

# Galáxias Elípticas

Capítulo 6 do livro-texto (Sparke & Gallagher)

Profa. Paula R. T. Coelho

AGA0299 - Astrofísica Galáctica e Extra-galáctica

# O que você sabe (ou acha que sabe) sobre galáxias elípticas?

---

- Qual a metalicidade?
- Qual a idade da população estelar?
- Quanto gás?
- Qual a cor?
- Razão alpha/fe?
- Rotação?
- Massa?
- Ambiente?
- Qual a origem de sua morfologia? formato? cinemática ?
- Qual o maior número que observamos ao lado do 'E'?

# Mitos? (Visão tradicional na década de 70)

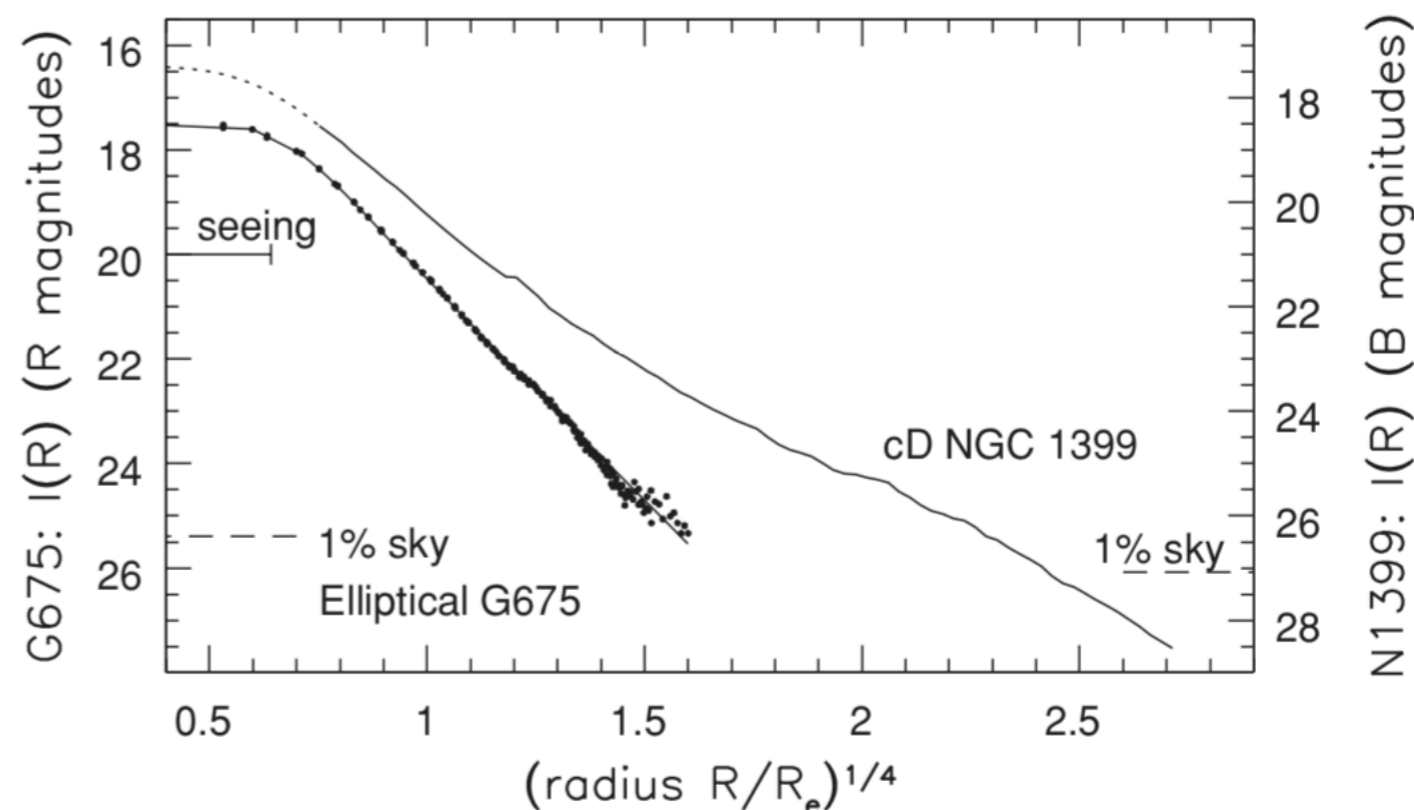
[http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic07/Lecture\\_7.pdf](http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic07/Lecture_7.pdf)

<https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March02/Efstathiou/Efst2.html>

- Bojos sem discos com perfil de de Vaucouleurs ( $R^{1/4}$ ) (vide eq. 6.1 no livro-texto)

$$I(R) = I(R_e) \exp\{-b[(R/R_e)^{1/4} - 1]\}$$

- Bojos com densidade central constante (King cores)



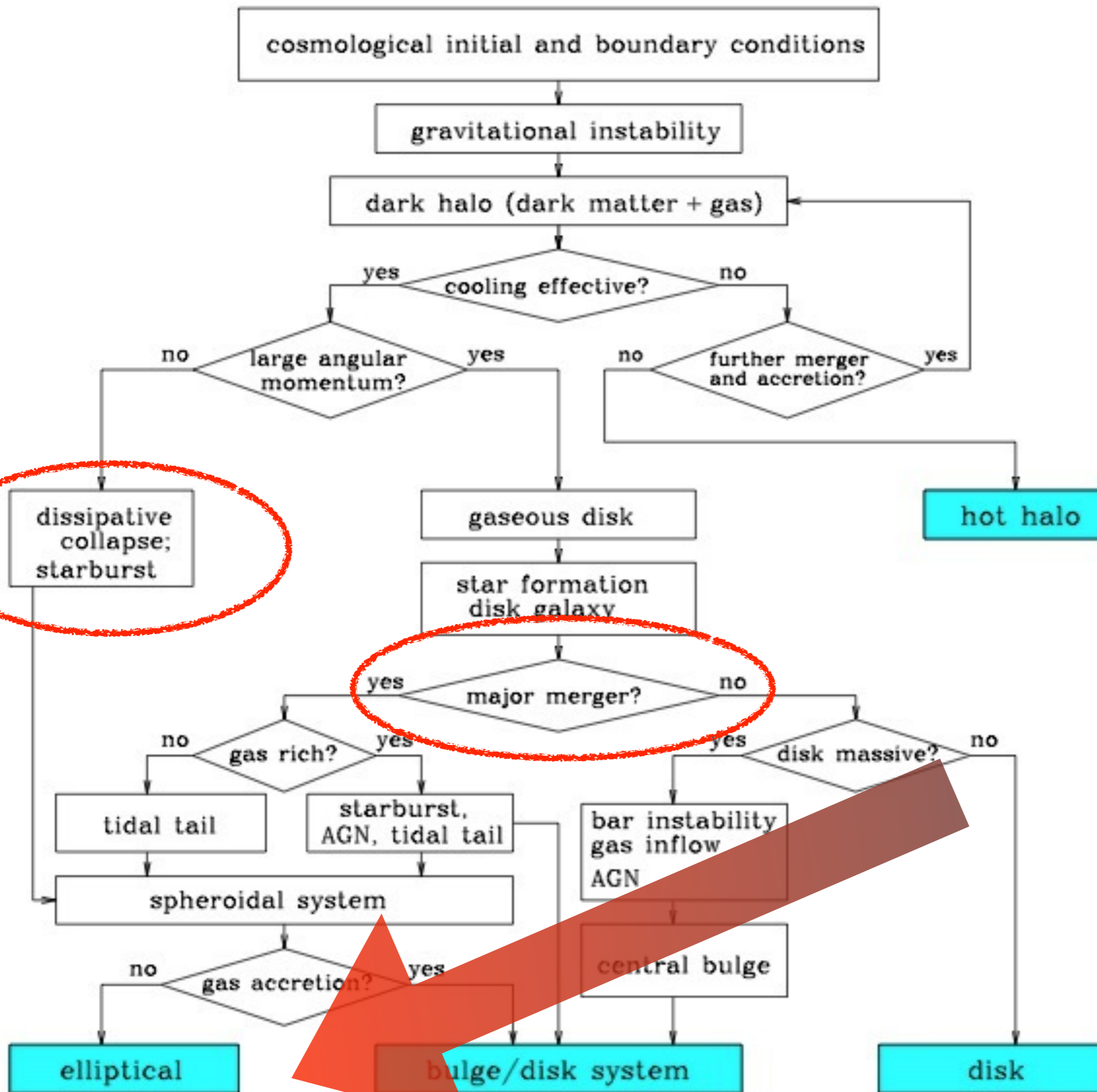
**Fig. 6.3.** Surface brightness of two luminous ellipticals: an  $R^{1/4}$  law corresponds

- Esferóides oblatos achatados por rotação
- Sem gás ou poeira
- Contém apenas uma população estelar simples e velha
- Sistemas dinâmicos relaxados dinamicamente

# Galáxias elípticas

---

- Aparentemente simples, mas são sistemas complexos
- Muito pouco gás frio, exceto nas partes centrais
- Não contém um disco estelar como as S0 (mas há excessões!)
- A morfologia suave sugere que as estrelas tiveram tempo de alcançar algum equilíbrio estável
- Grande intervalo de luminosidade e concentração de luz
- Algumas tem alta rotação, outras nenhuma
- São fósseis do Universo jovem
- A variedade de propriedades sugere que há mais de uma via de formação



Um flow-chart de formação de galáxias. As condições iniciais são dadas pela cosmologia adotada. Os caminhos levando a formação das diversas galáxias são mostrados com os principais processos físicos envolvidos. Crédito: Fig. 1.1 em Mo, den Bosch, White

As vias de formação de galáxias elípticas anãs deve ser distinto (e pouco se sabe a respeito ainda)



Galáxias elípticas:  
Propriedades fotométricas

# Luminosidades

- Elípticas cobrem um grande intervalo de luminosidades e é conveniente dividi-las em 3 grupos

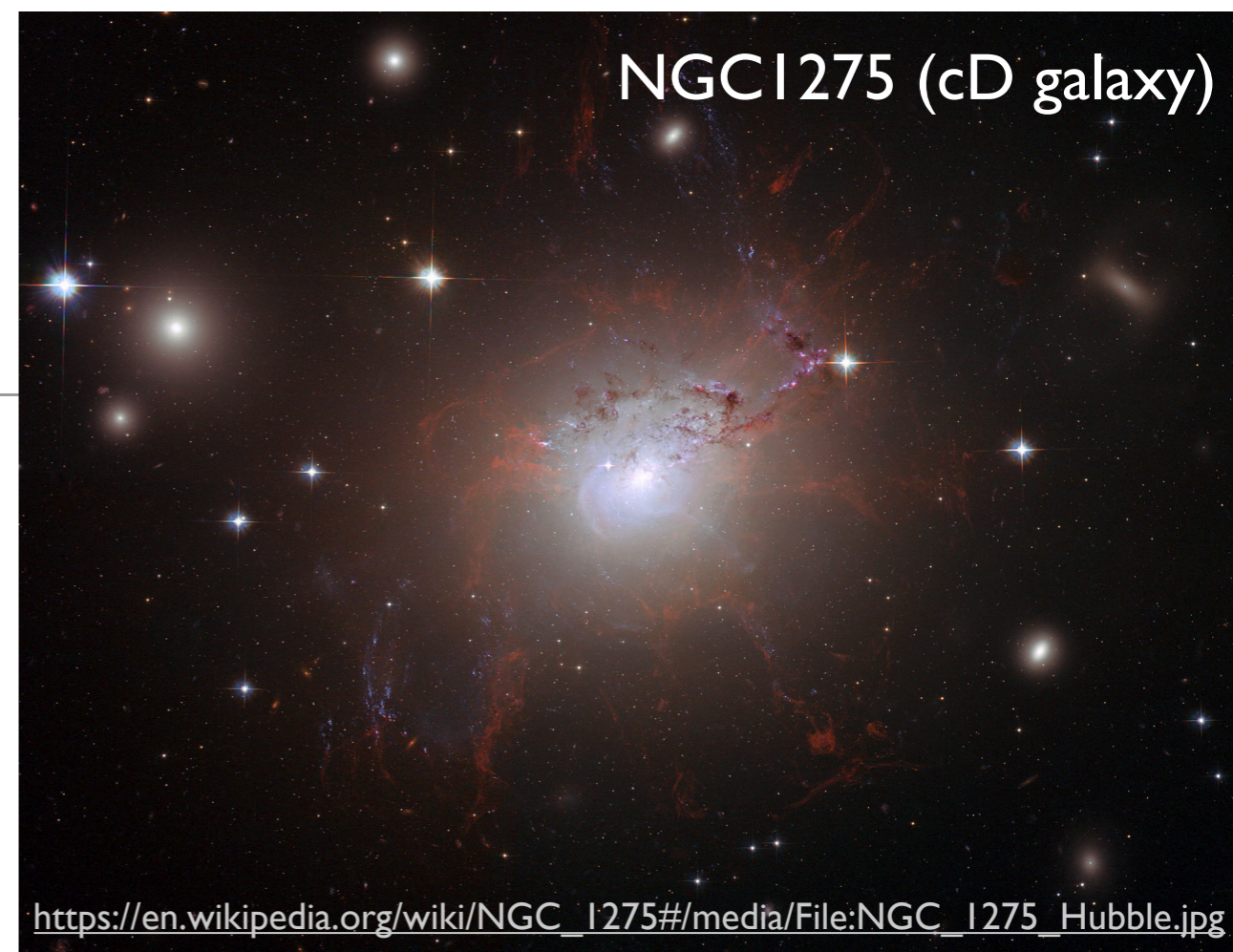
- Elípticas gigantes:  $L \gtrsim L_{\star}$

- Normais (intermediárias):

$$L \gtrsim 3 \times 10^9 L_{\odot}$$

- Anãs:  $< 3 \times 10^9 L_{\odot}$

NGC1275 (cD galaxy)



[https://en.wikipedia.org/wiki/NGC\\_1275#/media/File:NGC\\_1275\\_Hubble.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/NGC_1275#/media/File:NGC_1275_Hubble.jpg)

NGC4621



[https://en.wikipedia.org/wiki/Messier\\_59#/media/File:Messier59\\_-\\_HST\\_-\\_Potw1921a.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Messier_59#/media/File:Messier59_-_HST_-_Potw1921a.jpg)

# "Elípticas" pouco luminosas

---

- Elípticas compactas **cE**, tem alta rotação: M32 e outras descobertas em Fornax e Virgo. Raras (foto: M32)
- Anãs elípticas **dE**: não tem rotação importante (foto: M110)
- Anãs esferoidais **dSph**: versões menos luminosas de dEs (foto: Fornax)





# Brilho superficial

- Luz é muito mais concentrada do que em espirais
- $I(R) = I(R_e)\exp\{-b[(R/R_e)^{1/n} - 1]\}$ ,  $b$  é escolhido de modo que  $R_e$  (raio efetivo) contenha metade da luz.  $n > 1, b \approx 1.999n - 0.327$ .

- Elípticas gigantes tem perfis com  $n$  altos, mas elípticas intermediárias tem perfis exponenciais como os discos  $n \sim 1$

