



Galáxias Elípticas

Capítulo 6 do livro-texto

Versão enxuta !

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

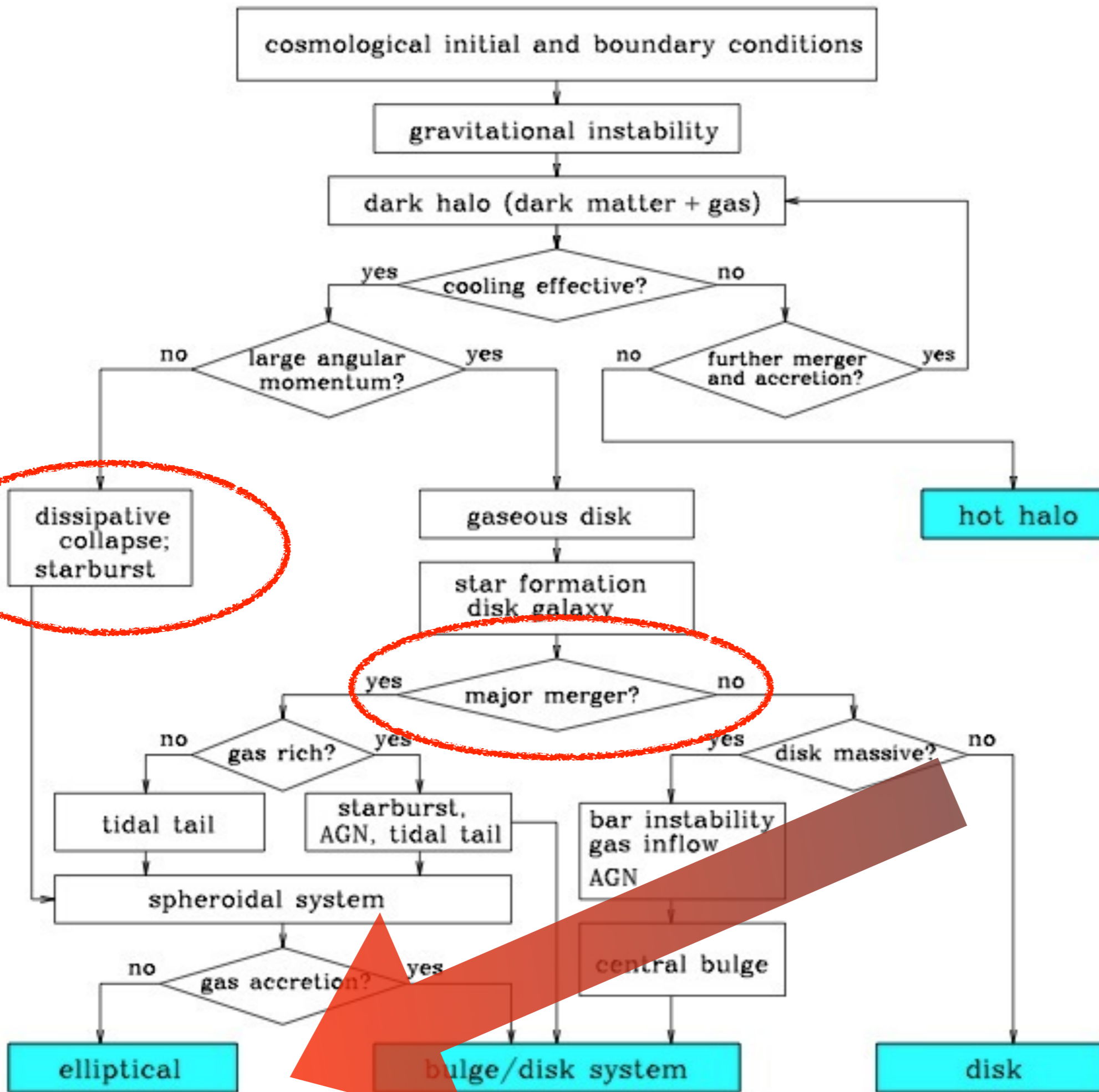
- Qual a metalicidade?
- Qual a idade da população estelar?
- Quanto gás?
- Qual a cor?
- Razão alpha/fe?
- Rotação?
- Massa?
- Ambiente?
- Qual a origem de sua morfologia? formato? cinemática ?
- qual o maior número que observamos ao lado do 'E'?

Mitos? (Visão tradicional na década de 70)

- Bojos sem discos com perfil de de Vaucouleurs ($R^{1/4}$) e centros de densidade constante (King cores)
- Esferóides oblatos achatados por rotação
- Sem gás ou poeira
- Contém apenas uma população estelar simples e velha
- Sistemas dinâmicos relaxados dinamicamente
- http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic07/Lecture_7.pdf

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

Fotometria

- 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: $< 3 \times 10^9 L_{\odot}$

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 $n \sim 1$

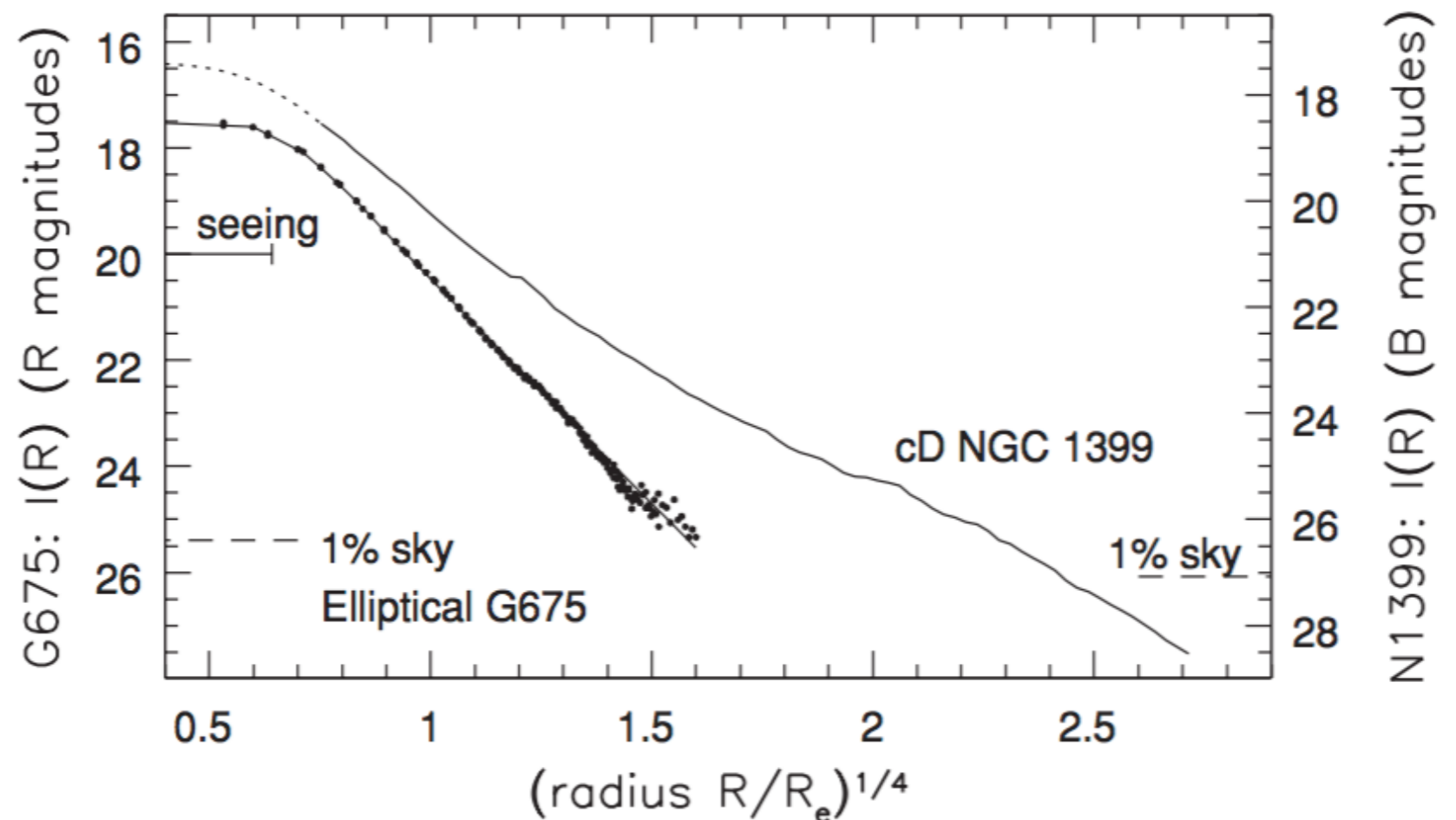


Fig. 6.3. Surface brightness of two luminous ellipticals: an $R^{1/4}$ law corresponds to a straight line.

Perfil de brilho central

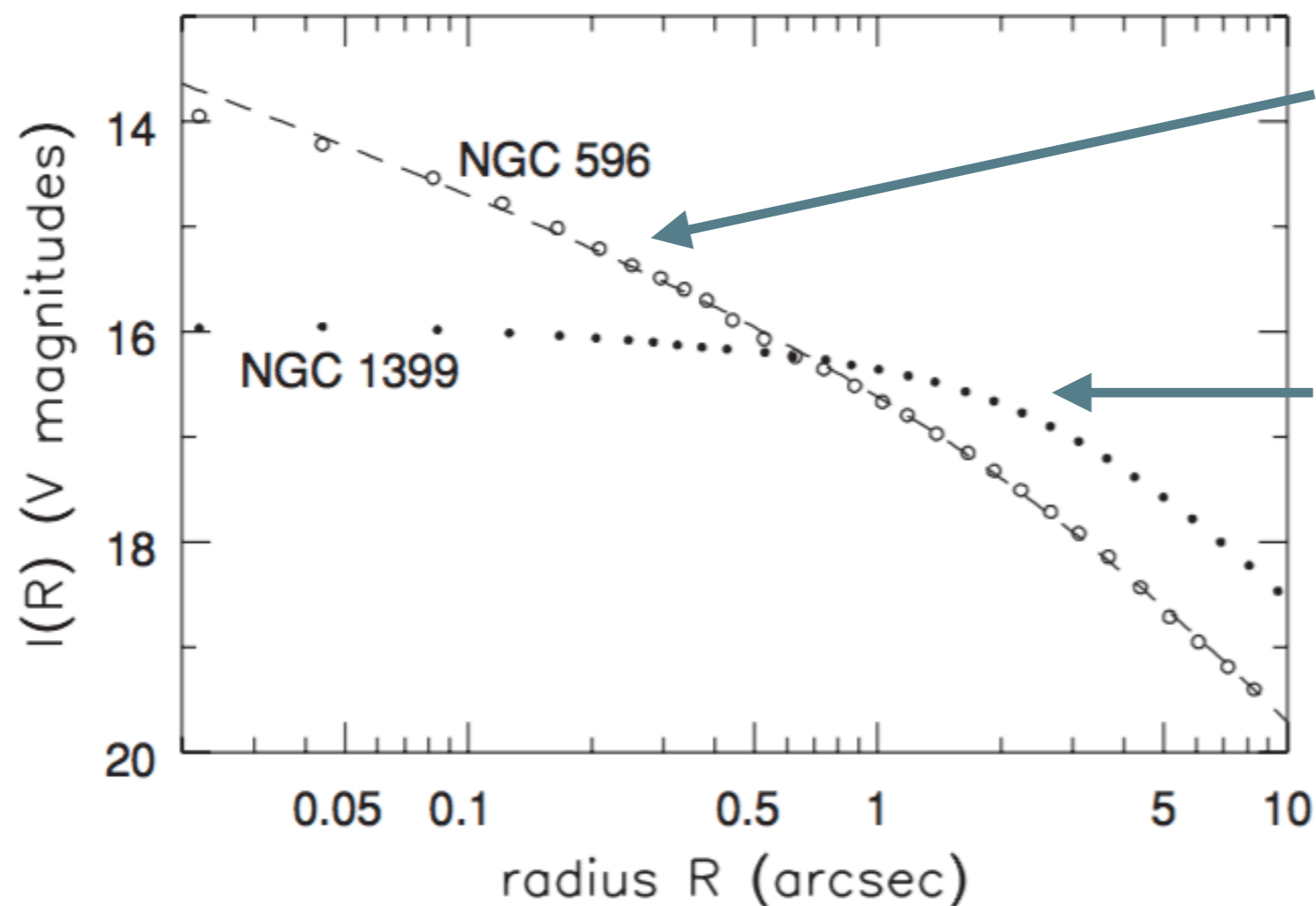


Fig. 6.7. Surface brightness $I_V(R)$ in the V band at the centers of two elliptical galaxies. The cD galaxy NGC 1399 ($M_V = -21.7$) has a *core* at $R \lesssim 1''$, where $I(R)$ is nearly constant. NGC 596 ($M_V = -20.9$) is half as luminous; the surface brightness continues to rise as a *cusp*. The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

