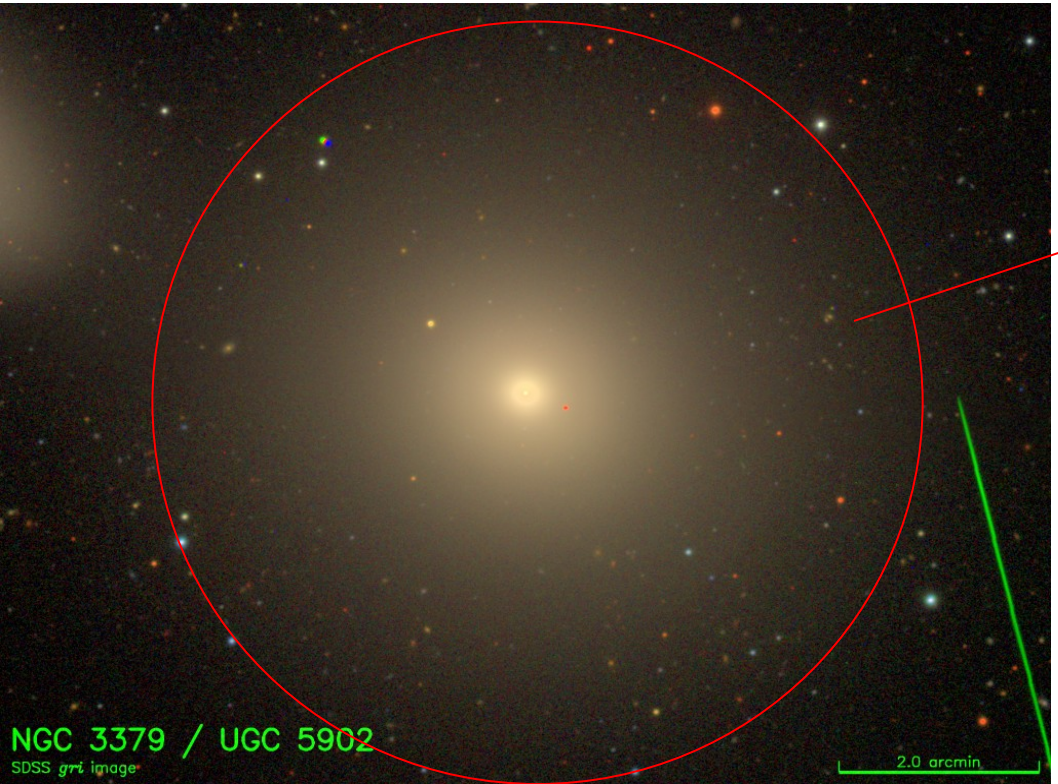
Uma das primeiras tentativas foi realizada por E. Hubble (1930, CMWCI, 398) que propôs a distribuição empírica de brilho das elípticas na forma

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

semelhante, na região interna, à distribuição de brilho dos aglomerados globulares, porém mais suave na região externa. Hubble notou ainda que, apesar de distinto, o perfil de brilho observado era parecido com o perfil esperado para uma esfera isotérmica, na qual as velocidades teriam uma distribuição Maxwelliana.



Posteriormente G. de Vaucouleurs propôs a relação empírica conhecida como a lei $r^{1/4}$ que representa com melhor precisão a distribuição de brilho superficial das galáxias elípticas. No caso de NGC 3379 esta representação é precisa até níveis da ordem de 1/1000 do fundo de céu (de Vaucouleurs & Capaccioli, (1979, ApJS, 40, 699). Como este perfil é também aplicável aos bojos prosperou a concepção que estas estruturas seriam semelhantes às galáxias elípticas de menor tamanho inseridas nos discos das galáxias espirais .



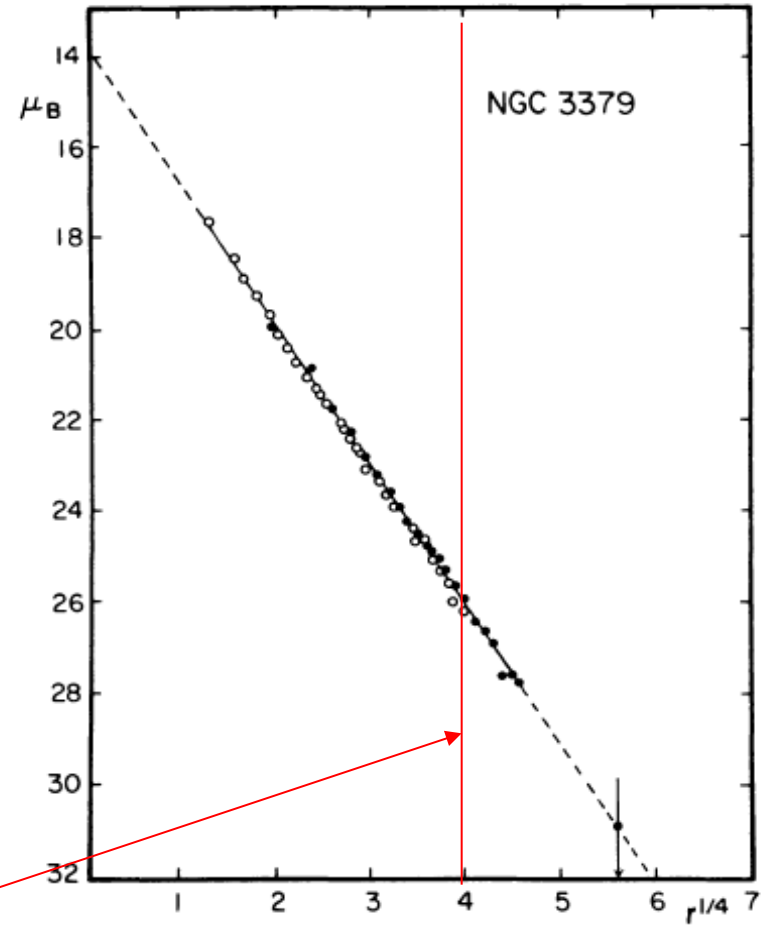


FIG. 2.—Mean E-W luminosity profile of NGC 3379 derived from McDonald photoelectric data. ●, Pe 4 data with 90 cm reflector; ○, Pe 1 data (M + P) with 2 m reflector. Note close agreement with $r^{1/4}$ law.

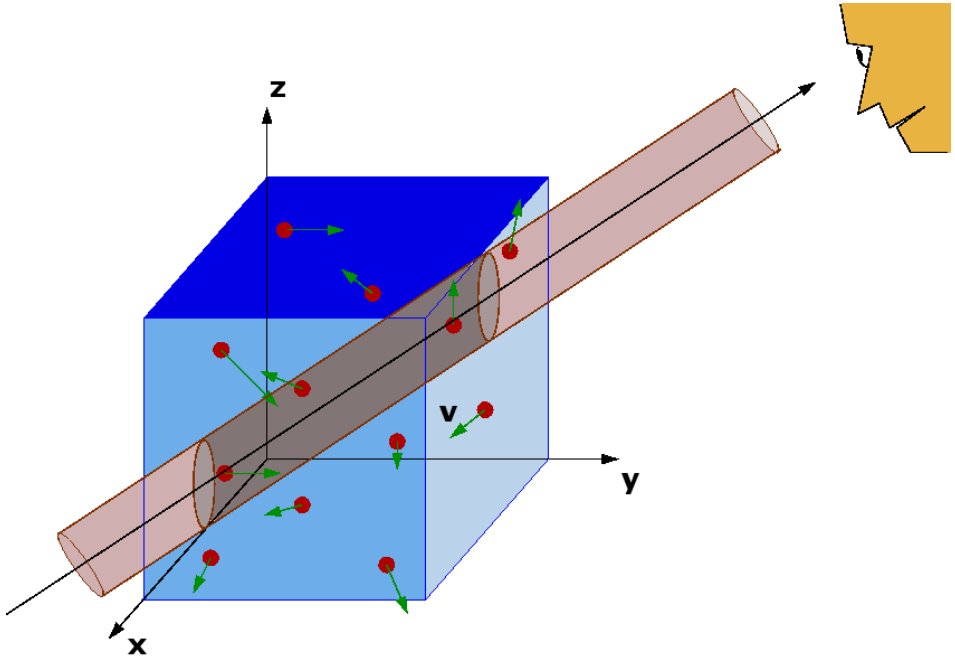
Sendo a distância de NGC 3379 cerca de 10,467 Mpc estime a dimensão máxima em que o perfil de de Vaucouleurs descreve este objeto.

A distribuição observada do brilho superficial de uma galáxia é uma consequência da distribuição das estrelas no interior daquele objeto. Mas como descrever esta distribuição? Nos anos de 1920 o físico inglês James Jeans deu os primeiros passos ao adaptar o conceito da função distribuição usual na mecânica dos fluidos. Como cada estrela se movimenta com uma velocidade aleatória esta função depende das coordenadas, das velocidades e do tempo caso o sistema não seja estacionário. No caso de sistemas estacionários a densidade volumétrica de estrelas pode ser obtida integrando-se no espaço de velocidades,

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

Como o perfil de brilho observado nas elípticas é similar a uma distribuição isotérmica a função de distribuição das velocidades deve se aproximar de uma Maxwelliana.

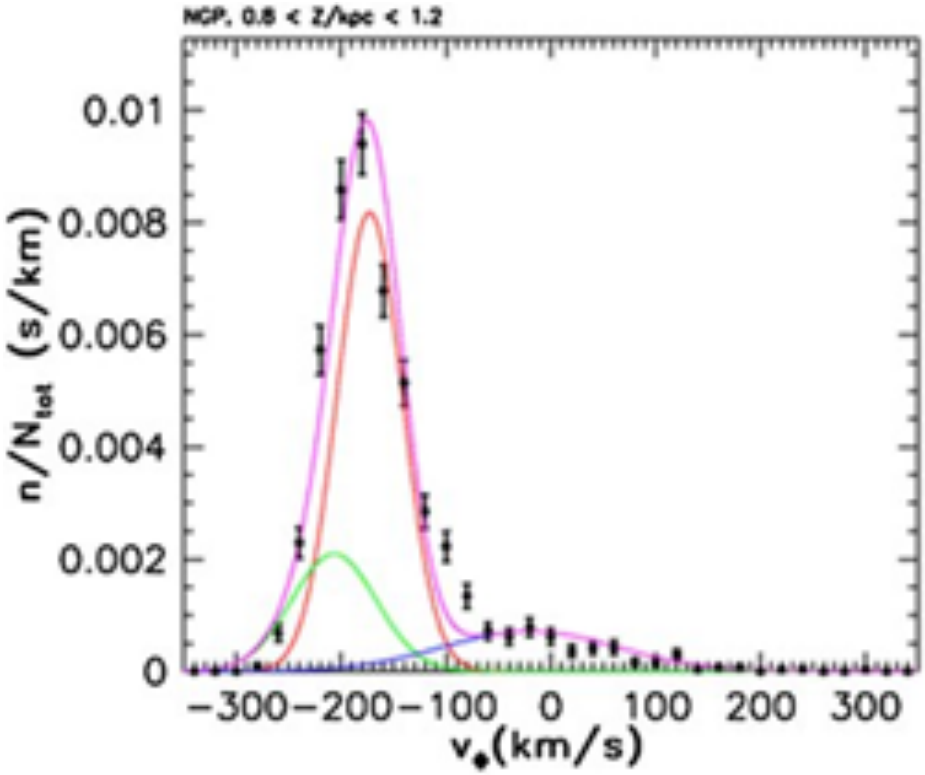
A distribuição do brilho superficial Σ(r,θ) é obtida como a integral da densidade volumétrica ponderada pela luminosidade de cada estrela, ao longo da linha de visada.

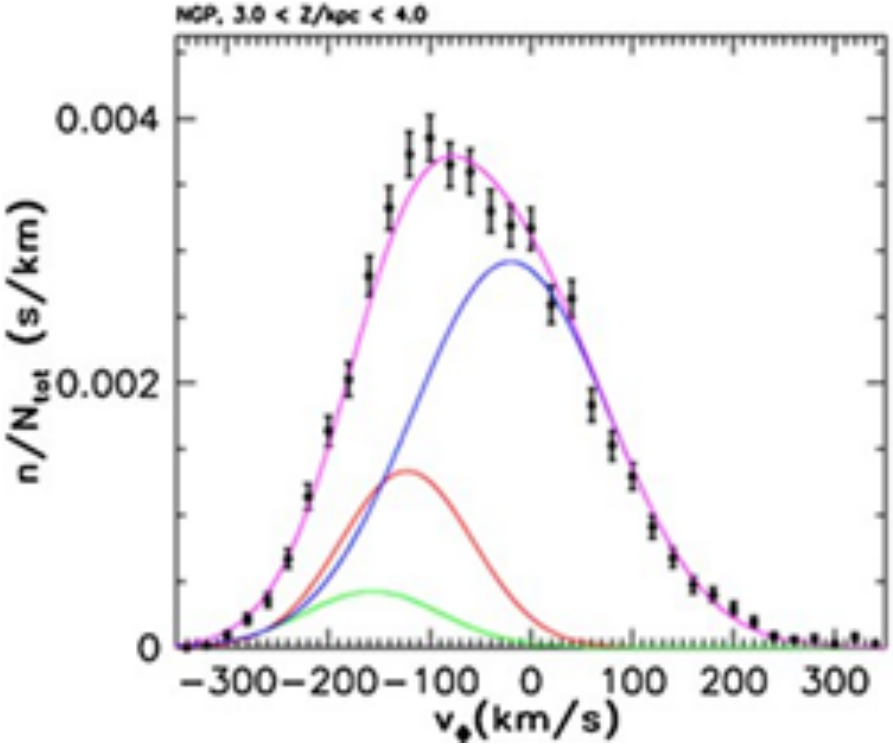


$$\Sigma(r,\theta) = \int \left(\frac{M}{L}\right)^{-1} \rho(x,y,z)\,dl$$

onde M/L representa a razão massa/luminosidade e dl representa o elemento de comprimento ao longo da direção de visada do observador. Outras contribuições importantes nesta área foram dadas nos anos 40 por Chandrasekhar e por J. Binney e outros a partir dos anos 70.

Sabemos hoje que a função de distribuição das velocidades estelares não pode ser exatamente descrita por uma Maxwelliana já que neste caso a estrutura da galáxia seria uma isotérmica exata cuja massa diverge. Um teorema muito importante foi descoberto por Jeans mostrando que a função de distribuição em sistemas estelares estacionários deve depender exclusivamente das integrais isolantes de movimento das estrelas. As duas integrais mais importantes seriam a energia ($E= \frac{1}{2} m_* v^2 + U(r)$ e o momentum angular (L).



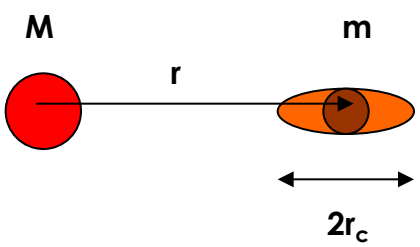


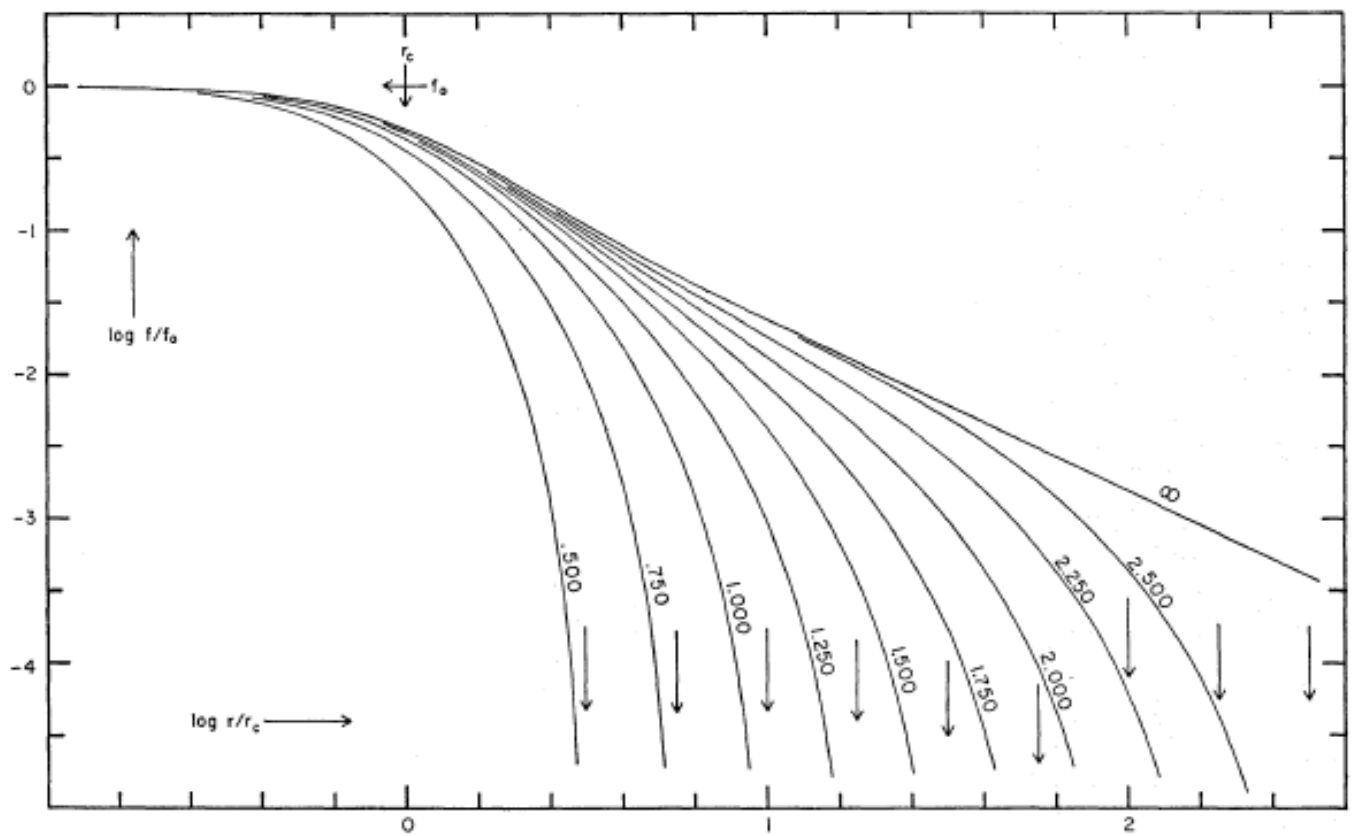
No caso mais simples de um sistema esférico com órbitas radiais resulta que $f=f(v^2)$ e a Maxwelliana seria um caso particular desta classe de distribuições.

A determinação da função de distribuição das velocidades é um dos temas mais importantes da dinâmica estelar. Sabe-se que esta distribuição é o resultado da formação e evolução das galáxias e certamente deve depender das populações estelares conforme se observa na vizinhança solar.

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.

Examine a dependência da força de atração Newtoniana e mostre como o raio de maré depende da distância ao centro atrator de massa M.





No caso de NGC3379 podemos verificar que o modelo de king, conhecido ainda como esfera isotérmica rebaixada, também apresenta uma ótima concordância com as observações com a grande vantagem adicional de ter um suporte teórico claro.

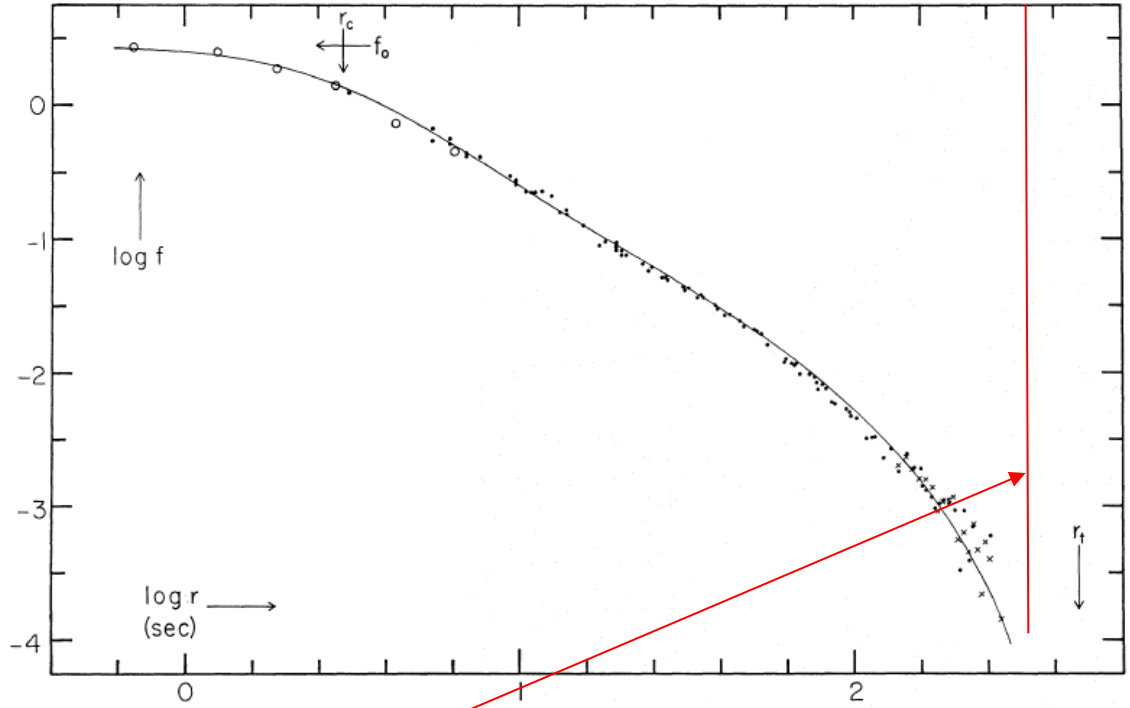
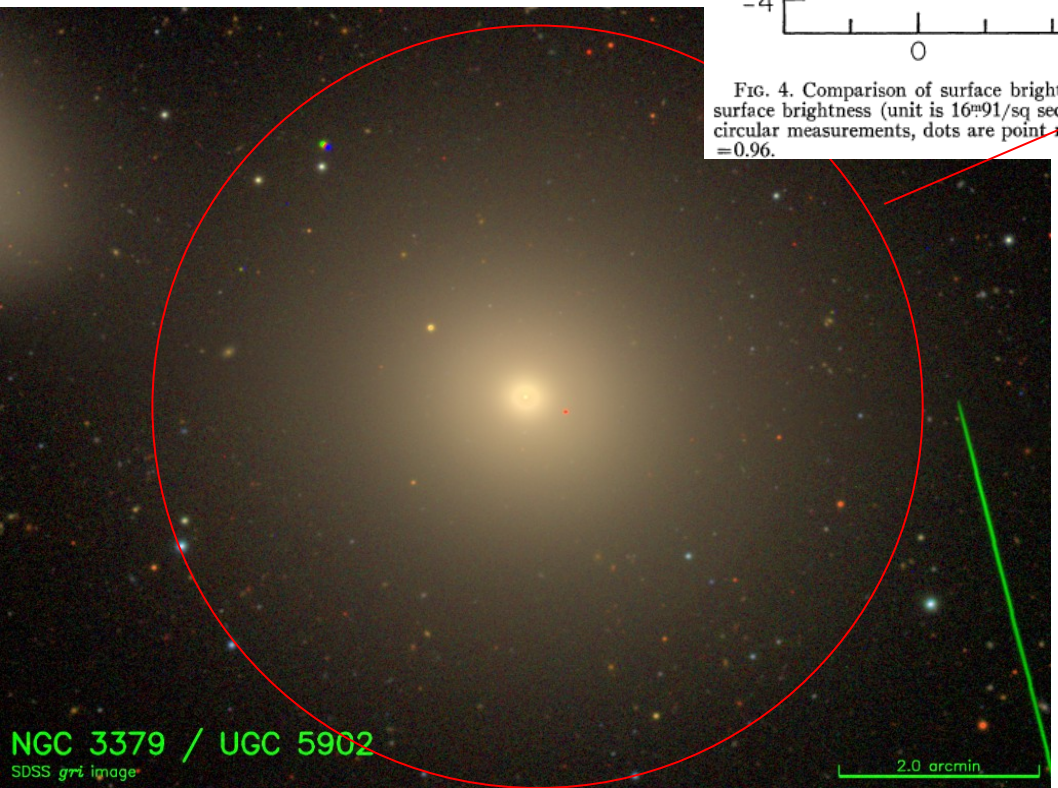
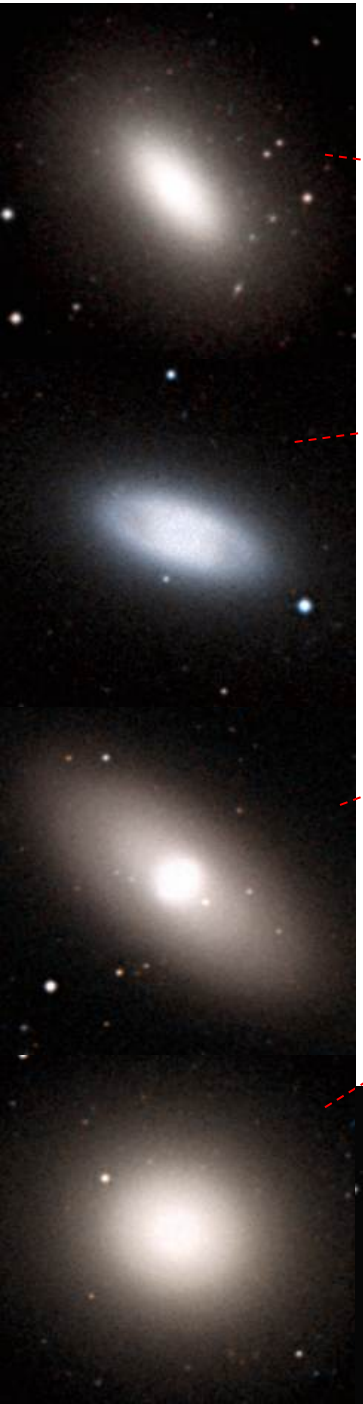