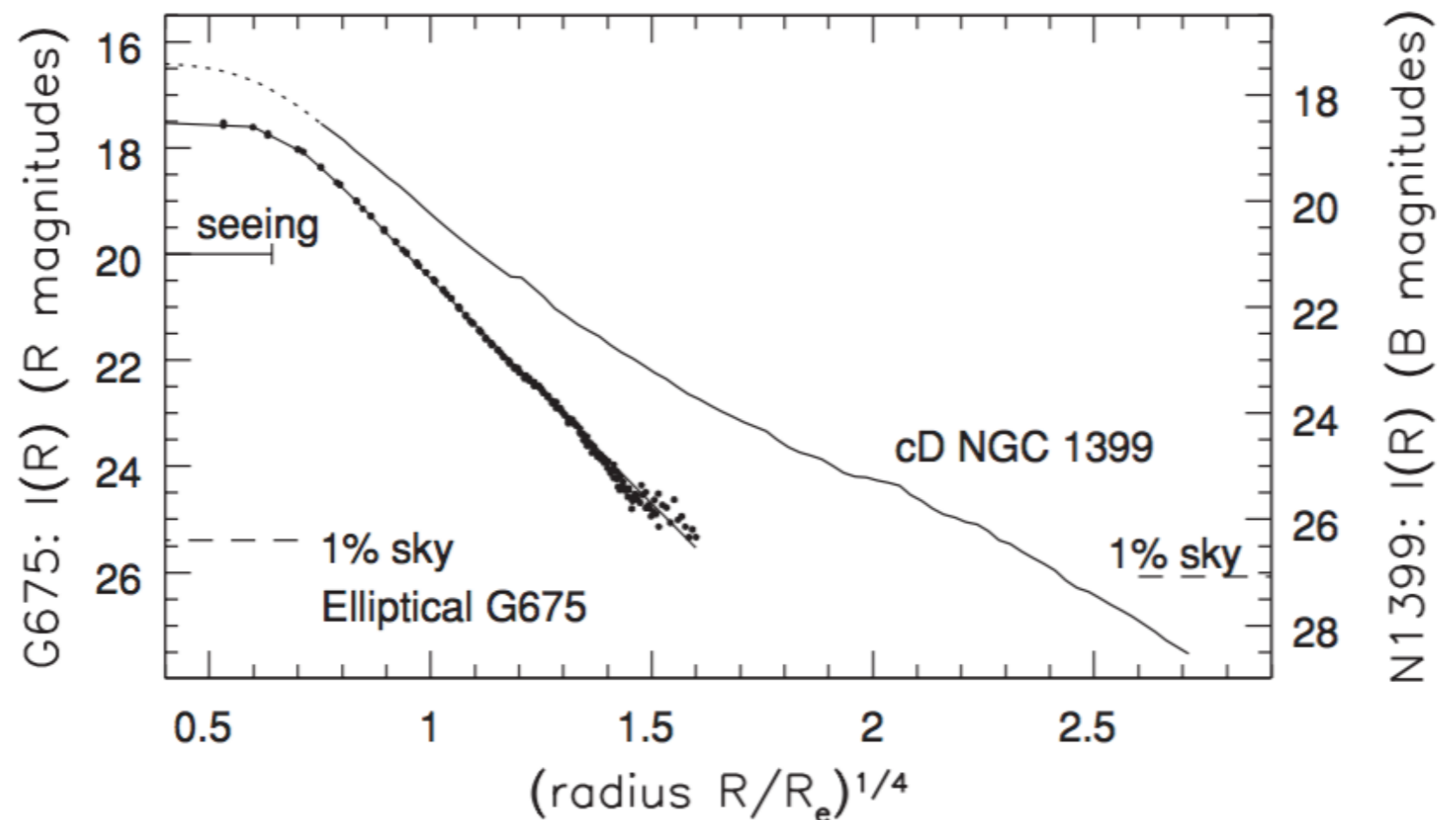
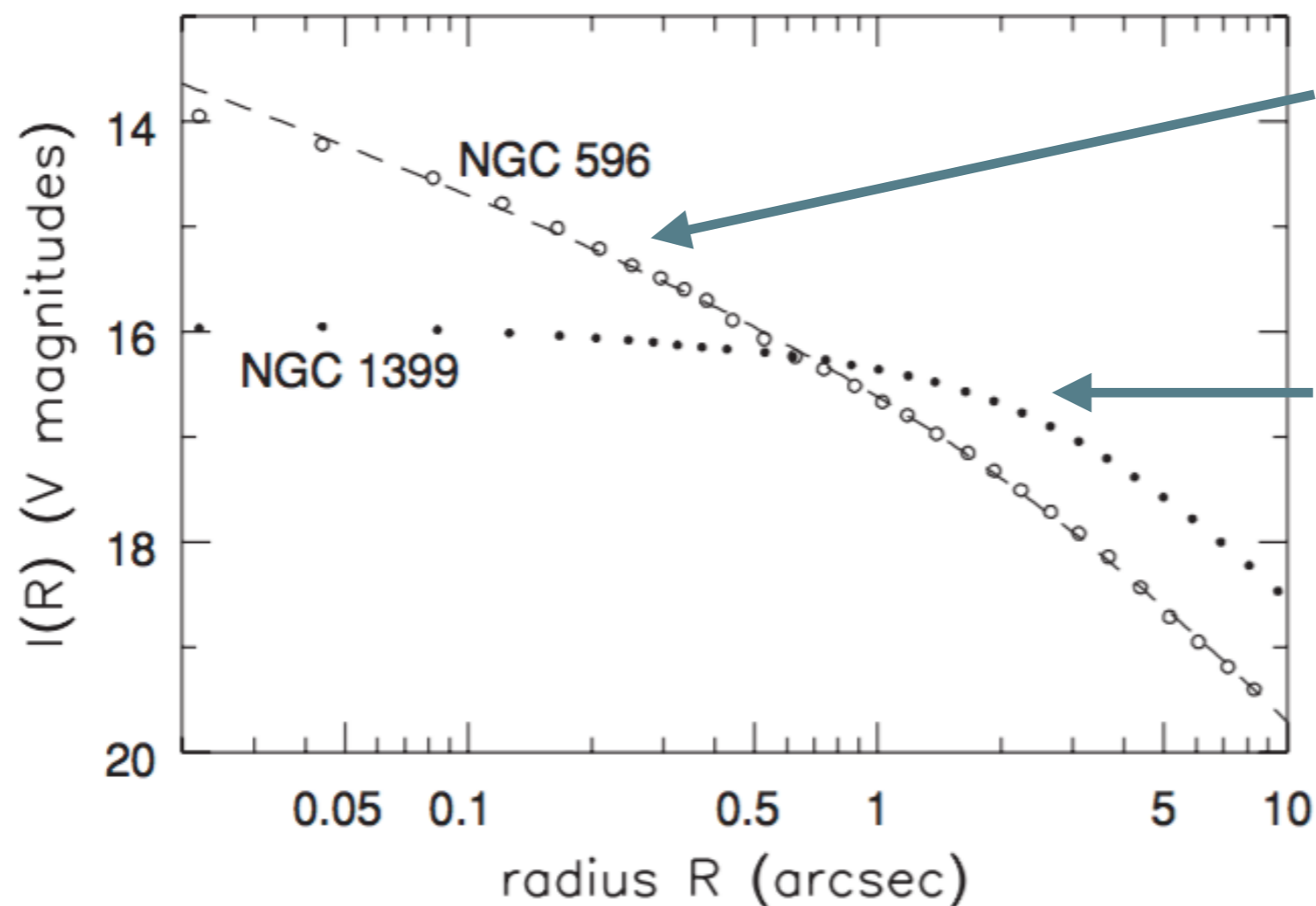


Fig. 6.3. Surface brightness of two luminous ellipticals: an  $R^{1/4}$  law corresponds to a straight line.


# Perfil de brilho central



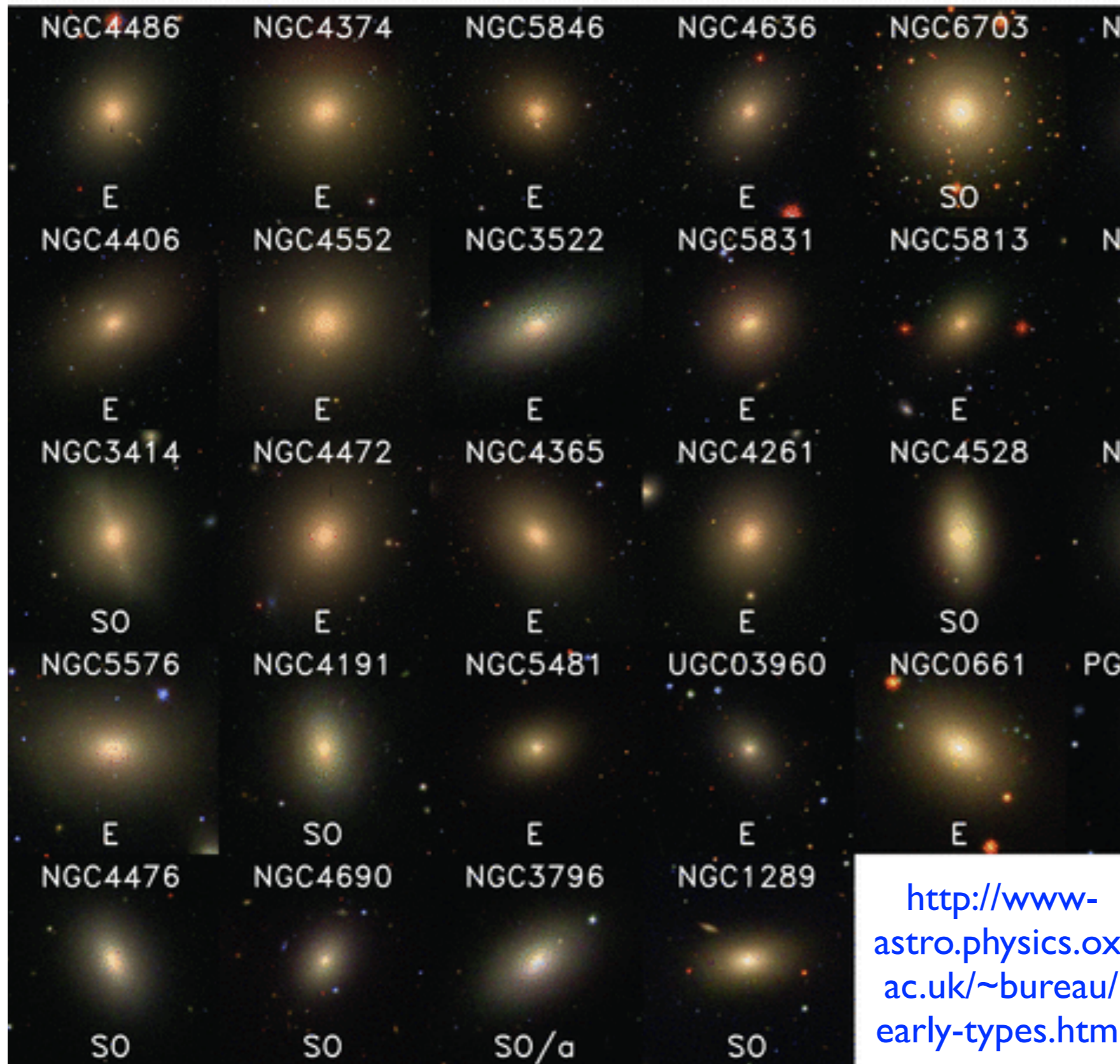
Elípticas menos  
luminosas tem  
*cusps* (ao invés de  
*cores*)

Típico de elípticas  
gigantes

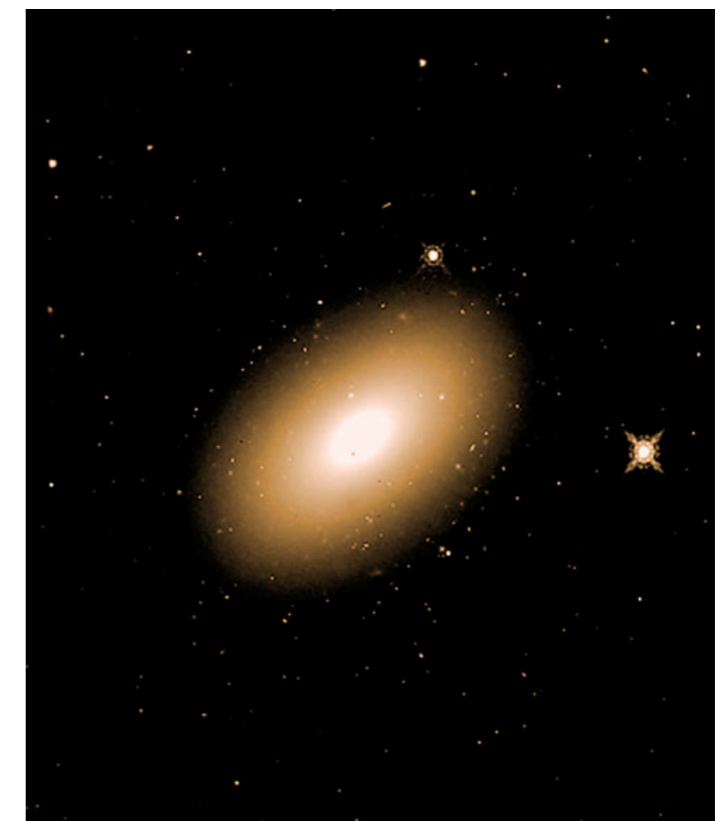
**Fig. 6.7.** Surface brightness  $I_V(R)$  in the  $V$  band at the centers of two elliptical galaxies. The cD galaxy NGC 1399 ( $M_V = -21.7$ ) has a *core* at  $R \lesssim 1''$ , where  $I(R)$  is nearly constant. NGC 596 ( $M_V = -20.9$ ) is half as luminous; the surface brightness continues to rise as a *cusp*. The dashed line shows  $I(R) \propto R^{-0.55}$  – T. Lauer.



Galáxias elípticas:  
Anisotropias, órbitas e afins



<http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~bureau/early-types.html>



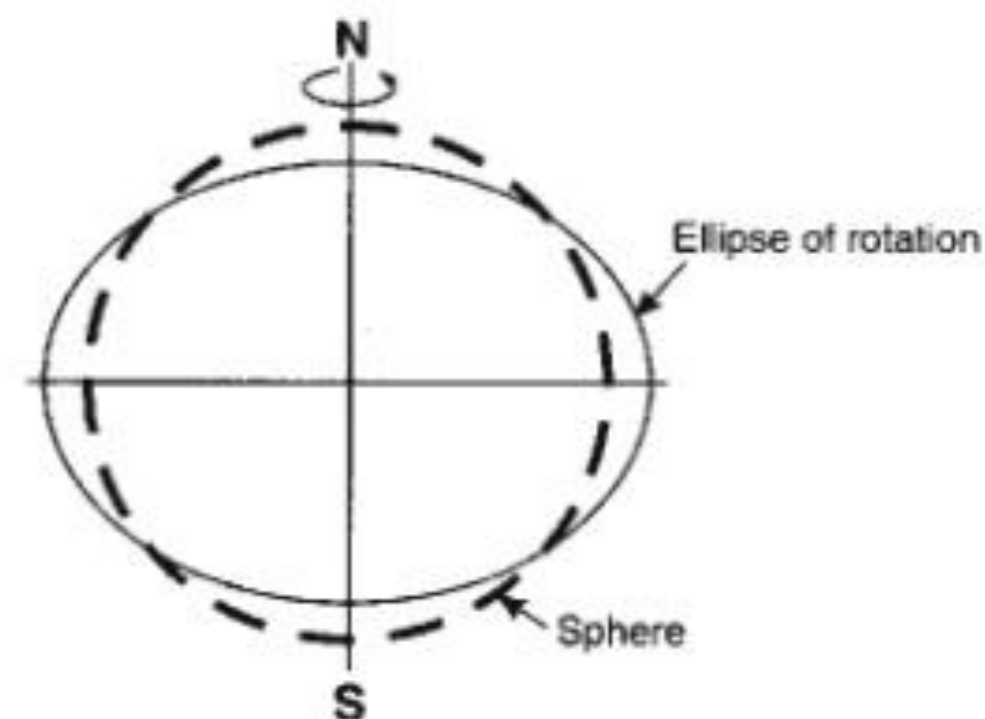
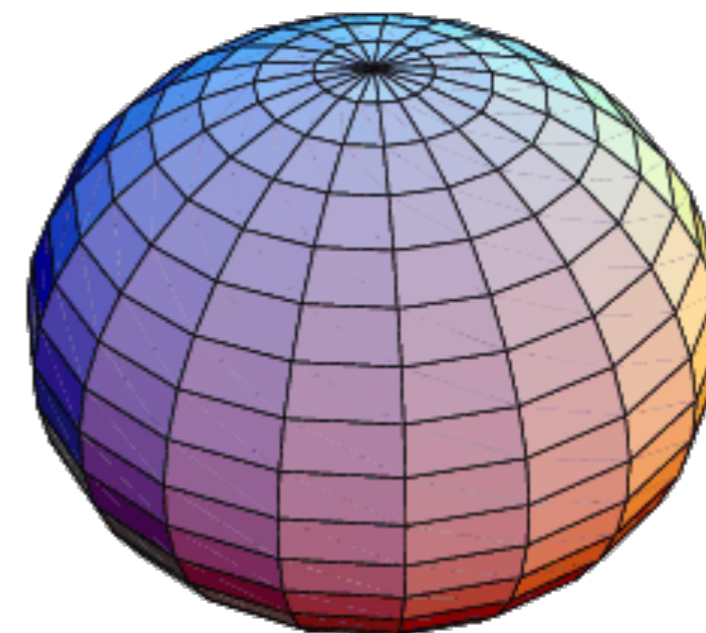
Qual a origem física das "formas" das galáxias elípticas?

# Rotação vs. Anisotropia

- Esferóide oblato: rotação de uma elipse em torno de um de seus eixos. Para eixo de simetria em torno de  $z$ ,  $a = b$ :

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

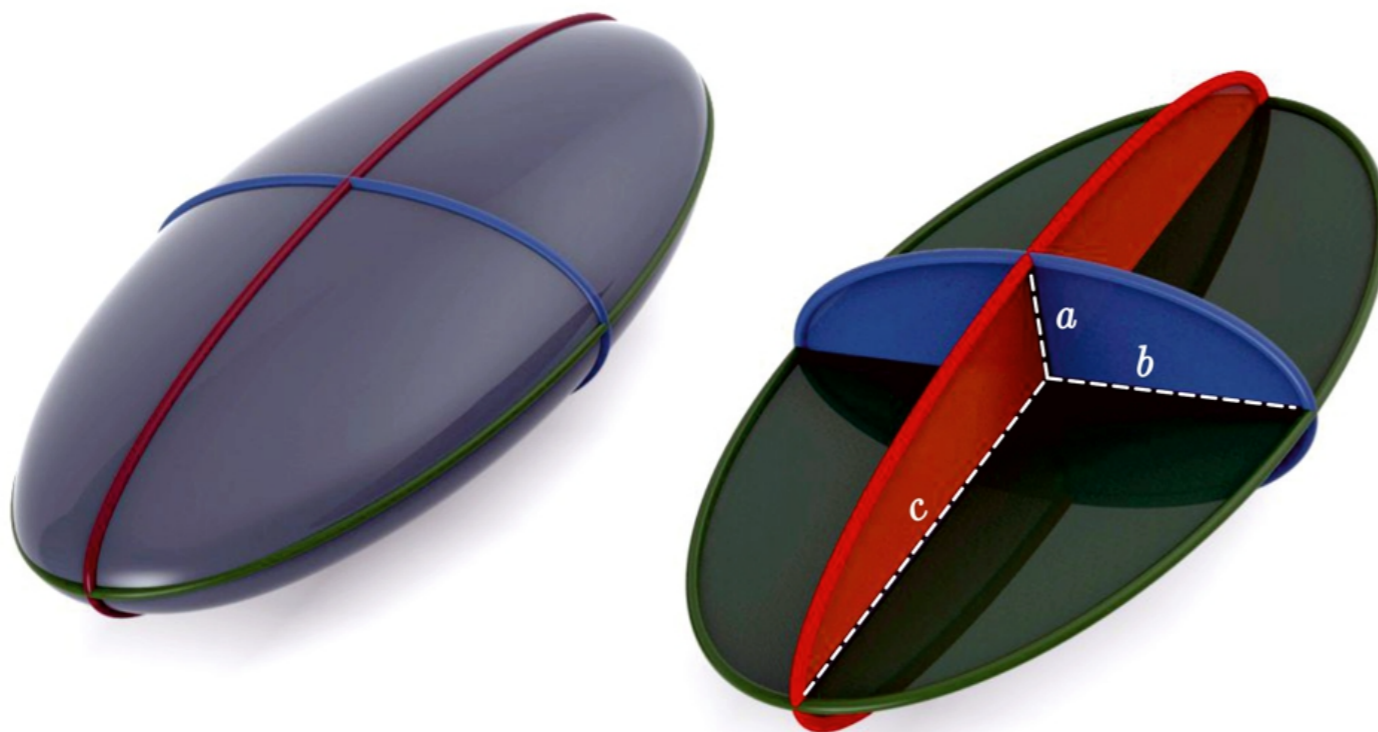
**Um esferóide achatado por rotação onde o raio equatorial é maior do que o raio polar. Ex. a Terra.**