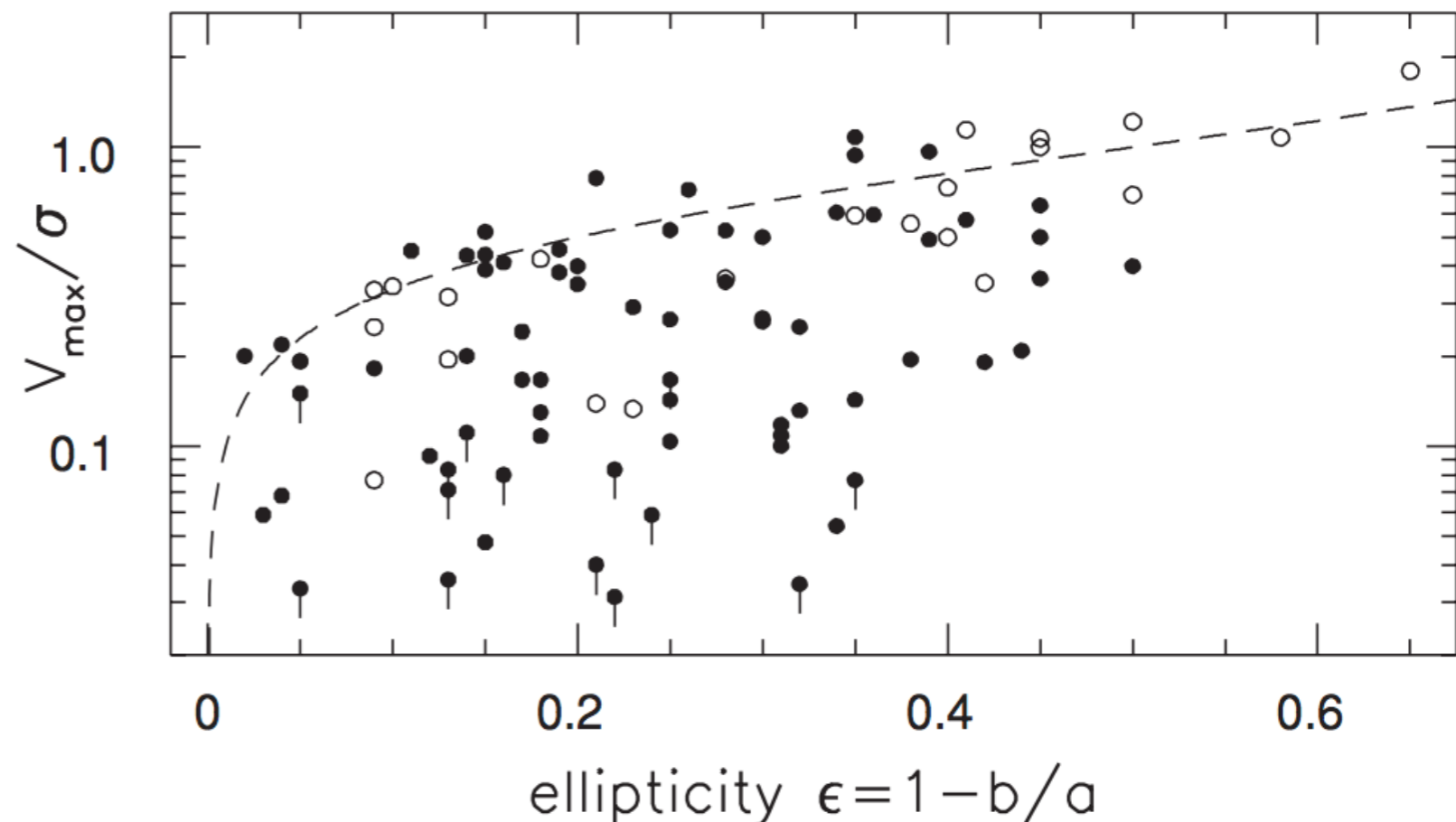
Um pouco de “história” (seção 6.2.3 do livro-texto)

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

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

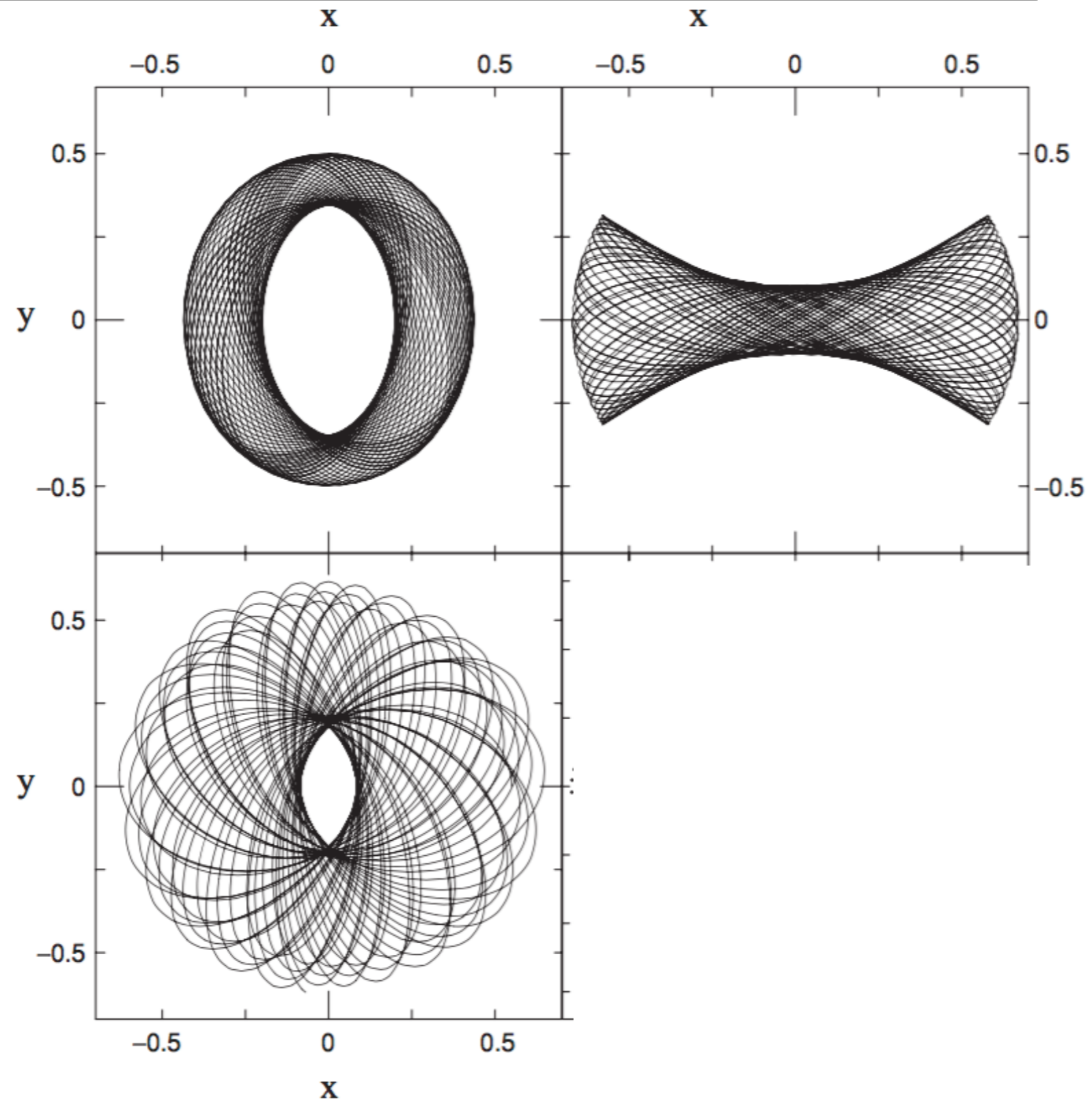


Fig. 6.16. Orbits in the potential of Equation 6.33, with $v_0 = 1$, $q = 0.8$, and $R_e = 0.14$; all have energy $E = -0.337$. The top left panel shows a loop orbit, which avoids the center; at the top right is a box orbit, which passes through it; lower left is a chaotic orbit, produced when a central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

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)

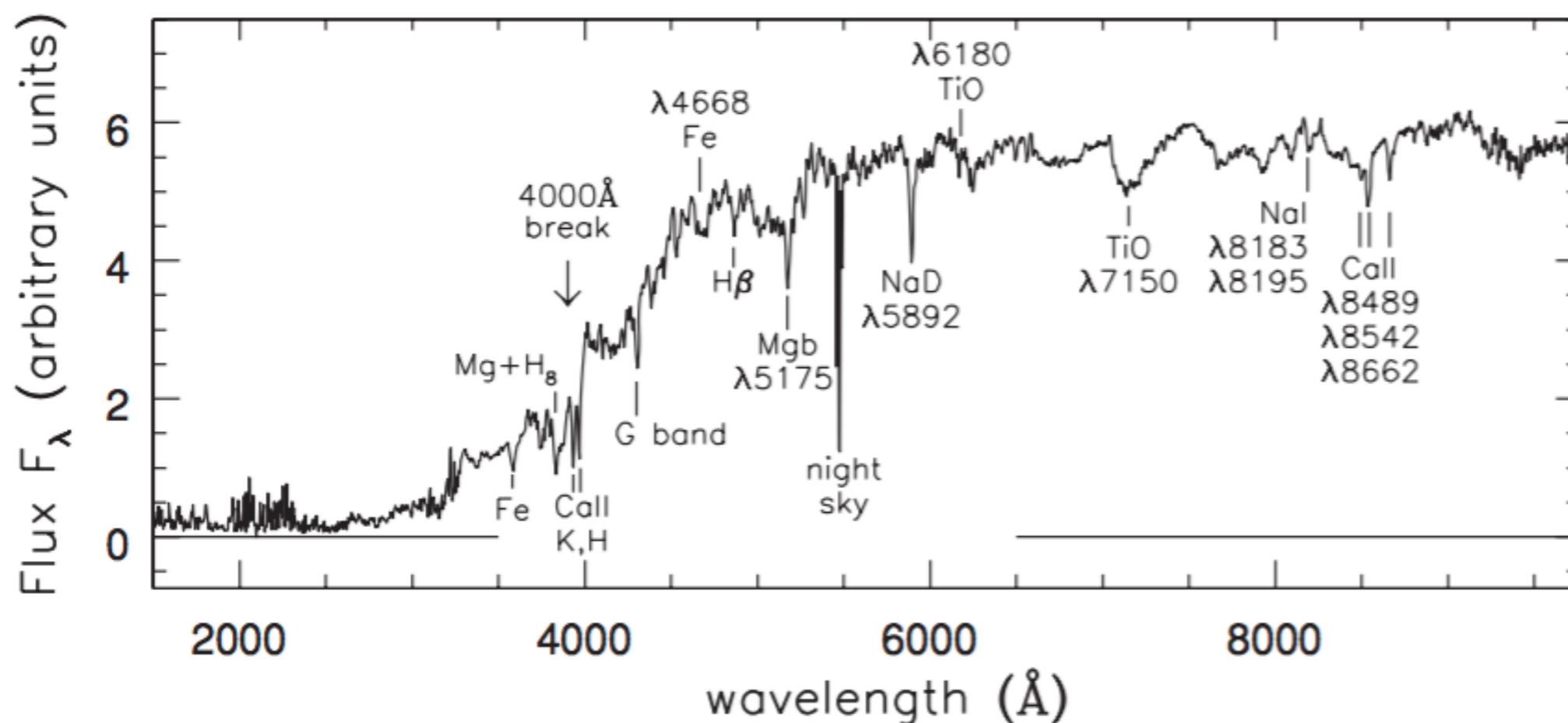


Fig. 6.17. The spectrum of an elliptical galaxy; compare this with the spectra of K and M stars in Figure 1.1, and those of disk galaxies in Figure 5.24 – A. Kinney.