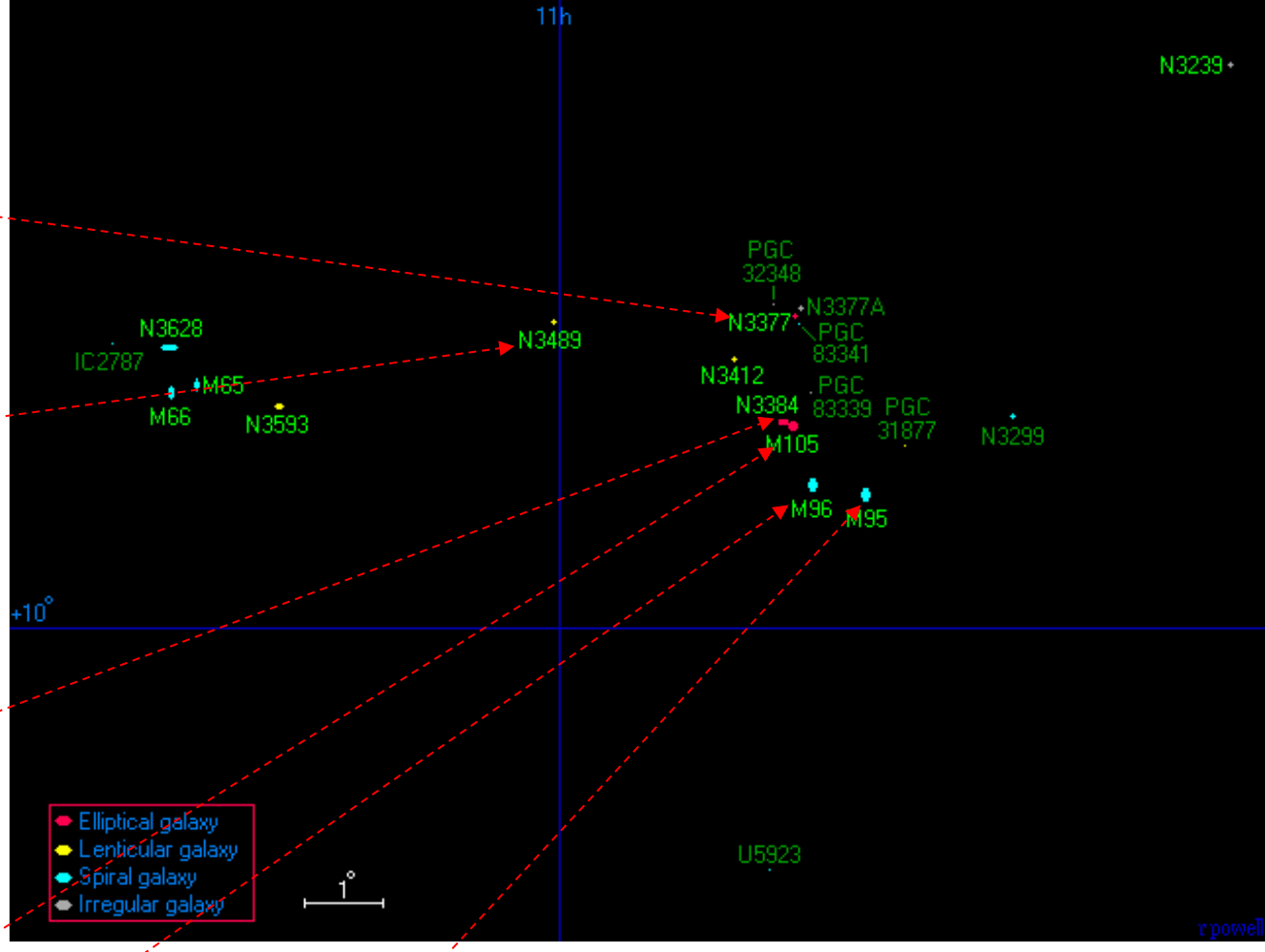
FIG. 4. Comparison of surface brightnesses in NGC 3379 with theoretical curve for $\log(r_t/r_c)=2.20$. Ordinate: logarithm of yellow surface brightness (unit is 16^m91/sq sec); abscissa: logarithm of radius in seconds. Open circles are values calculated from concentric circular measurements, dots are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



No entanto, nem todos os objetos apresentam este mesmo nível de concordância. Portanto não existem garantias que a interpretação de King possa ser genericamente aplicada.

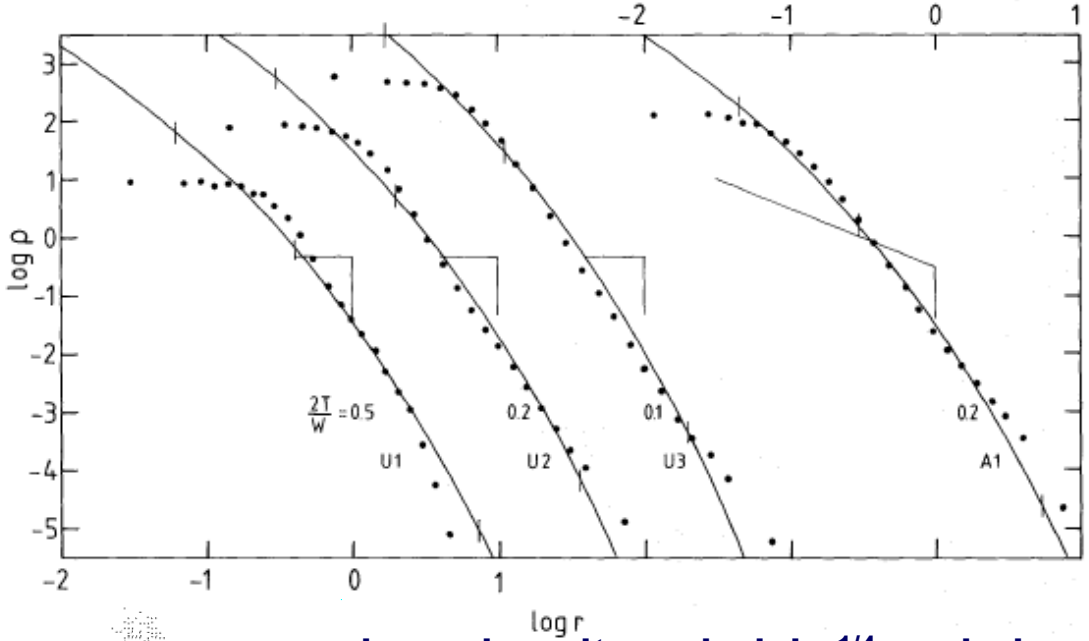
A origem do nome *rebaixada* se deve a que o efeito de maré deve extrair do objeto todas as estrelas com velocidades superiores à velocidade de escape (E>0).

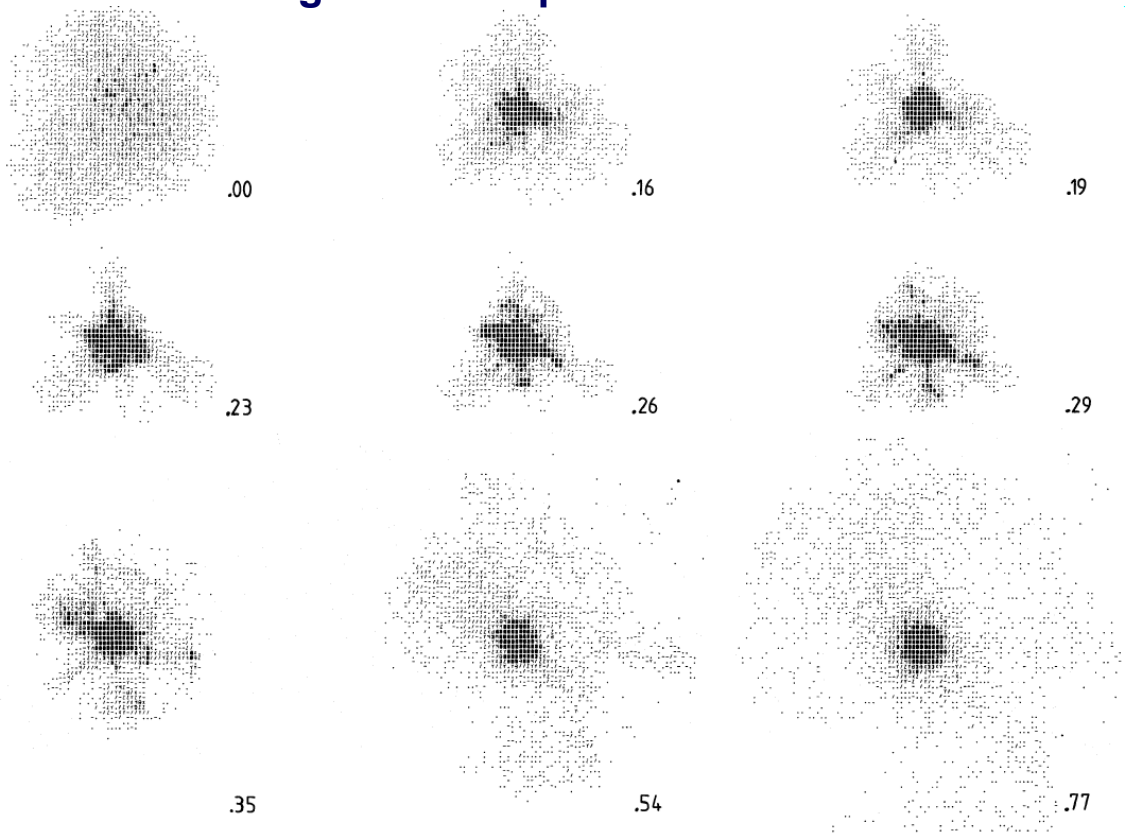




NGC3379, ou M105, fica na região central de um grupo de galáxias conhecido com Leo. Como você testaria a hipótese do perfil deste objeto ser de fato truncado por efeito de maré?

Durante muitos anos os pesquisadores ficaram intrigados em entender porque razão o perfil de brilho das elípticas apresenta o comportamento observado. Com o desenvolvimento de computadores mais eficientes esta questão começou a ser investigada com sucesso a partir dos anos de 1980. Segundo Van Albada (1982, MNRAS, 201, 939) a razão do perfil de brilho das galáxias elípticas ser





bem descrito pela lei $r^{1/4}$ poderia ser uma consequência natural devido às condições iniciais na época do colapso que formou o objeto. Uma distribuição inicial que seja praticamente uniforme se encontra fora do equilíbrio dinâmico assim que as estrelas se formam. A partir deste ponto o sistema rapidamente oscila e relaxa modificando a função de distribuição. Desde que o fator de colapso seja suficientemente grande a distribuição final de densidade é indistinguível daquela observada no perfil de de Vaucouleurs.

Outra alternativa de representação do perfil de brilho das elípticas é através da lei empírica conhecida como perfil de Sérsic que é uma generalização do perfil de de Vaucouleurs

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

onde o índice n permite a incorporação em uma única fórmula tanto do perfil exponencial do disco (n=1) quanto do perfil de de Vaucouleurs (n=4) como casos particulares. O uso deste perfil para representar galáxias elípticas no aglomerado de Virgo foi adotado por Caon et al (1993, MNRAS, 265, 1013) que mostraram ser o perfil de Sérsic mais representativo, do ponto de vista estatístico, do que o perfil de de Vaucouleurs. O argumento central, de natureza estatística, é que o resíduo dos ajustes é sistematicamente menor quando se usa o perfil de Sérsic.

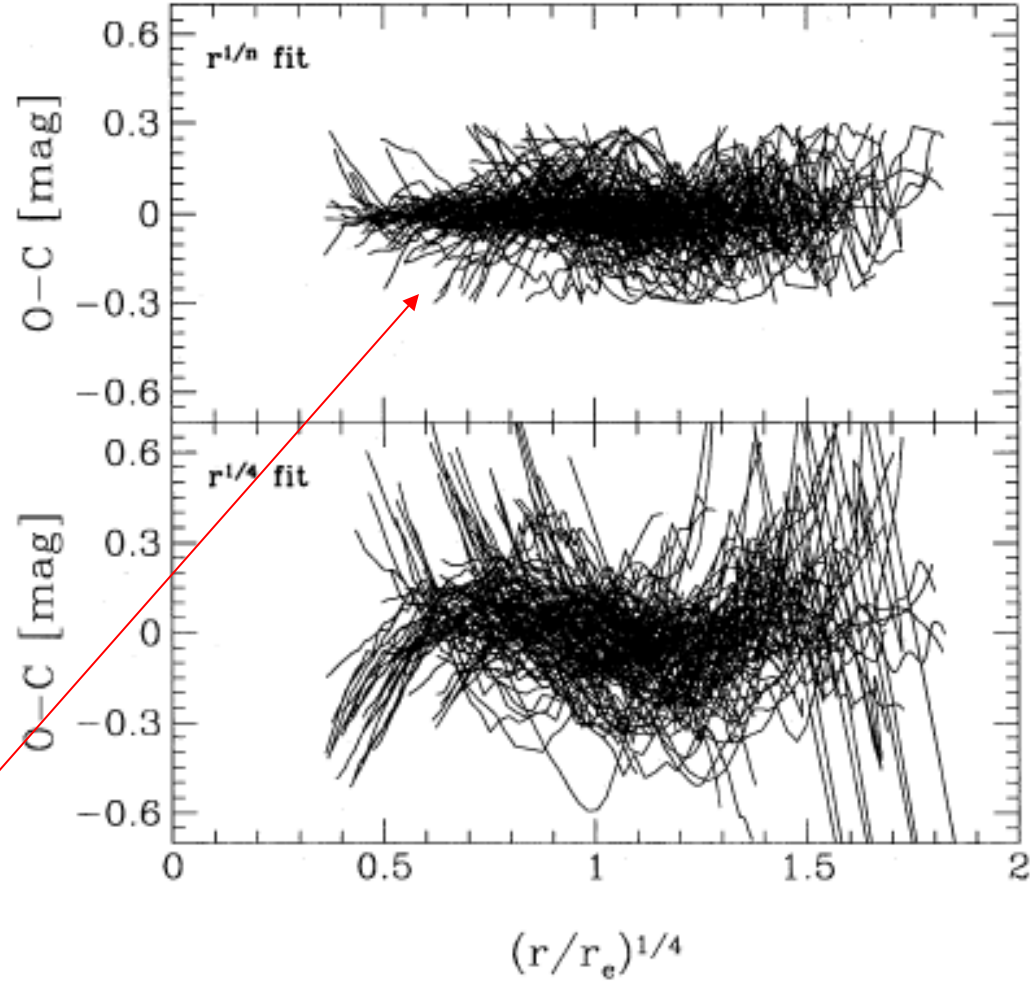


Figure 2. Radial run of the (O−C) residuals (in magnitudes) for the fit of the *B* light profiles of our Virgo galaxies (Table 2) with the $r^{1/n}$ law (upper panel) and with the de Vaucouleurs law (lower panel); the abscissa is the reduced galactocentric distance $(r/r_e)^{1/4}$.

Observe que o perfil de de Vaucouleur tem uma estrutura de resíduo que parece oscilar com a distância. Qual é o significado desta oscilação para o comportamento gráfico do perfil radial?

Recentemente este método foi aplicado por Longhetti et al para descrever com sucesso a distribuição de brilho de galáxias elípticas em z=1,5 (2007, MNRAS, 374, 614) mostrando que o perfil de brilho das elípticas já estava bem estabelecido a cerca de 4,3 Ganos após o big-bang.

Consulte algum livro sobre cosmologia e descubra qual a fração da idade do Universo transcorrida desde a formação das galáxias até z=1,5 no modelo ΛCDM. Compare esta escala de tempo com o tempo de cruzamento de uma estrela típica da galáxia (tcr=R/σv).