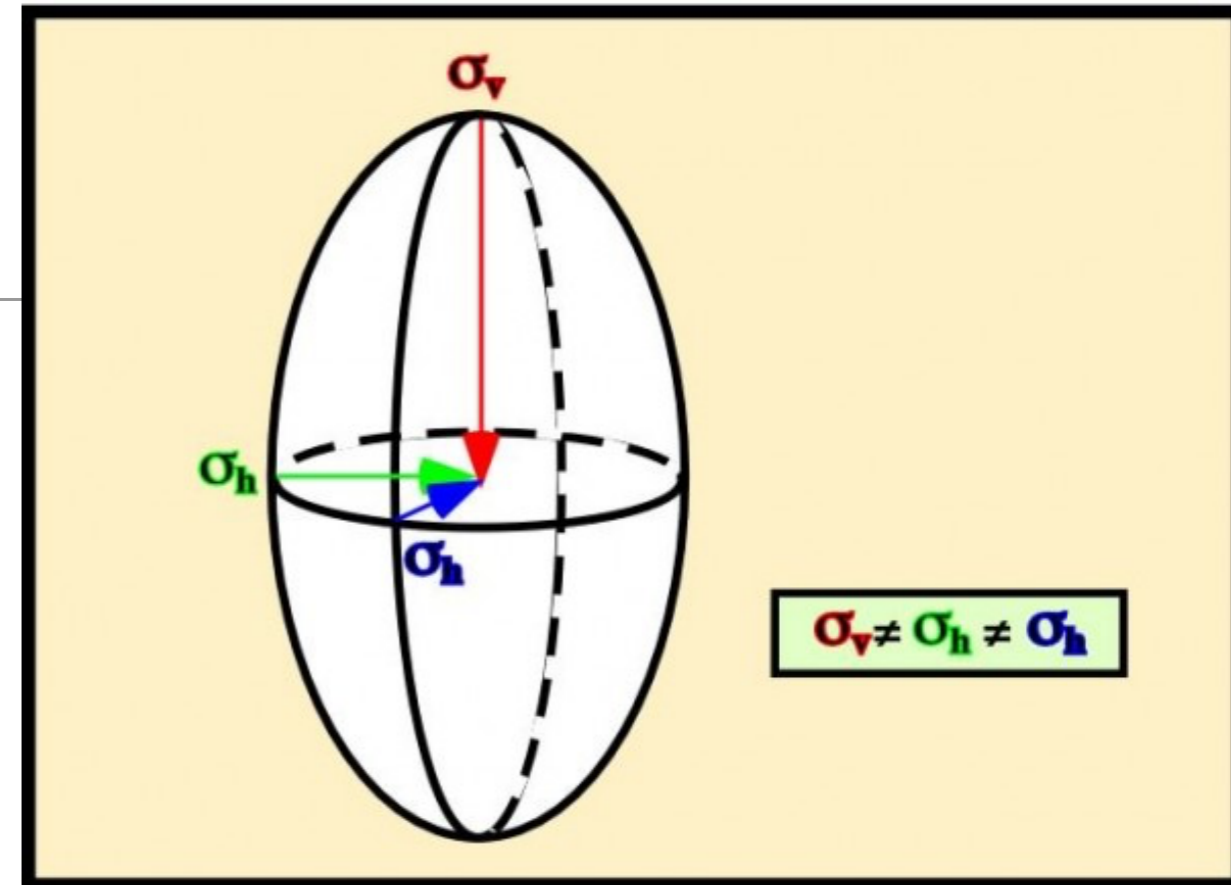
# Rotação vs. Anisotropia

- Elipsóide triaxial: os três eixos diferem

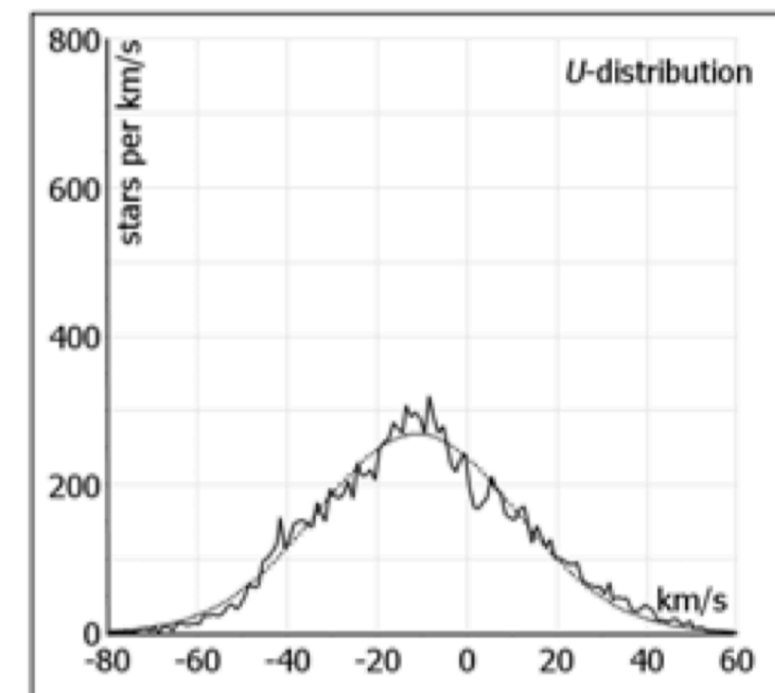
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$



## Triaxial Ellipsoid



No caso das galáxias, eixos seriam dados pelas dispersão de velocidades estelares



# Um pouco de “história” (seção 6.2.3 do livro-texto)

- Inicialmente acreditava-se que galáxias elípticas eram achatadas por rotação. A partir do Teorema do Virial e assumindo-se que os movimentos estelares aleatórios são isotrópicos, i.e.,  $\sigma_x = \sigma_y$ , temos:

$$\left(\frac{V_{\max}}{\sigma}\right) = \left(\frac{V}{\sigma}\right)_{\text{iso}} \equiv \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \approx \sqrt{\epsilon/(1 - \epsilon)}; \quad (6.29)$$

**Mas o que observamos é:**

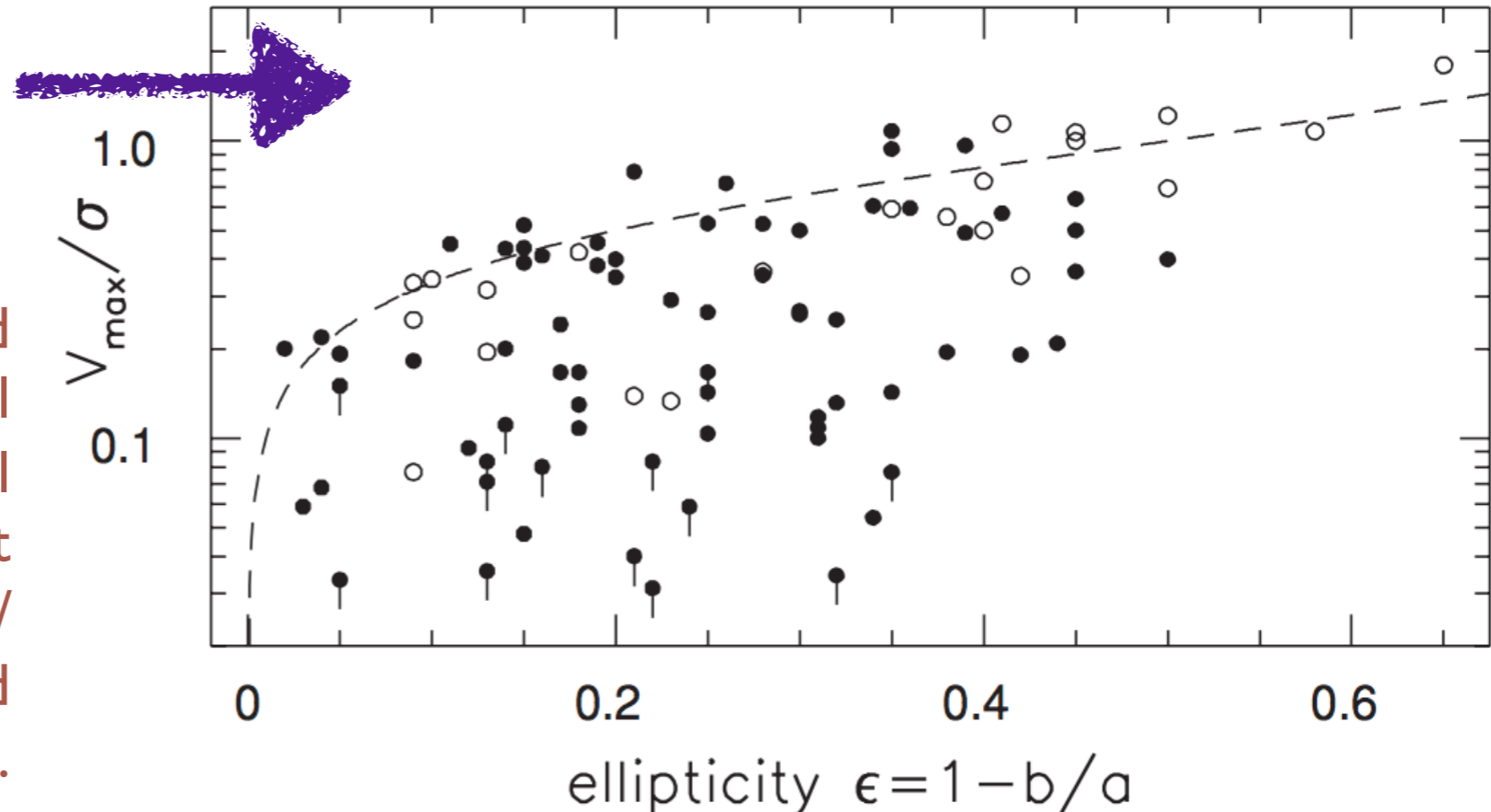


Fig. 6.14. The ratio of measured peak rotation speed  $V_{\max}$  to central velocity dispersion  $\sigma$  for elliptical galaxies, plotted against apparent ellipticity. The dashed line gives  $(V/\sigma)_{\text{iso}}$ , the fastest rotation expected for a given flattening.

## Um pouco de "história"

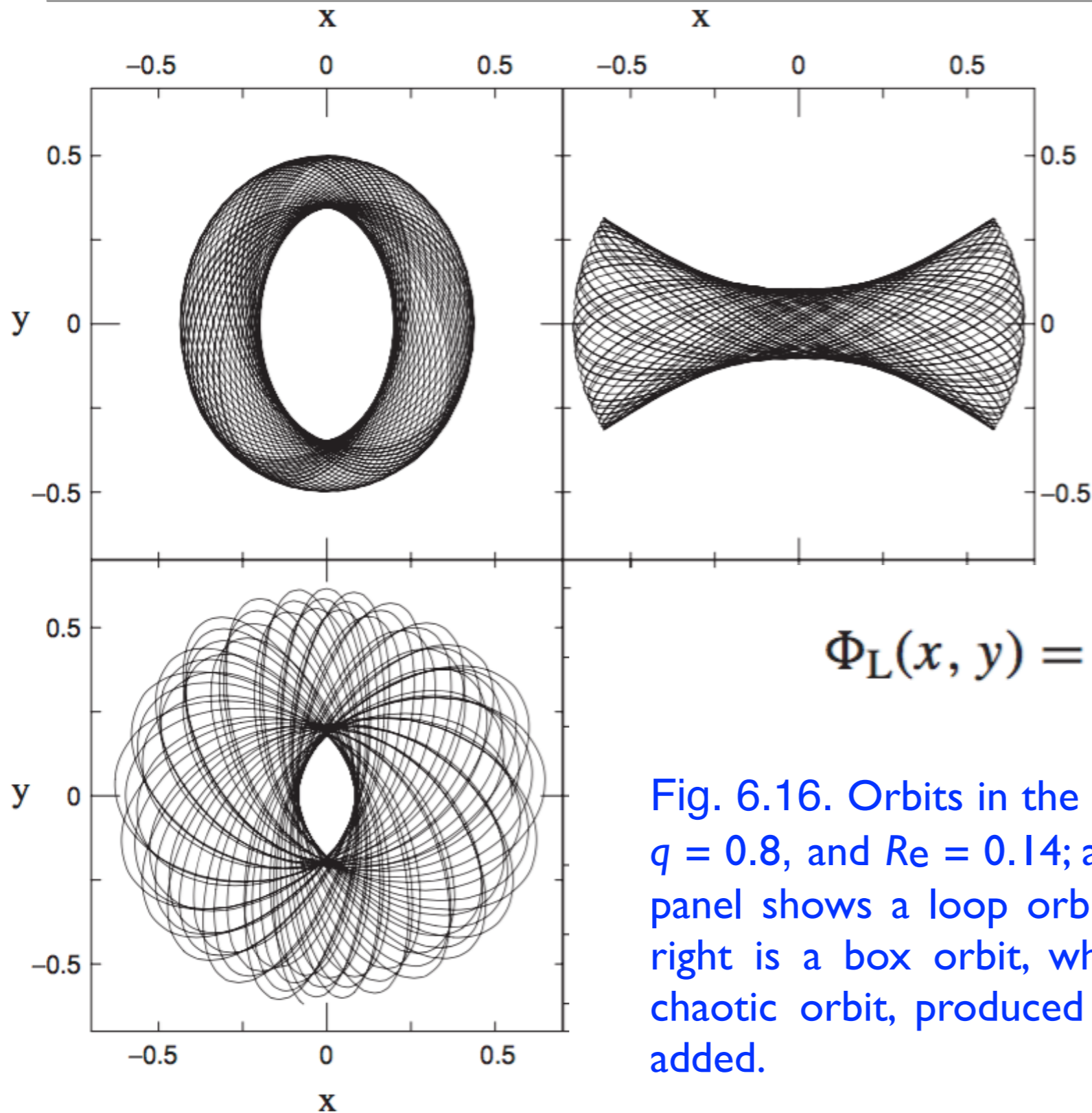
---

- Essas descobertas derrubaram a idéia vigente de que as elípticas eram “smooth” porque já havia relaxado dinamicamente (simétricas em torno de um eixo de rotação, isotropia de velocidades)
- Esses estados não podem existir por muito tempo em galáxias axissimétricas, e requerem *potenciais gravitacionais triaxiais*
- Um dos mais comuns é o oscilador harmônico triaxial:

$$\Phi_{\text{HO}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2) \quad (6.31)$$



# Órbitas em um potencial triaxial



$$\Phi_L(x, y) = \frac{1}{2} v_0^2 \ln \left( R_e^2 + x^2 + \frac{y^2}{q^2} \right),$$

Fig. 6.16. Orbits in the potential of Equation 6.33, with  $v_0 = 1$ ,  $q = 0.8$ , and  $R_e = 0.14$ ; all have energy  $E = -0.337$ . The top left panel shows a loop orbit, which avoids the center; at the top right is a box orbit, which passes through it; lower left is a chaotic orbit, produced when a central spherical potential is added.

# Isofotas

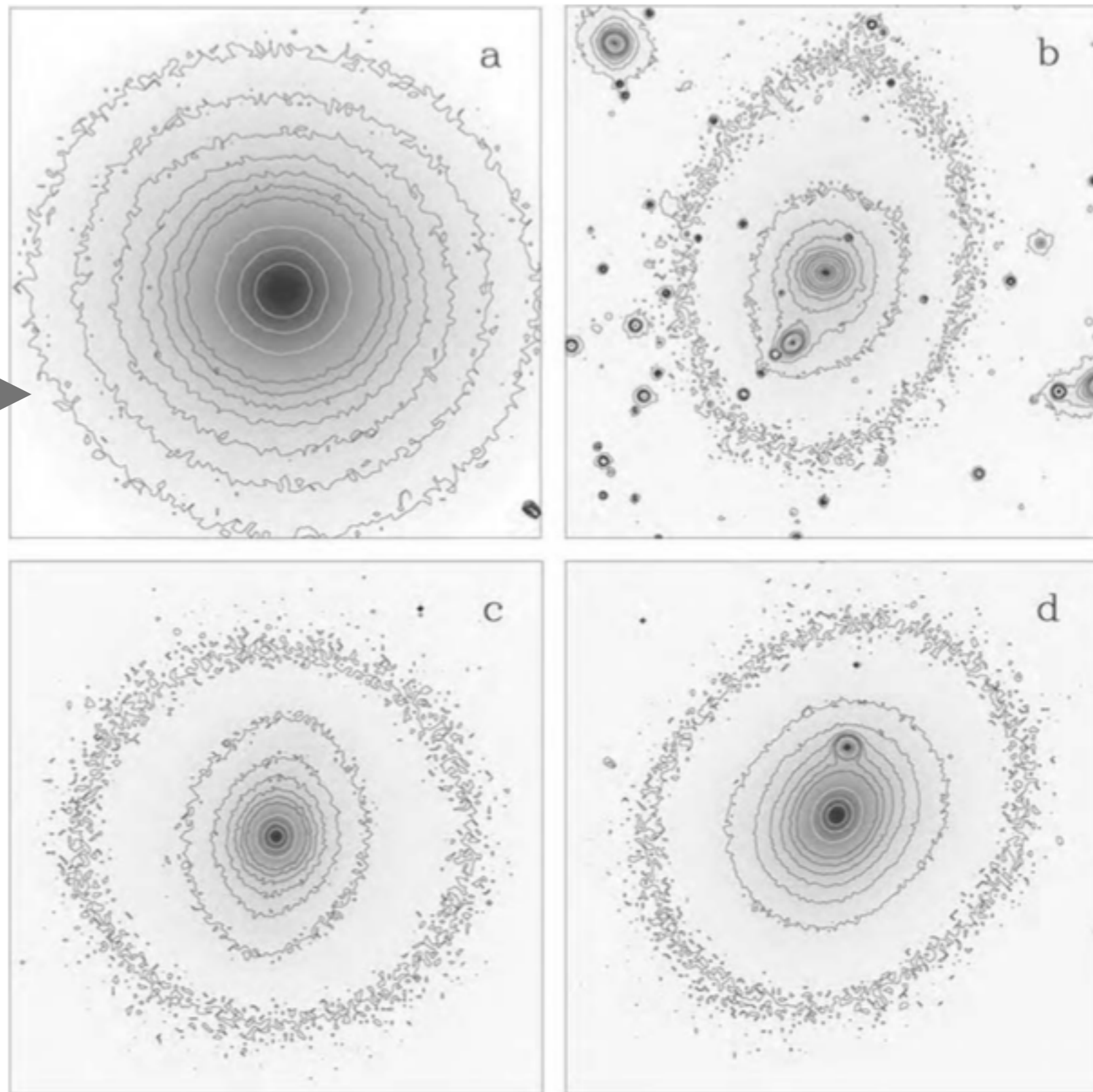
Em algumas galáxias, as isofotas são incrivelmente próximas de verdadeiras elipses, e as várias isofotas compartilham o mesmo centro e direção dos eixos.