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

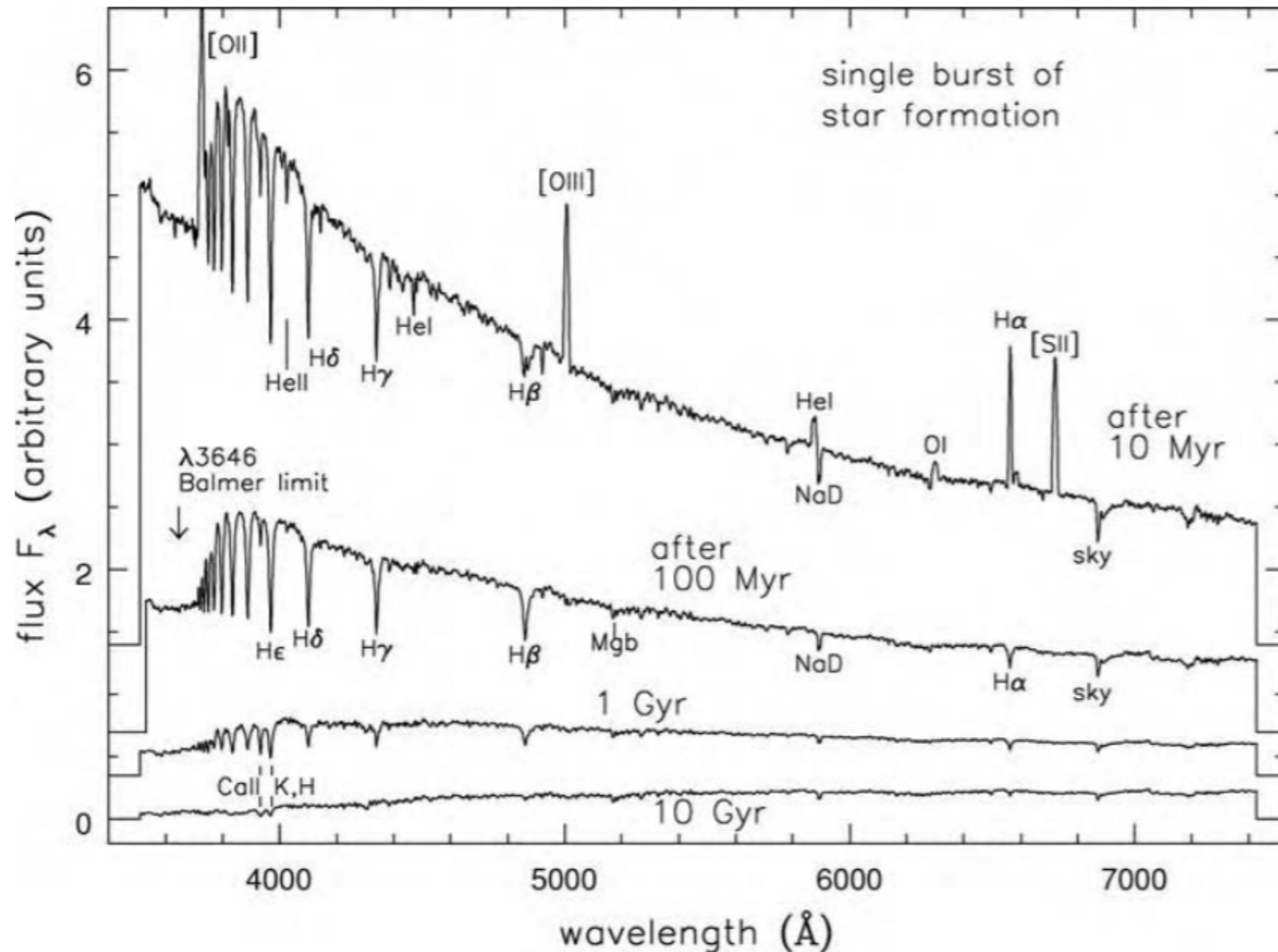
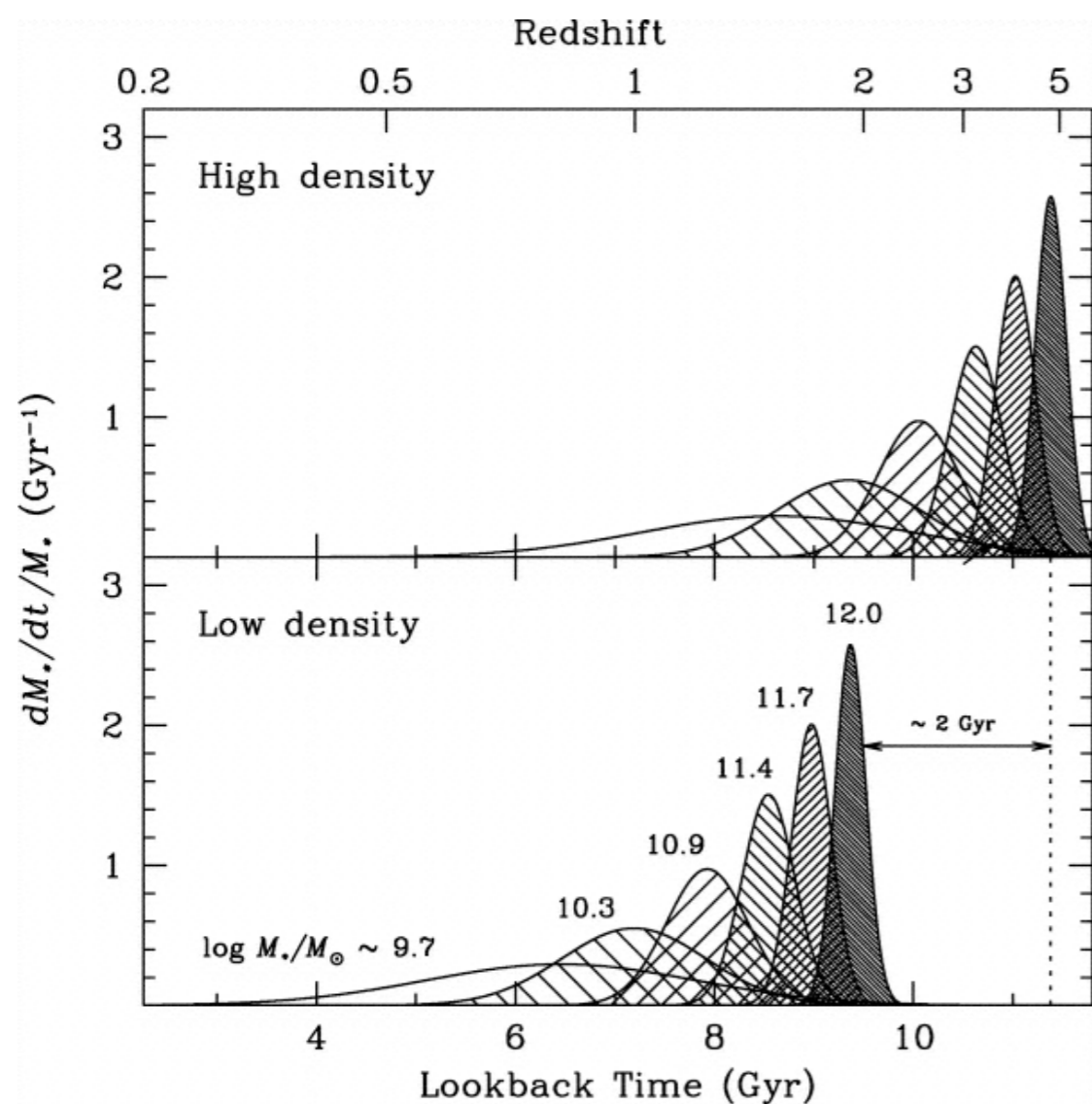


Fig. 6.18. Spectra for a ‘galaxy’ that makes its stars in a 10^8 yr burst, all plotted to the same vertical scale. Emission lines of ionized gas are strong 10 Myr after the burst ends; after 100 Myr, the galaxy has faded and reddened, and deep hydrogen lines of A stars are prominent. Beyond 1 Gyr, the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

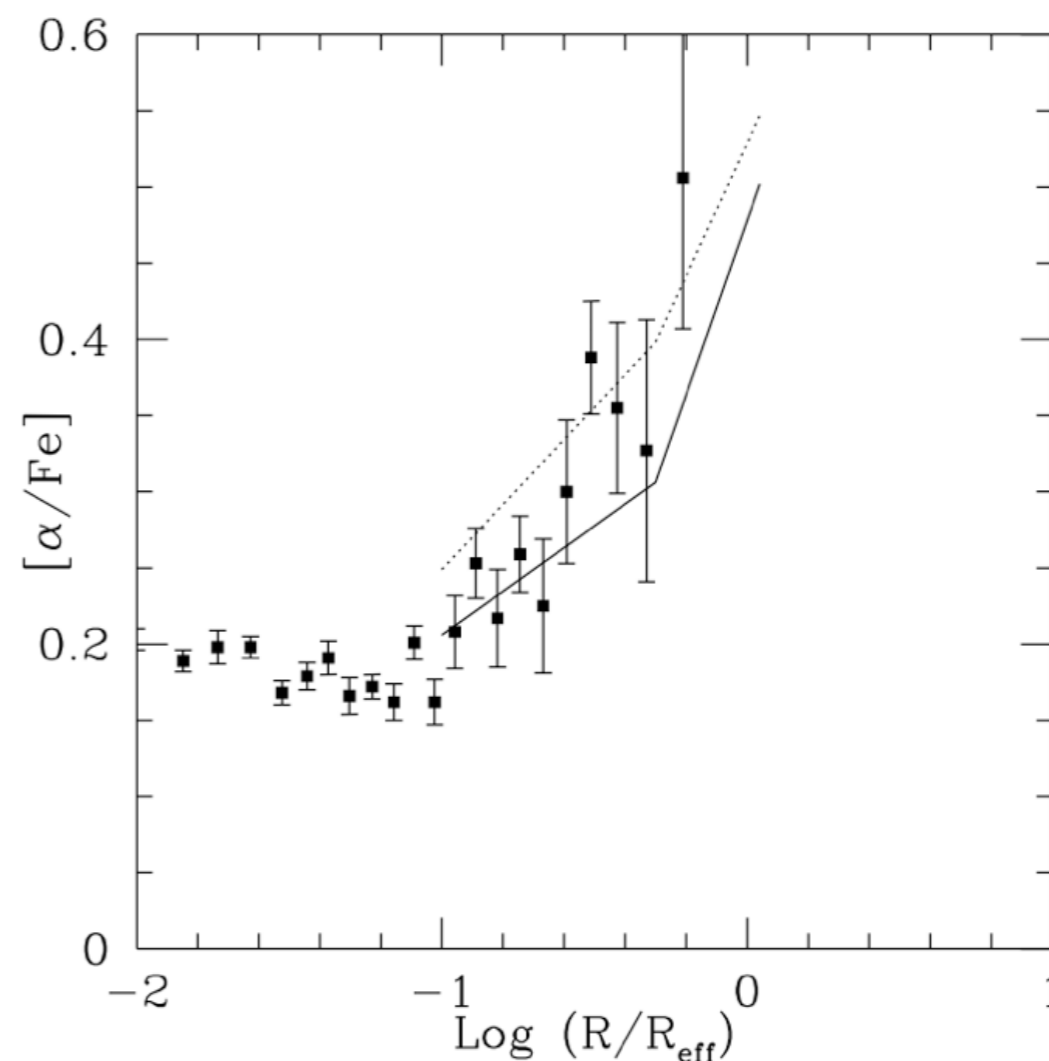
$[\alpha/\text{Fe}]$ em galáxias elípticas

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)

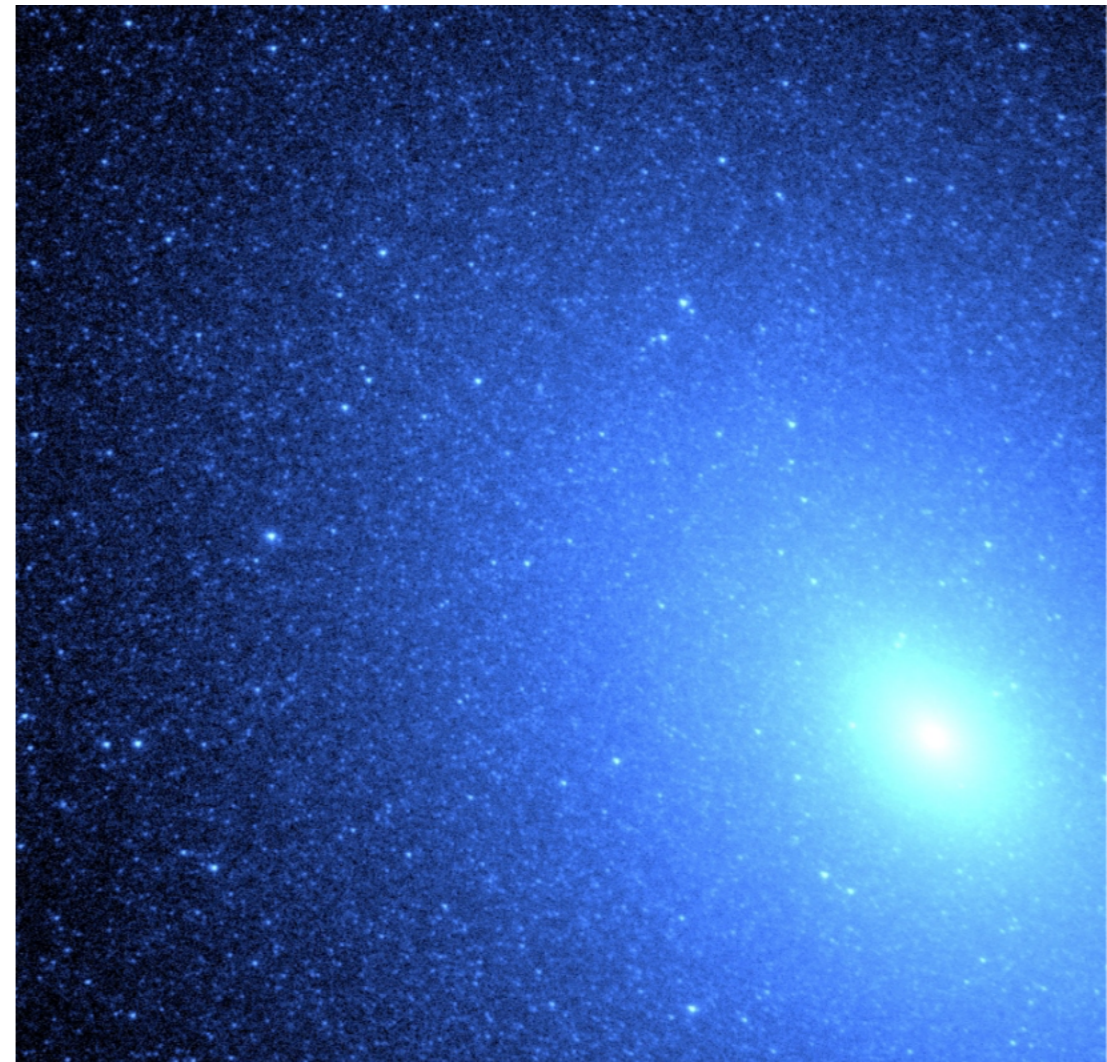


- $[\alpha/\text{Fe}]$ em função do raio para a galáxia elíptica NGC4697. Linhas correspondem a previsões de modelos de evolução química (formação “outside-in”).