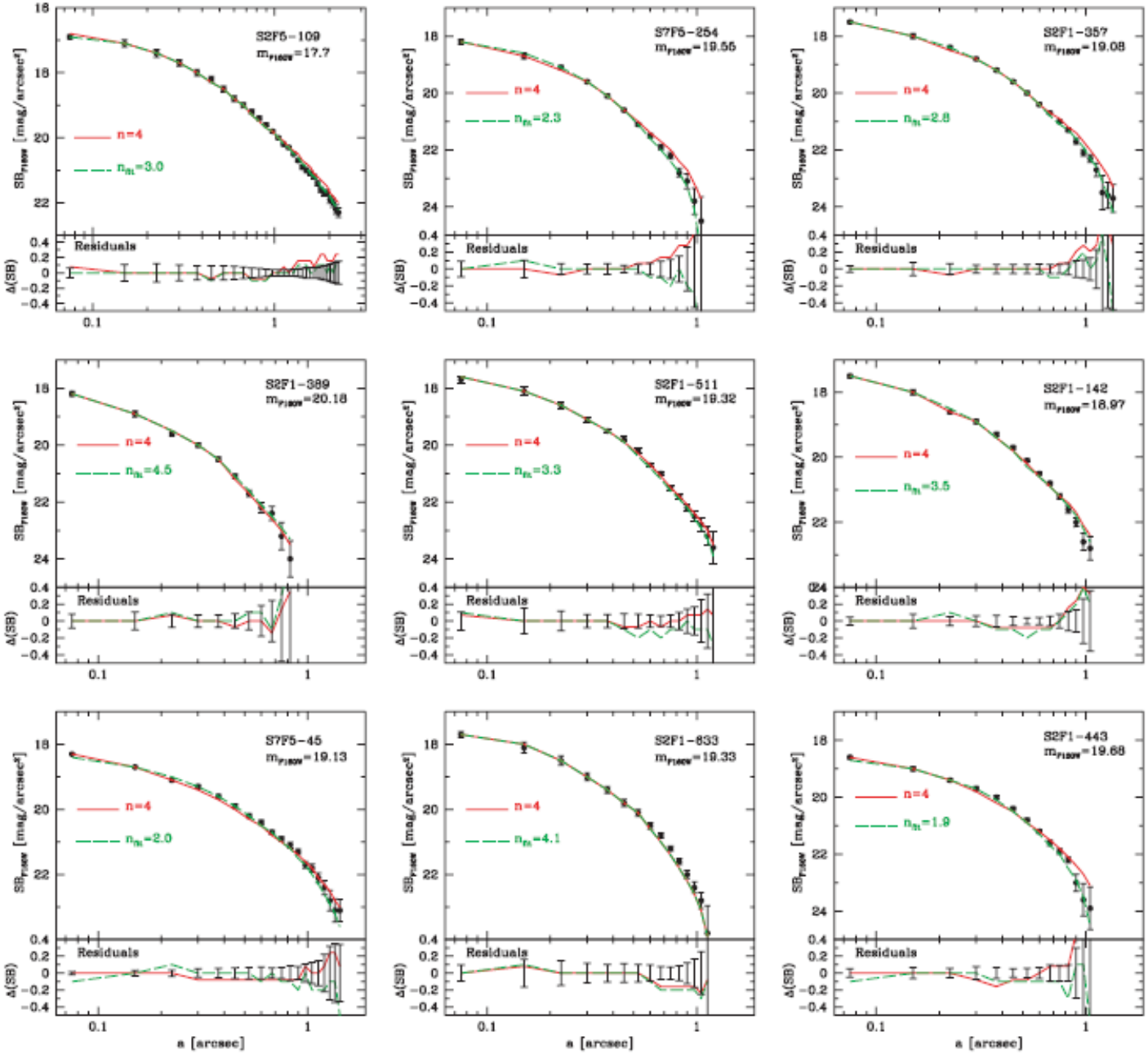
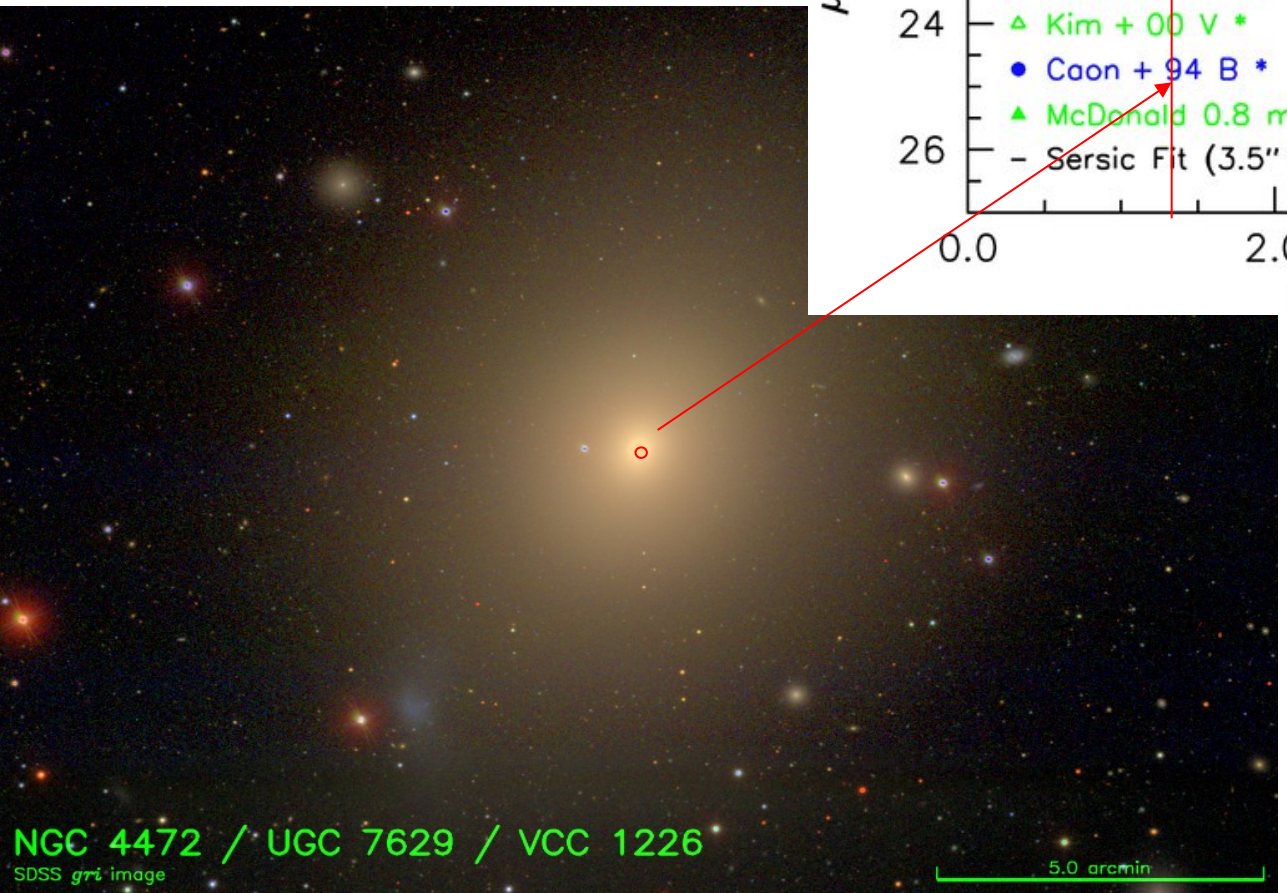
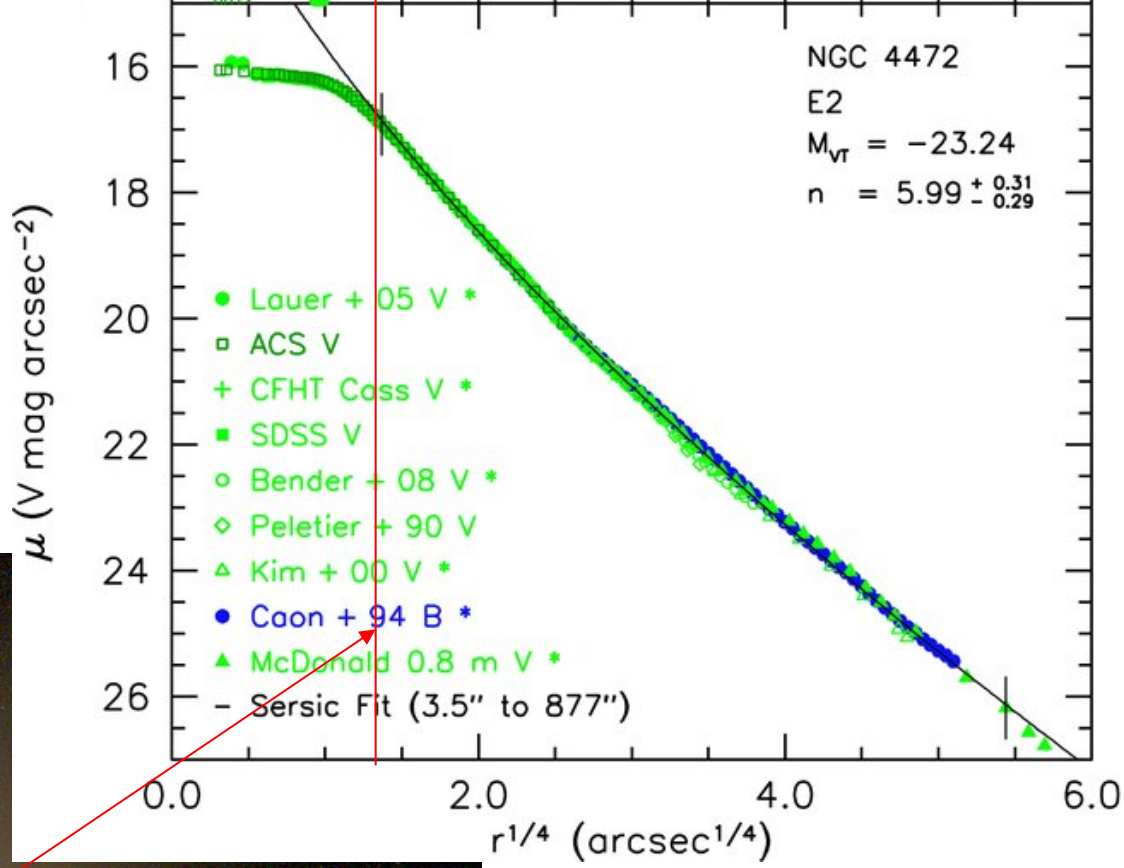


Figure 2. In the upper panels of each figure, the SB in the F160W band measured along the galaxy major axis of each galaxy (data points) is compared with the de Vaucouleurs ($n = 4$, solid/red line) and the Sérsic (n_{fit}, dashed/green line) profiles resulting from the fitting. The NIC2 pixel scale is 0.075 arcsec pixel^{-1}. In the lower panels the residuals of the fitting obtained as the difference between the data points and the models are shown. The formal 1σ error bar on the data points are shown for comparison.

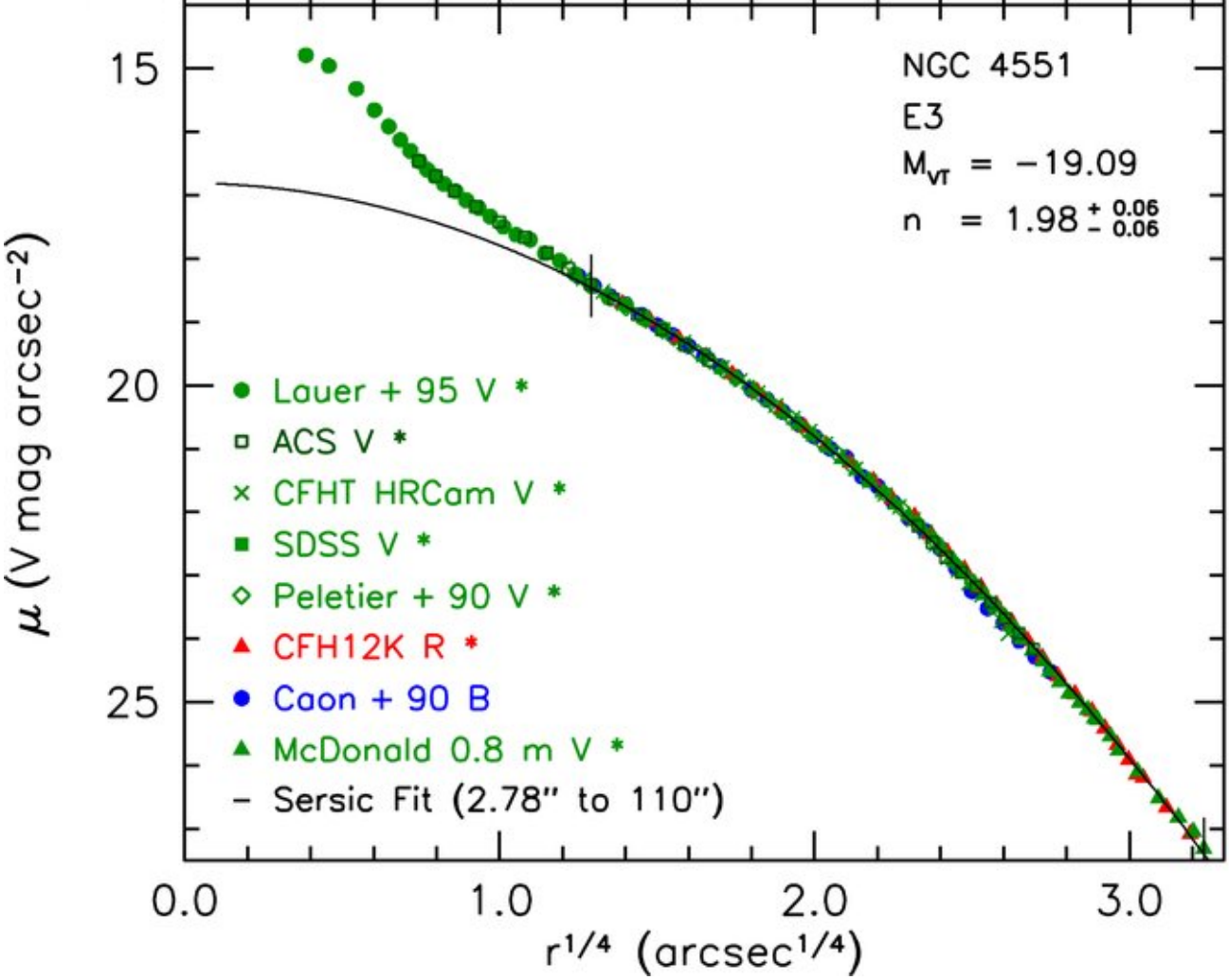
Uma análise recente (Kormendy et al, 2009, ApJSS, 182, 210), utilizando observações de alta resolução espacial, mostrou que os objetos mais brilhantes que (M_B< -21,66) seguem a lei de Sérsic mas tendem a apresentar no núcleo uma estrutura de caroço central (core).

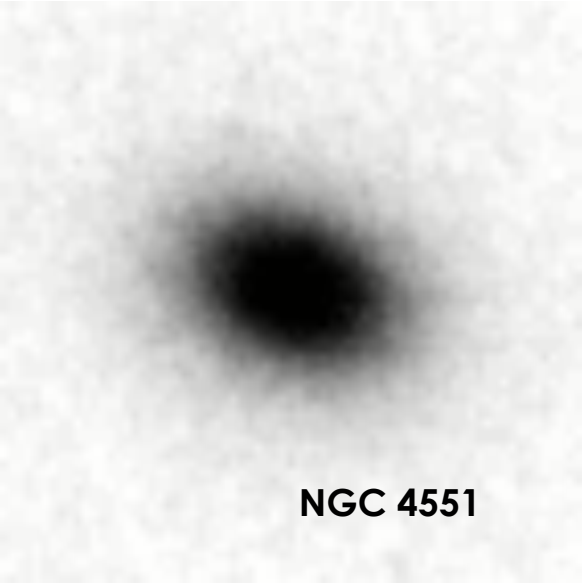




Sabendo que a distância de NGC 4472 é cerca de 16,063 Mpc estime a dimensão do caroço em parsecs. Estime a luminosidade que falta neste caroço quando o comparamos com o perfil de Sérsic, em unidades solares ($M_{V\odot}$=4,80). O que voce acha que poderia ter ocorrido com estas estrelas?

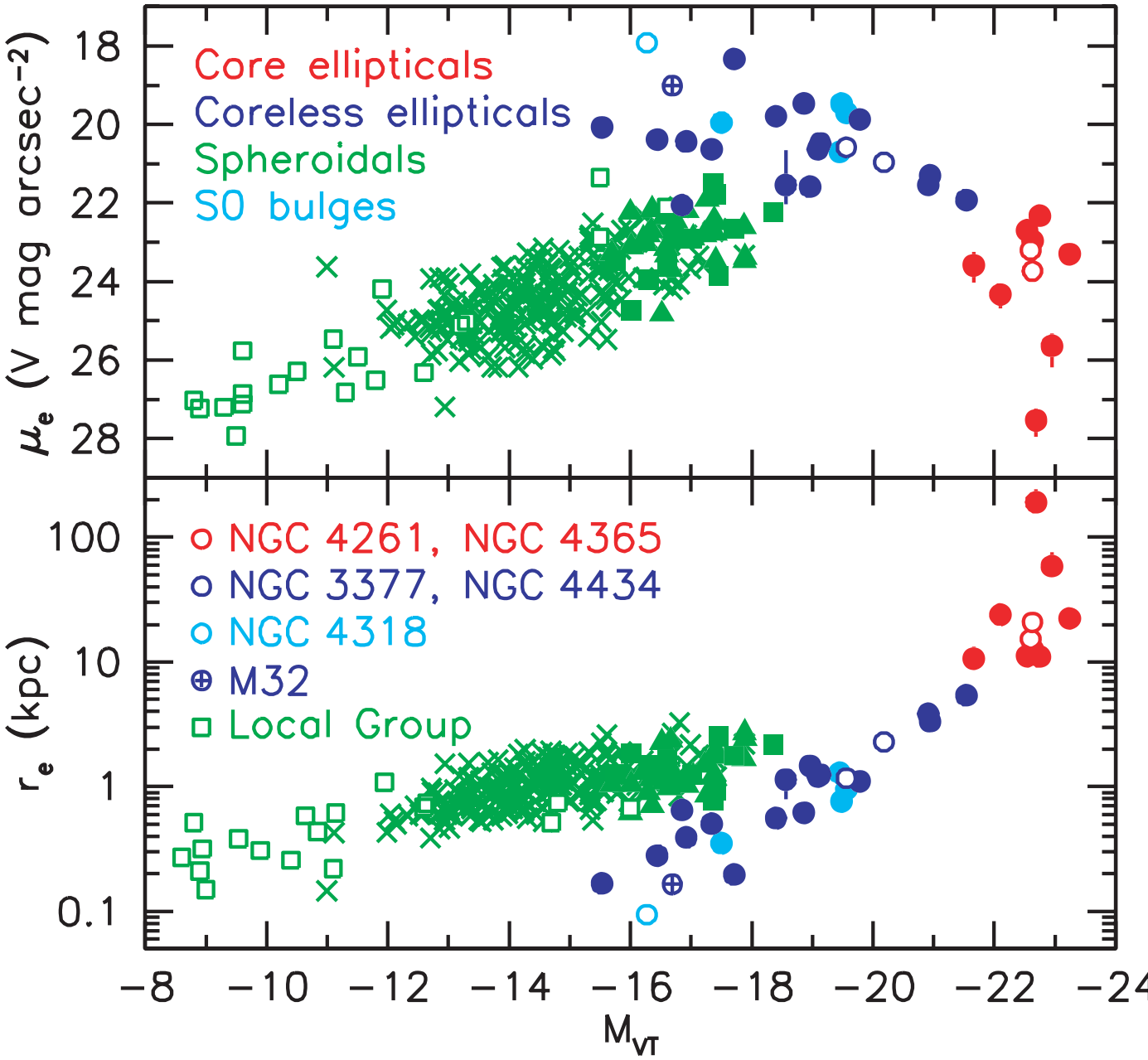
Ao contrário os objetos menos brilhantes como NGC 4551 também seguem a lei de Sérsic mas tendem a apresentar no núcleo um perfil do tipo cuspy, com um excesso de brilho na região central. Muito provavelmente estas diferenças podem estar associadas à presença de buracos negros massivos nas elípticas com perfil do tipo core.





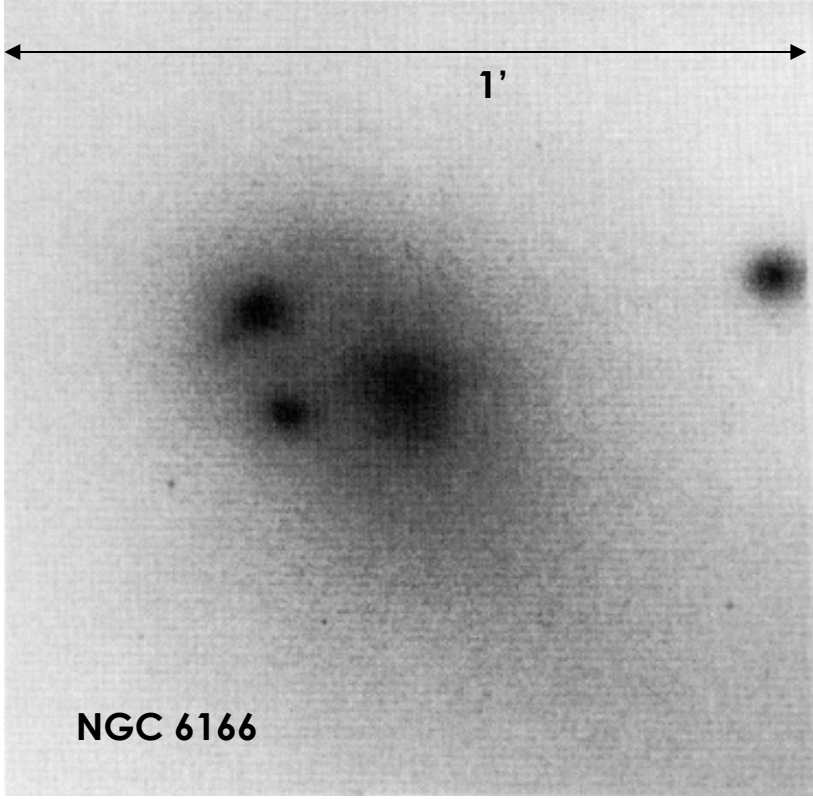
Faça uma estimativa do excesso de luminosidade deste perfil cuspy em unidades solares. (A distância de NGC 4551 é igual a 17,292 Mpc)

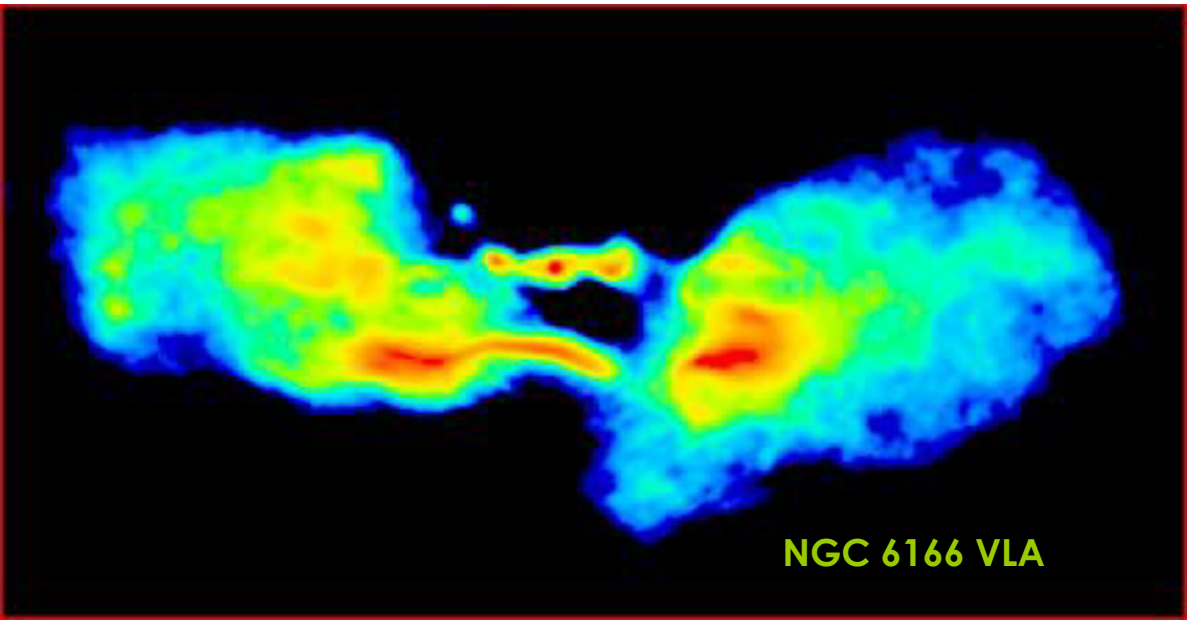
Nesta figura podemos observar claramente a distinção entre a sequência dos bojos e as galáxias elípticas que apresentam um núcleo central. Observe como os bojos compartilham a mesma região ocupada pelas galáxias elípticas sem caroço central!



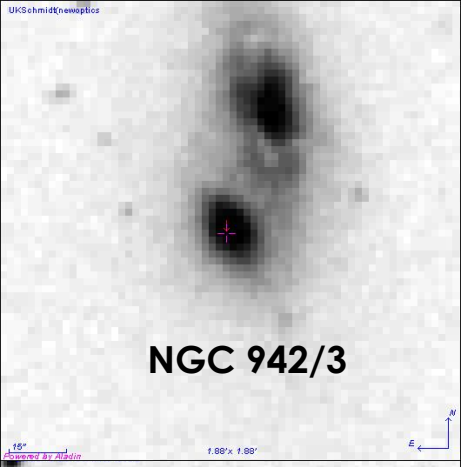
5.2 Distorções e Assimetrias

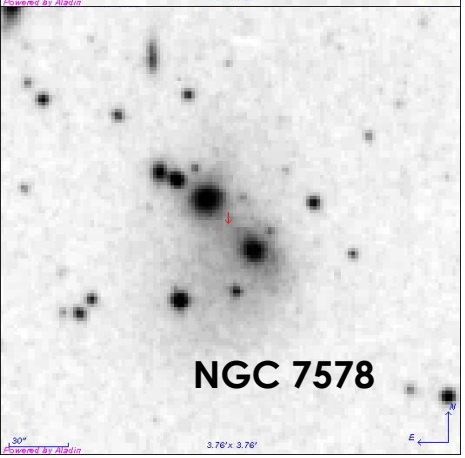
Algumas galáxias elípticas, em contraste com a vasta maioria dos outros objetos, apresentam distorções possivelmente associadas com interações ocorridas no passado. NGC 6166, por exemplo, é a galáxia cD central do aglomerado A2199 e apresenta um núcleo múltiplo. Esta estrutura é provavelmente o resultado de um processo de captura em andamento em que a galáxia cD está destruindo a estrutura das duas galáxias capturadas como se vê na imagem abaixo obtida no VLA.