Elipsidade:  $\epsilon = 1 - b/a$

Classificação da galáxia no sistema de Hubble:  $En$

$$n = 10(1 - b/a)$$

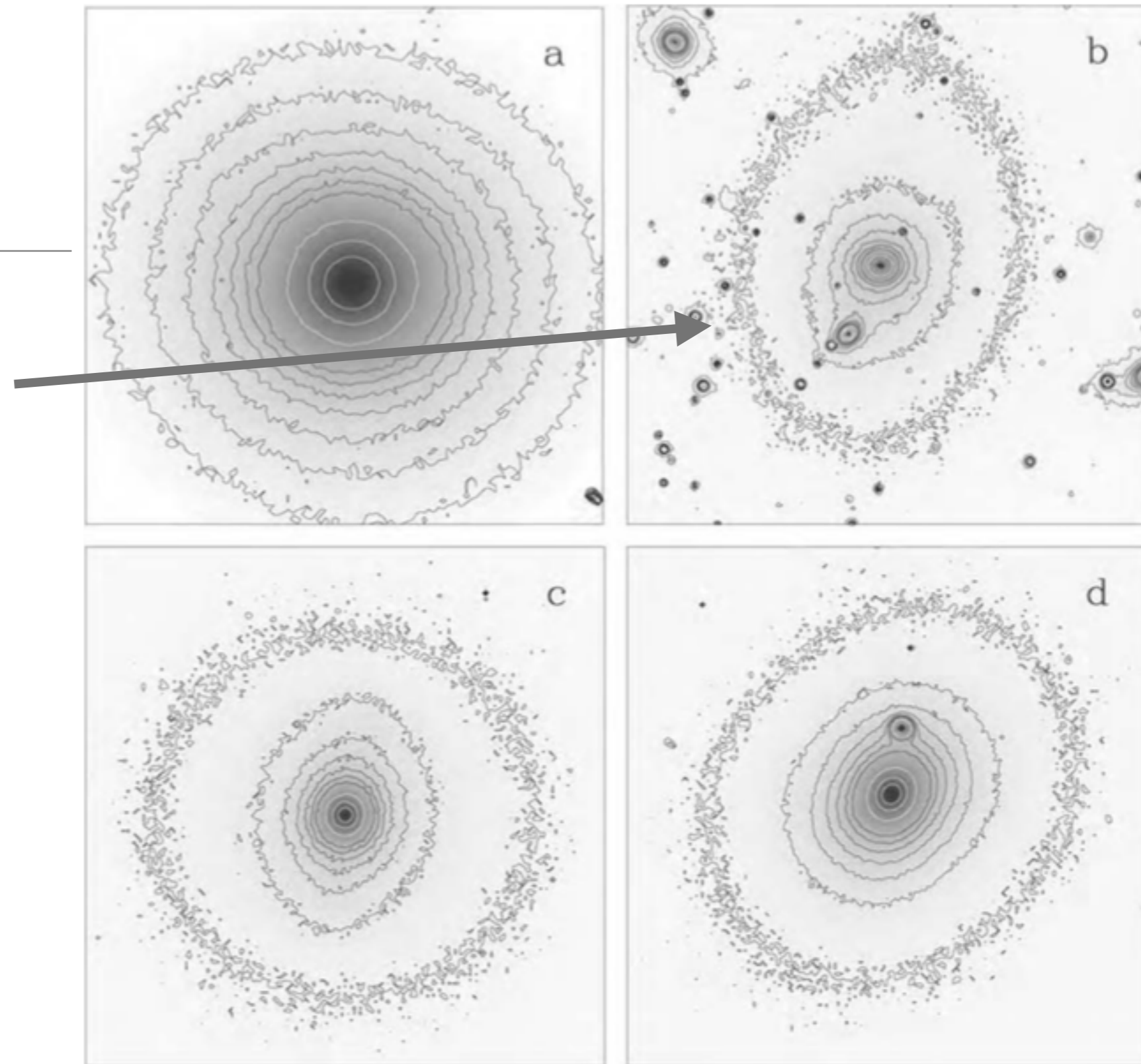
Mas a classificação de uma galáxia elíptica depende da nossa linha de visada.



**Fig. 6.1.** Isofotas in the  $R$  band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with  $a_4 \approx 0.03$  (Zw 159-89 in Coma); (d) rectangular 'boxy' isophotes, with  $a_4 \approx -0.01$  (NGC 4478). The compact objects, especially prominent in (b), are mainly foreground stars – R. de Jong.

# Isofotas

*Isophote twist* é geralmente interpretado como uma indicação de que a galáxia é triaxial



**Fig. 6.1.** Isophotes in the *R* band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with  $a_4 \approx 0.03$  (Zw 159-89 in Coma); (d) rectangular 'boxy' isophotes, with  $a_4 \approx -0.01$  (NGC 4478). The compact objects, especially prominent in (b), are mainly foreground stars – R. de Jong.

# Isofotas

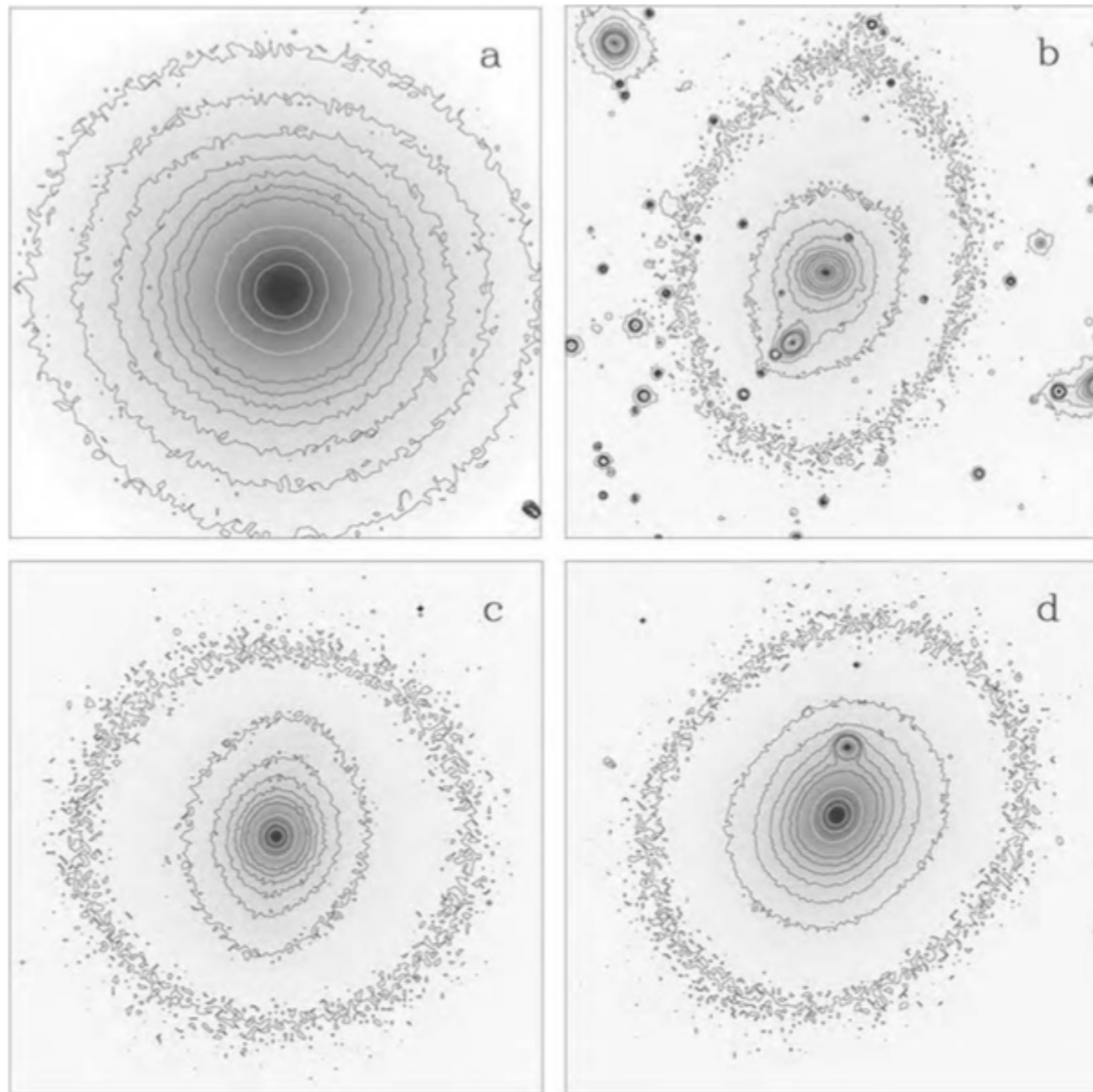
Pode-se descrever elipses em termos de

$$x = a \cos t, \quad y = b \sin t,$$

onde  $x$  e  $y$  descrevem distâncias ao longo dos eixos maiores e menores, e  $t$  descreve o ângulo.

Sendo  $\Delta r(t)$  a distância entre a elipse e a isofota medida, pode-se descrever:

$$\Delta r(t) \approx \sum_{k \geq 3} a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt);$$



**Fig. 6.1.** Isophotes in the  $R$  band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with  $a_4 \approx 0.03$  (Zw 159-89 in Coma); (d) rectangular 'boxy' isophotes, with  $a_4 \approx -0.01$  (NGC 4478). The compact objects, especially prominent in (b), are mainly foreground stars – R. de Jong.

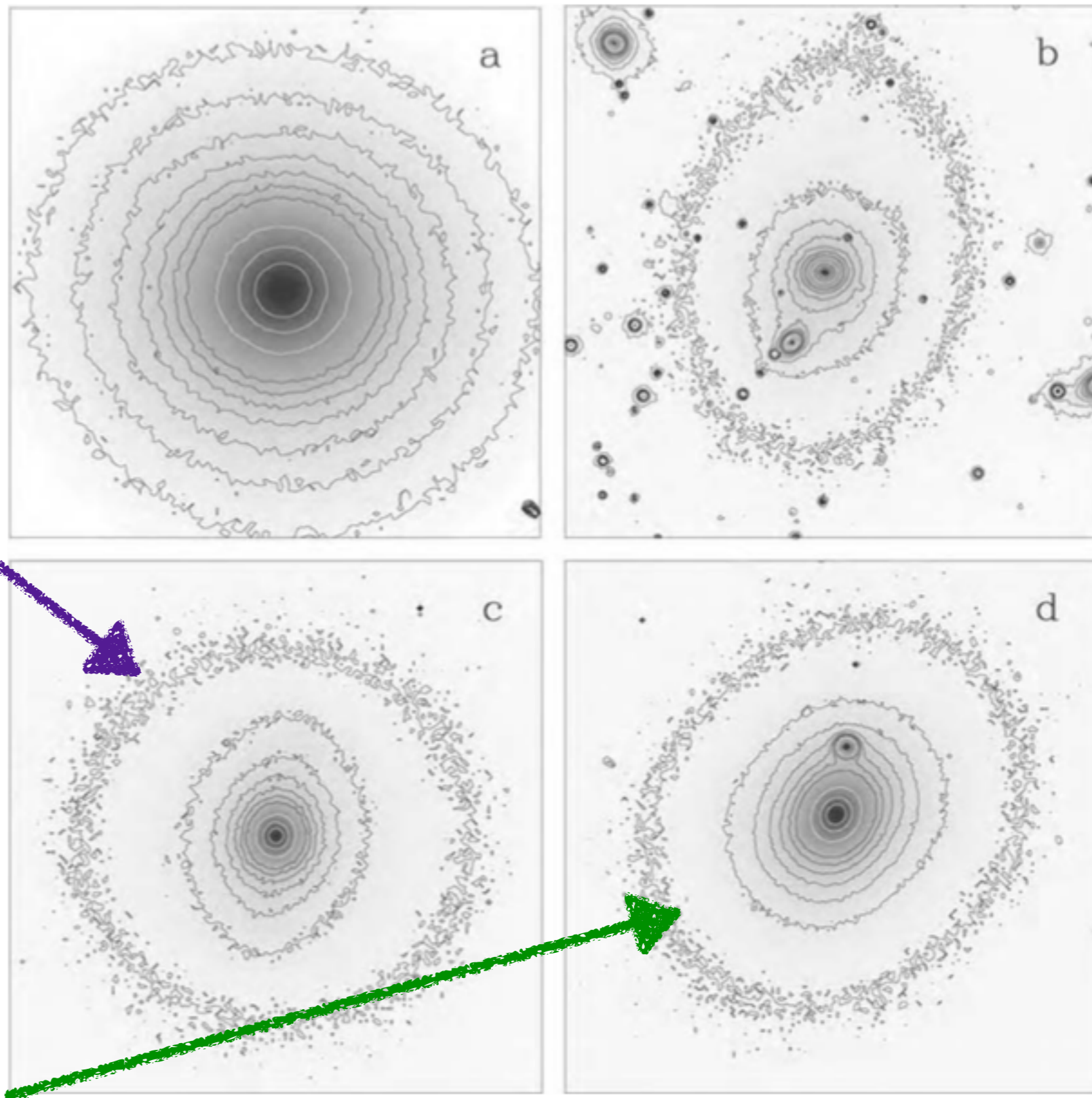
# Isofotas

**Isofotas “disky”**  $a_4 > 0$

Discos contendo até 30% da luz total da galáxia estão embebidas no corpo elíptico. São como S0 onde o bojo é tão grande que engoliu o disco. Tendem a ter alta rotação e serem mais achatadas.

**Isofotas “boxy”**  $a_4 < 0$

As boxy são associadas a fortes emissões de rádio e raio-X e tem pouca ou nenhuma rotação

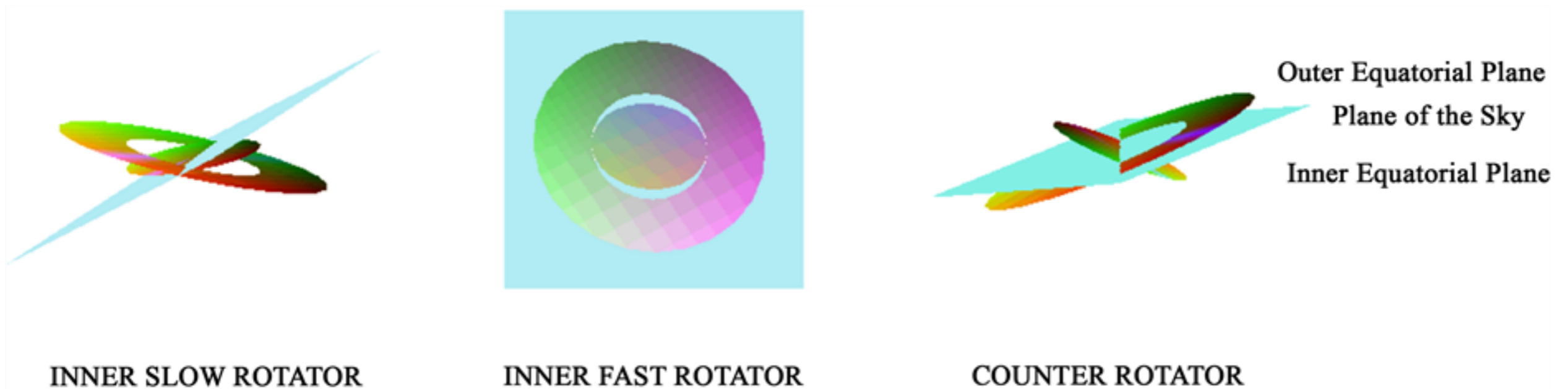


**Fig. 6.1.** Isofotes in the  $R$  band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped ‘disky’ isophotes, with  $a_4 \approx 0.03$  (Zw 159-89 in Coma); (d) rectangular ‘boxy’ isophotes, with  $a_4 \approx -0.01$  (NGC 4478). The compact objects, especially prominent in (b), are mainly foreground stars – R. de Jong.