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
- "Using M32 to Study Rapid Phases of Stellar Evolution" <http://www.stsci.edu/~tbrown/research/padova.pdf>



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?

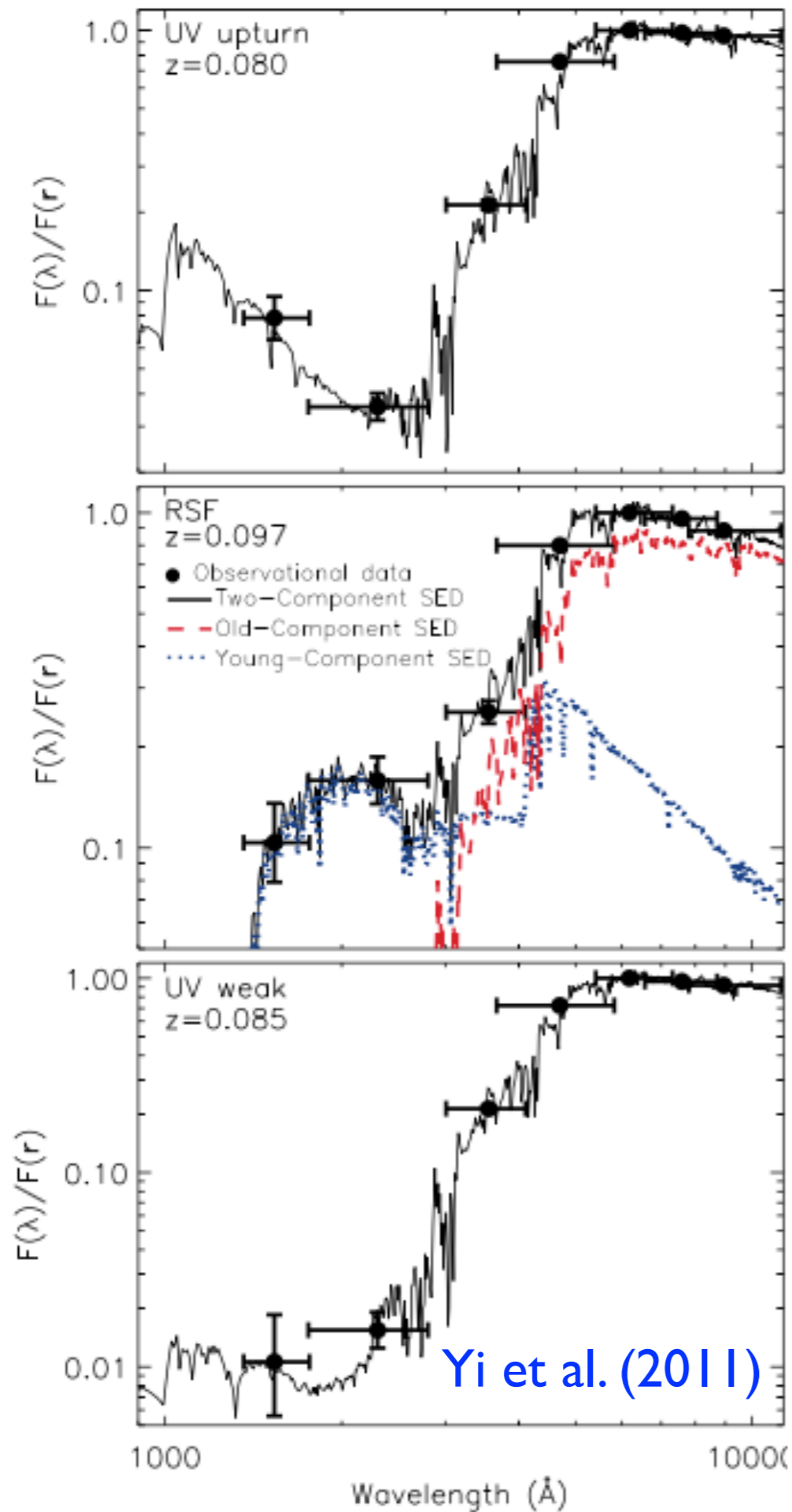
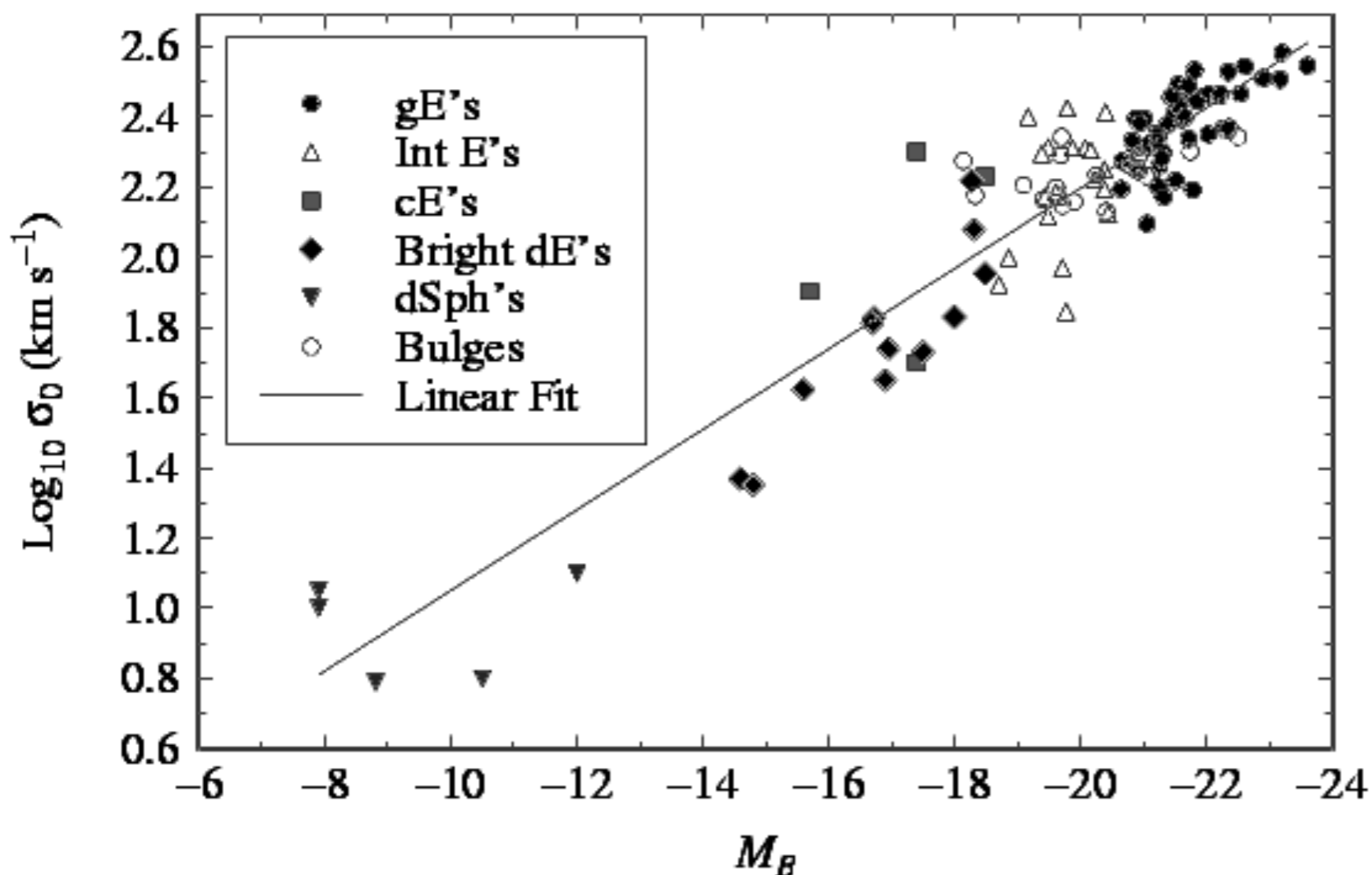


FIG. 3.— Spectral fits for the estimation of population parameters and k corrections. Top panel: An example of UV upturn galaxies. GALEX FUV , NUV , and SDSS $ugriz$ photometry are shown with band widths (horizontal) and measurement errors (vertical). The spectral fit is based on the Yi (2003) population 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.

Relação Faber - Jackson

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

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

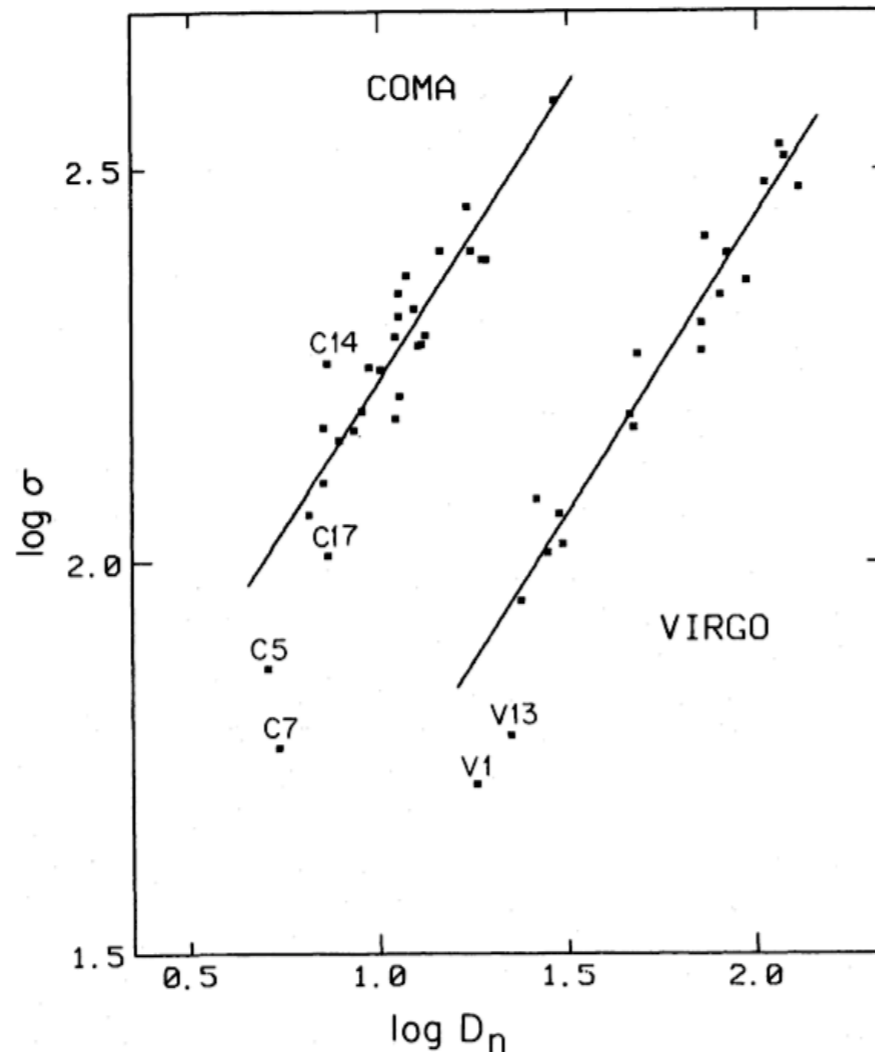


- Ao contrário de espirais, a maior parte da energia cinética em uma galáxia elíptica está na forma de movimentos aleatórios
- Assim como há uma correlação entre luminosidade e velocidade de rotação para as espirais, há uma correlação entre luminosidade em elípticas e dispersão de velocidades