Quanto tempo você acha que este processo de captura deve demorar?





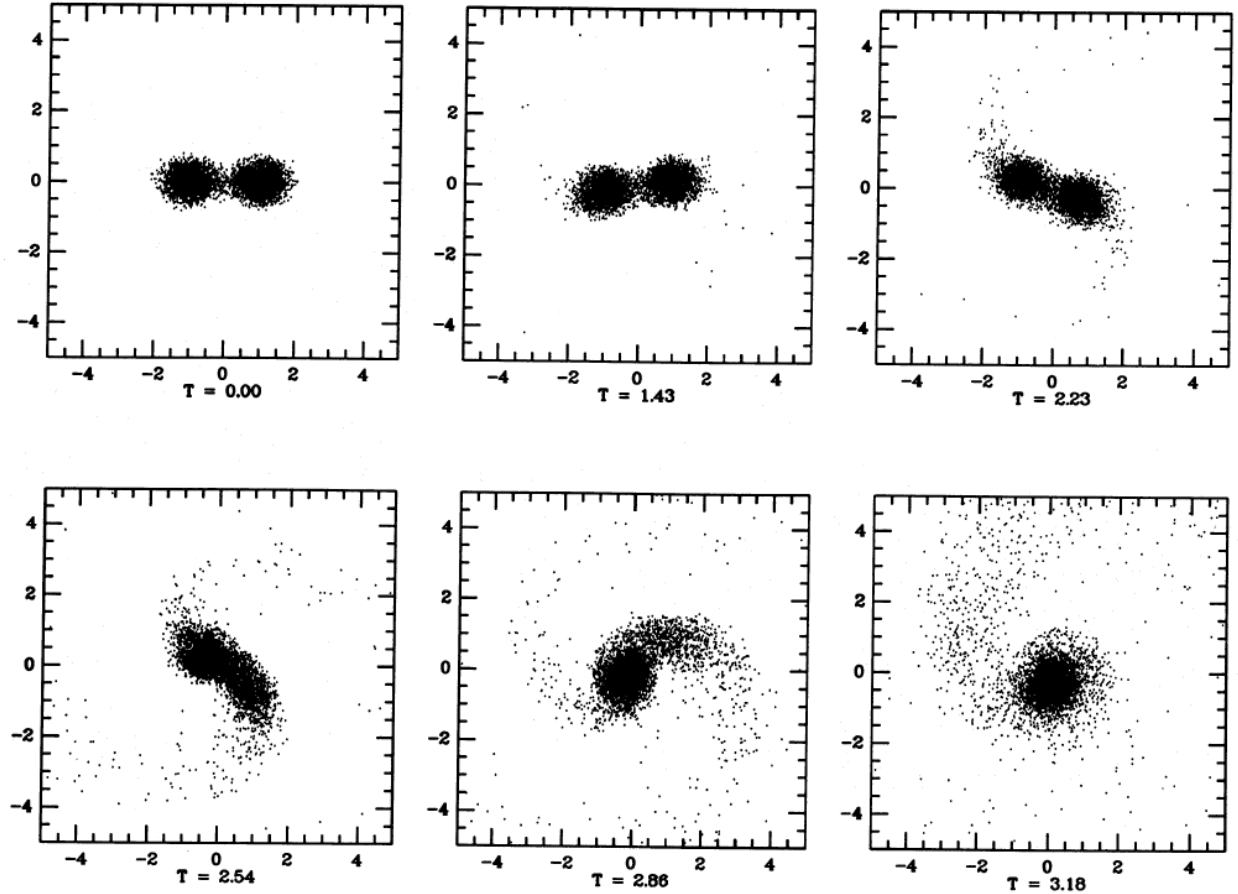
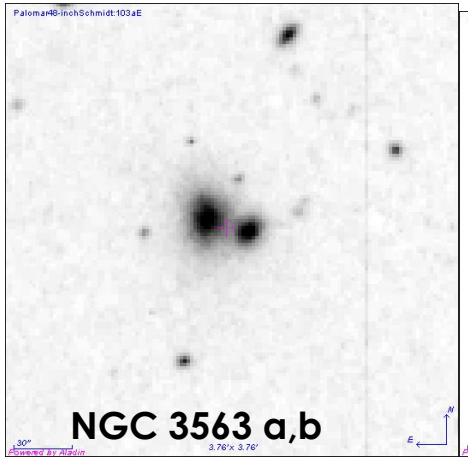
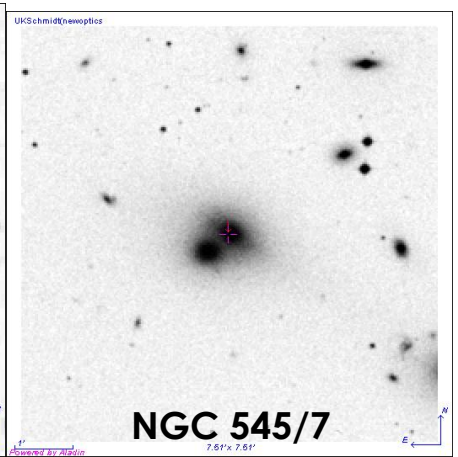


Figure 6. The six panels show the time evolution of the model $n = 1.5$, $s = 1.0$ projected on to the orbital plane. The times given below each frame are in units of the initial rotation period $2\pi/\Omega$. Note the strong asymmetry in the final stages of the collapse. This effect is due to the amplification of small asymmetries which were introduced by noise at the beginning of the mass loss phase.

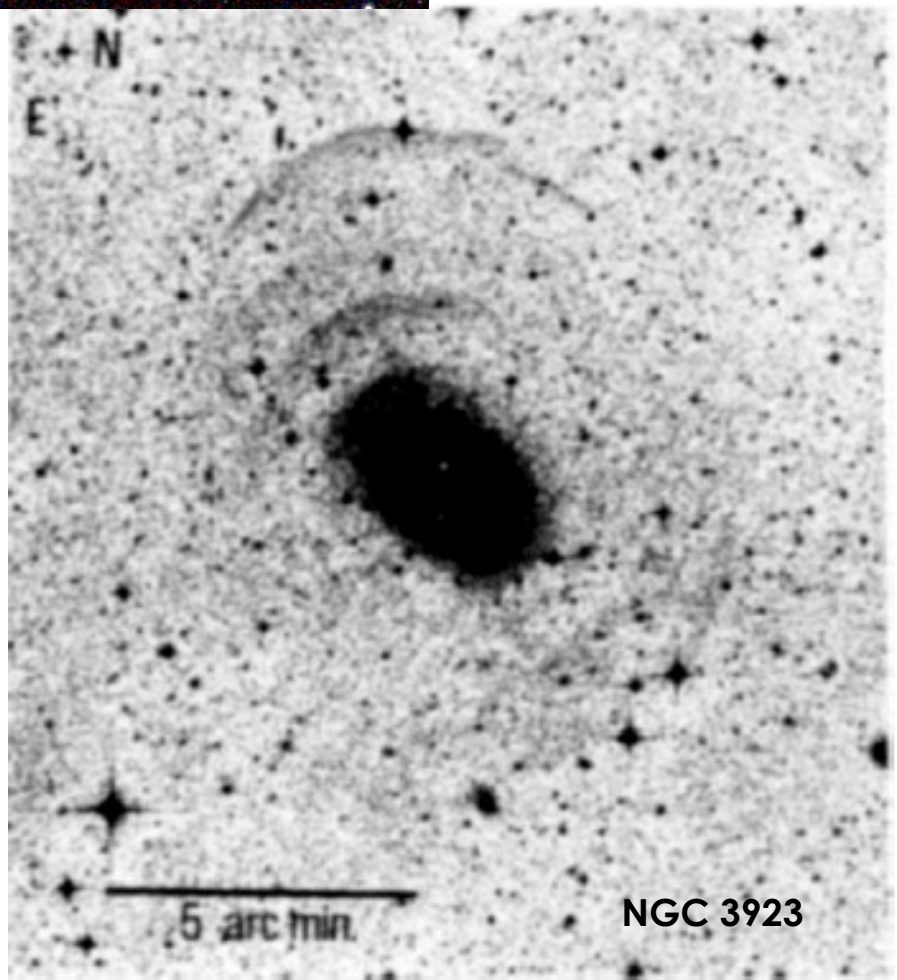
Outro caso interessante são as galáxias do tipo dumb-bell em que dois objetos de massas comparáveis, usualmente no centro de grupos e aglomerados, são flagrados durante o processo de fusão como indicam as simulações de Rix&white (1989, MNRAS, 240,941) .



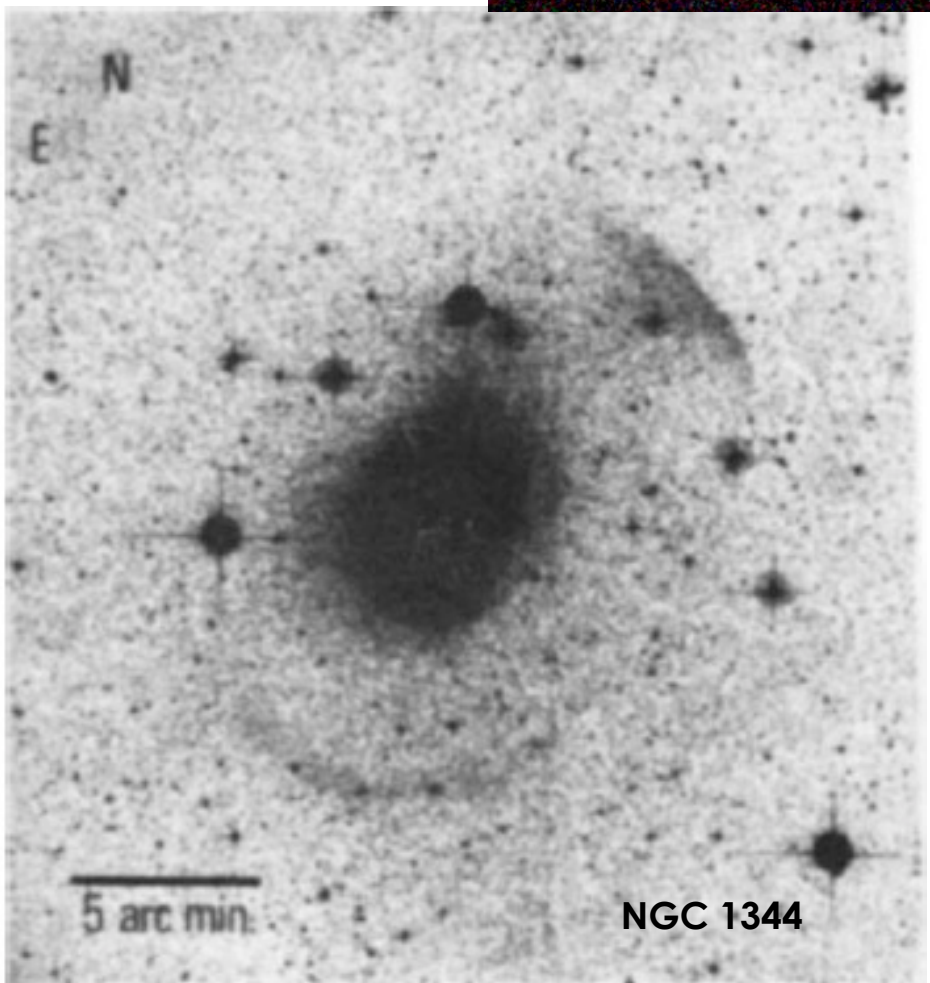


Estime a escala de tempo para completar o processo de fusão para uma galáxia com Vrot~150 km/s e R~20 Kpc.

Em outros casos é possível detectar camadas e anéis em torno das galáxias (Malin & Carter, 1980, Nature, 285,26) provavelmente sinalizando a formação estelar em conchas formadas por ondas de choque.

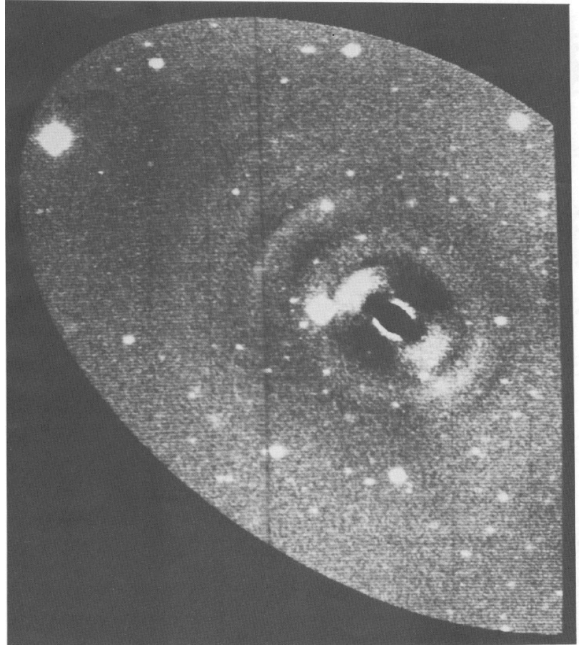


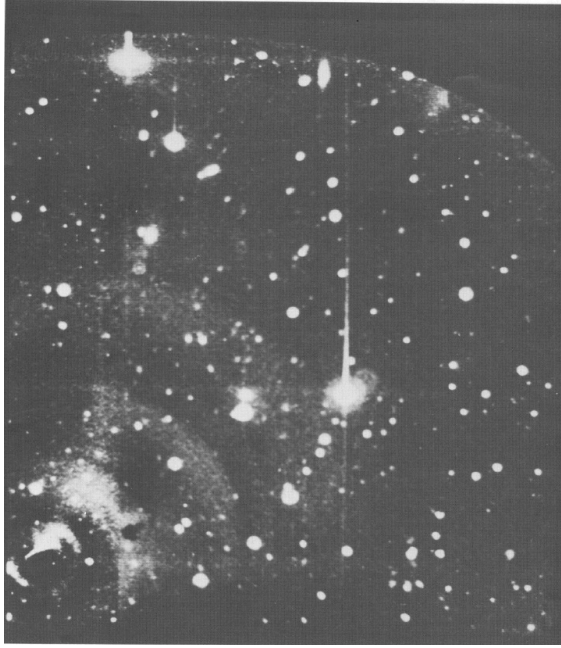
NGC 3923

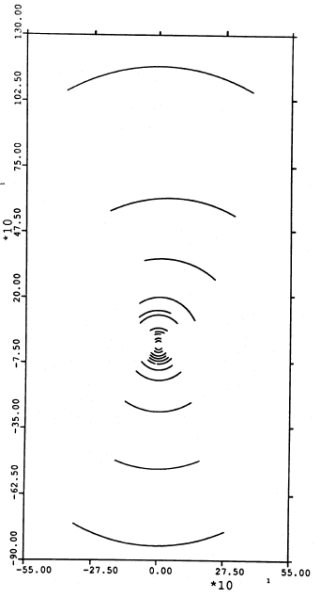


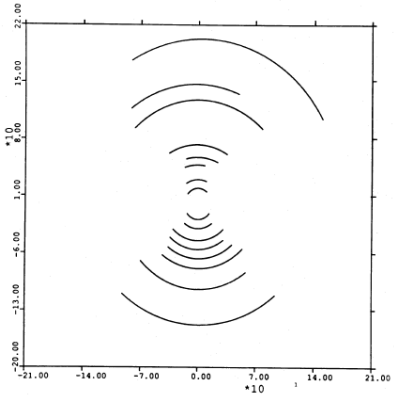
NGC 1344

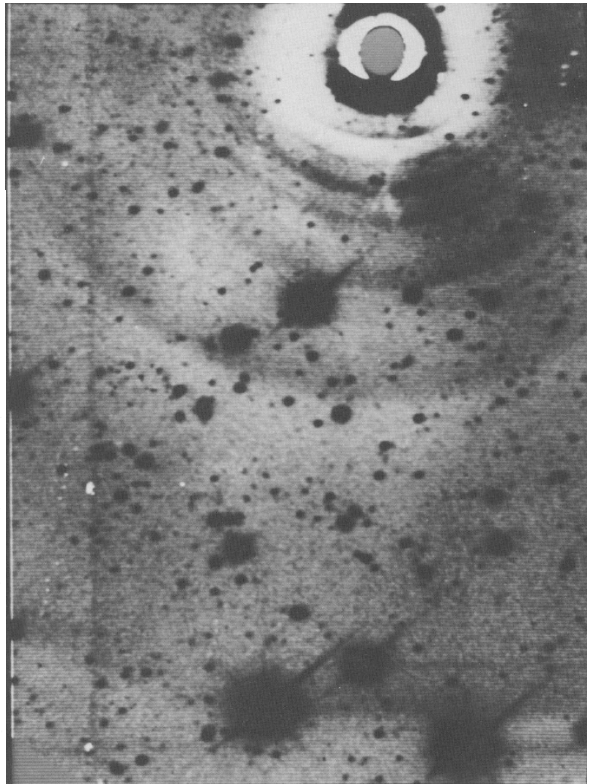
No caso particular de NGC 3923 um estudo de Prior (1988, ApJ, 326, 596) detectou a presença de pelo menos 22 estruturas de camadas. As camadas mais internas estão a cerca de 3Kpc e as mais afastadas a cerca de 95 Kpc do centro da galáxia.