# Kinematic decoupled cores (KDCs)

---

- Grande número de galáxias com cores cinematicamente desacoplados vem sendo descobertas. Número de descobertas crescem com a precisão das medidas





Galáxias elípticas:  
Populações estelares

# Gás Frio

---

- Em geral não apresentam gás e poeira. Apenas 5%–10% das elípticas tem hidrogênio atômico e molecular suficiente para ser detectado
- Mas quase todas apresentam alguma poeira nas regiões nucleares
- Uma minoria de elípticas, em particular as que tem ‘peculiaridades’ (shells, lanes) tem tanto ou mais gás que uma galáxia espiral (Centaurus A, ao lado)

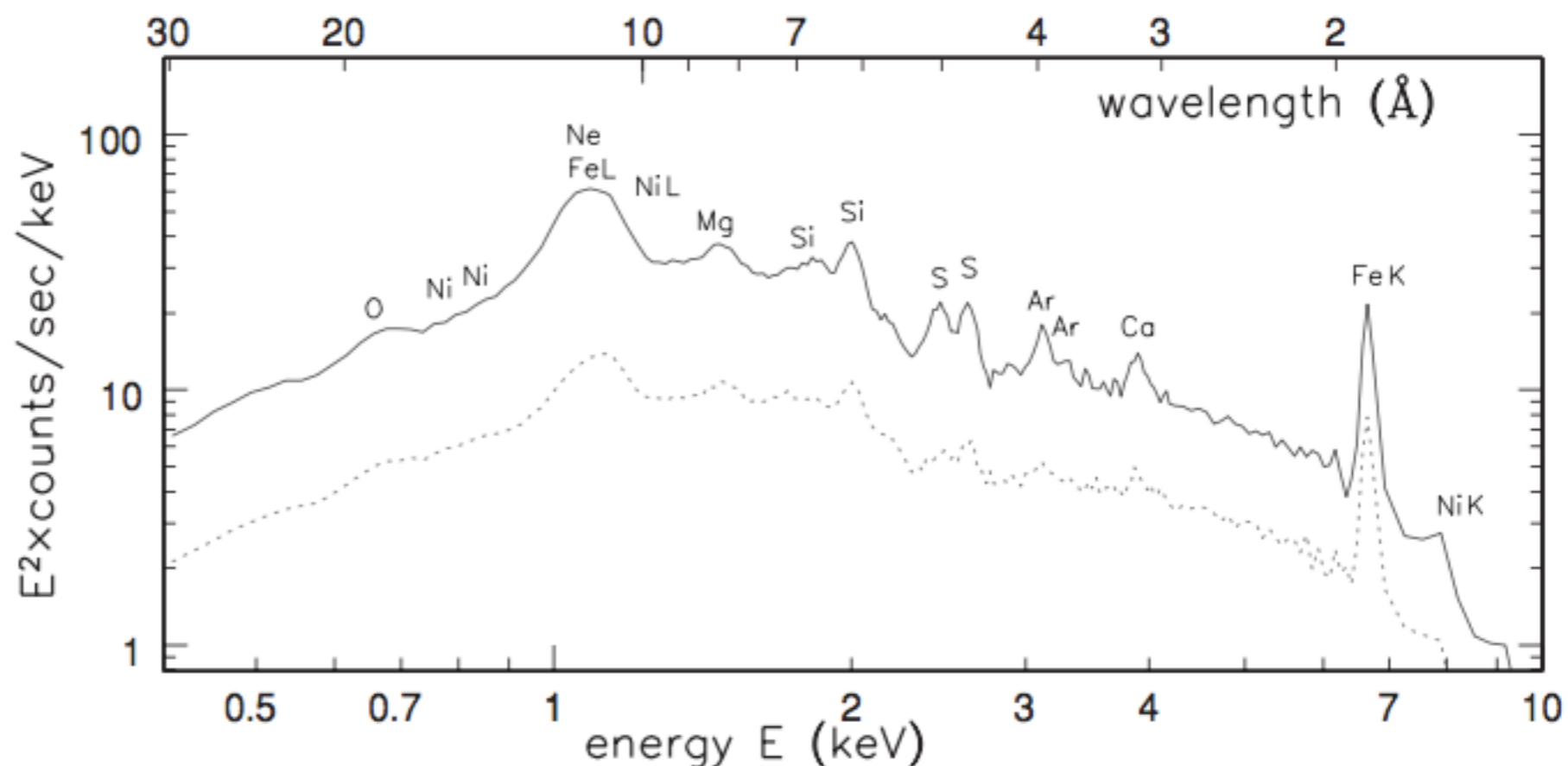




# Gás quente em elípticas

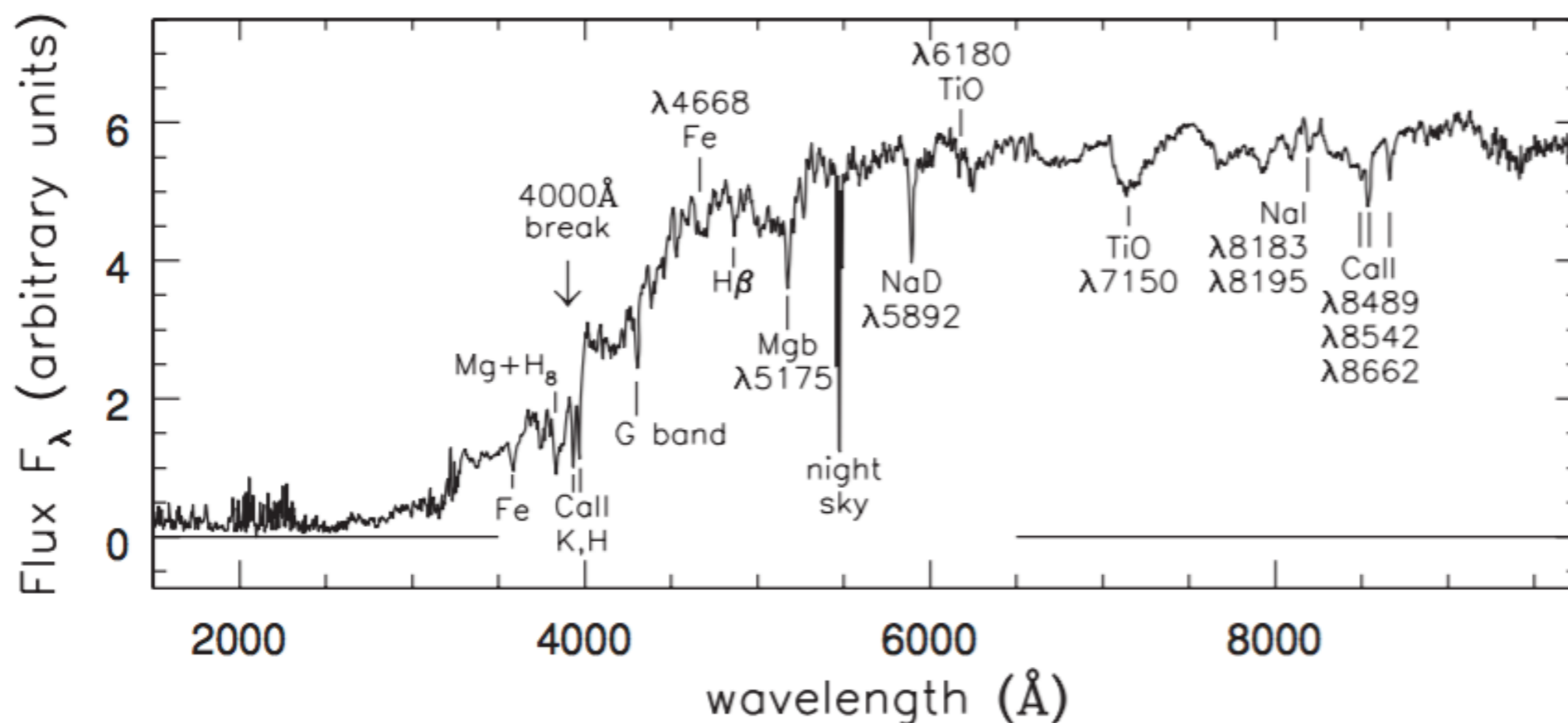
- No entanto, a elíptica típica contém imensas quantidades de gás quente ionizado
- Temperaturas de  $(1-3) \times 10^7$  K,
- Essas “atmosferas” estendem por cerca de 30 kpc
- Mass de gás  $(10^9-10^{11})M_{\odot}$  para as elípticas gigantes
- Fontes de raio-X; gás quente, AGN e binárias estelares

Fig. 6.21. The X-ray spectrum of hot gas at  $T \sim 2 \times 10^7$  K around the luminous elliptical M87. The solid line shows emission from gas within  $4'$  or 5 kpc of the center; the broken line is for gas between  $4'$  and  $8'$  radius. All lines except iron L and nickel L are emitted as electrons drop to the lowest-energy orbits, in the K shell – XMM-Newton:



# Populações estelares e gás

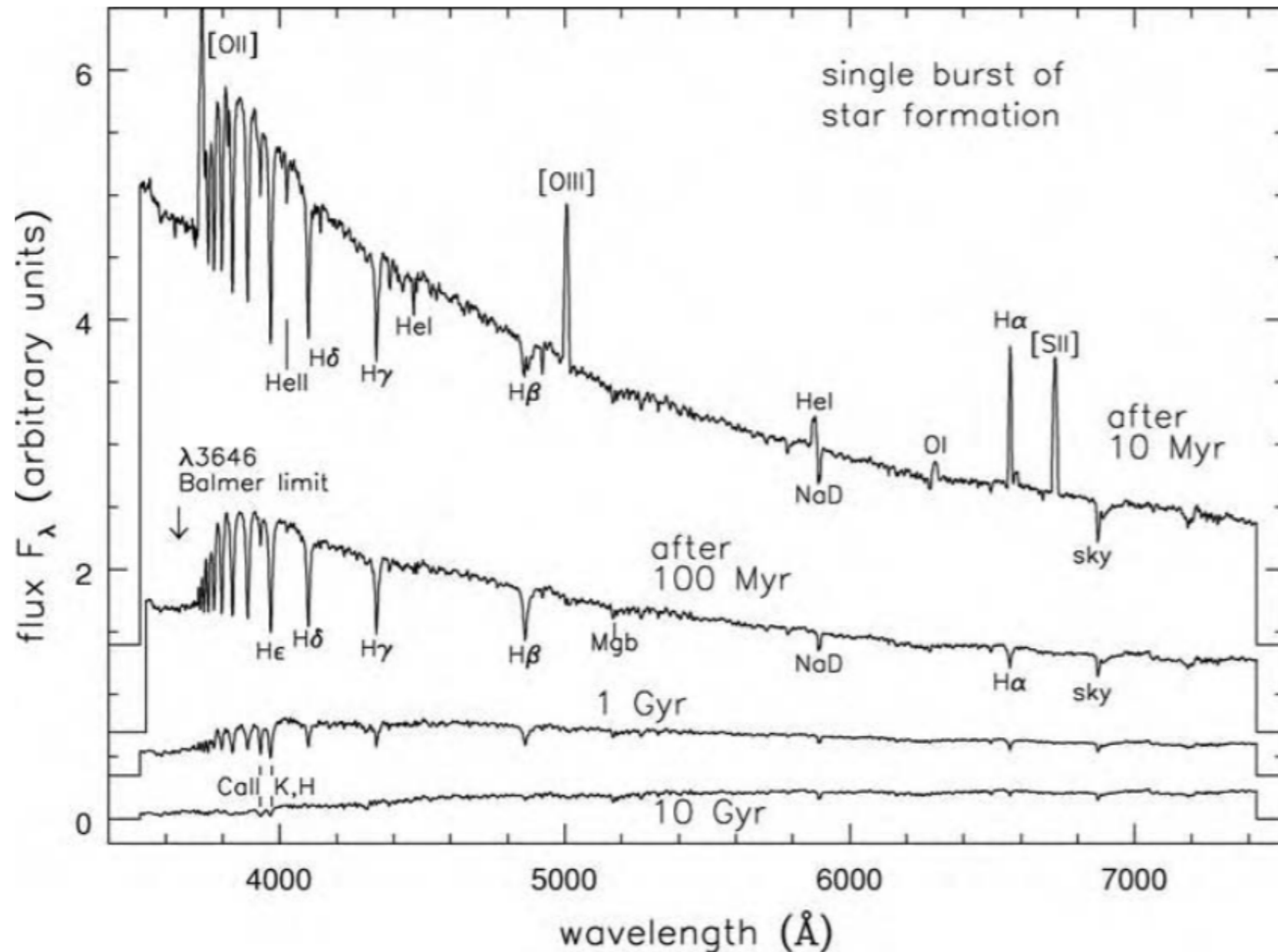
- Pouca formação estelar ocorreu nos últimos 1 - 2 Gyr
- População estelar tipicamente velha, mas bastante rica em metais (mais próxima da população do bojo do que do halo)



**Fig. 6.17.** The spectrum of an elliptical galaxy; compare this with the spectra of K and M stars in Figure 1.1, and those of disk galaxies in Figure 5.24 – A. Kinney.

# Populações estelares

- depois de 10Myr, fortes linhas de emissão são visíveis
- em 1 Gyr, tem-se um espectro *post-starburst*, com linhas típicas de estrelas tipo A
- Após ~2Gyr, o espectro é dominado por linhas de populações velhas
- Algumas elípticas são classificadas 'E+A' quando tem um espectro velho misturado a linhas de post-starburst

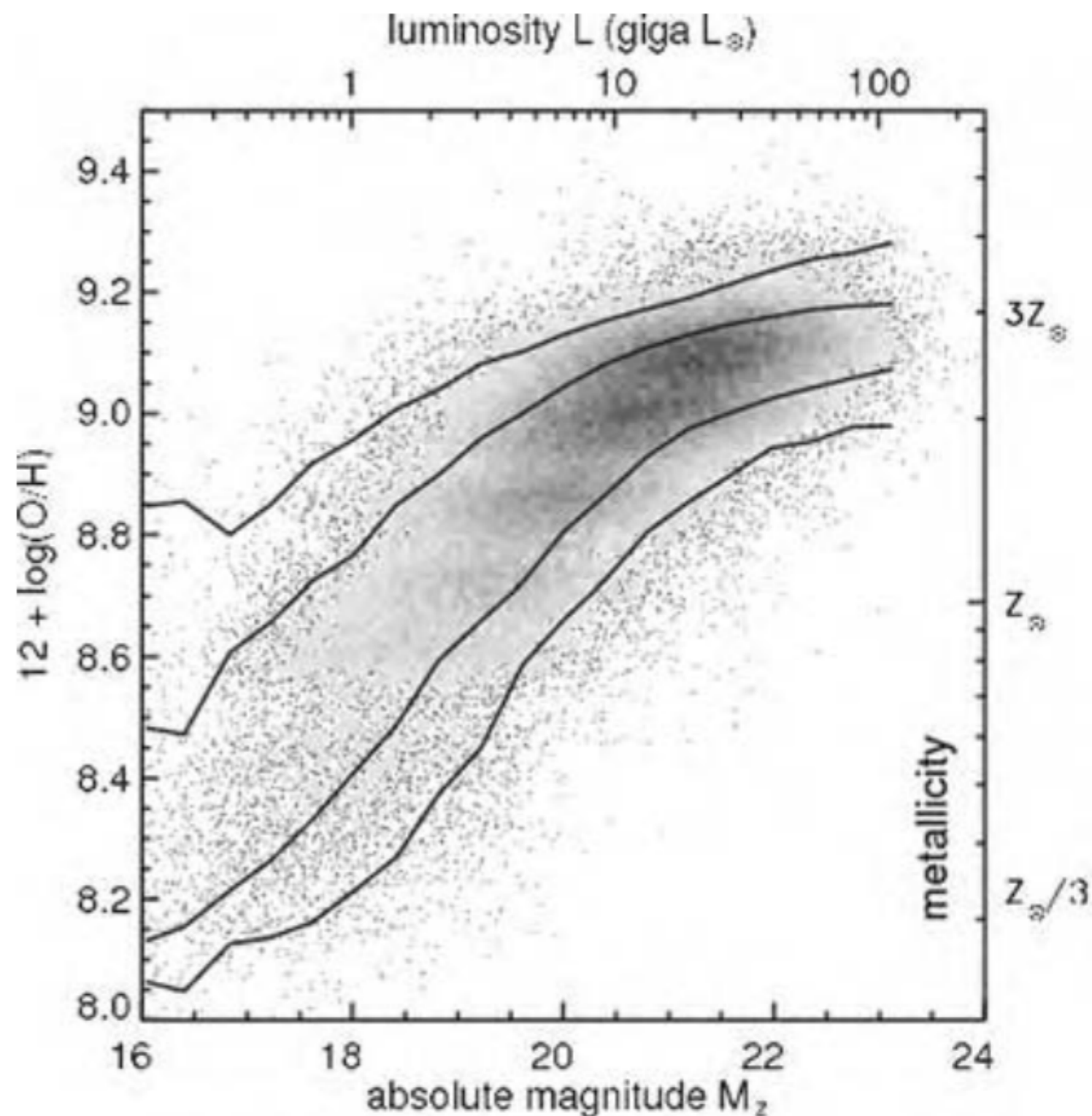


**Fig. 6.18.** Spectra for a ‘galaxy’ that makes its stars in a  $10^8$  yr burst, all plotted to the same vertical scale. Emission lines of ionized gas are strong 10 Myr after the burst ends; after 100 Myr, the galaxy has faded and reddened, and deep hydrogen lines of A stars are prominent. Beyond 1 Gyr, the light dims and becomes slightly redder, but changes are much slower – B. Poggianti.

# Populações Estelares

Galáxias mais luminosas  
(mais massivas) são mais  
velhas e mais ricas em  
metais.