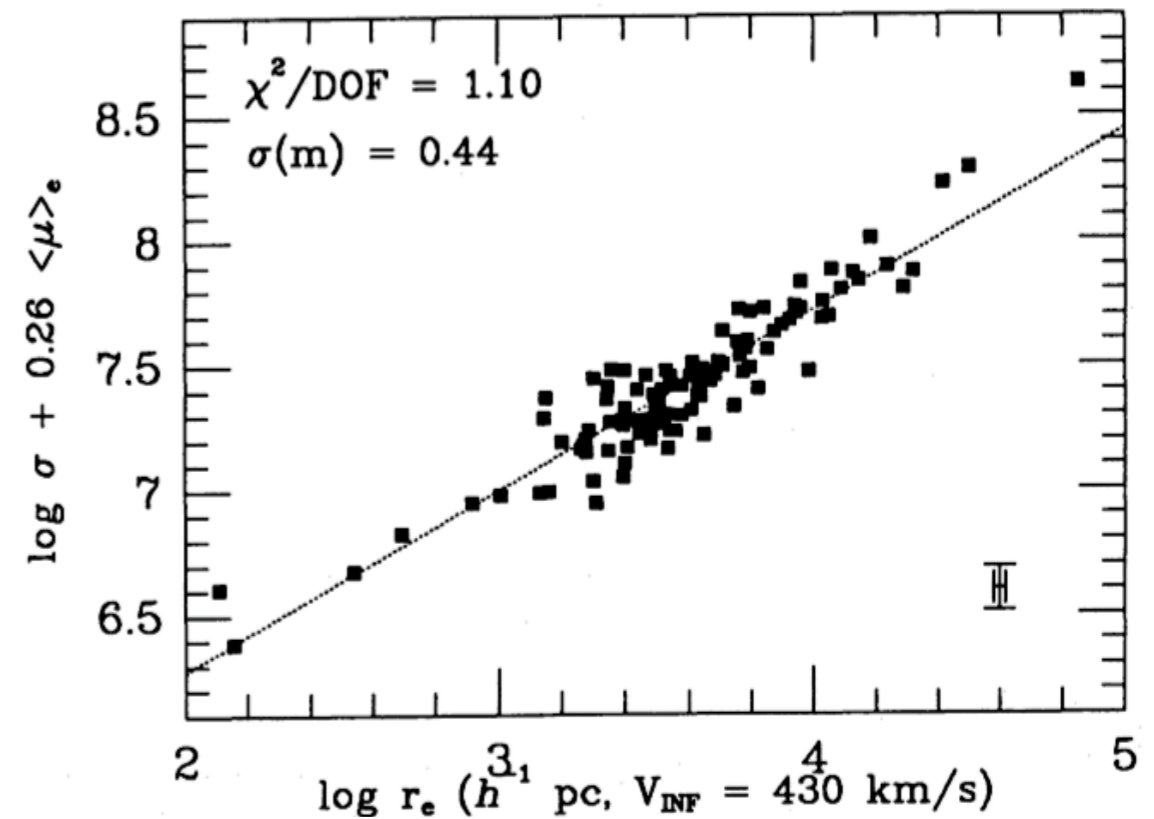
O que pode explicar a dispersão da relação FB? (Para melhorar a sua utilidade como indicador de distância?)

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 - σ , Dressler et al. 1997



R - σ - μ , Djorgovski & Davis (1987)



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

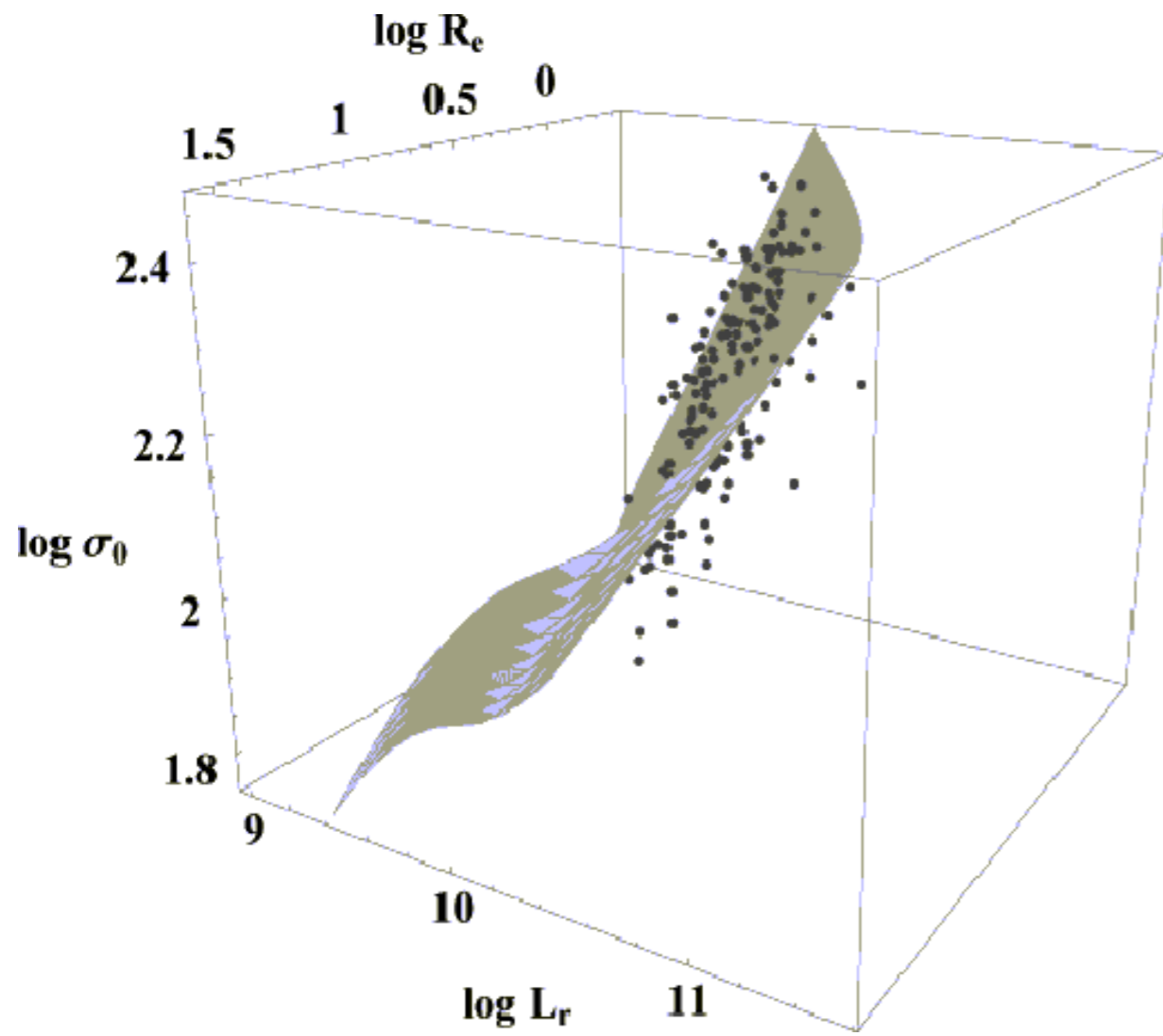
R = non-isophotal radius (r_e, r_η, \dots)

σ = central proj. velocity disp.

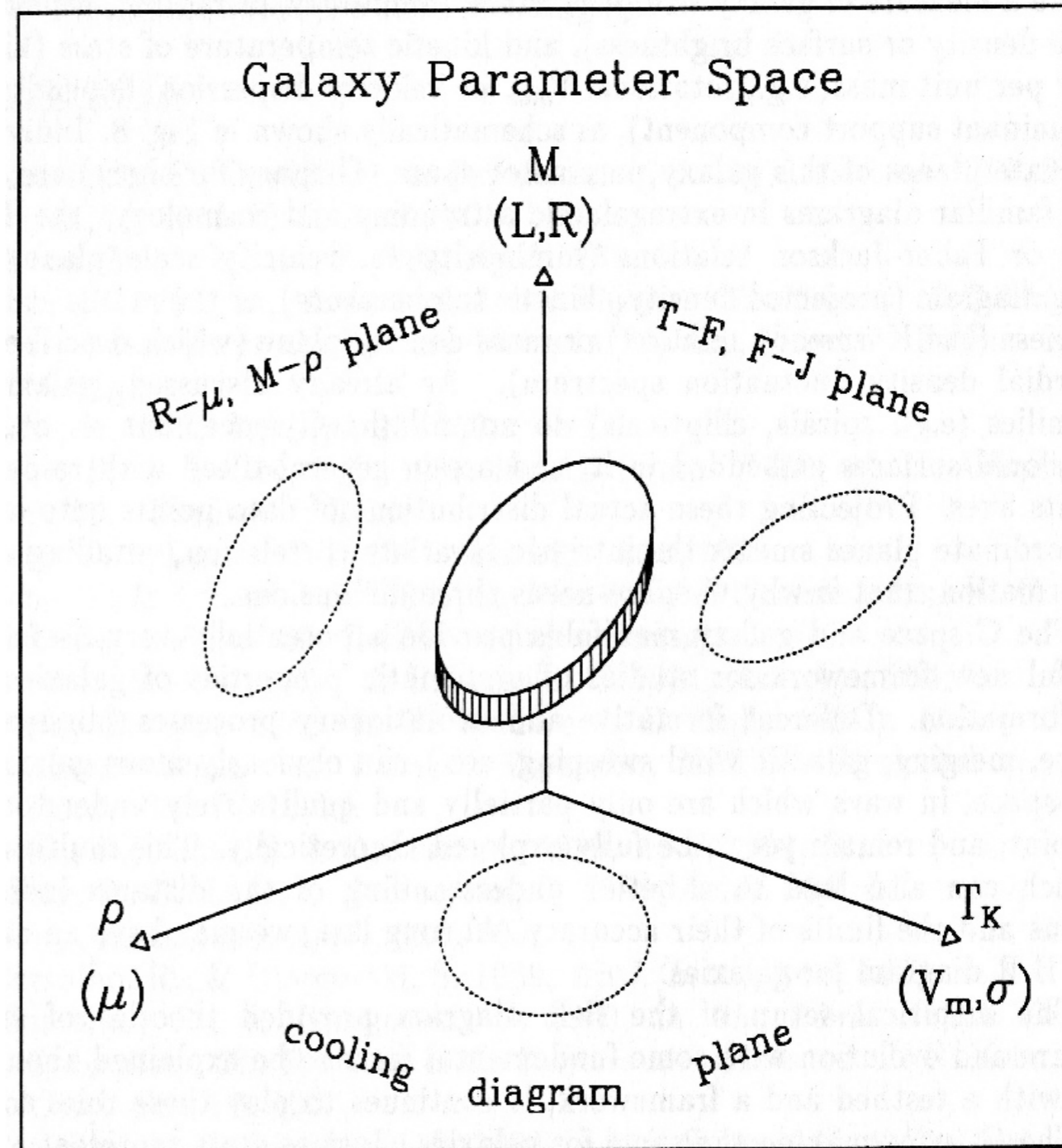
I = mean surf. br. in linear units

Plano Fundamental

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



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



O Plano Fundamental das Elípticas

O diagrama HR das galáxias elípticas

- Para **qualquer galáxia elíptica de hoje**, pequena ou grande, **com apenas dois números**, é possível determinar, dentro de poucos % ou menos:
 - massa, luminosidade (em qualquer banda)
 - raio efetivo
 - brilho superficial, ou densidade de massa projetada
 - dispersão de velocidade central projetada
 - 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-k (Bender et al. 1992)

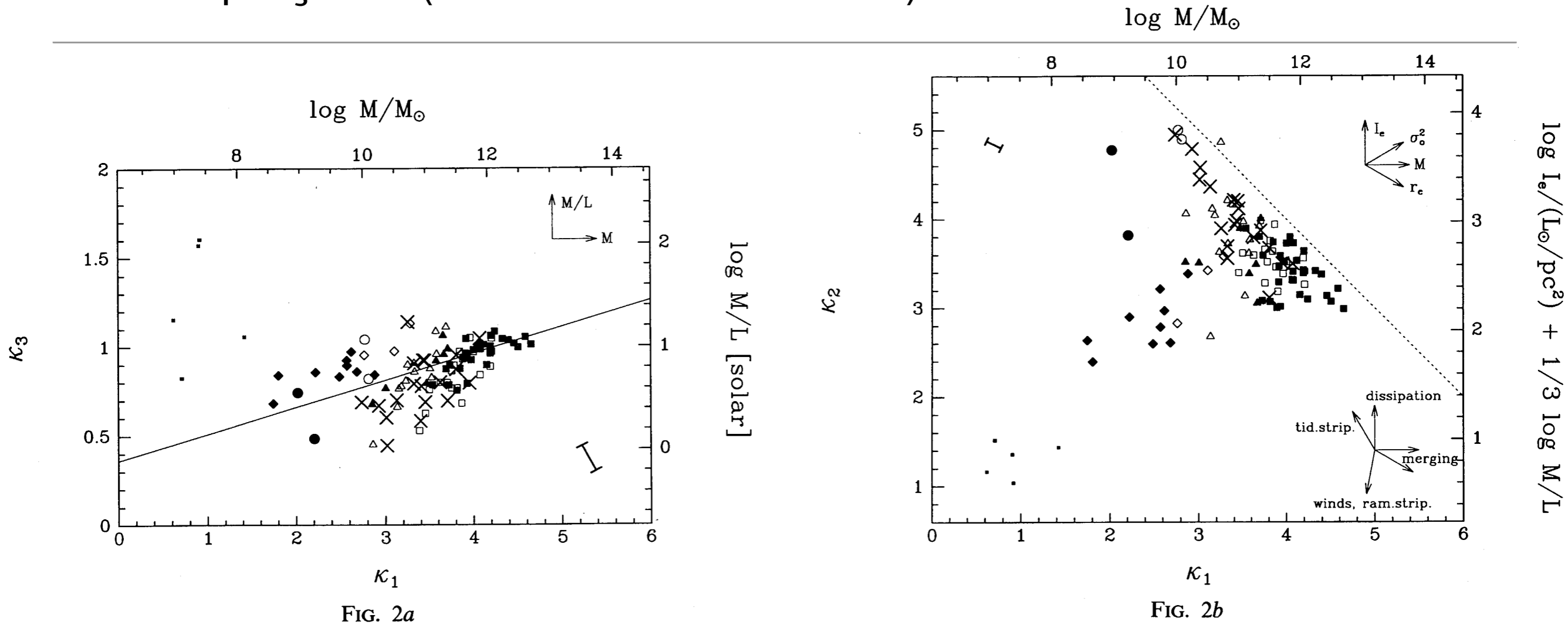


FIG. 2a

FIG. 2b

FIG. 2.—Distribution of all types of hot stellar systems in κ -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/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.