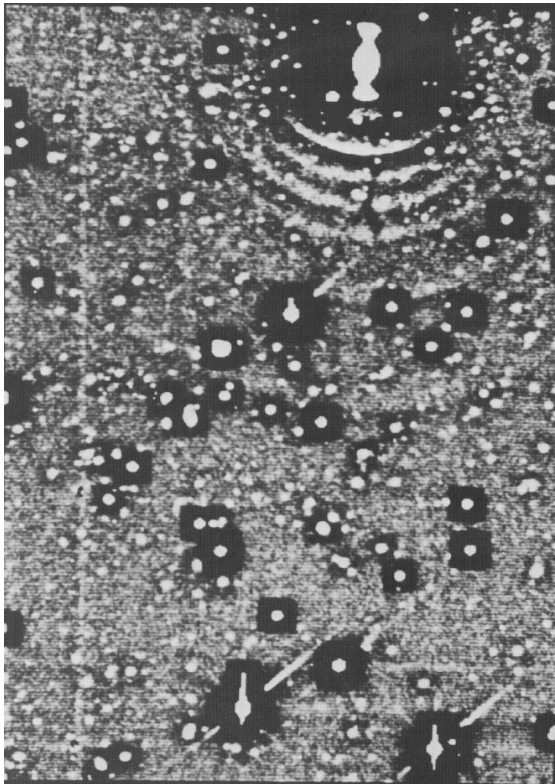




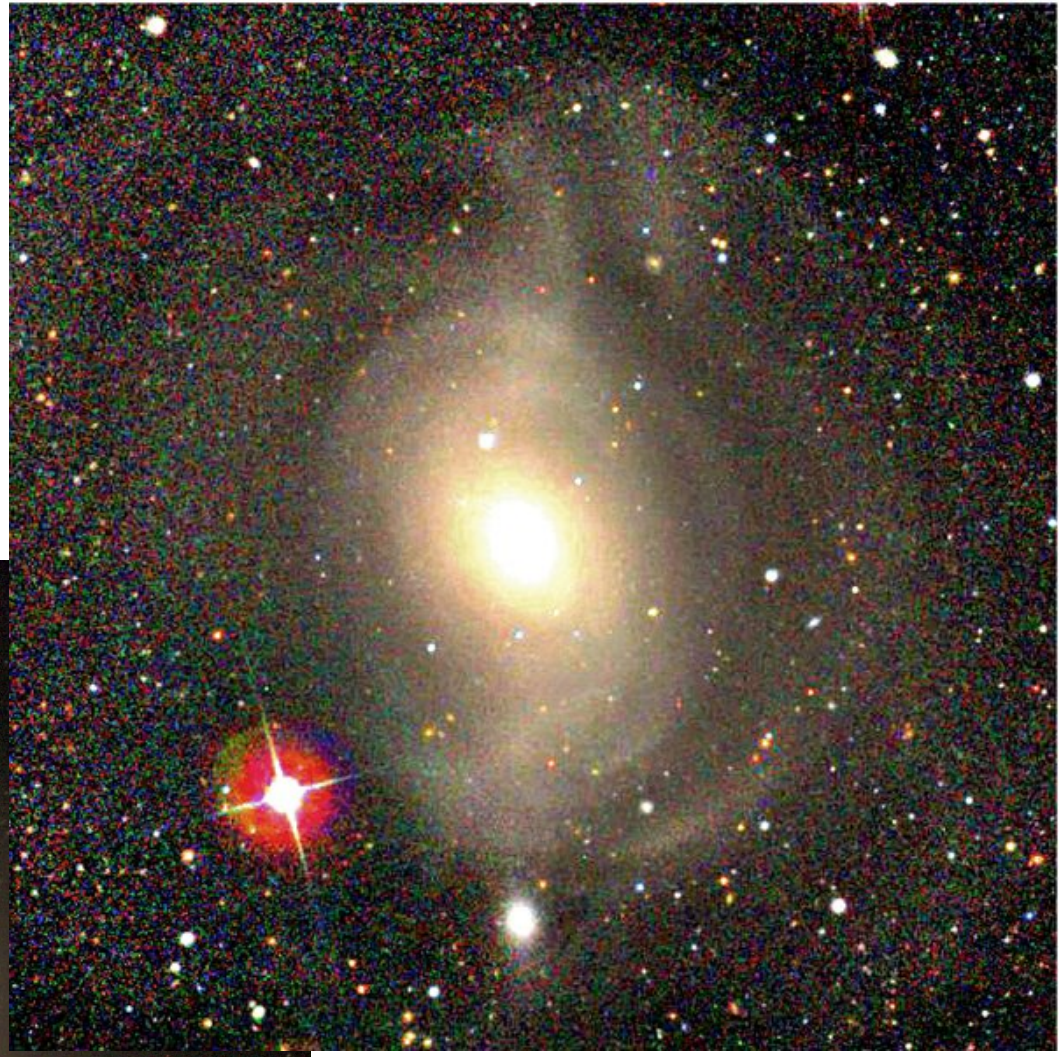


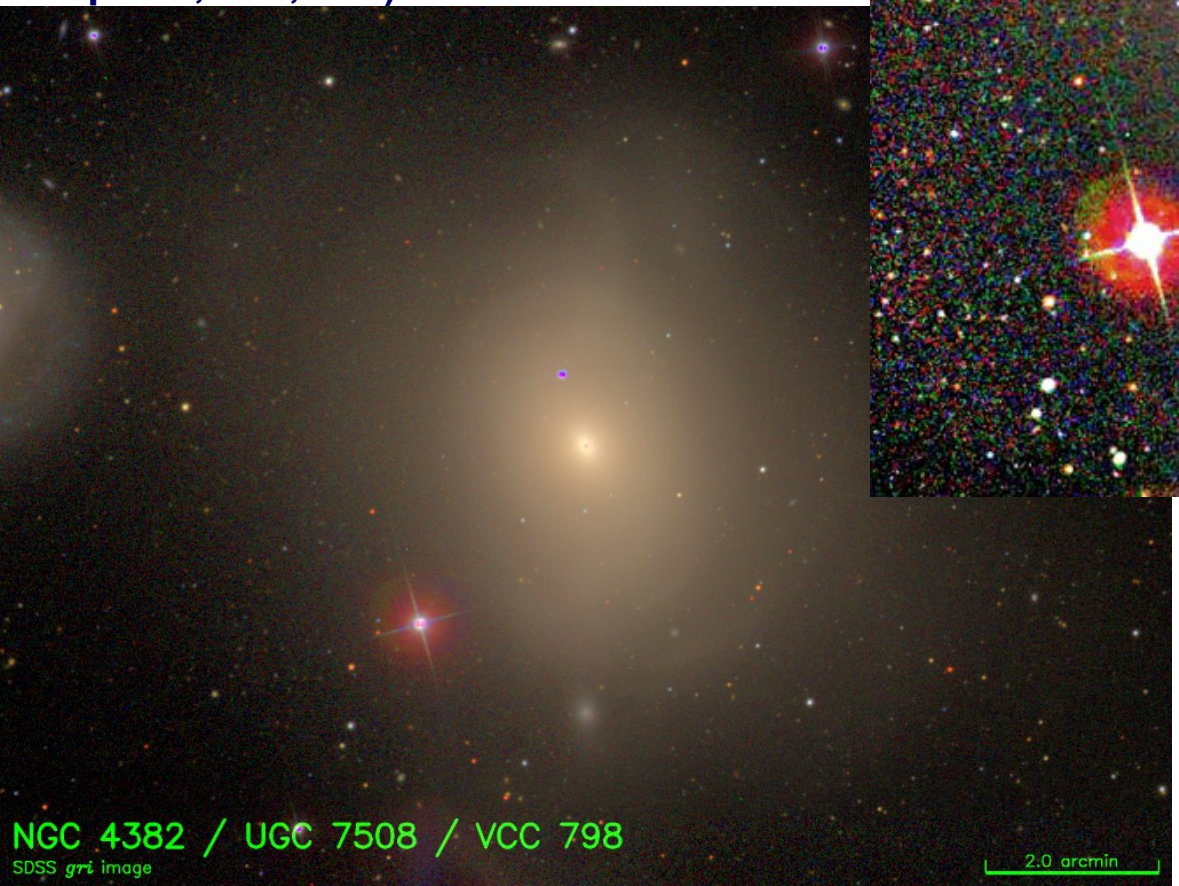




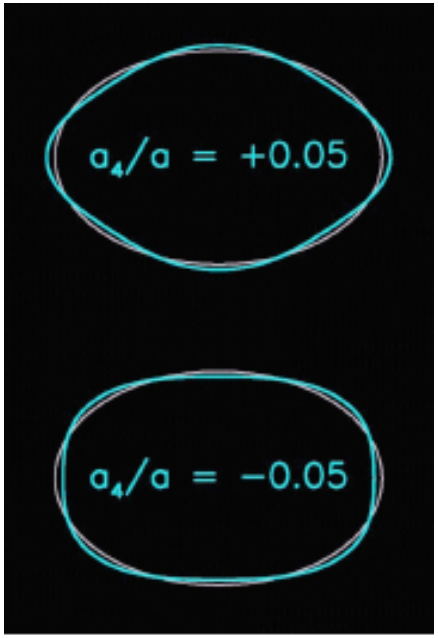


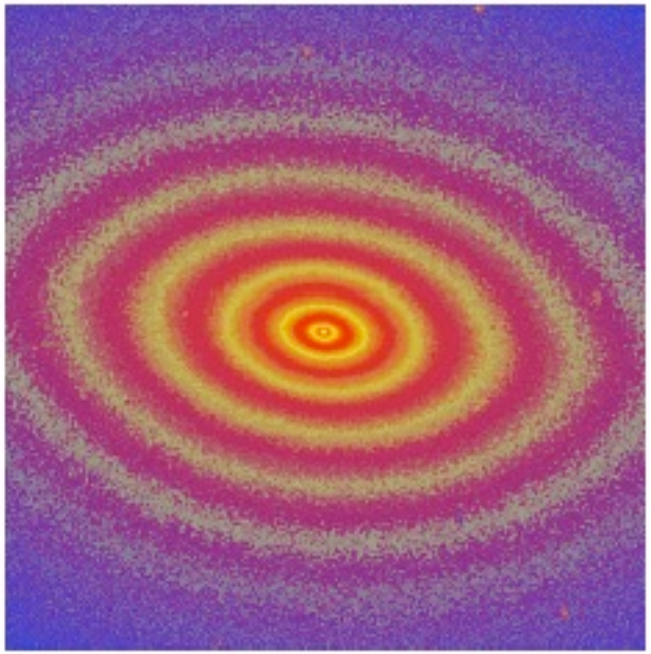
NGC 4382 é um exemplo de objeto que apresenta uma subestrutura bastante nítida ressaltada na imagem composta ao lado. A interpretação é que talvez este objeto tenha sofrido uma processo recente de fusão e ainda não conseguiu atingir uma distribuição de massa relaxada típica das elípticas normais (Kormendy et all, 2009, ApJSS, 182, 216).



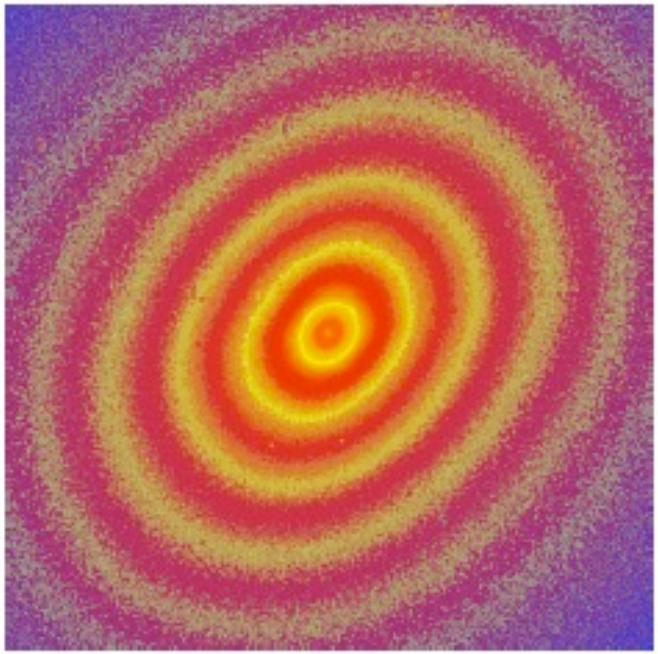


Além de algumas características patológicas mencionadas acima a maioria das galáxias elípticas apresenta uma distorção mais sutil na forma das suas isofotas. Ao contrário do que se acreditava no passado as isofotas não são elipses perfeitas. Uma elipse perfeita é descrita por uma curva de segundo grau em senos e cossenos. É possível, no entanto, construir curvas mais gerais incluindo termos de quarta ordem. Estas curvas podem ser classificadas pela amplitude do termo a_4 em isofotas do tipo disco ($a_4>0$) ou do tipo caixa ($a_4<0$). O caso da elipse se recupera quando $a_4=0$. A vasta maioria das elípticas são ou do tipo disco ou do tipo caixa. Acredita-se que as elípticas do tipo disco têm esta forma graças à presença de um pequeno disco interno.





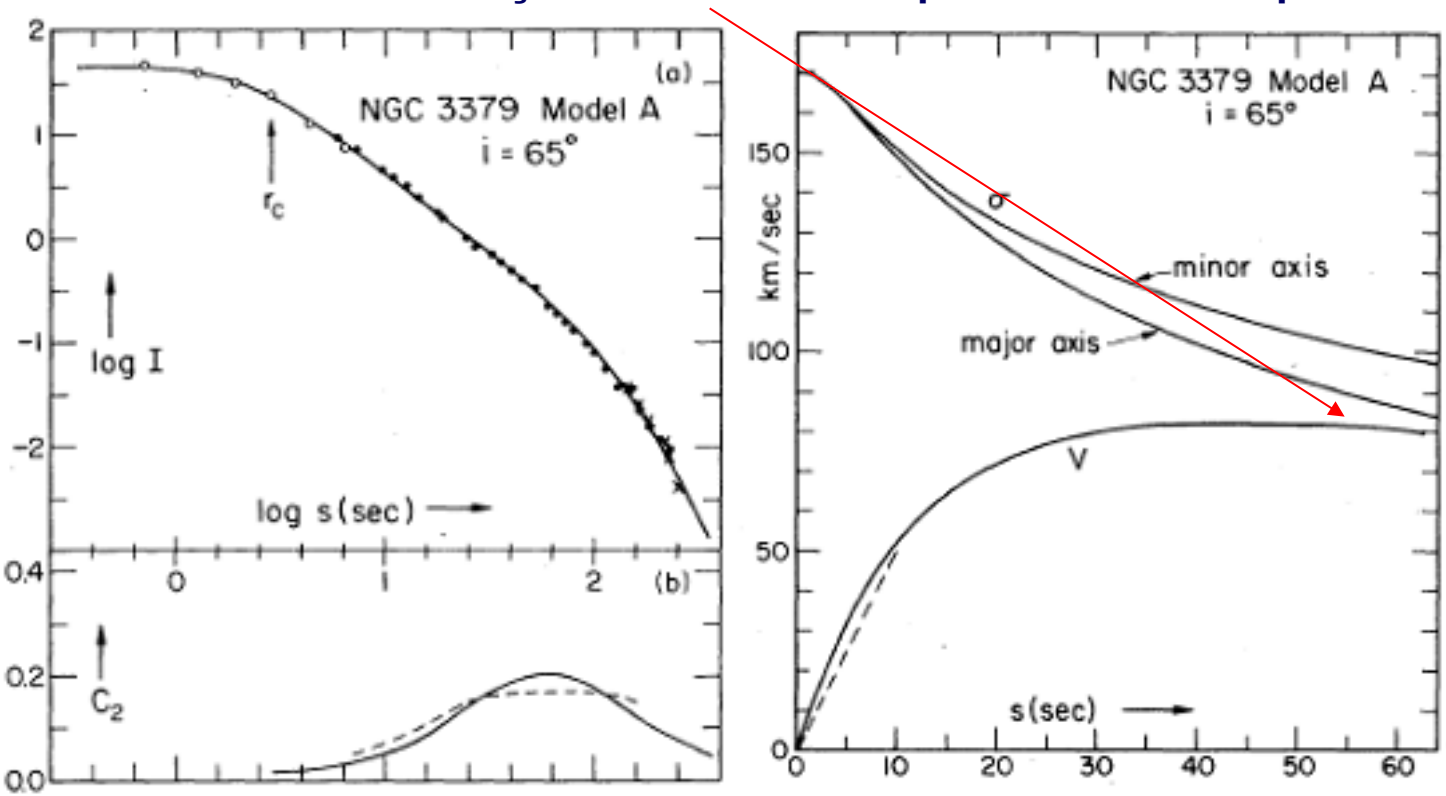
NGC 821: a_4/a ~ +0.02, disky

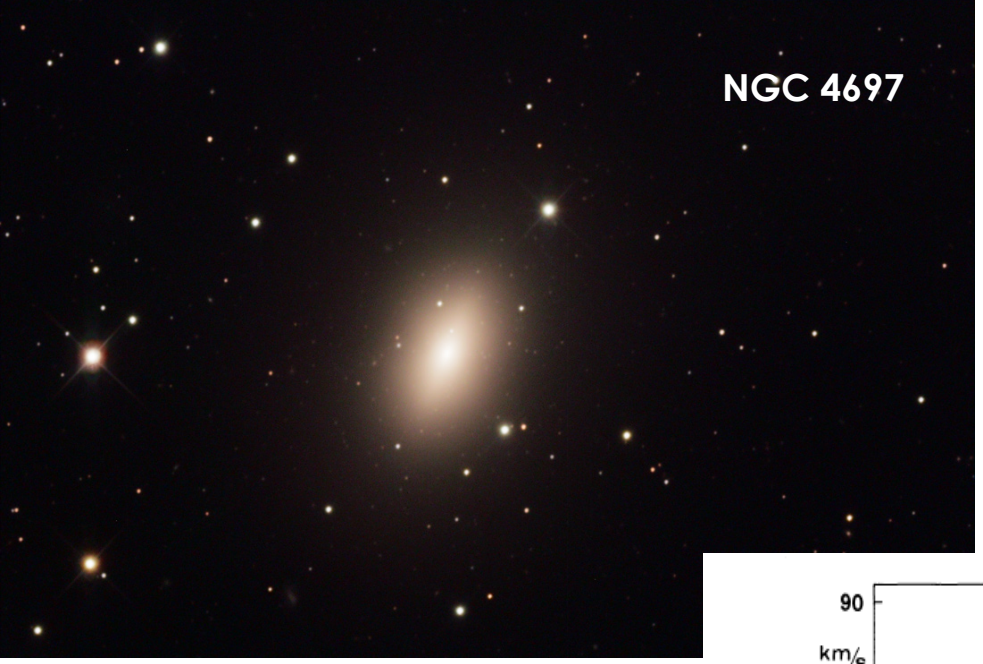


NGC 2300: a_4/a ~ -0.02, boxy

5.3 Velocidade de Rotação

Sabe-se hoje que as galáxias elípticas apresentam velocidades de rotação que são insuficientes, no entanto, para prover a sustentação dinâmica destes objetos como ocorre nos discos das espirais. Inicialmente pensava-se o contrário e em 1975 Wilson (1975, AJ, 80, 175) construiu uma série de modelos isotrópicos autoconsistentes, baseados na concepção de King, satisfazendo simultaneamente a equação de Poisson e as equações hidrodinâmicas para um sistema não colisional. Para que este modelo fosse estruturalmente estável tornava-se necessário incluir uma dispersão interna na velocidade das estrelas e também uma rotação do sistema comparável com a dispersão de velocidades.





Porque a velocidade de rotação depende da orientação do objeto em relação à linha de visada?

No entanto um resultado surpreendente surgiu, ainda em 1975, quando Bertola & Capaccioli (1975, ApJ, 200, 439) mostraram que a galáxia elíptica NGC 4697 não apresentava uma velocidade de rotação tão importante quanto indicavam os modelos autoconsistentes de Wilson. Curiosamente este objeto apresenta uma dispersão interna de velocidades da ordem de 200 km/s e uma velocidade de rotação de somente 60 km/s!

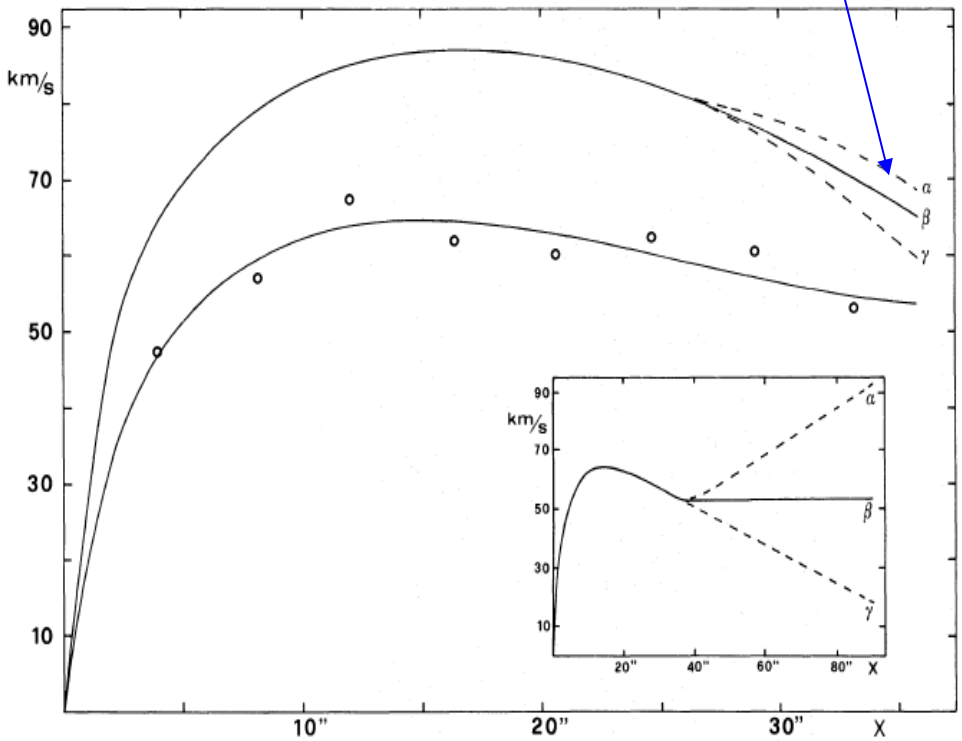


FIG. 2.—The lower curve represents the projected velocity of rotation $\langle\theta(x)\rangle$ along the major axis (P.A. 65°) of the elliptical galaxy NGC 4697. Open circles are means of the measurements from five spectra. The upper curve gives the rotational velocity $\theta(r)$ computed from equation (1) assuming that the galaxy is seen edge-on ($i = 90°$). The use of different extrapolations of $\langle\theta(x)\rangle$ (see the inset) on the computation of $\theta(r)$ affects only the outer part of the rotational velocity curve.

Em 1978 Binney (1978, MNRAS, 183, 501) mostrou que o fenômeno apontado por Bertola & Cappacioli era muito mais comum do que se imaginava antes. A figura abaixo ilustra este efeito ao comparar a velocidade de rotação com a dispersão de velocidades (V_r/σ) para uma série de elipsóides oblatos e triaxiais uniformes. Em um elipsóide isotrópico as dispersões de velocidades ao longo dos três eixos são idênticas ($\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z$) e constitui o modelo mais simples, e que se imaginava no passado ser o mais correto. Caso contrário temos um elipsóide não isotrópico. Como podemos observar pela figura é impossível descrever as elípticas como elipsóides isotrópicos em rotação!

Modelos sustentados por rotação

Elipsóide oblato isotrópico

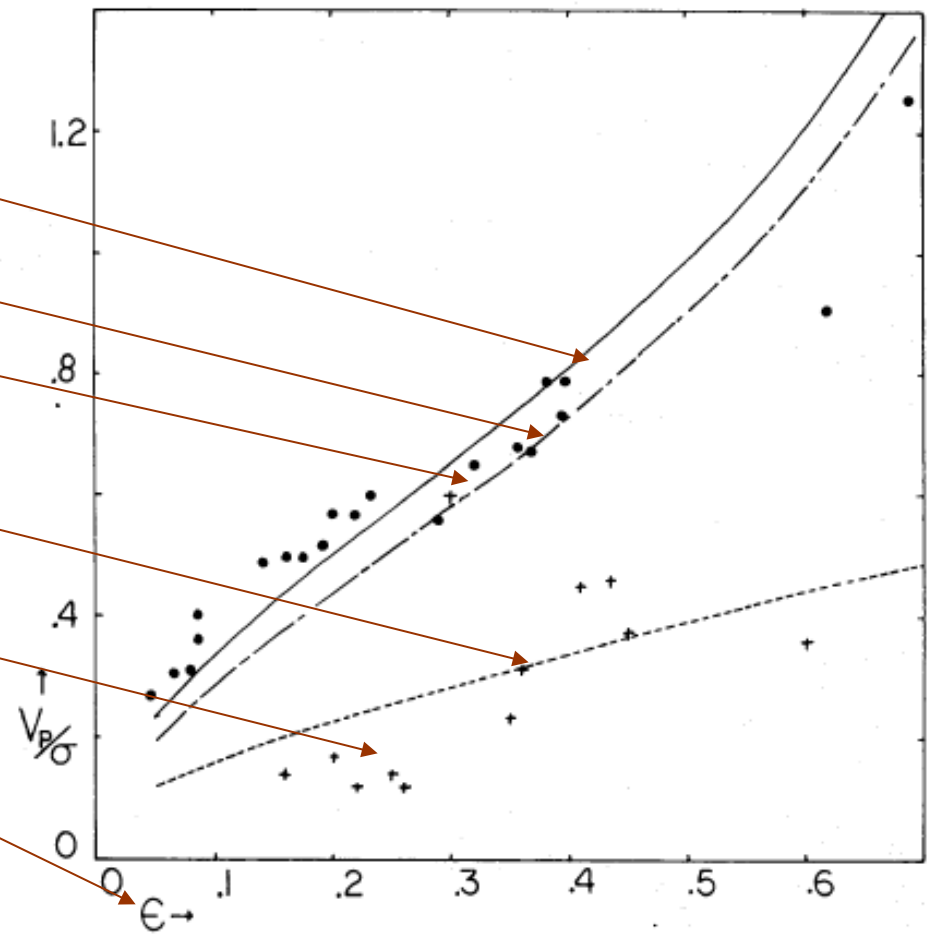
Elipsóide triaxial isotrópico

Modelos autoconsistentes isotrópicos

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

Galáxias elípticas gigantes

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



Quanto à forma é possível que as elípticas possam ser descritas tanto como elipsóides oblatos como por elipsóides prolatos anisotrópicos conforme ilustrado abaixo. No entanto, na opinião de Binney é mais provável que as galáxias elípticas sejam de fato elipsóides prolatos, ou mesmo triaxiais, já que estas formas reproduzem melhor a distribuição das elipticidade aparentes destes objetos, como vimos anteriormente.

De quantas formas diferentes pode girar uma galáxia elíptica?