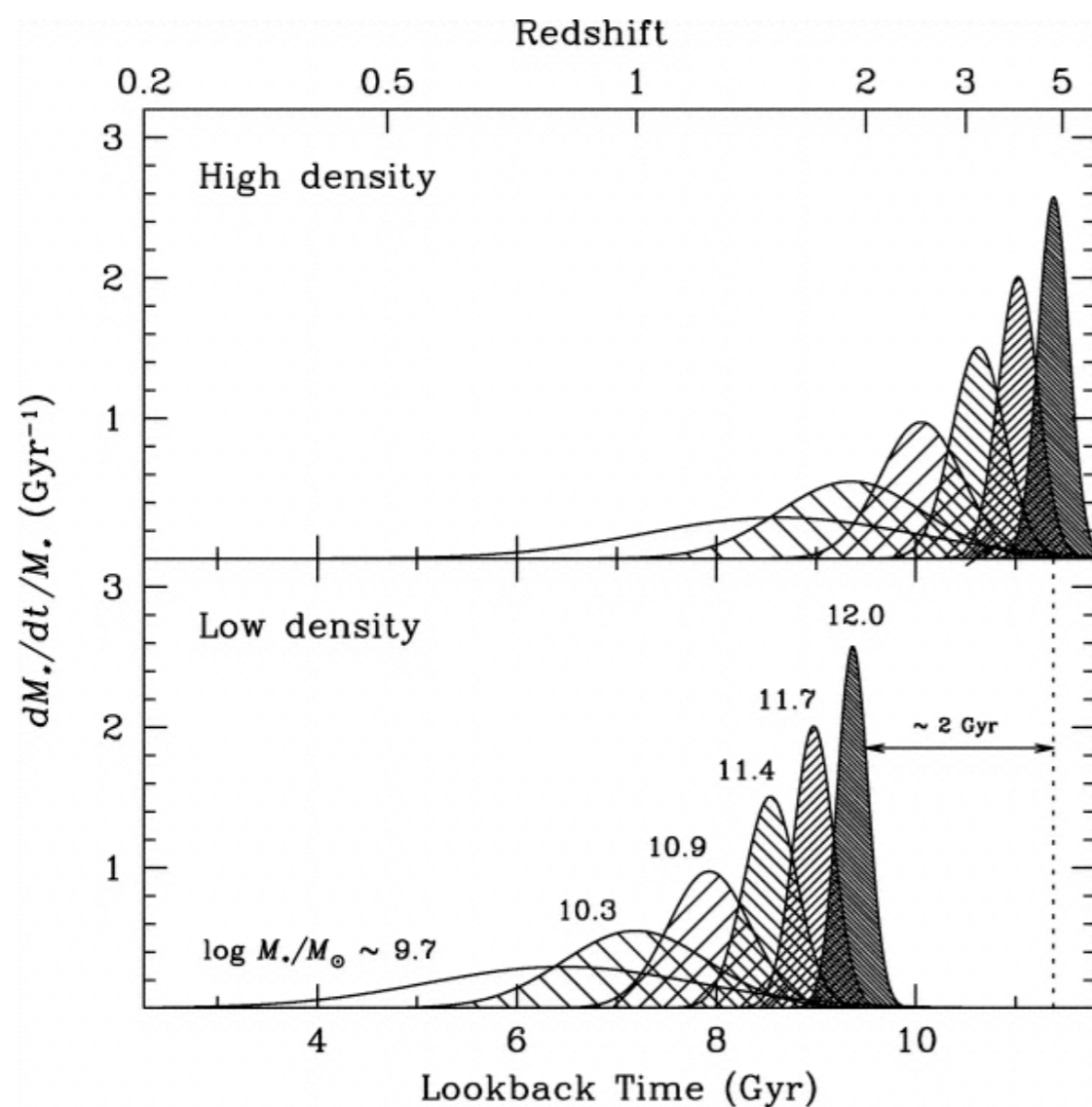
Fig. 6.20. For 83 963 galaxies of the Sloan Digital Sky Survey, the left panel shows that luminous systems are richer in heavy elements. Outer curves show the region where 95% of the galaxies lie; inner curves enclose 60% of them.



Qual o  $[\alpha/Fe]$  você espera para  
esses sistemas?

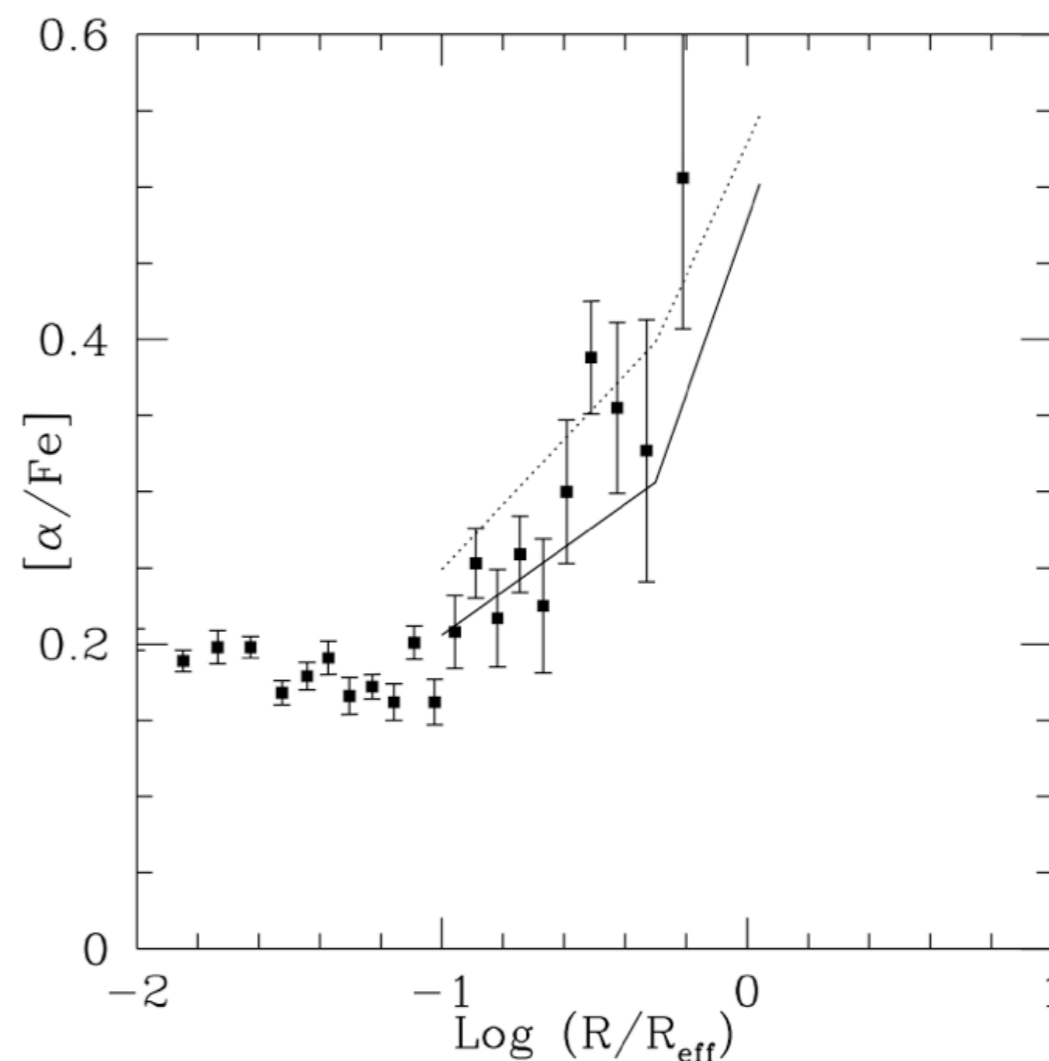
# $[\alpha/\text{Fe}]$ em galáxias elípticas

**The Epochs of Early-Type Galaxy Formation as a Function of Environment (Thomas et al. 2005)**



- Histórias de formação estelar de galáxias “early-type” para diferentes dispersão de velocidades = 100, 140, 190, 240, 280, e 320 km/s).

**The Outside-In Formation of Elliptical Galaxies (Pipino et al. 2004)**

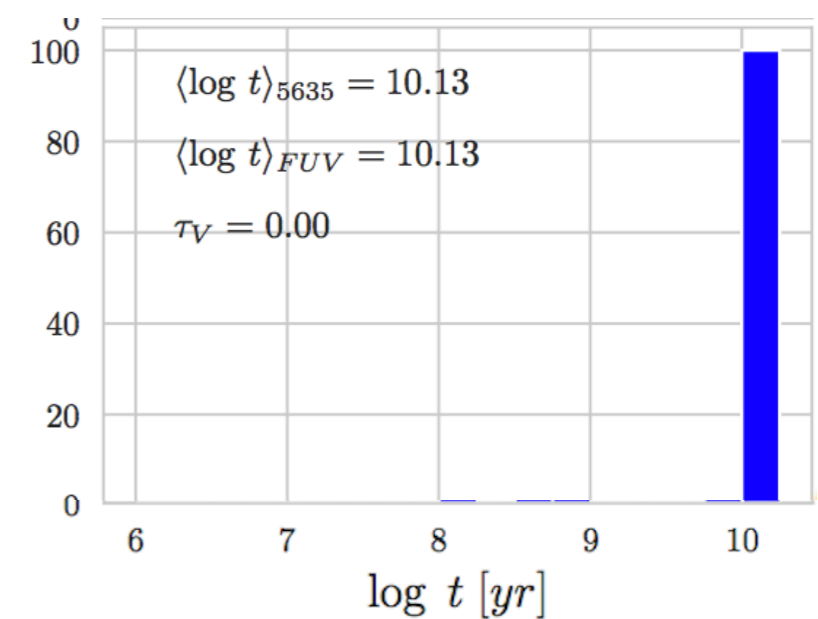
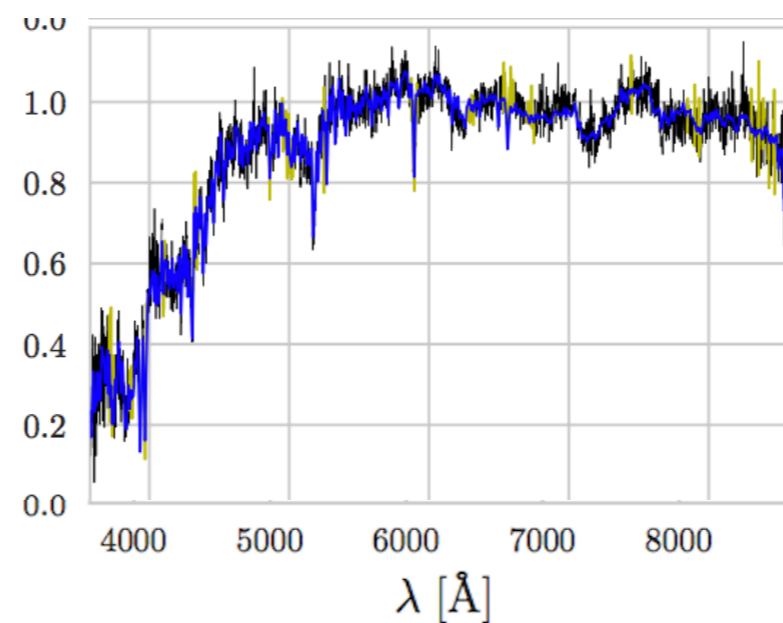
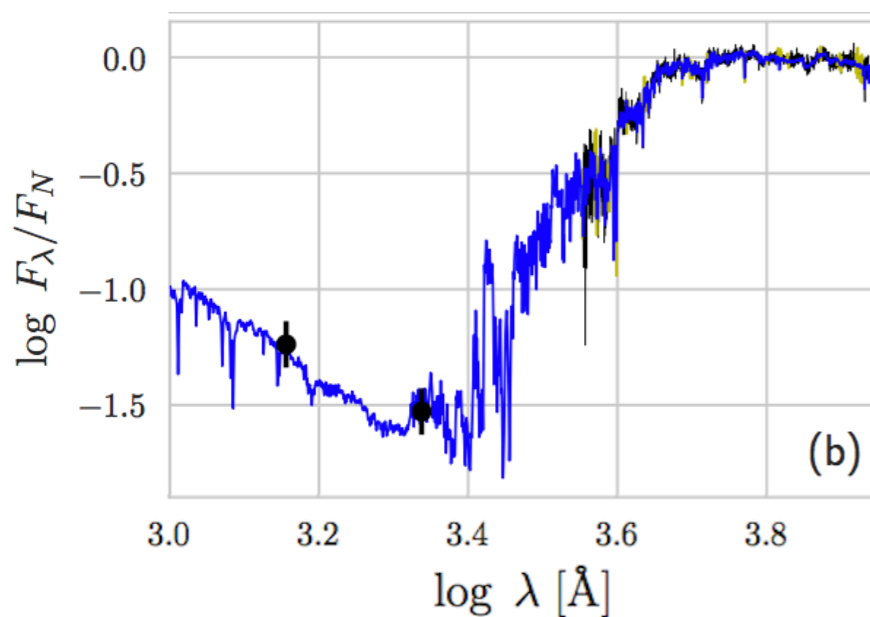


- $[\alpha/\text{Fe}]$  em função do raio para a galáxia elíptica NGC4697. Linhas correspondem a previsões de modelos de evolução química (formação “outside-in”).

Com uma população tipicamente velha, o que você espera em termos de emissão no UV?

# Fluxo UV

- Apesar da ausência de formação estelar recente, as elípticas podem ter alto fluxo no UV - **UV Upturn**
- A origem dessa emissão não é bem conhecida ainda, mas ao menos parte da emissão vem de fases estelares evolutivas que não são comuns na vizinhança solar



Werle et al. (in prep.)

# Fluxo UV

- Qual a origem do fluxo UV observado em elípticas?
- Formação estelar residual? (RSF na figura ao lado)
- Estrelas do Hot Horizontal Branch et al.?
- Binárias interagentes?

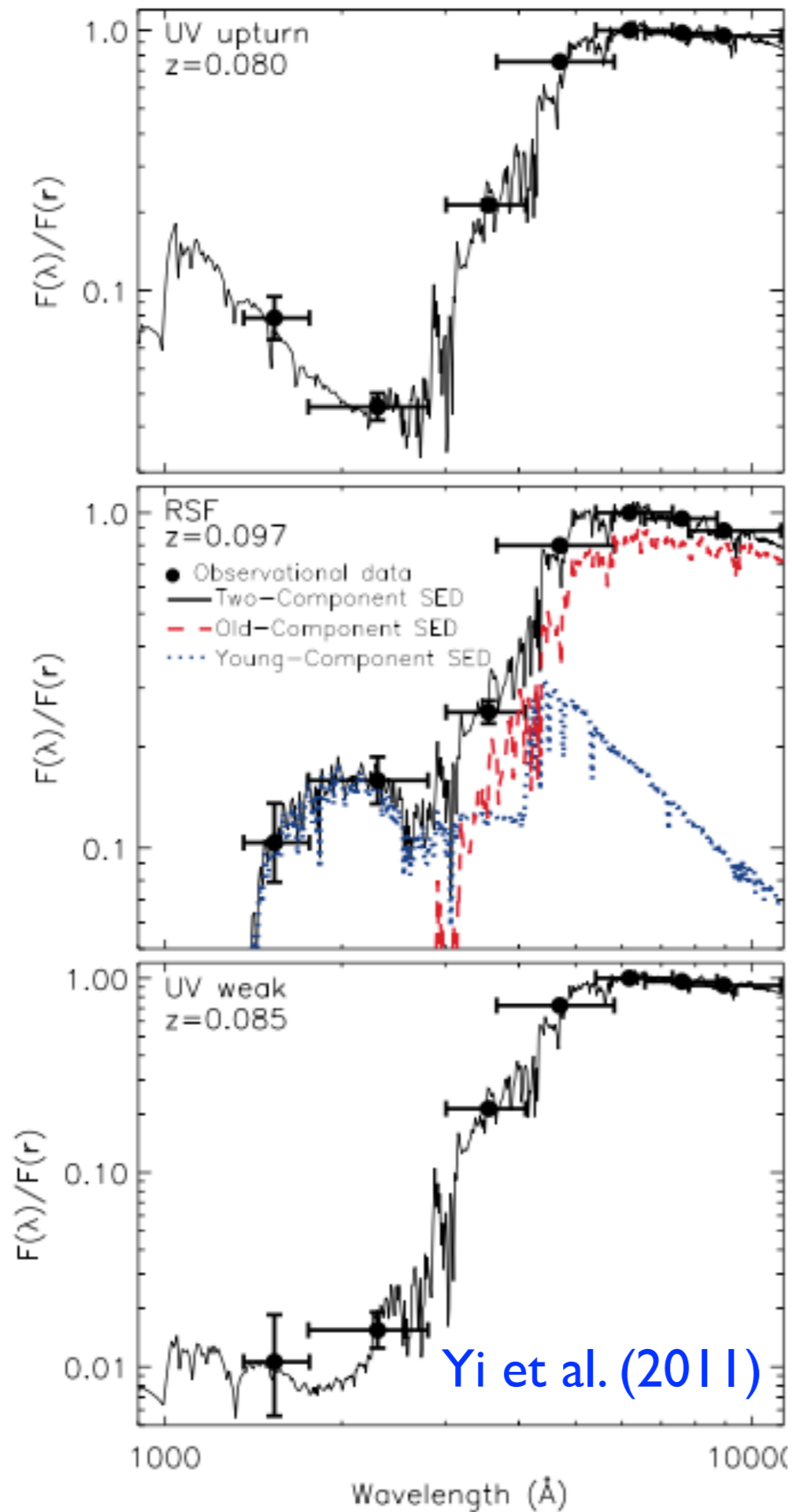


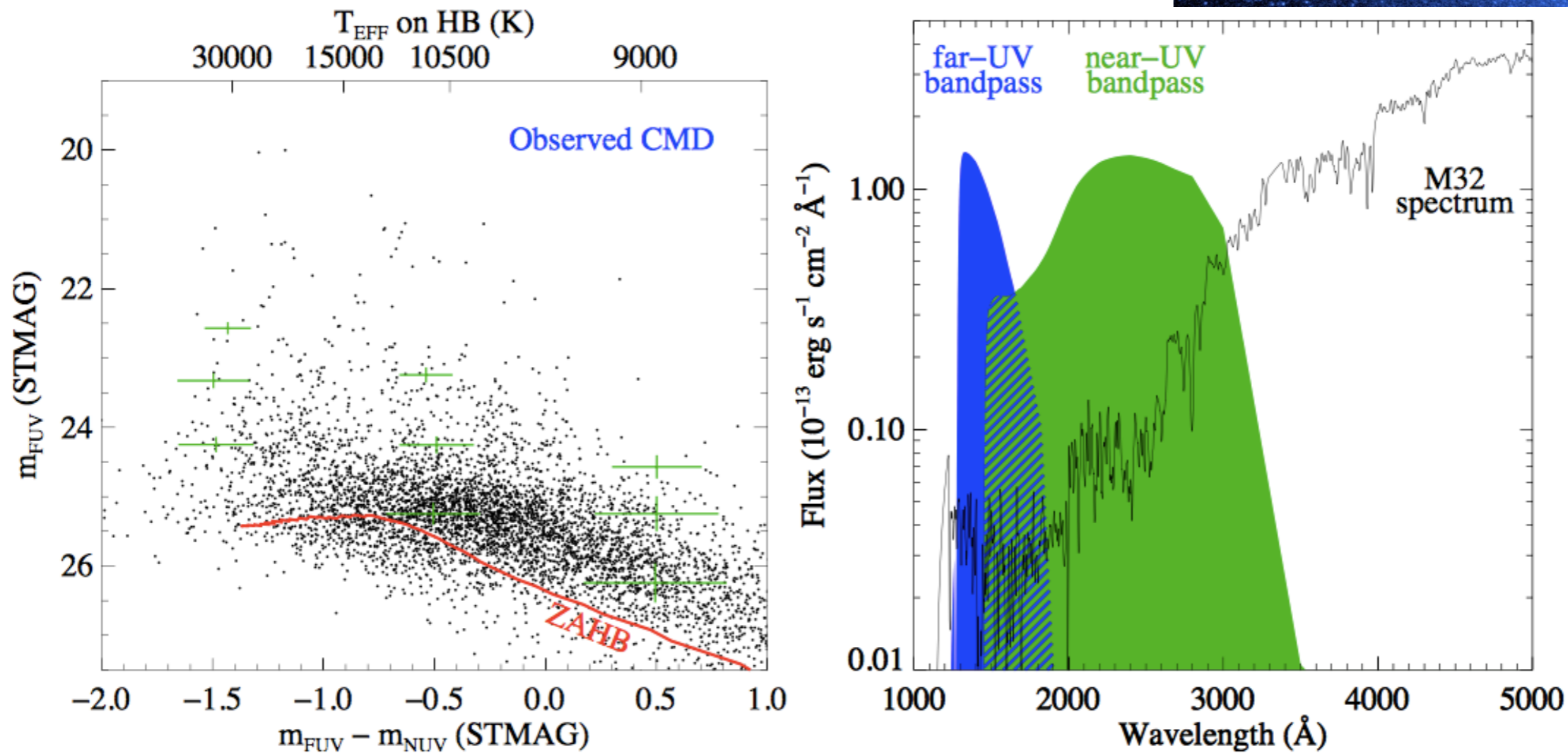
FIG. 3.— Spectral fits for the estimation of population parameters and  $k$  corrections. Top panel: An example of UV upturn galaxies. GALEX  $FUV$ ,  $NUV$ , and SDSS  $ugriz$  photometry are shown with band widths (horizontal) and measurement errors (vertical). The spectral fit is based on the Yi (2003) population models. Middle panel: An RSF elliptical case. The fit employs two (old and young) component populations to match the data. Bottom panel: A UV-weak case, the majority of elliptical galaxies.