Versão longa !

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 um equilíbrio estável
- Grande intervalo de luminosidade e concentração de luz
- Algumas tem alta rotação, outras nenhuma
- A variedade de propriedades sugere que há mais de uma via de formação
- São fósseis do Universo jovem

Mitos? (Visão tradicional na década de 70)

- Bojos sem discos com perfil de de Vaucouleurs ($R^{1/4}$) e centros de densidade constante (King cores)
- Esferóides oblatos achatados por rotação
- Sem gás ou poeira
- Contém apenas uma população estelar simples e velha
- Sistemas dinâmicos relaxados dinamicamente
- http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic07/Lecture_7.pdf

Fotometria

- 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: $< 3 \times 10^9 L_\odot$

$$L_\star \approx 2 \times 10^{10} L_\odot$$

$$\Phi(L)\Delta L = n_\star \left(\frac{L}{L_\star}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L_\star}\right) \frac{\Delta L}{L_\star}$$

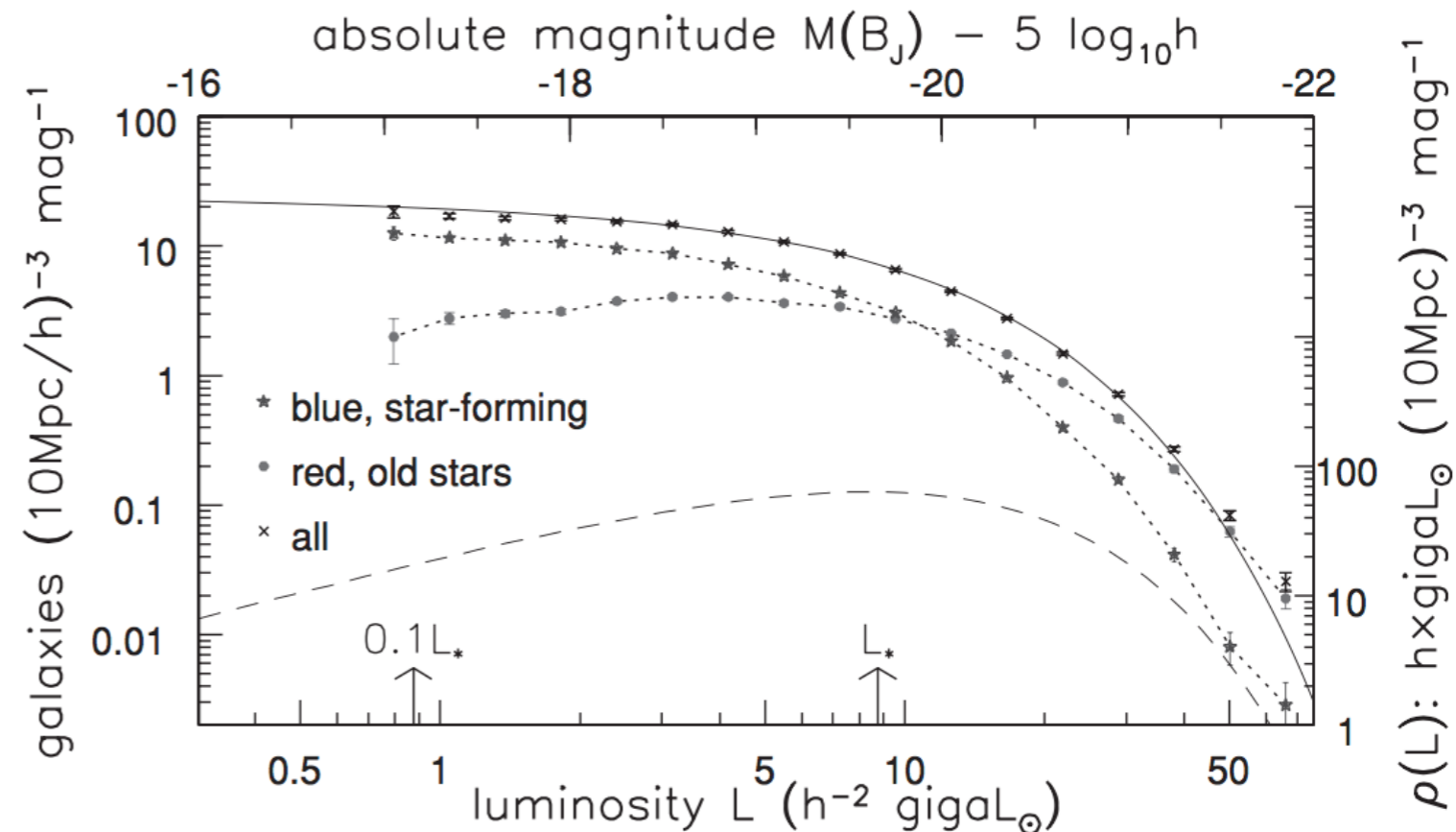


Fig. 1.16. Number of galaxies per 10 Mpc cube between absolute magnitude $M(B_J)$ and

Parâmetros importantes

- Brilho superficial $I(R)$
- Fluxo ou magnitude total, M
- Raio efetivo R_e : raio que contém metade da luz $L(<R_e) = 0.5L_{\text{tot}}$
- Dispersão de velocidade estelar, $\sigma(R)$

- Brilho superficial central $I_0 = I(0)$
- Raio do core r_c tal que $I(r_c) = 0.5 I(0)$ (as vezes se refere a uma quebra no perfil de luminosidade nuclear)
- Dispersão de velocidade central $\sigma_0 = \sigma(0)$

- http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic07/Lecture_7.pdf

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:

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

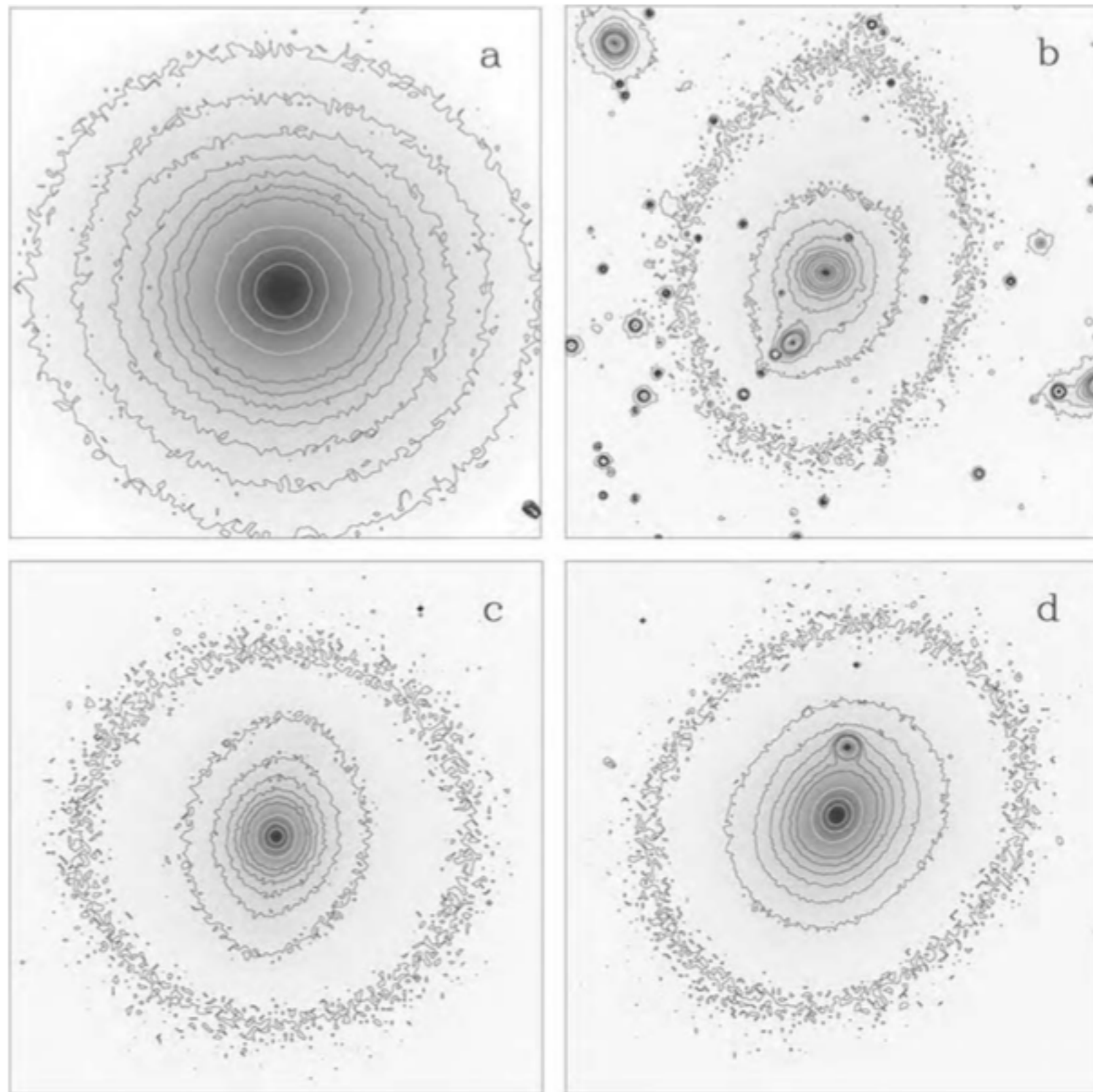


Fig. 6.1. Isophotes in the R band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw 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”.

$$a_4 > 0$$

Isofotas “boxy”

$$a_4 < 0$$

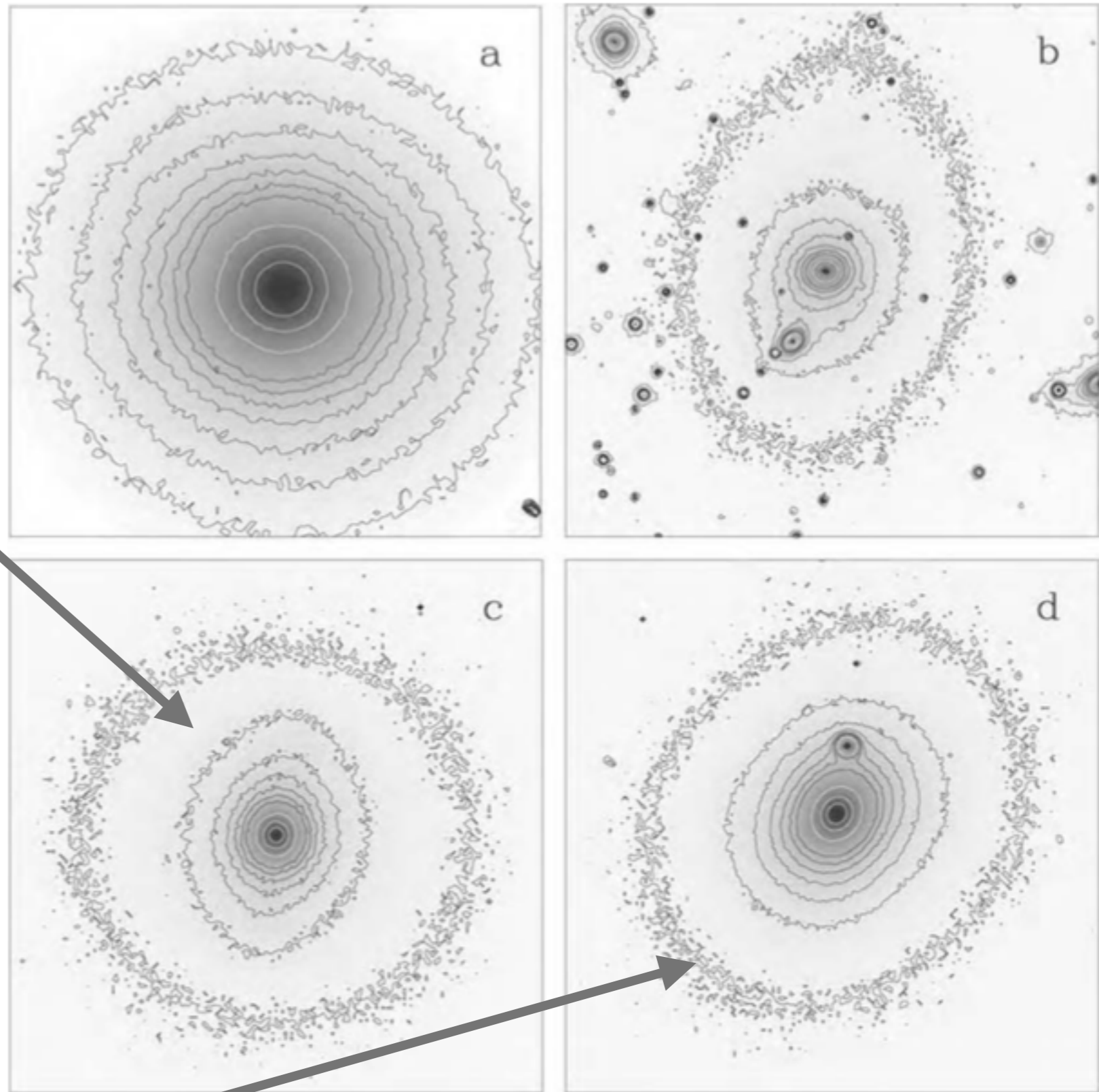


Fig. 6.1. Isophotes in the R band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped ‘disky’ isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw 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

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.