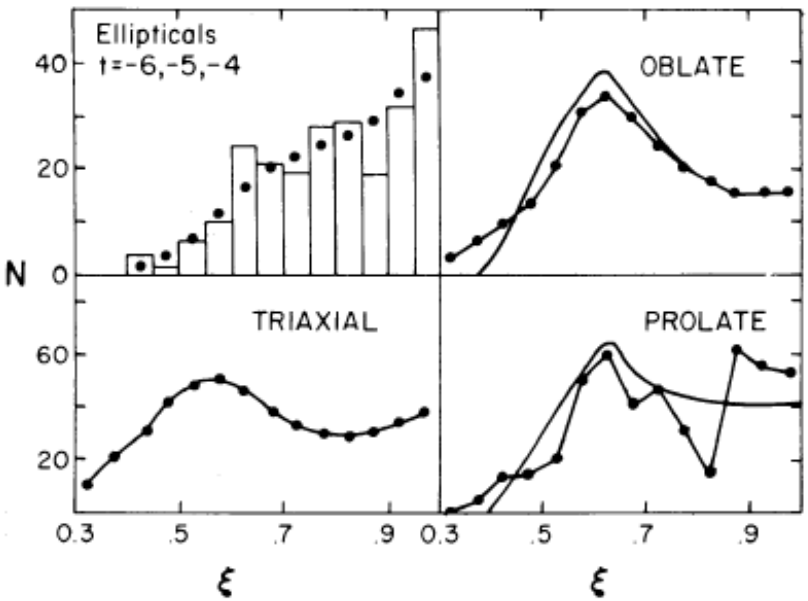
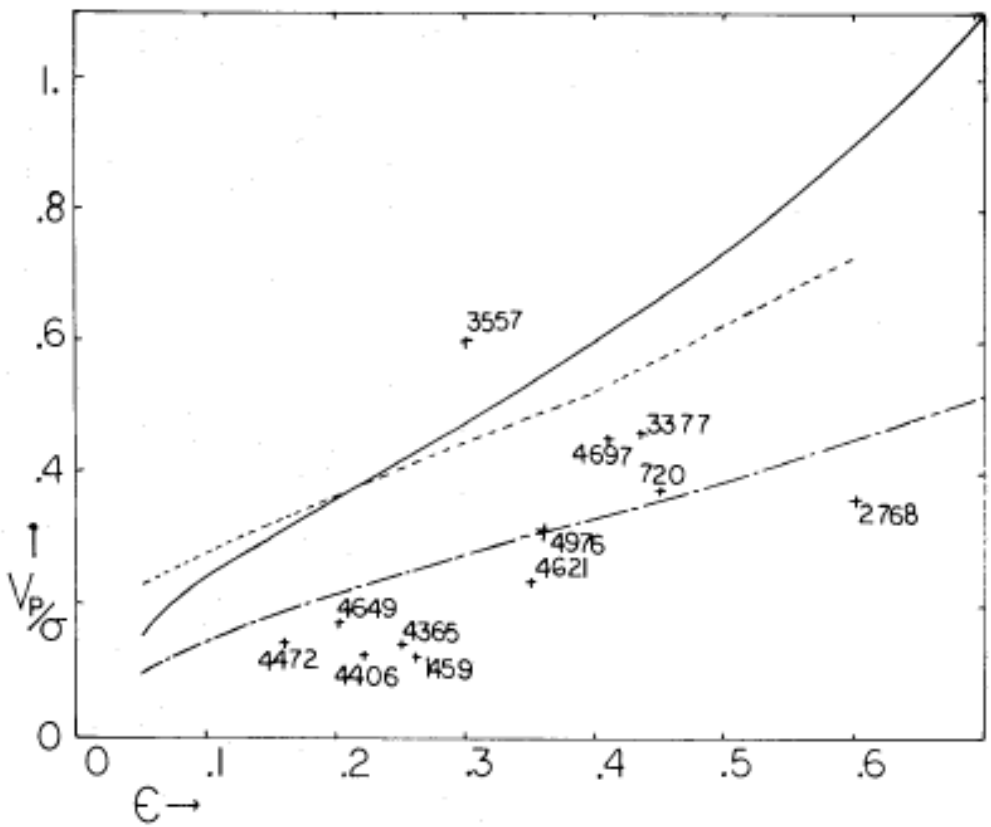
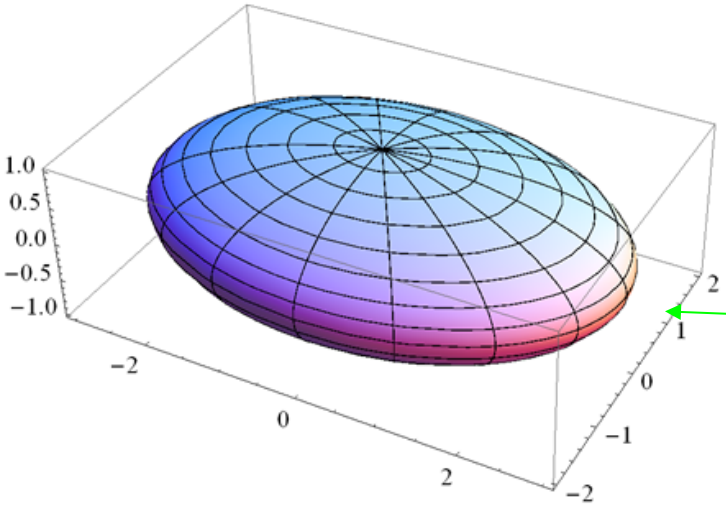


Table 3. Fits to data for elliptical galaxies.

Type	Free fit	
	χ^2/bin	P_{ks}
Oblate	0.84	0.72
Prolate	0.92	0.22
Triax	0.88	0.72



A determinação da real estrutura das galáxias elípticas ainda é uma questão em debate. O grande problema reside em descobrir a forma intrínseca de um elipsoide baseando-se apenas na sua forma aparente.



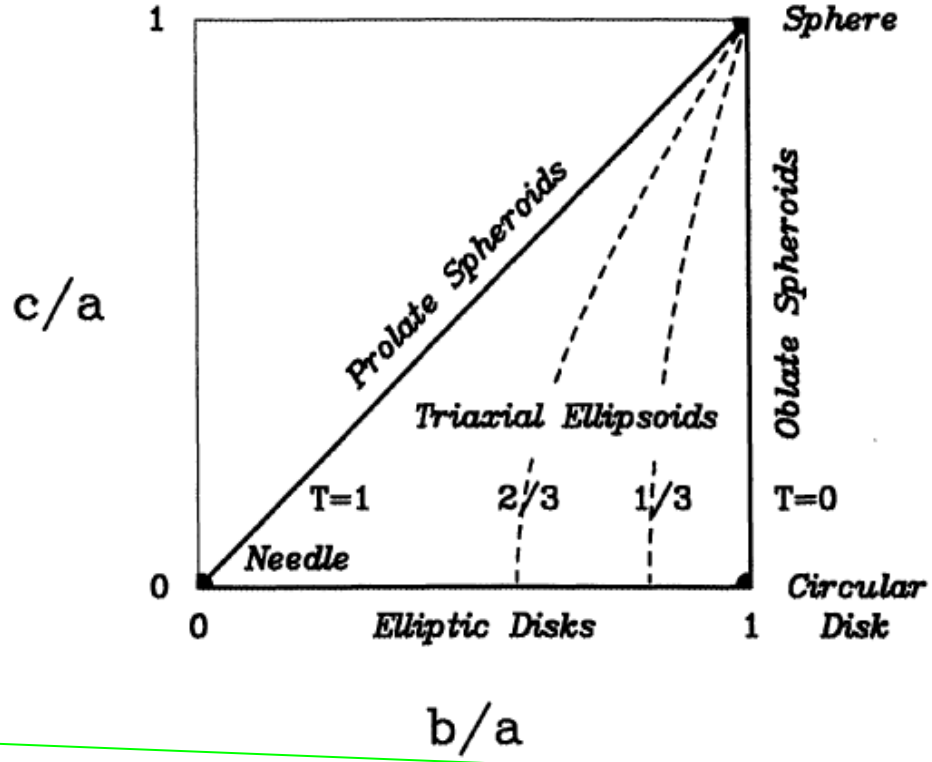
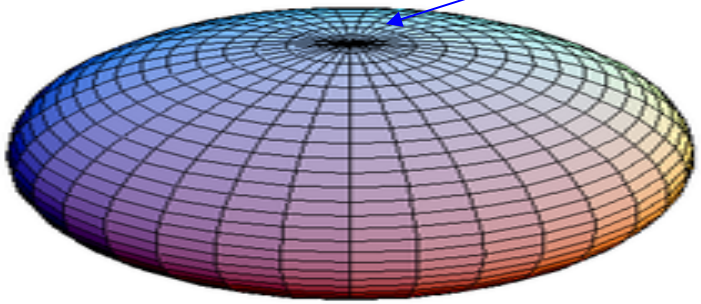
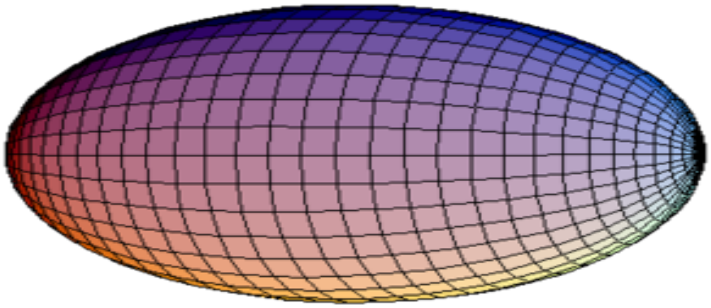


Figure 1 Ellipsoid Land: the plane of all possible axial ratios b/a and c/a for triaxial ellipsoids. The limiting cases with more symmetry are indicated. The *dashed lines* are curves of constant triaxiality T (see Section 3.4). Oblate spheroids have $T = 0$, prolate spheroids have $T = 1$.

Porque a natureza privilegiaria a forma de um elipsóide oblato se os elipsóide triaxiais representam soluções muito mais gerais?





Se as galáxias elípticas puderem ser descritas por elipsóides triaxiais não isotrópicos então deveria ser possível detectar variações sistemáticas na orientação isofotal destes objetos. E este efeito, pelo menos em alguns objetos, é de fato detectado.

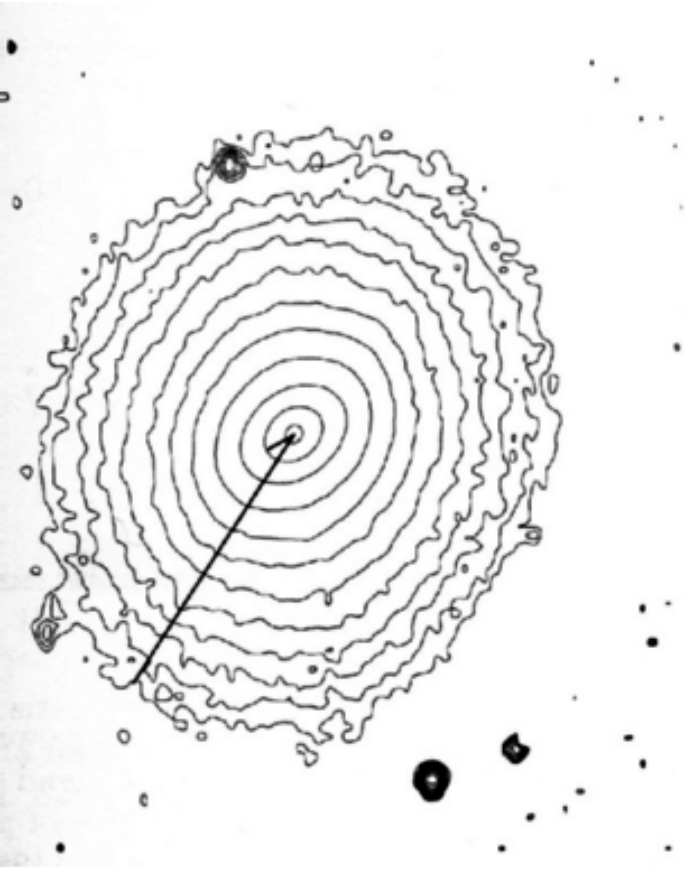


Figure 4.37 Isophotes (at $0.5\,\mu_r$ intervals) of the E3 galaxy, NGC 5831. The heavier lines indicate the semi-major axes of the ellipses that best fit the isophotes at two radii. These axes have lengths $a = 4$ arcsec and $a = 40$ arcsec. [From data kindly provided by R. Bender]

Será que a informação cinemática pode ser importante para discriminar a forma das galáxias elípticas?

O acúmulo de galáxias com curvas de rotação medidas permitiu a descoberta de uma importante diferença entre as elípticas e os bojos. Mesmo que as suas distribuições de brilho sejam semelhantes, já que ambas estruturas obedecem a lei de $r^{1/4}$, ficou evidente que, ao contrário das elípticas luminosas, os bojos, e as elípticas menos luminosas, podem ser descritos como elipsóides oblatos em rotação (Davies et al, (1983, ApJ, 266, 41).

Porque os elipsóides oblatos isotrópicos mais achatados necessitam apresentar maior velocidade de rotação?

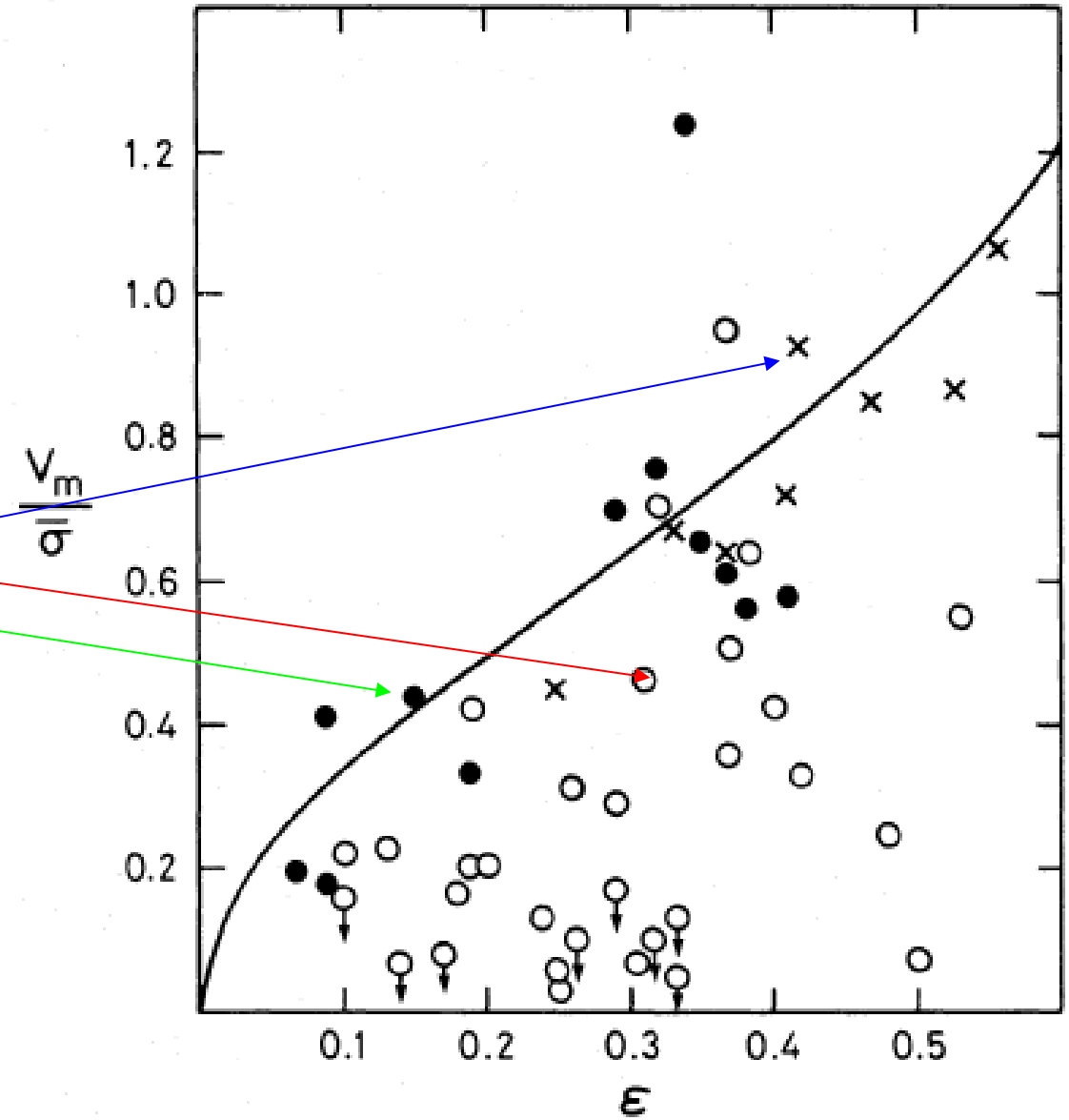
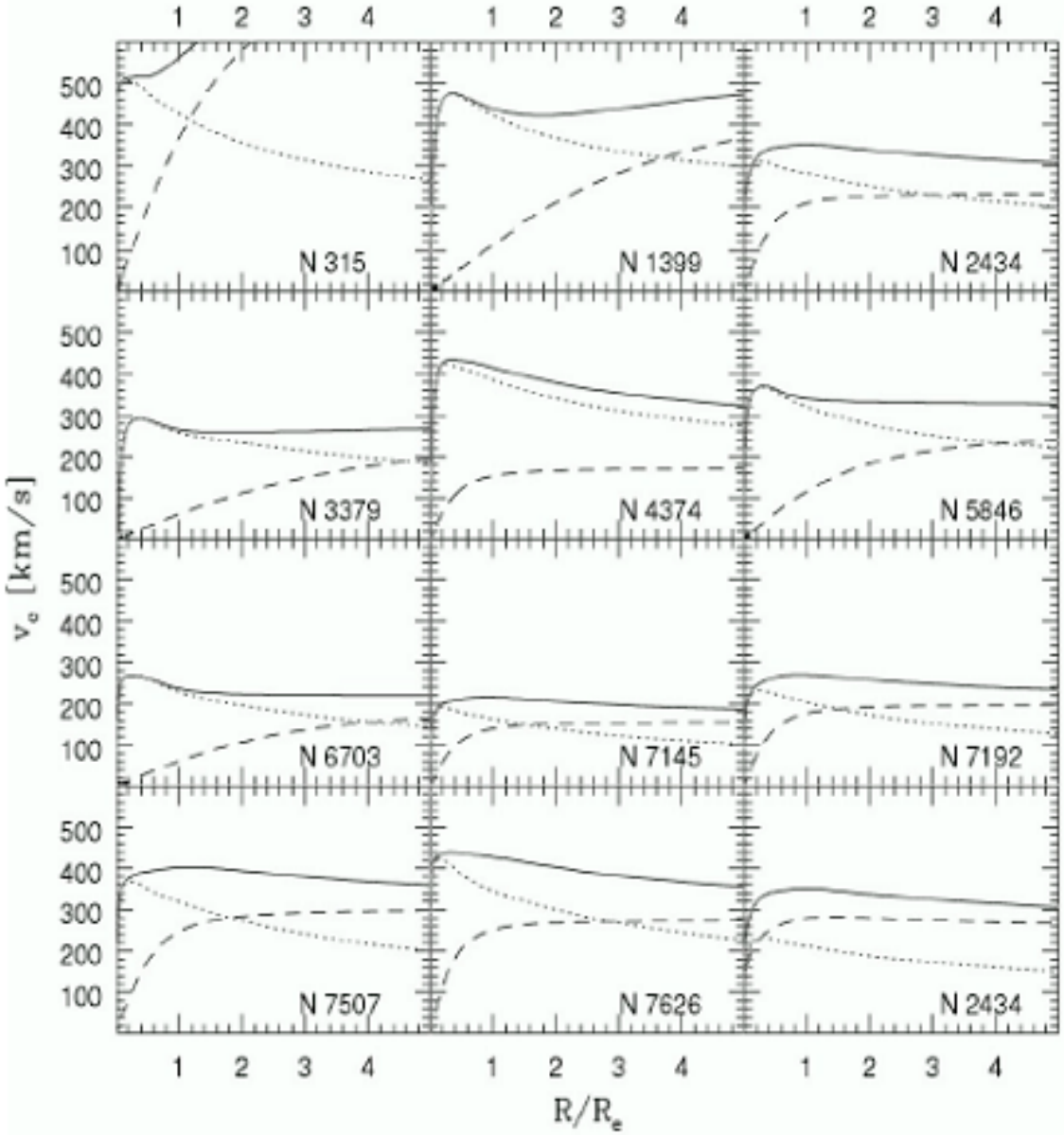
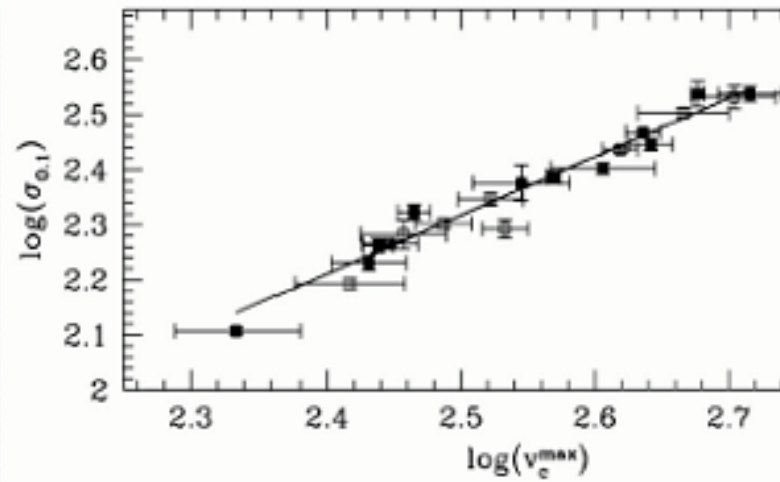


FIG. 3.—The quantity $V_m/\bar{\sigma}$ against ellipticity. Ellipticals with $M_B^{UH} > -20.5$ are shown as filled circles; ellipticals with $M_B^{UH} < -20.5$, as open circles; and the bulges of disk galaxies, as crosses. The solid line shows the $(V/\sigma, \epsilon)$-relation for oblate galaxies with isotropic velocity dispersions (Binney 1978).