# "Using M32 to Study Rapid Phases of Stellar Evolution"

<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207211>

<http://www.stsci.edu/~tbrown/research/padova.pdf>



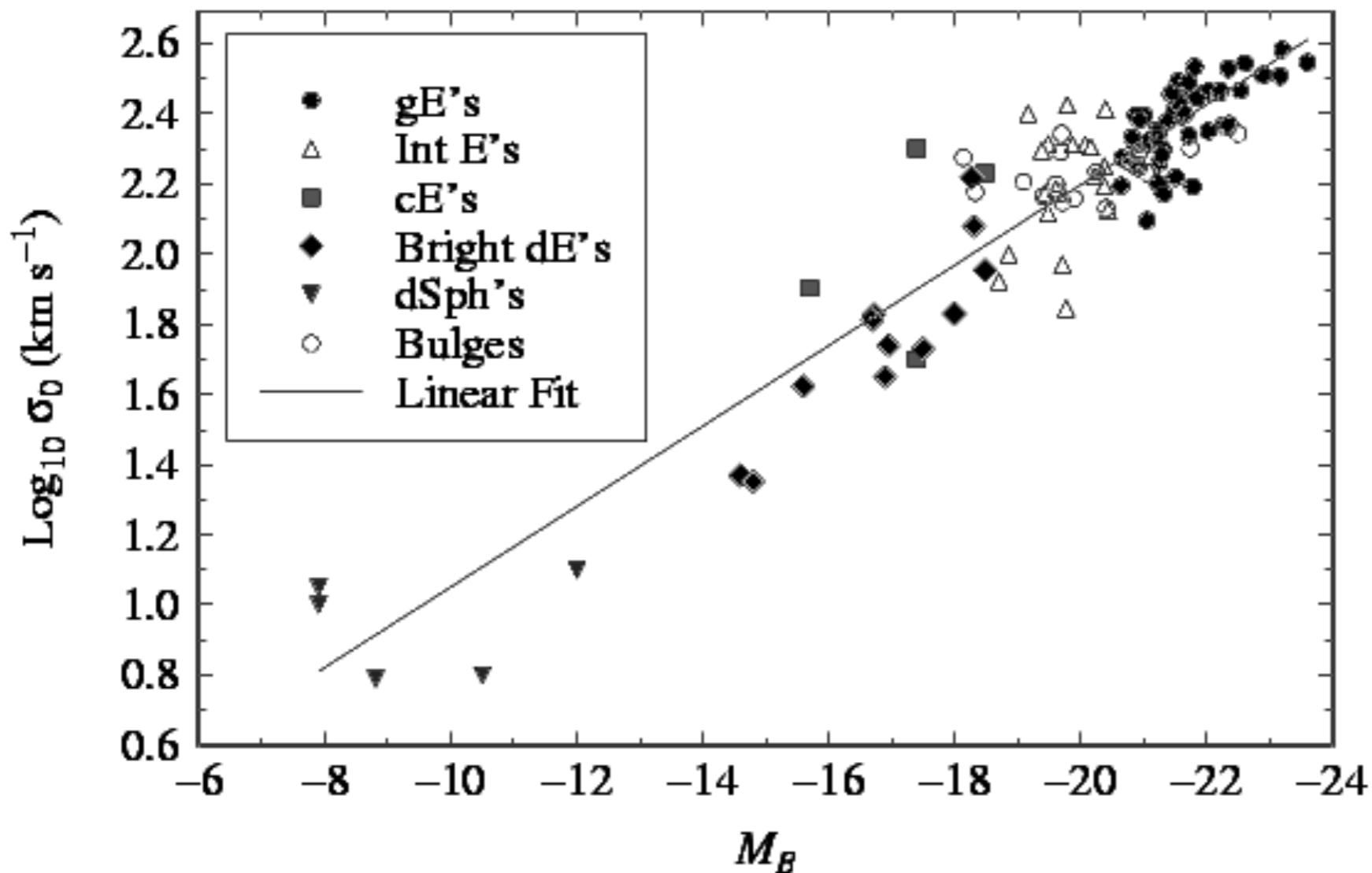


Galáxias elípticas:  
Relações de escala

# Relação Faber - Jackson (1976)

$$\frac{L_V}{2 \times 10^{10} L_{\odot}} \approx \left( \frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4.$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (v_i - \bar{v})^2}{N}}$$

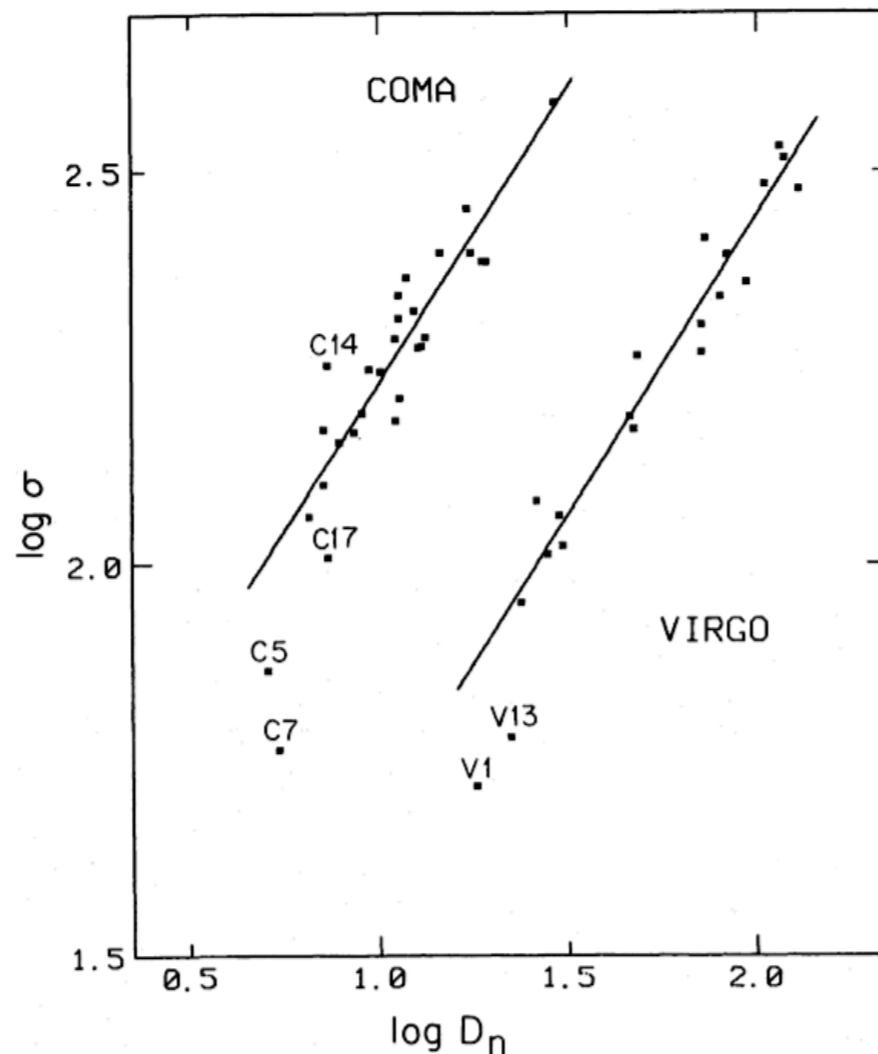


- Ao contrário de espirais, a maior parte da energia cinética em uma galáxia elíptica está na forma de movimentos aleatórios
- Assim como há uma correlação entre luminosidade e velocidade de rotação para as espirais, há uma correlação entre luminosidade em elípticas e dispersão de velocidades

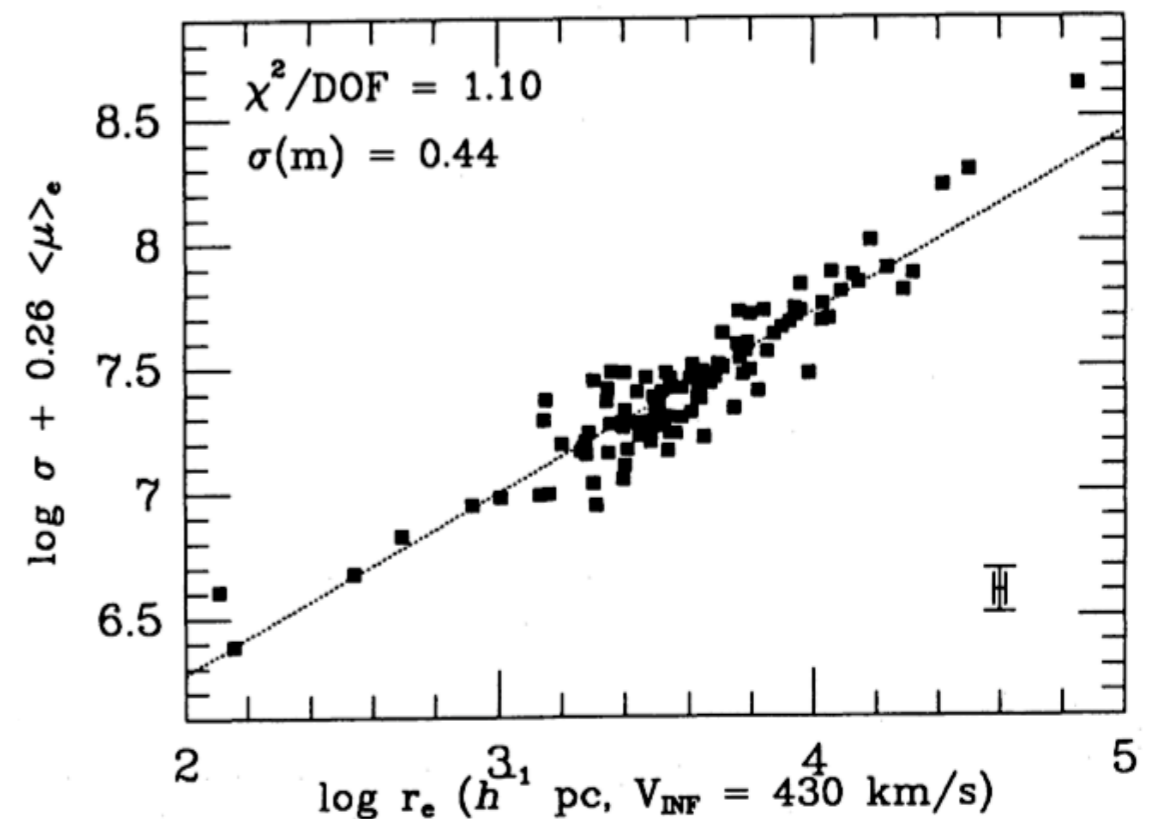
# O que pode explicar a dispersão da relação FB? (Para melhorar a sua utilidade como indicador de distância?)

Reescrever a luminosidade (ou magnitude absoluta) em termos de um tamanho e brilho superficial.  $D_n$  é um diâmetro fotométrico, dentro de uma isofota de um dado brilho superficial.

$D_n$ - $\sigma$ , Dressler et al. 1997



$R$ - $\sigma$ - $\mu$ , Djorgovski & Davis (1987)



**The “canonical form”:**  $R \sim \sigma^A I^B$

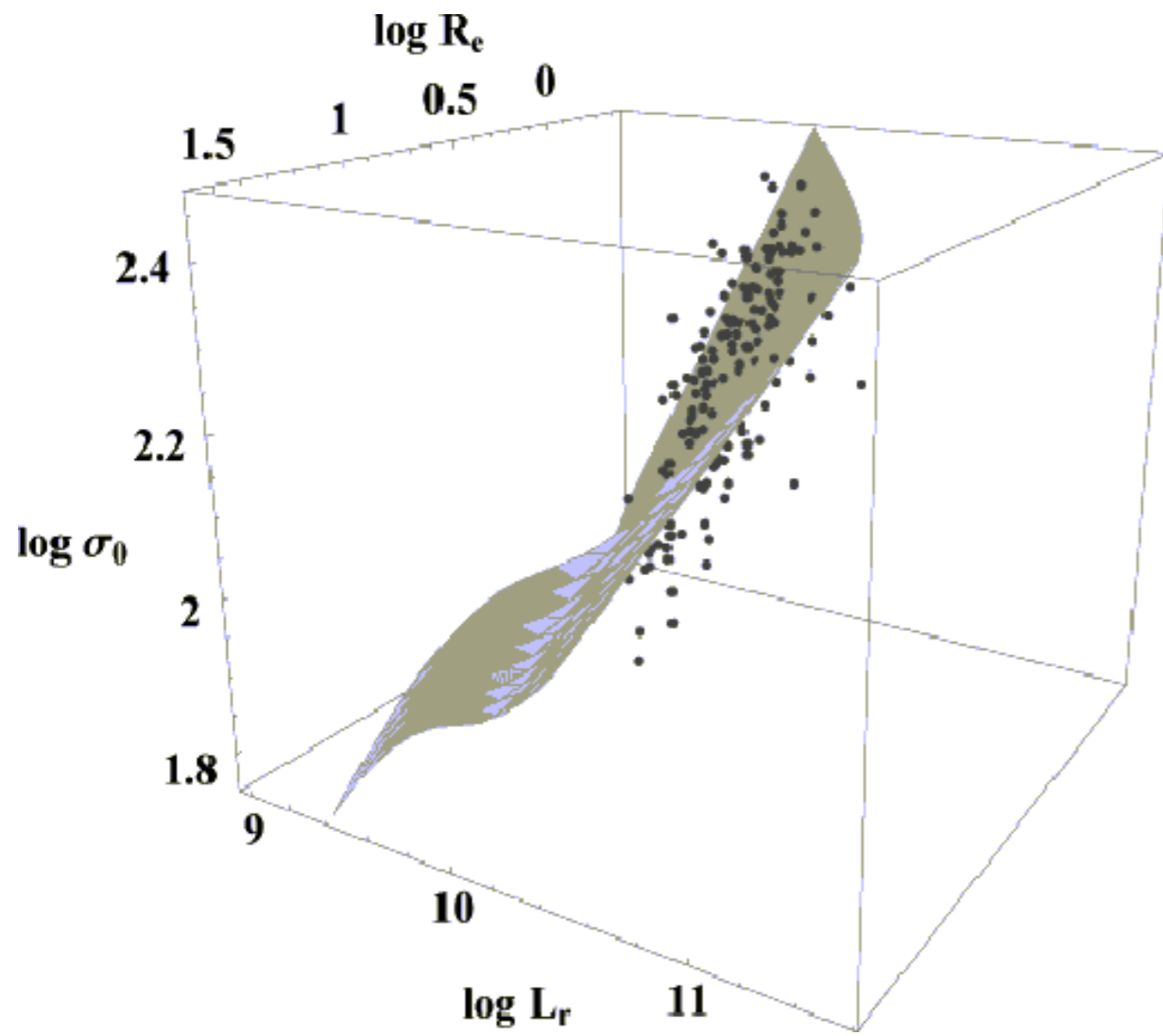
$R$  = non-isophotal radius ( $r_e, r_\eta, \dots$ )

$\sigma$  = central proj. velocity disp.