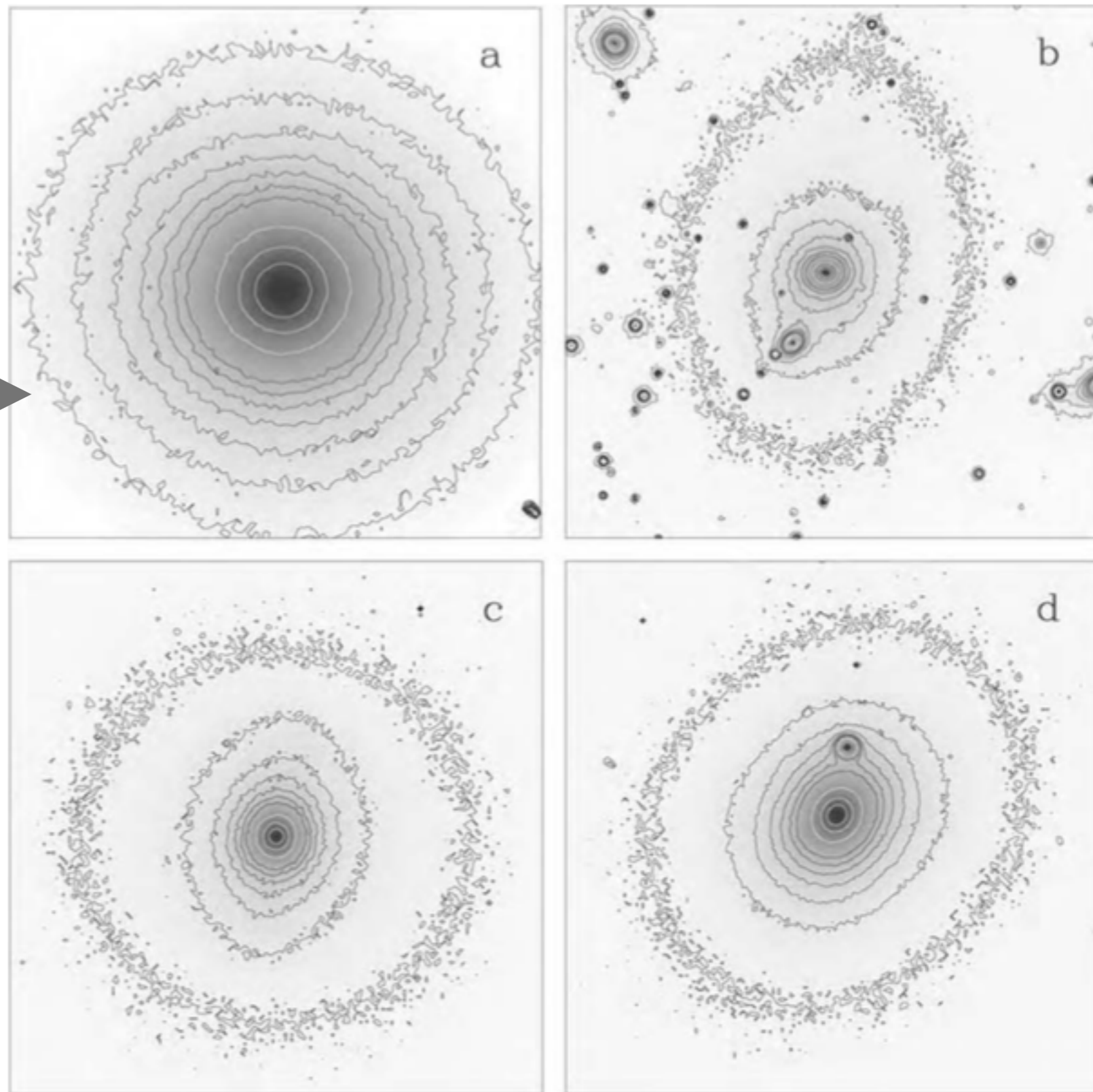


Fig. 6.1. Isofotas in the R band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw 159-89 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

Pode-se descrever as 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:

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

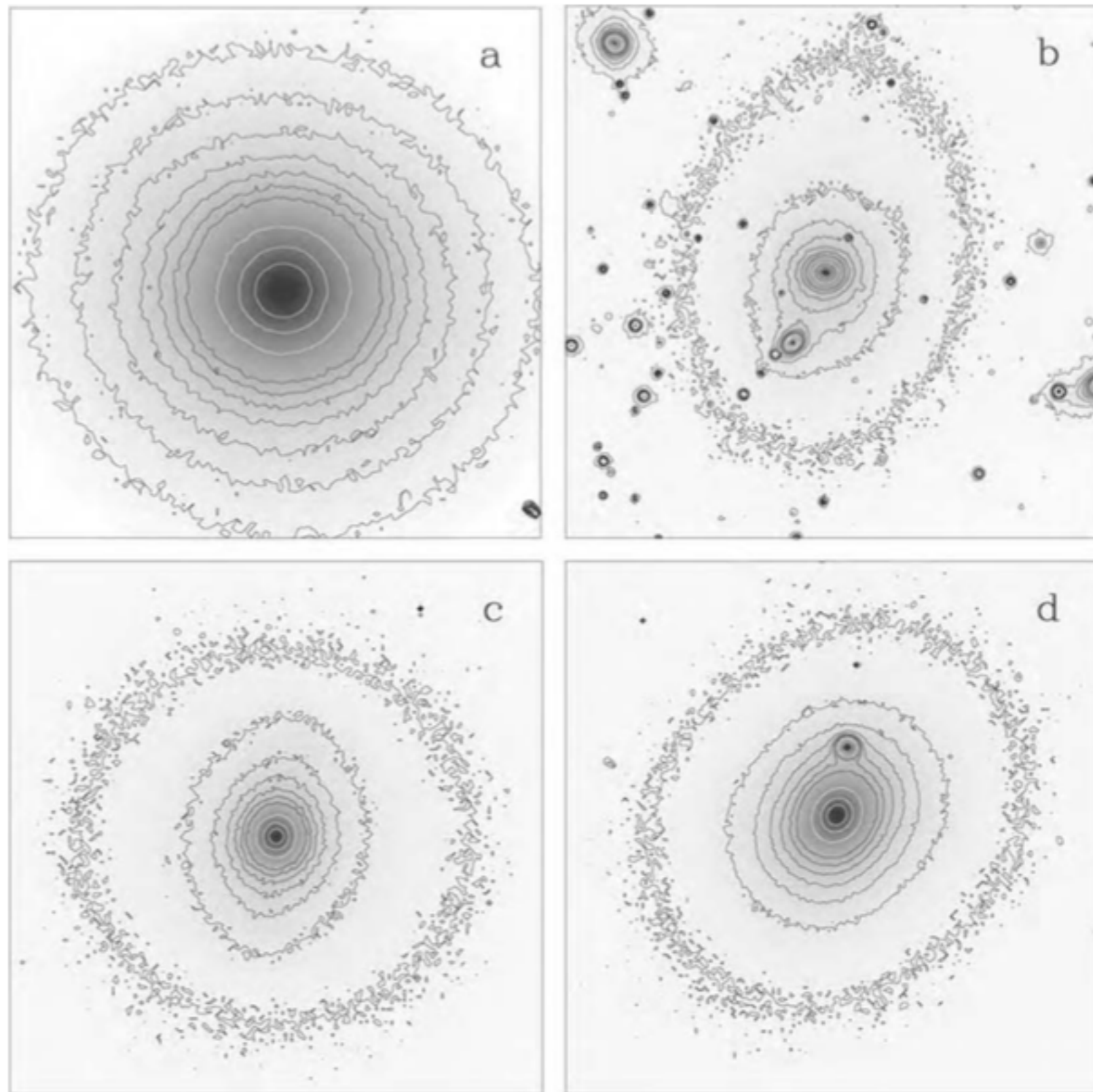


Fig. 6.1. Isofotes in the R band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw 159-89 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.

Isofotas

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.

$$a_4 > 0$$

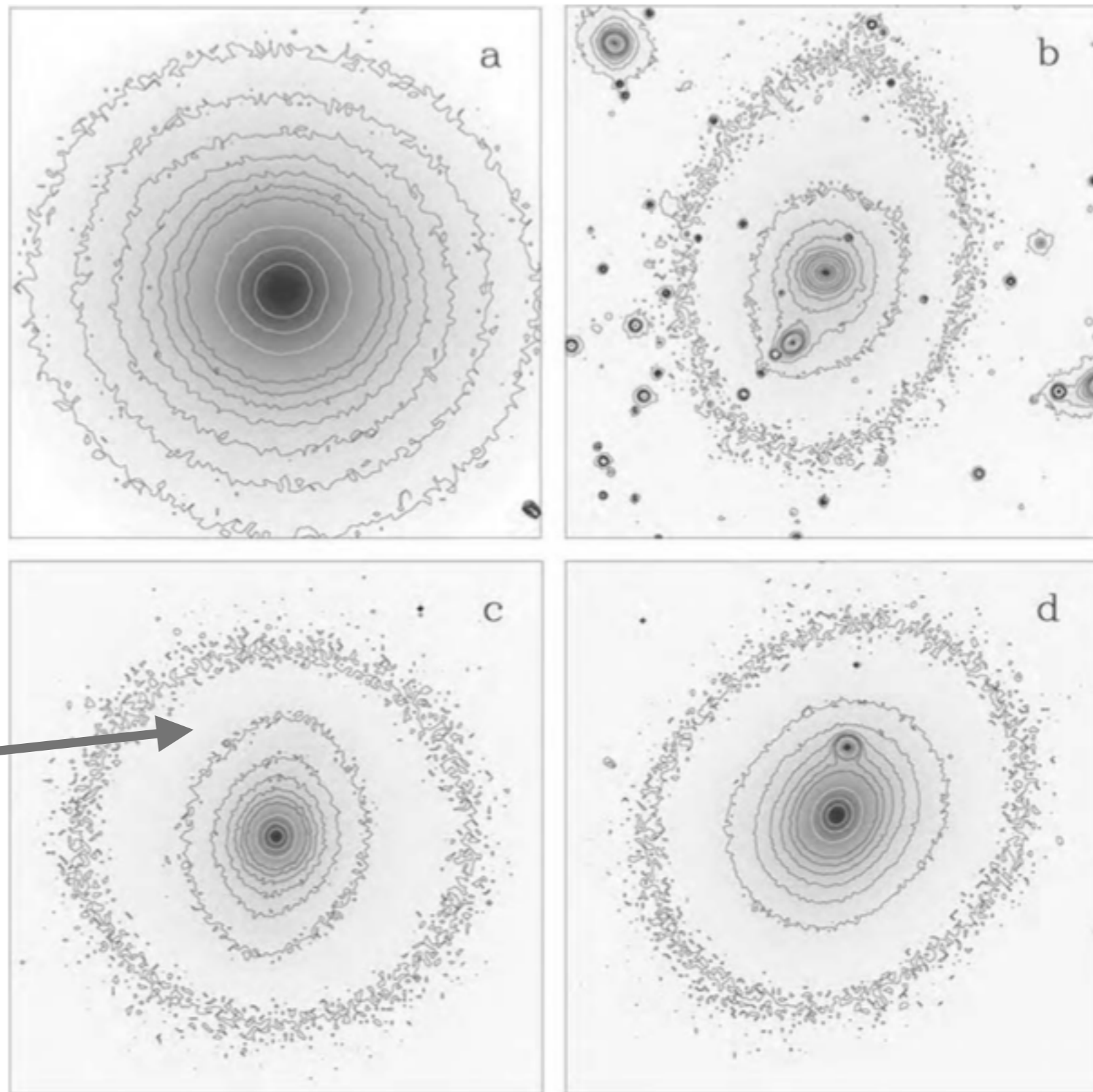


Fig. 6.1. Isophotes in the R band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw 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