- ⇨ 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)

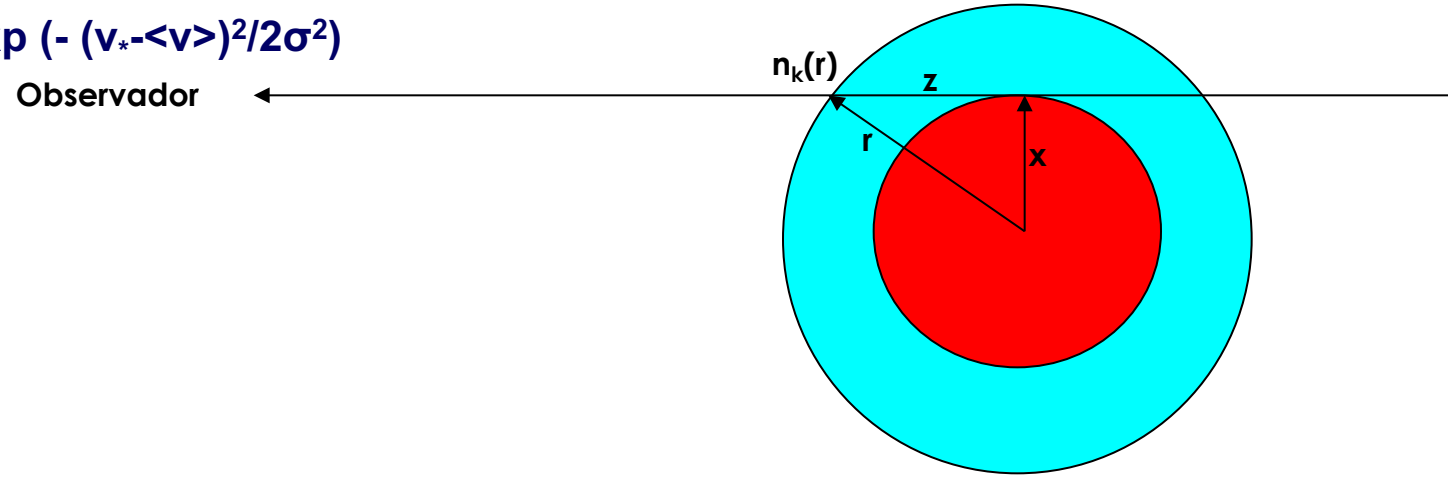
5.4 Dispersão de Velocidades

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

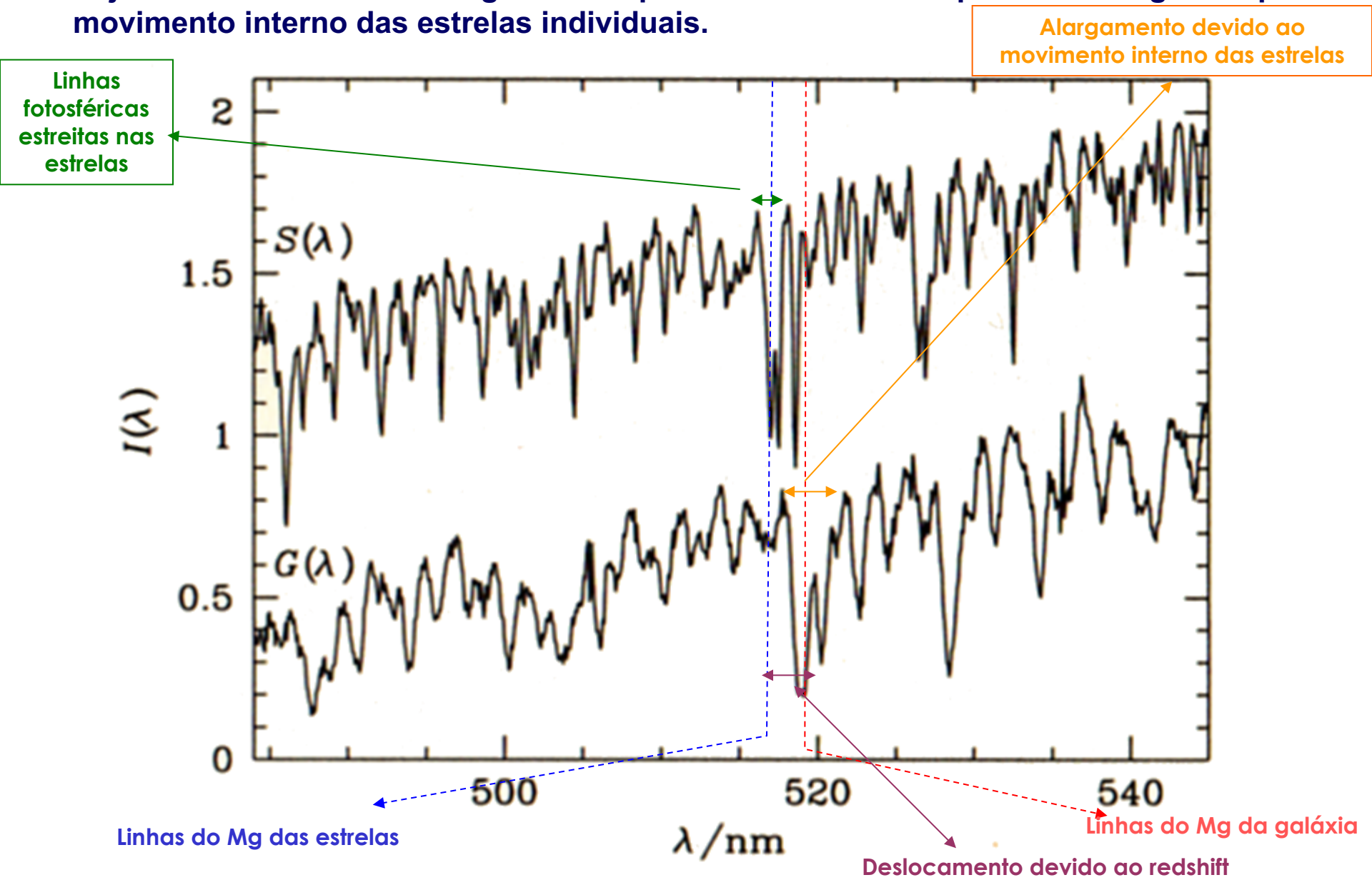
$$g(\lambda)= \Sigma\, n_i(r) \int s_i(\lambda-\lambda v_*/c) f_i(v_*) dv_*$$

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

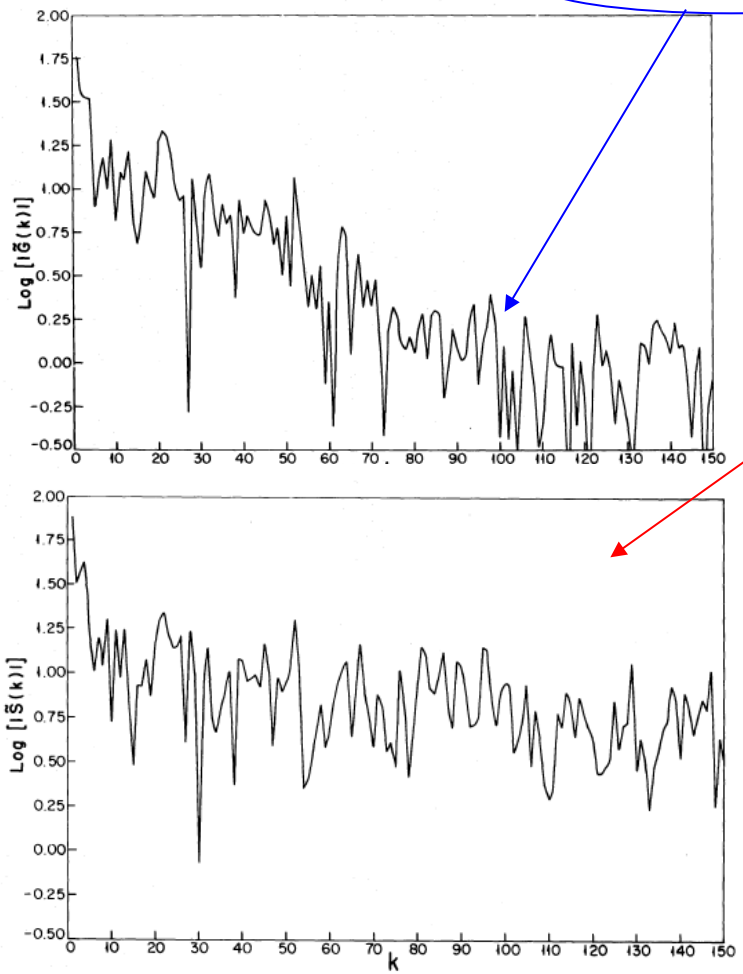
$$f_i(v_*)= 1/(2\pi\sigma_v^2)^{1/2} \exp\left(- (v_*-\langle v\rangle)^2/2\sigma^2\right)$$

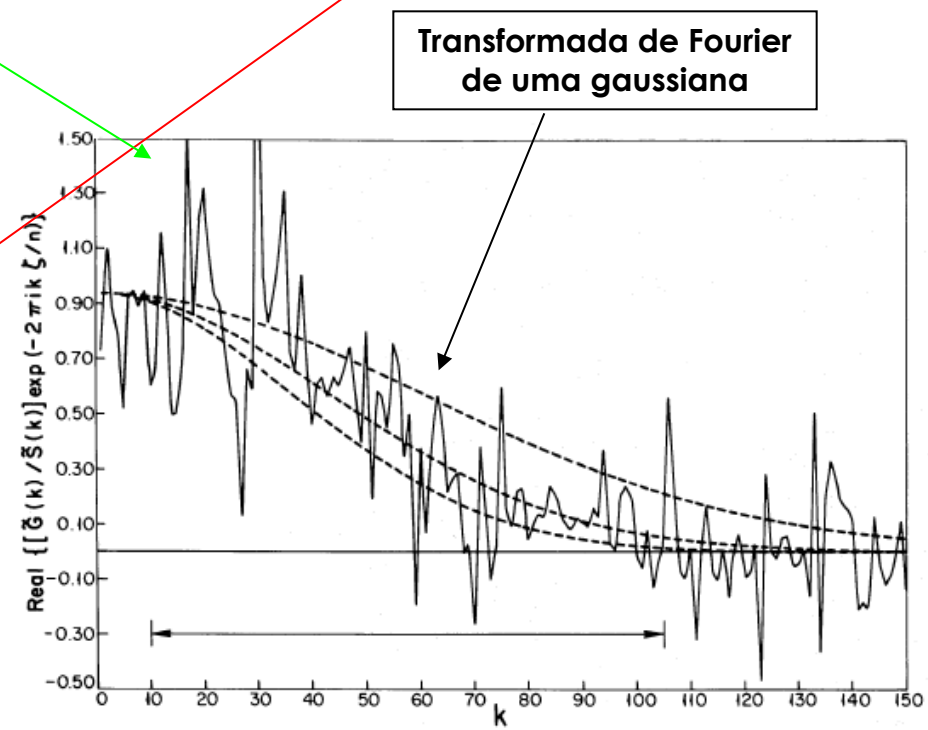


A conseqüência prática desta dispersão interna de velocidades é que o espectro das estrelas apresenta linhas bem estreitas, decorrentes da emissão fotosférica destes objetos. Ao contrário as galáxias apresentam linhas espectrais alargadas pelo movimento interno das estrelas individuais.



Como podemos perceber através das equações anteriores o espectro observado é a convolução dos espectros individuais das estrelas com a função de distribuição das velocidades estelares. Pelo teorema da convolução sabemos que a transformada de Fourier do espectro observado é simplesmente o produto da transformada de Fourier do espectro das estrelas pela transformada da função de distribuição G(k)=S(k) X F(k) para cada freqüência k. Assim concluímos que a transformada de Fourier da função distribuição pode ser obtida pelo quociente da transformada do espectro da galáxia pela transformada do espectro das estrelas de comparação $F(k;\sigma_v,\langle v\rangle)=G(k)/S(k)$.



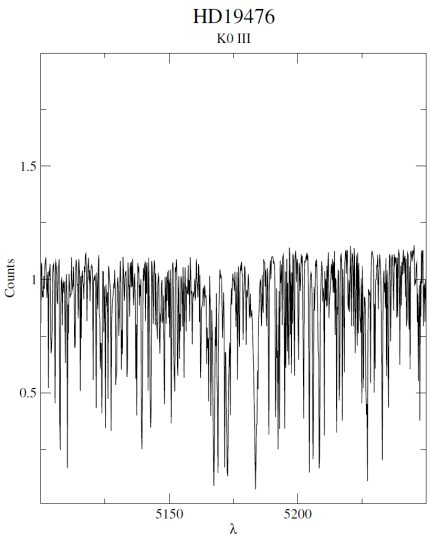


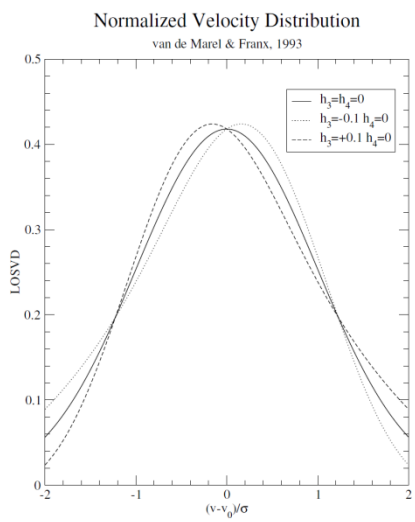
Método do quociente de Fourier
(Sargent et al, 1977, ApJ, 212,326)

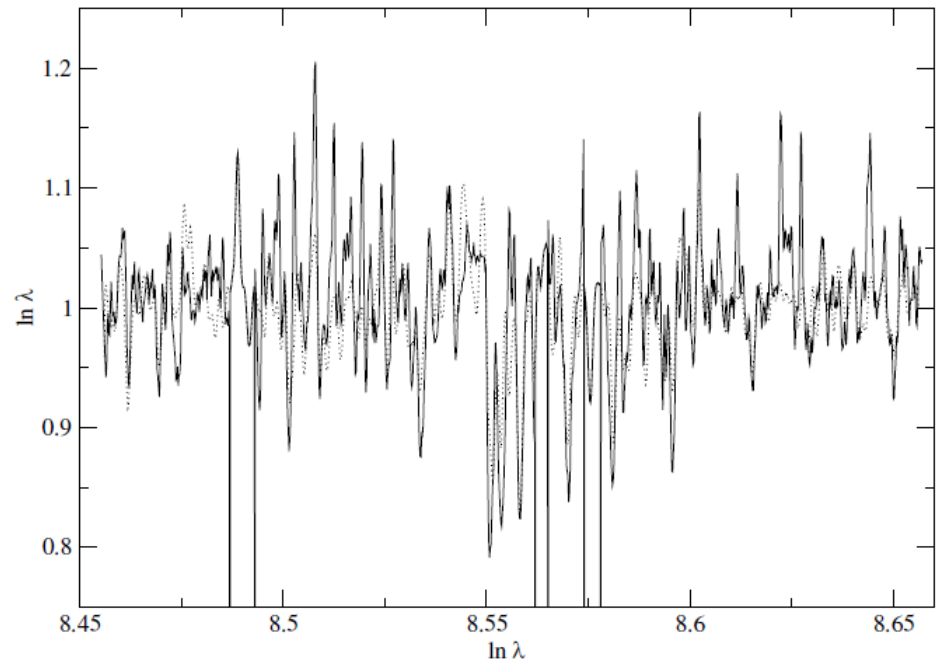
O método do quociente de Fourier tem no entanto um sério inconveniente devido às flutuações presentes nas transformadas devido à presença das flutuações observacionais inevitavelmente presentes nos dados. Uma alternativa mais moderna consiste em resolver diretamente a equação

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

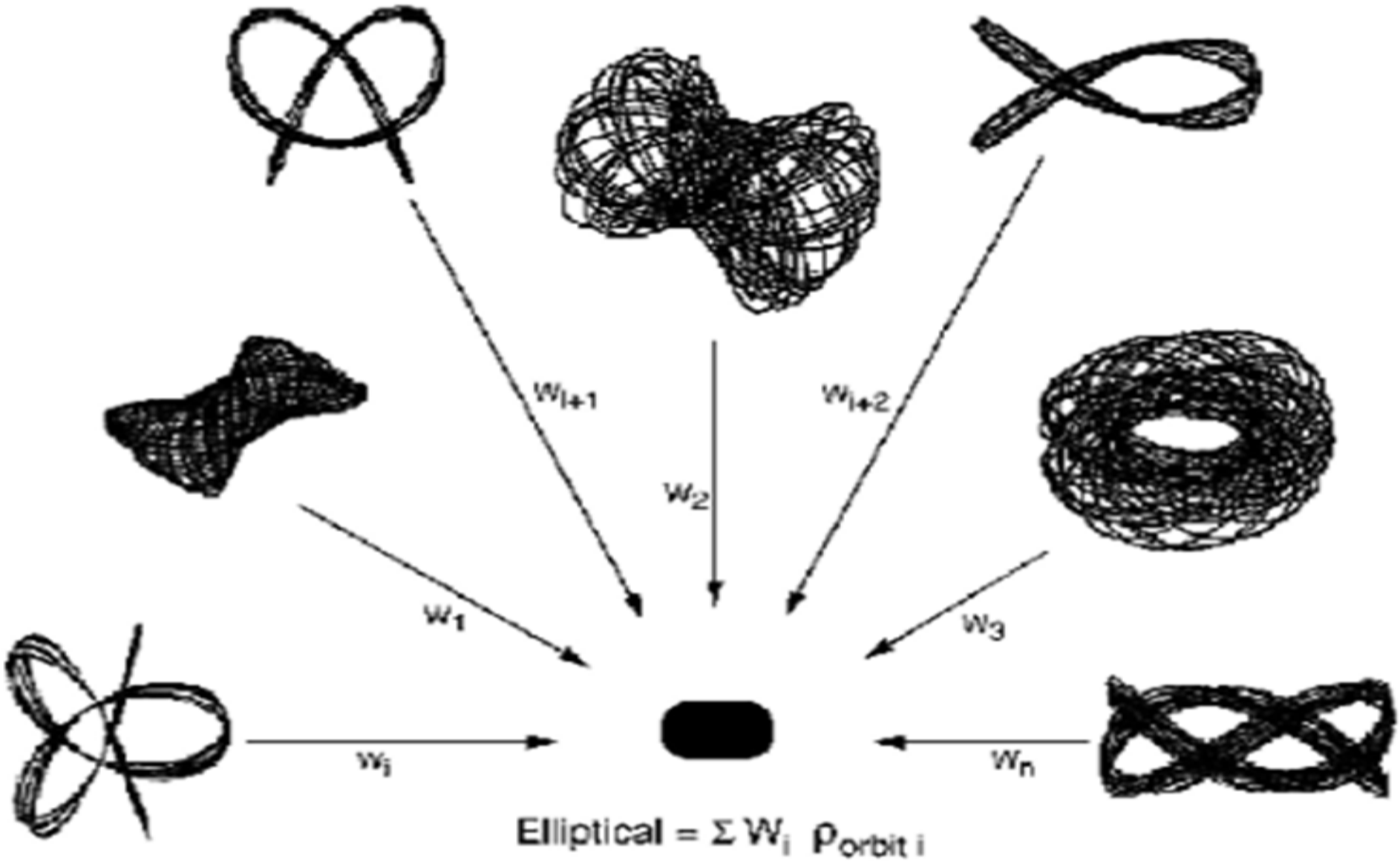
usando um método de ajuste por mínimos quadrados de todas as frequências.



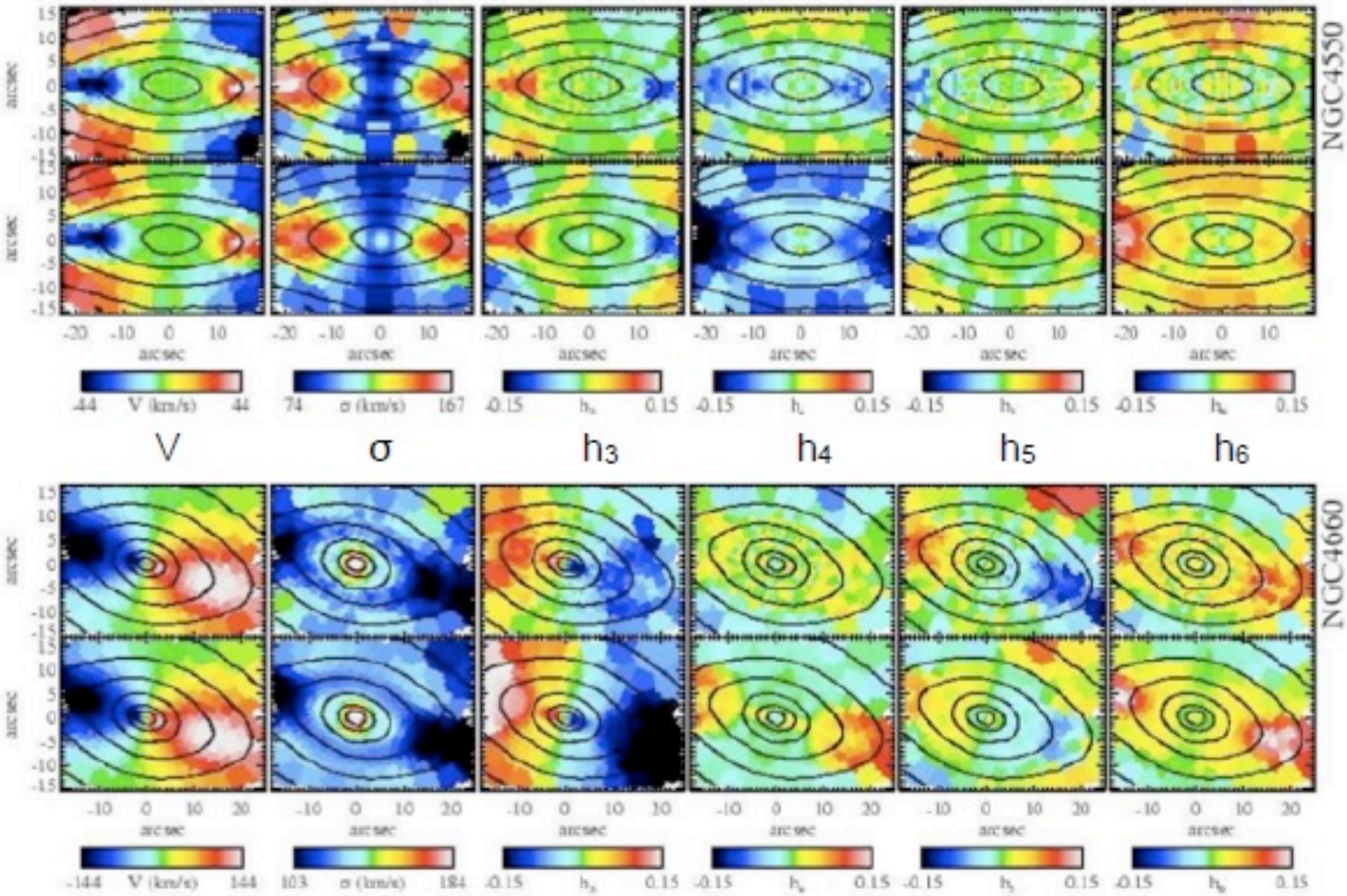




A descrição cinemática das elípticas através da dispersão de velocidades é certamente muito simplificada. Dada a relativa simplicidade do perfil de densidade acredita-se que existam algumas poucas classes de órbitas estelares e compondo-se adequadamente frações variadas destas órbitas talvez seja possível descrever acuradamente a estrutura dinâmica destes objetos.



A presença das várias classes de órbitas afeta não somente os momentos de primeira e segunda ordem do campo de velocidades (V_{rot}, σ_V) mas também os momentos superiores na expansão de Gauss-hermite (h_3, h_4,...) (Capelari, 2008).