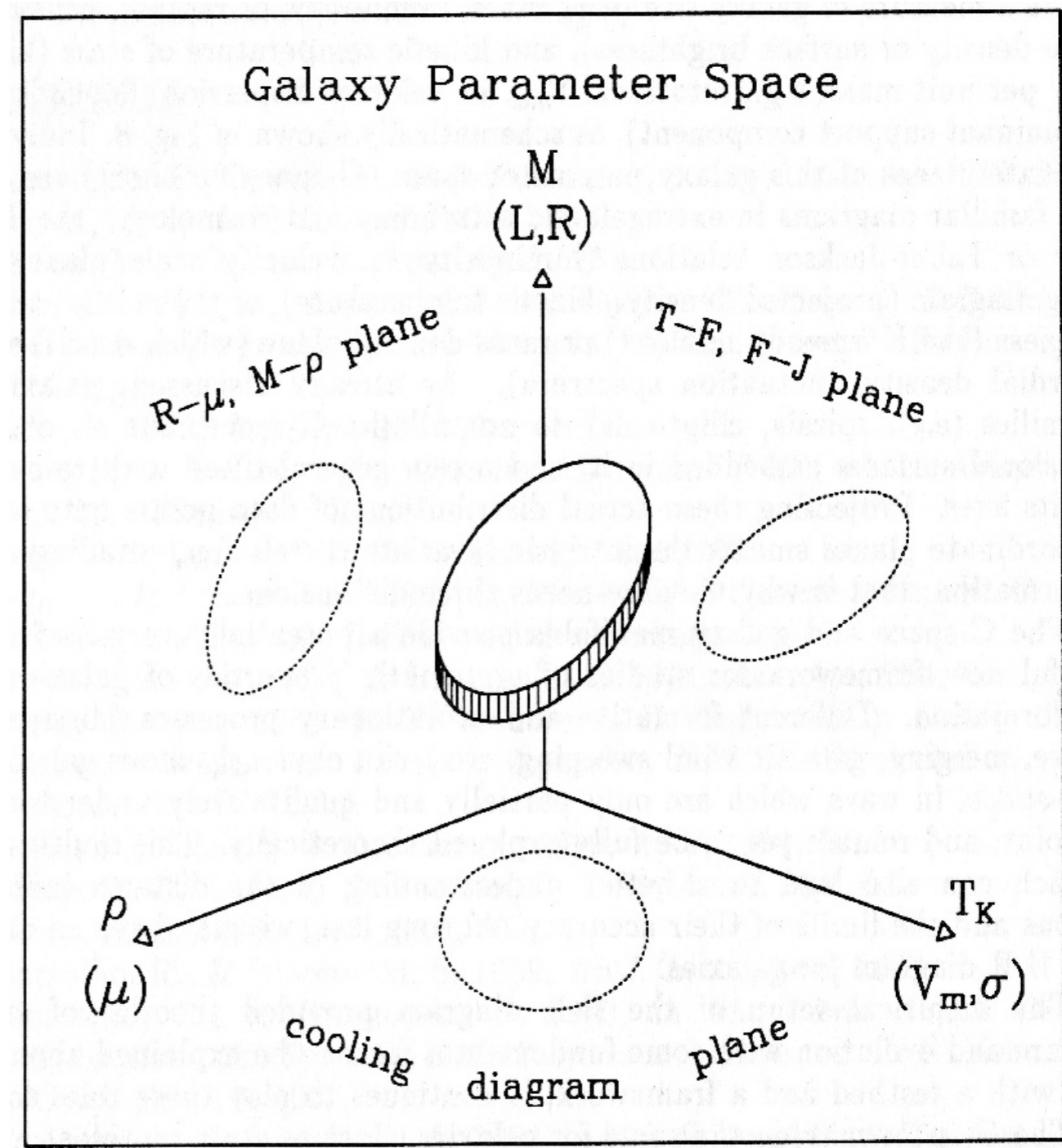
$I$  = mean surf. br. in linear units

# Plano Fundamental

Um plano no espaço tridimensional de dispersão de velocidade central  $\sigma$ , raio efetivo  $R_e$  e brilho superficial no raio efetivo  $I_e = I(R_e)$



$$R_e \propto \sigma^{1.2} I_e^{-0.8}$$

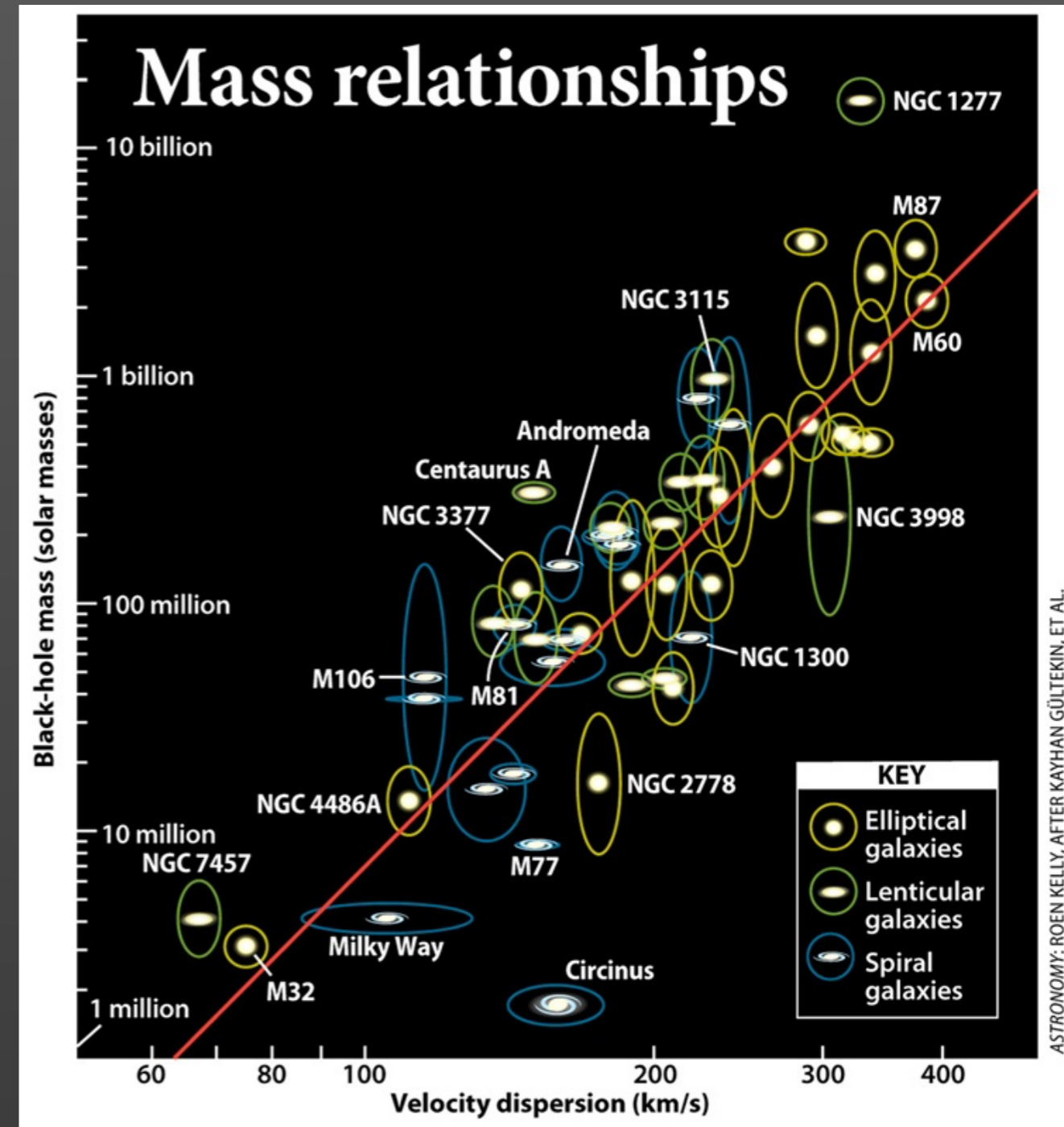


<http://astronomy.stackexchange.com/questions/6439/what-is-the-fundamental-plane-for-elliptical-galaxies>

[https://www.astro.umd.edu/~richard/ASTRO620/Fundamental\\_Plane\\_Djorgovski.pdf](https://www.astro.umd.edu/~richard/ASTRO620/Fundamental_Plane_Djorgovski.pdf)

# Relação entre massa do buraco negro central e early-type galaxies

- Há uma correlação observacional entre a dispersão de velocidade central de esferóides galácticos (bojos em galáxias espirais e lenticulares, ou galáxias elípticas) e a massa do buraco negro supermassivo que habita nas partes centrais da galáxia - **M- $\sigma$  relation** (ou "relação Faber-Jackson dos buracos negros")
- Alguns astrônomos interpretam como evidência de que o buraco negro central é parte fundamental da evolução das galáxias
- É geralmente interpretado como alguma forma de feedback mecânico entre o crescimento do buraco negro e dos esferóides galácticos, mas a origem desse feedback ainda é incerta
- <https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2013/07/supermassive-black-holes>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/M-sigma\\_relation](https://en.wikipedia.org/wiki/M-sigma_relation)



# O Plano Fundamental das Elípticas

## O diagrama HR das galáxias elípticas

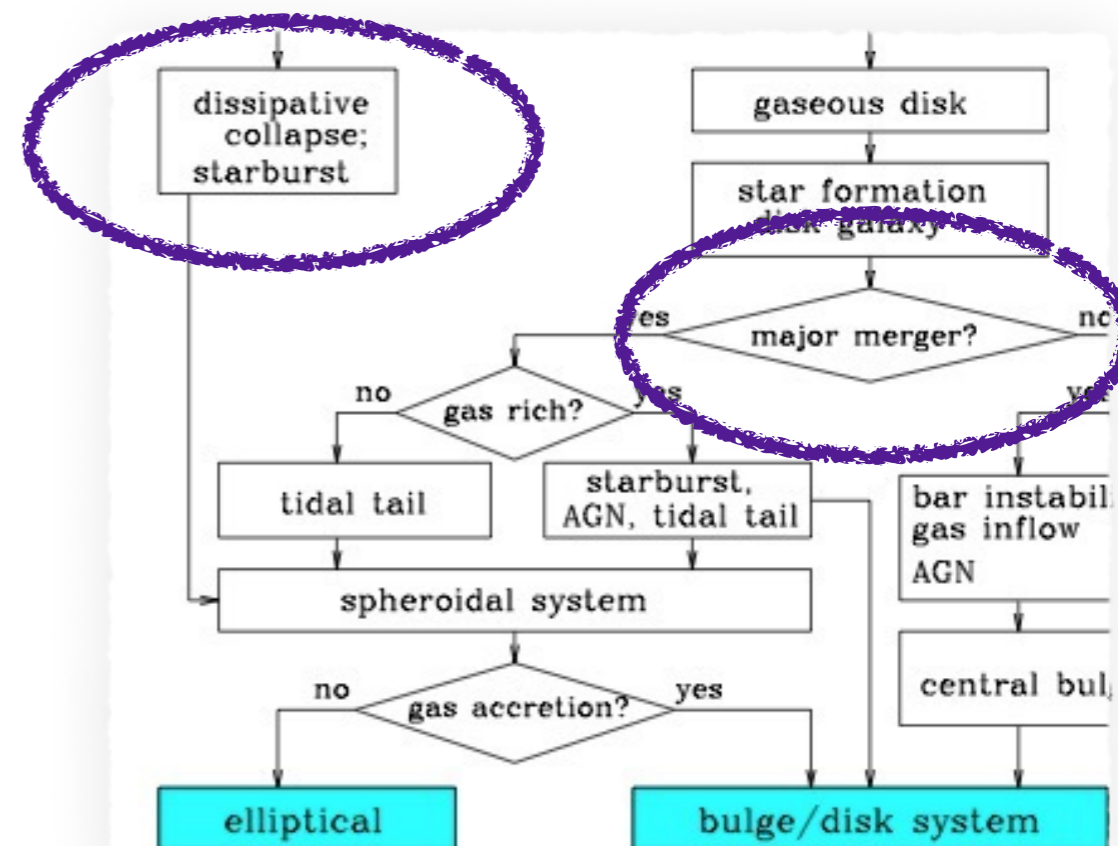
---

- Para **qualquer galáxia elíptica, com a medida de apenas dois parâmetros**, é possível **determinar**, dentro de poucos % ou menos:
  - ♦ **raio efetivo**
  - ♦ **brilho superficial, ou densidade de massa projetada**
  - ♦ **dispersão de velocidade central projetada**
  - **massa, luminosidade (em qualquer banda)**
  - **cores, índices espectrais, metalicidade**
  - **massa do buraco negro central**
  - e possivelmente outros parâmetros
- E isso ocorre independente de:
  - formação estelar e história evolutiva / mergers
  - ambiente em larga escala
  - detalhes da estrutura e dinâmica interna (incluindo S0)
  - efeitos de projeção

# Como isso é possível?

- “Não sei, só sei que é assim...” A implicação é que as elípticas ocupam um espaço pequeno e selecionado naturalmente dentre as possíveis estruturas dinâmicas
- Estados de máxima entropia? O mecanismo para atingir esses estados ainda é desconhecido
- Simulações numéricas podem reproduzir as estruturas observadas e o PF, mas não necessariamente explicar
- Entender a origem do pequeno espalhamento do PF (ou, em outras palavras, o pequeno intervalo possível de suas estruturas dinâmicas) é um problema em aberto.

- **Interpretação Wiki em Junho 2019: A relação observada cai entre duas previsões teóricas, a de galáxias se formando por mergers não-dissipativos, e a de galáxias se formando por colapso dissipativo.**





# Como se interpreta a existência dessa relação?

## Ex: Espaço- $\kappa$ (Bender et al. 1992)

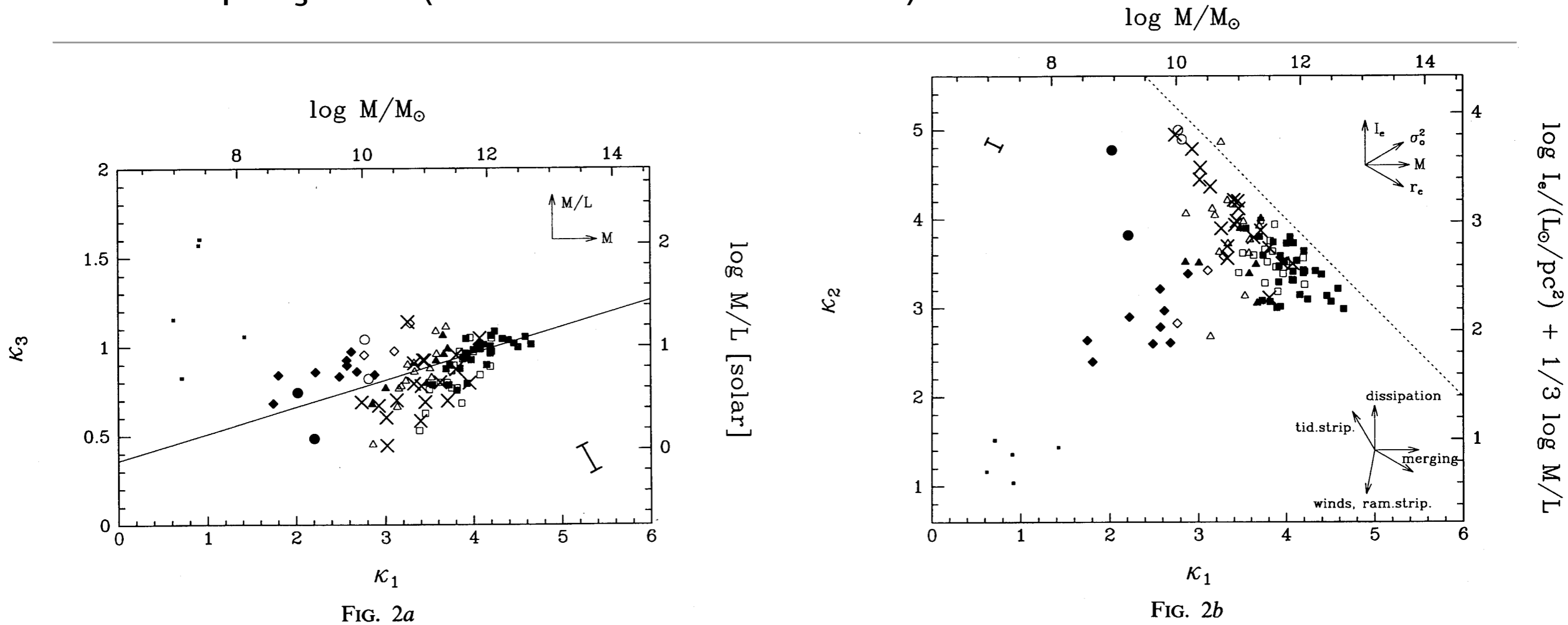


FIG. 2a

FIG. 2b

FIG. 2.—Distribution of all types of hot stellar systems in  $\kappa$ -space as defined in Fig. 1 and in the text. The values of the corresponding physical parameters are given on the opposite sides of the figures [masses  $M$  were determined from  $M = 5G^{-1}\sigma_0^2 r_e$  and are given in solar units; mean effective surface brightnesses  $\langle I \rangle_e$  were derived from  $\log \langle I \rangle_e = -0.4(SB_e - 27)$  and refer to units of  $L_\odot/\text{pc}^2$ ; luminosities  $L$  are given by  $L = 2\pi \langle I \rangle_e r_e^2$  in solar units; for further details, see Appendix 1]. The plane occupied by hot stellar systems is again shown in (a) edge-on and (b) face-on view. Squares denote giant ellipticals ( $M_T < -20.5$  mag), triangles denote ellipticals of intermediate luminosity ( $-20.5 \text{ mag} < M_T < -18.5$  mag), circles denote compact galaxies and diamonds denote bright dwarf galaxies ( $M_T > -18.5$ ) with known kinematics. Open symbols are galaxies that are rotationally flattened; filled symbols are galaxies that have anisotropic kinematics. Bulges are represented by only one symbol (*crosses*), as all those for which internal kinematics has been obtained appear to be rotationally flattened (see Table 1). The five small filled squares refer to Fornax (which is anisotropic) and four other dwarf spheroidal companions of the Galaxy for which no spatially resolved kinematics are available. The arrows in the upper right of the lower panel indicate the directions in which the basic global parameters of hot stellar systems increase. The arrows in the lower right of the lower panel sketch how the major processes move objects in the plane (tid. strip. = tidal stripping, ram. strip. = ram pressure stripping). The range of directions for merging is approximate; a more detailed treatment of CDM mergers is given in Fig. 4. An error bar corresponding to a distance uncertainty of  $\pm 30\%$  is given in the lower right corner of (a) and the upper left corner of (b). The diagonal dashed line highlights the area in this plane not occupied by hot stellar systems.