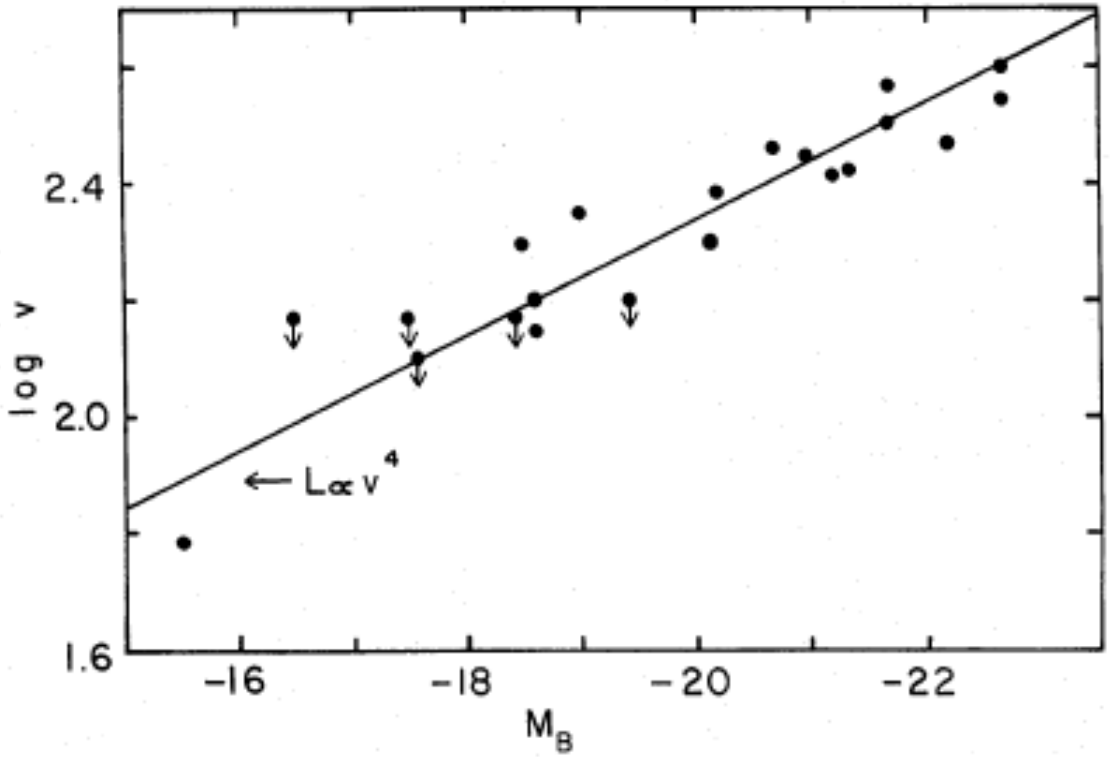


Em 1976 Faber & Jackson (1976, ApJ,204,668) perceberam a existência de uma estreita relação entre a luminosidade absoluta e a dispersão de velocidades

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

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 $L \sim cte\ \sigma^4$.

Voce seria capaz de imaginar uma forma de estimar distâncias usando esta relação?

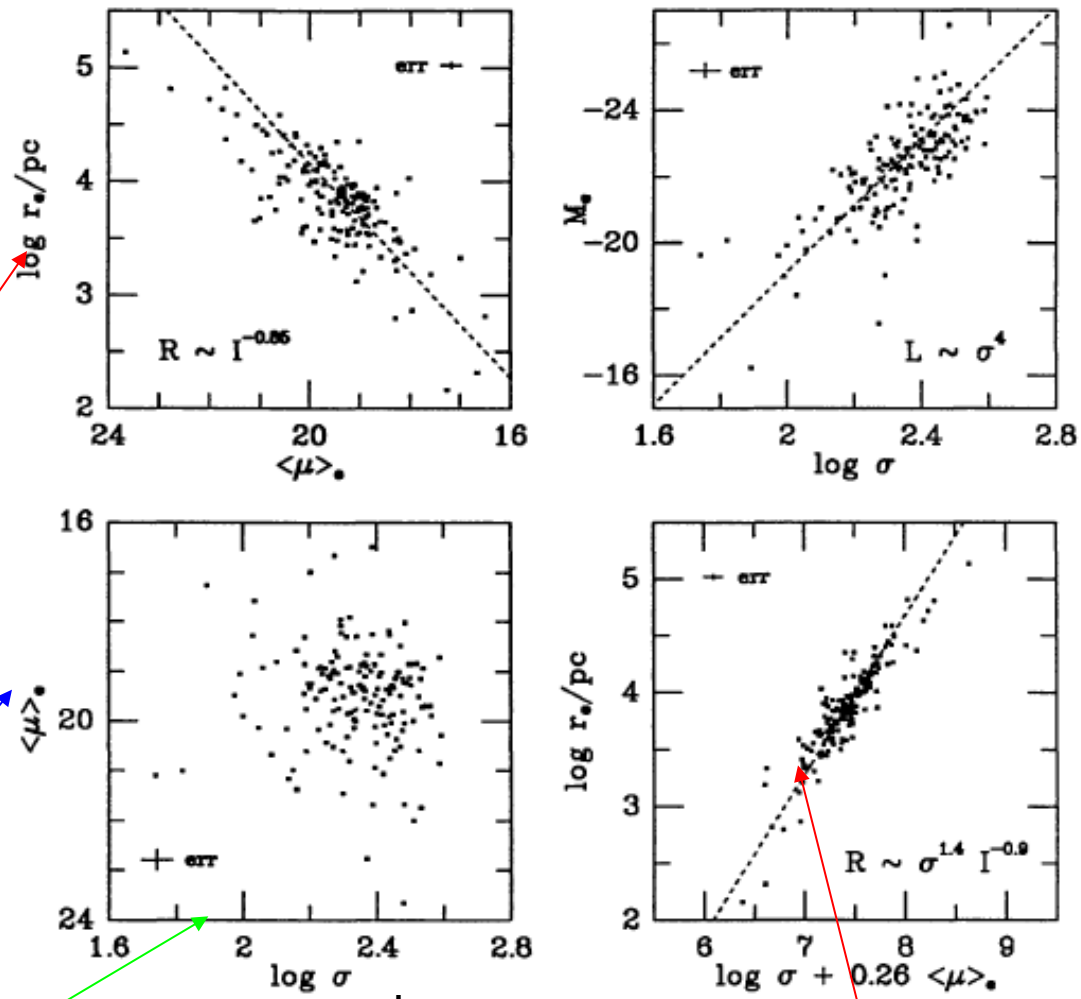


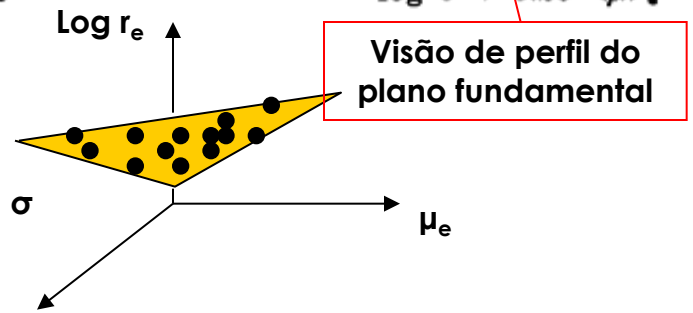
5.5 Plano Fundamental

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.

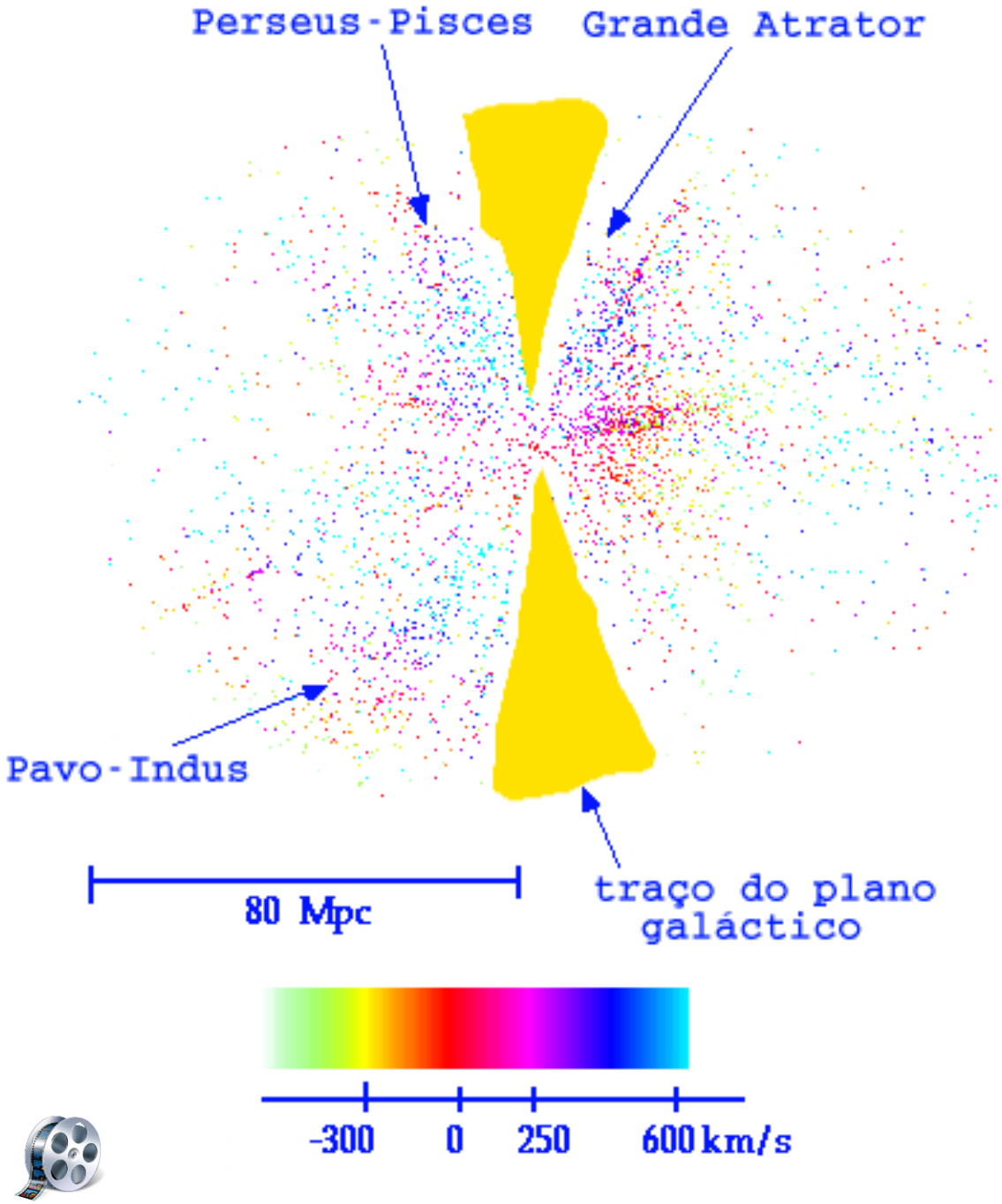
Log R =Cte +1.4logσ -0,9 Log I

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.

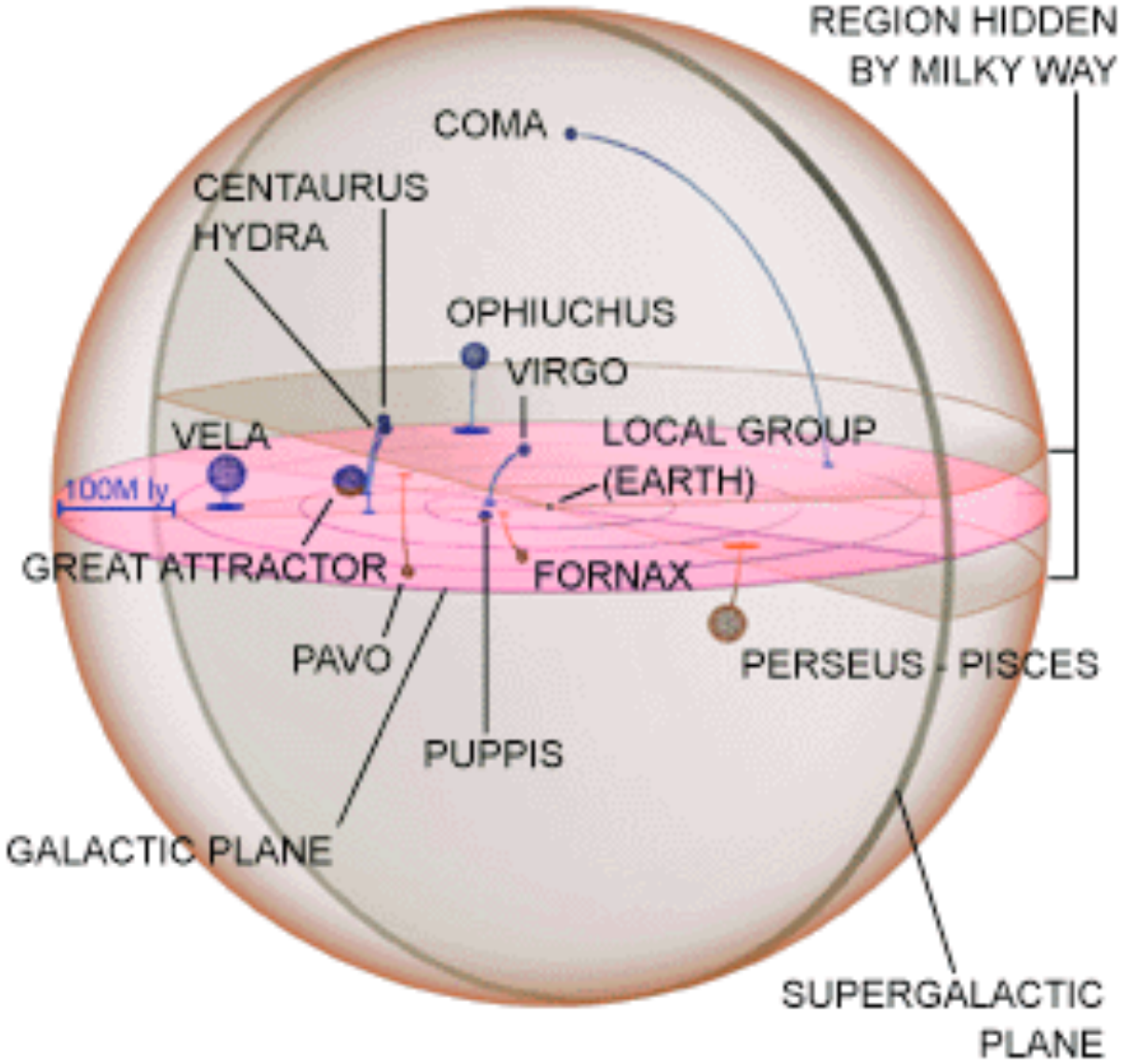




O resíduo individual das galáxias no plano fundamental é da ordem de 20% e todo ele pode ser explicado como devido a erros observacionais nas estimativas da distância, luminosidade e dispersão de velocidades. Qualquer desvio cósmico, se houver, não deve ser superior a uma pequena porcentagem. Lynden-Bell et al (1988, ApJ, 326, 19) usaram esta relação como indicador de distância para mostrar que o movimento de cerca de 400 galáxias elípticas próximas é afetada por uma grande concentração de massa conhecida como o Grande Atrator.

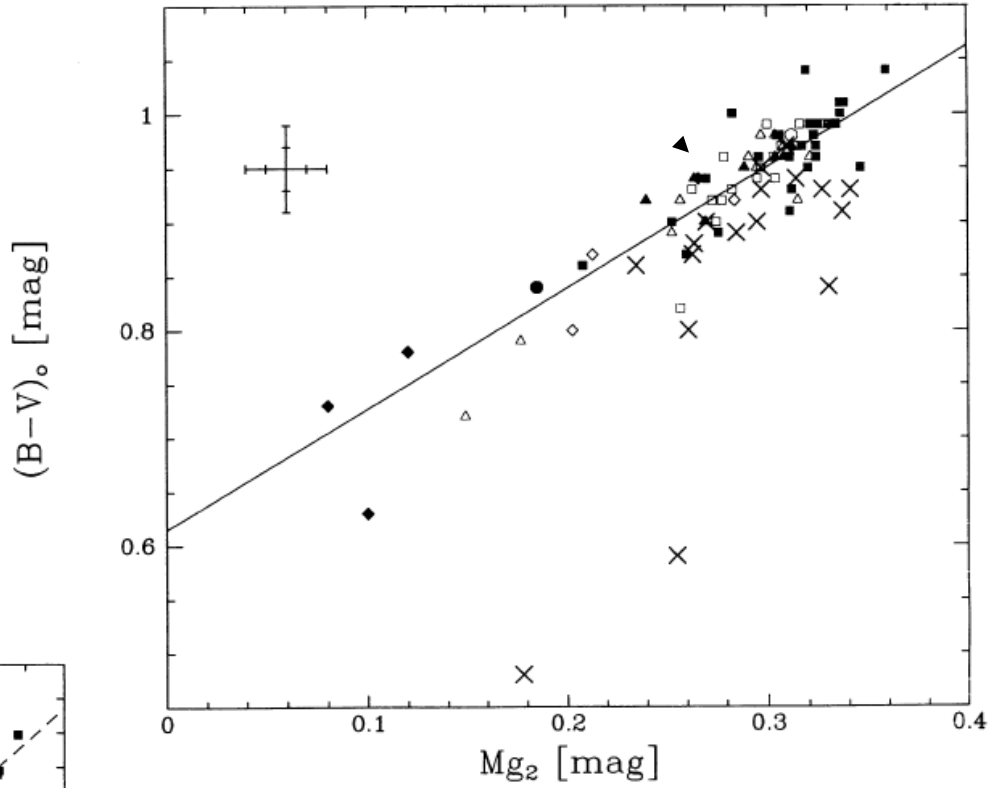


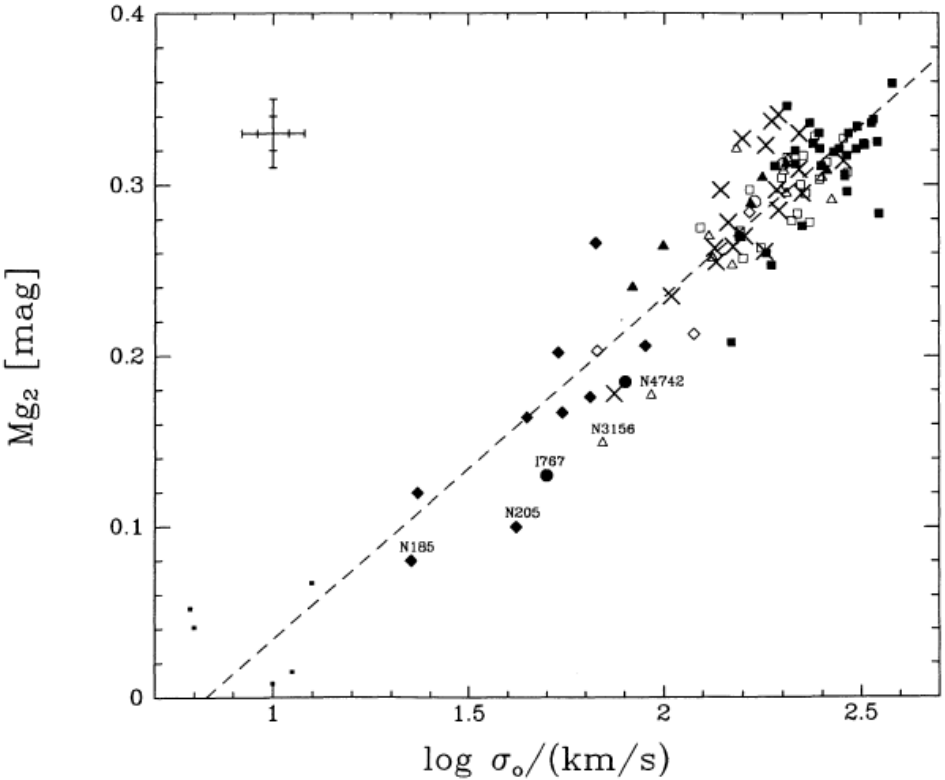
O Grande Atrator é uma enorme massa que afeta os movimentos das galáxias próximas induzindo um campo de velocidade que pode ser usado para estimar a sua massa total em cerca de 10^{16} $M_{\odot}$.



Se estivermos a cerca de 100 Mpc de distância do grande atrator qual seria a nossa velocidade peculiar induzida por esta atração gravitacional atuando durante cerca de 10^{10} anos?

As galáxias elípticas obedecem ainda a uma relação muito interessante, provavelmente também relacionada com o seu processo de evolução, conforme ilustram as figuras ao lado extraídas de Bender et al (1993, ApJ, 411, 153). As elípticas mais avermelhadas e 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.

Estime a velocidade de escape de uma galáxia elíptica gigante (M_B~-23) e compare com a de uma elíptica anã (M_B~-17)

5.6 Problemas

1. A maioria dos autores prefere exprimir a lei $r^{1/4}$ na forma

$$\text{Log}\,(I(r)/I_e)=-3.3307[\,(r/r_e)^{1/4}-1]$$

onde r_e é o chamado raio efetivo, contendo metade da luminosidade total, e I_e o brilho superficial no raio efetivo. Utilize esta relação para mostrar que o brilho superficial médio no círculo de raio r_e é

$$\langle I\rangle = 3.607\, I_e$$

2. Mostre que o perfil de brilho proposto por Hubble não pode ser aplicado a grandes distâncias radiais porque apresenta uma luminosidade integrada divergente.
3. Uma aproximação proposta por King (1962, AJ, 67, 471) para o perfil isotérmico truncado de um aglomerado globular é

$$I(r)=k\{\,1/[(1+r^2/r_c^2)]^{1/2}-1/[(1+r_t^2/r_c^2)]^{1/2}\}^2$$

mostre que na região central $I0=k\{1-1/[(1+r_t^2/r_c^2)]^{1/2}\}^2$. Mostre que quando $r>>rc$ temos aproximadamente

$$I(r)=f_1(1/r-1/r_t)^2$$

4. **Utilize o calculador cosmológico apresentado em linguagem Java na página do Ned Wright (http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html) para estimar a dimensão típica em Kpc de uma região de 1" de uma galáxia elíptica em z=1,5.**
5. **Utilize o perfil de brilho de NGC 4472 para estimar a luminosidade total aparente do caroço central deste objeto. Qual seria a magnitude absoluta? Supondo que as estrelas desta região sejam semelhantes ao Sol estime qual deve ser a massa estelar nesta região. Qual deve ser a densidade volumétrica de massa em unidades solares por pc^3? Como este número se compara com a densidade média de estrelas na Galáxia?**
6. **Uma galáxia elíptica esférica é sustentada exclusivamente pela dispersão de velocidades. Supondo que ela tenha densidade uniforme, massa M, e raio R, estime a sua dispersão de velocidades utilizando o teorema do Virial. Aplique este resultado para uma galáxia de massa $M=10^{11}\ M_\odot$ e R=15 Kpc.**
7. **Estime o período gasto por uma estrela que se movimenta em uma órbita radial em uma galáxia elíptica de $M=10^{11}\ M_\odot$ e R=15 Kpc.**

Cap. 5 Cap. 6