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

$$a_4 < 0$$

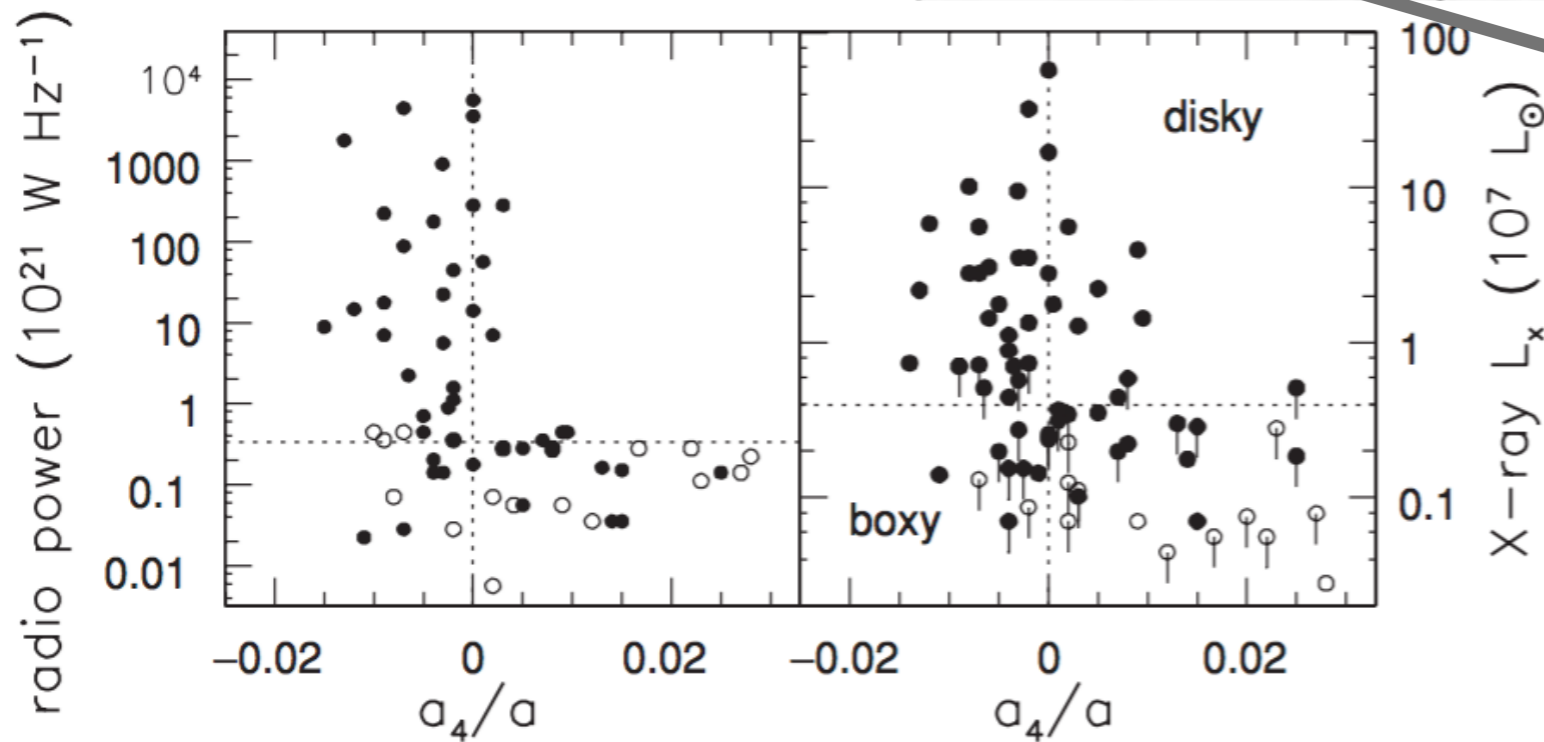
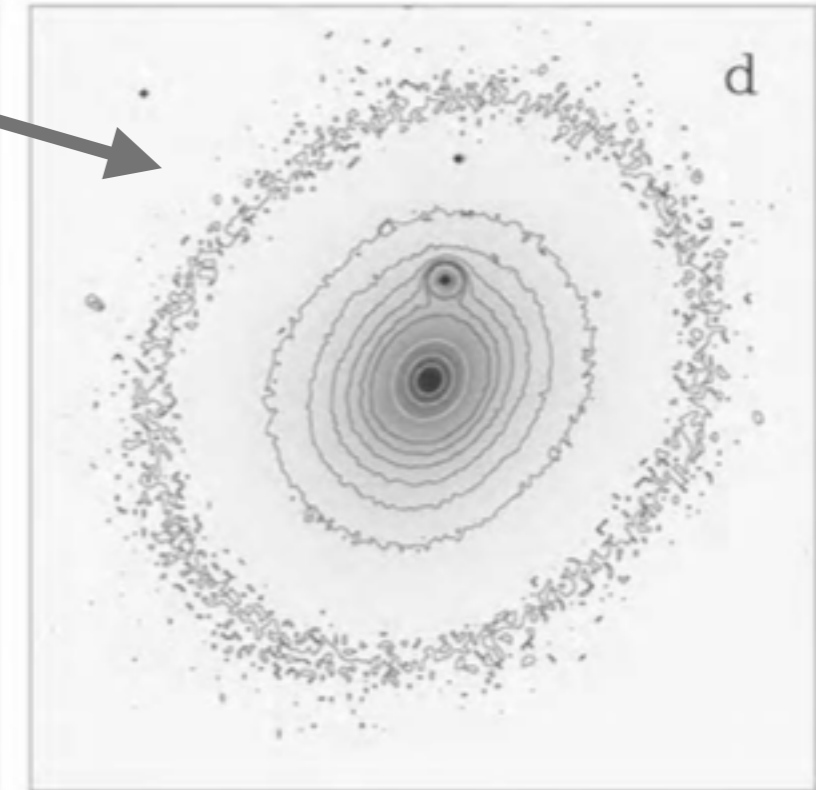
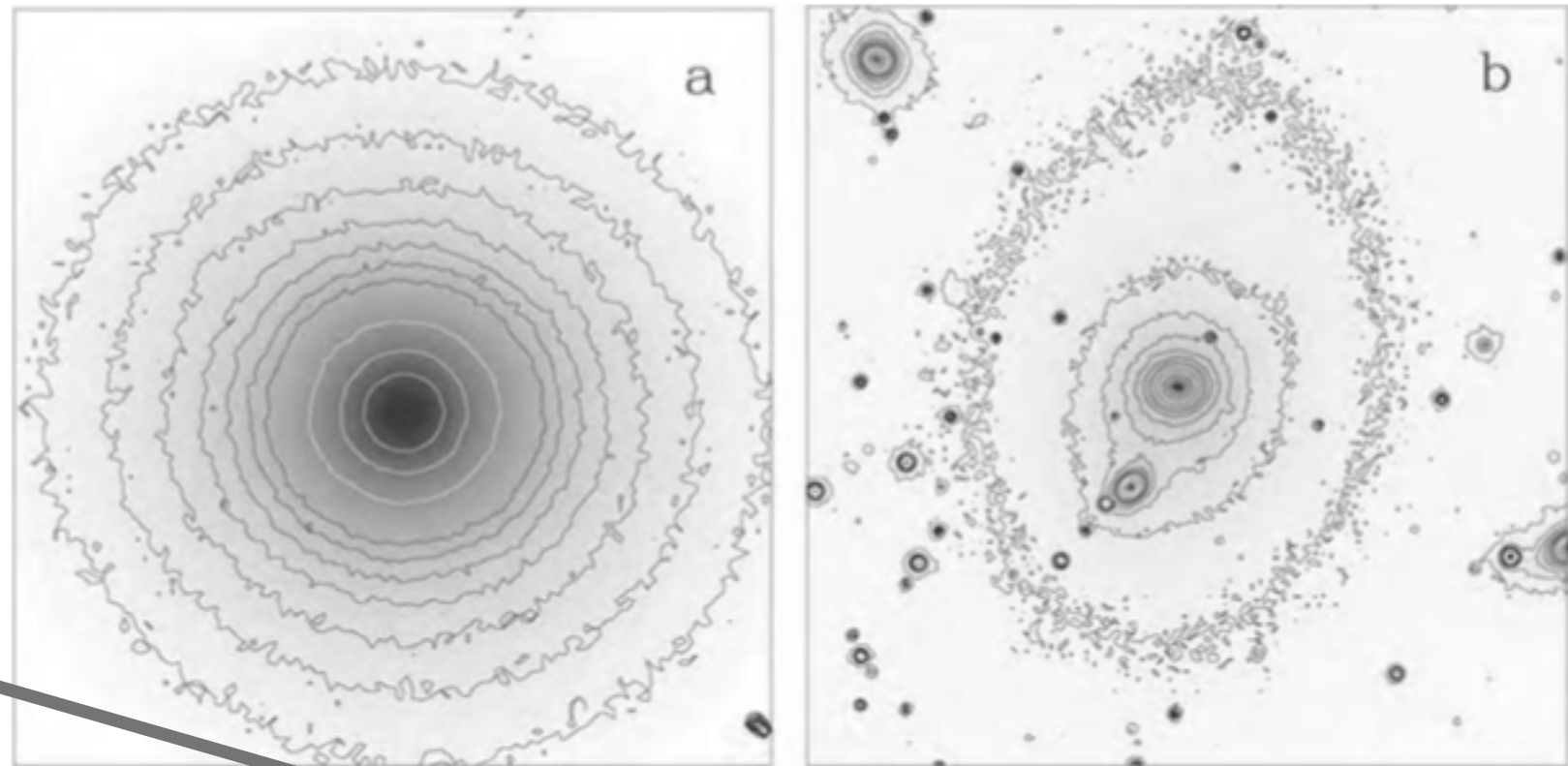


Fig. 6.11. Radio and X-ray power of elliptical galaxies. Boxy galaxies with $a_4 < 0$ tend to be strong sources; diskly ellipticals with $a_4 > 0$ are usually weak. Filled circles show bright objects, with $M_B < -19.5$; open circles are dimmer galaxies. Points with downward-extending bars show upper limits on the X-ray emission; luminosities are calculated for $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ – R. Bender.

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 $n \sim 1$

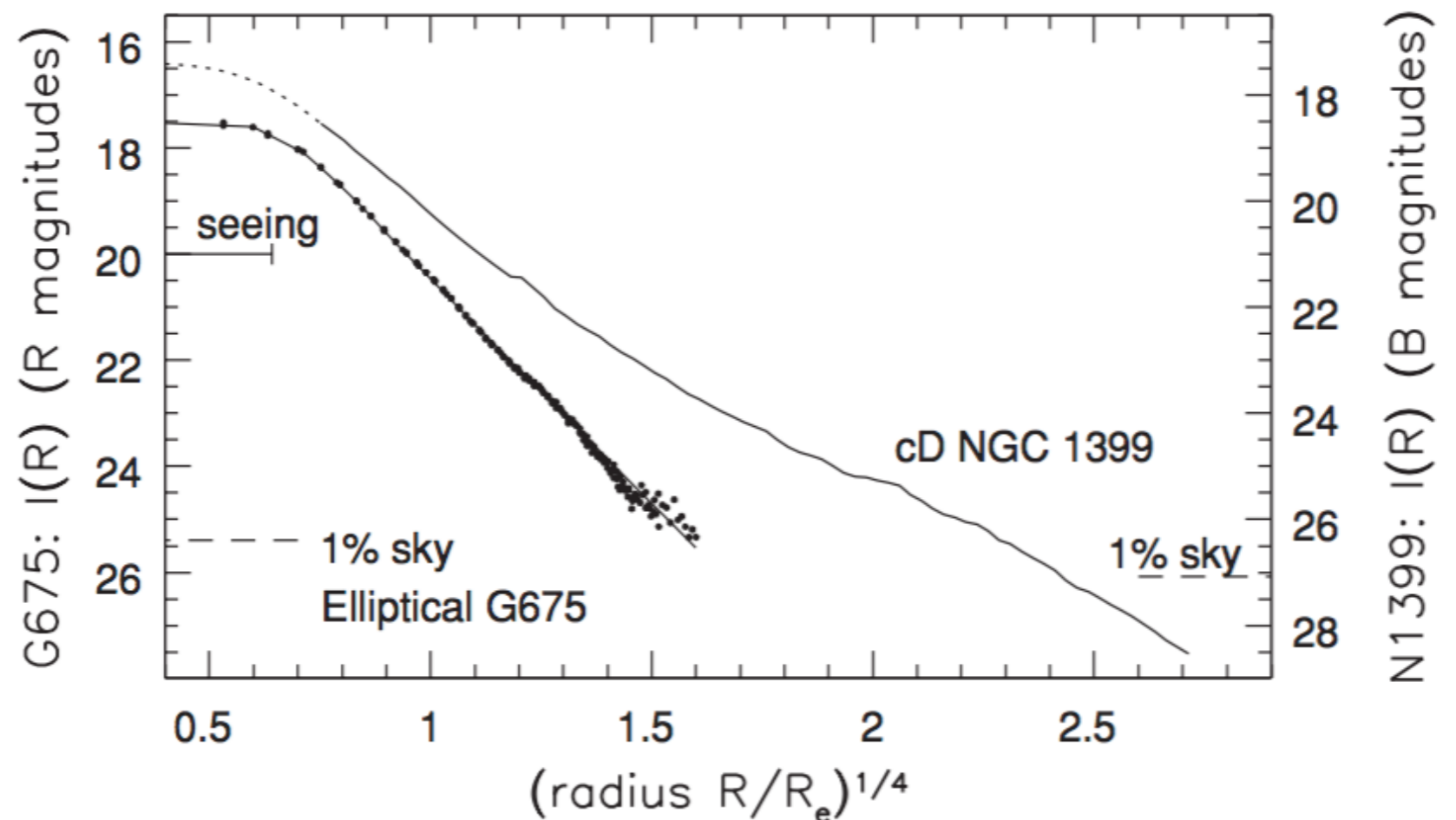
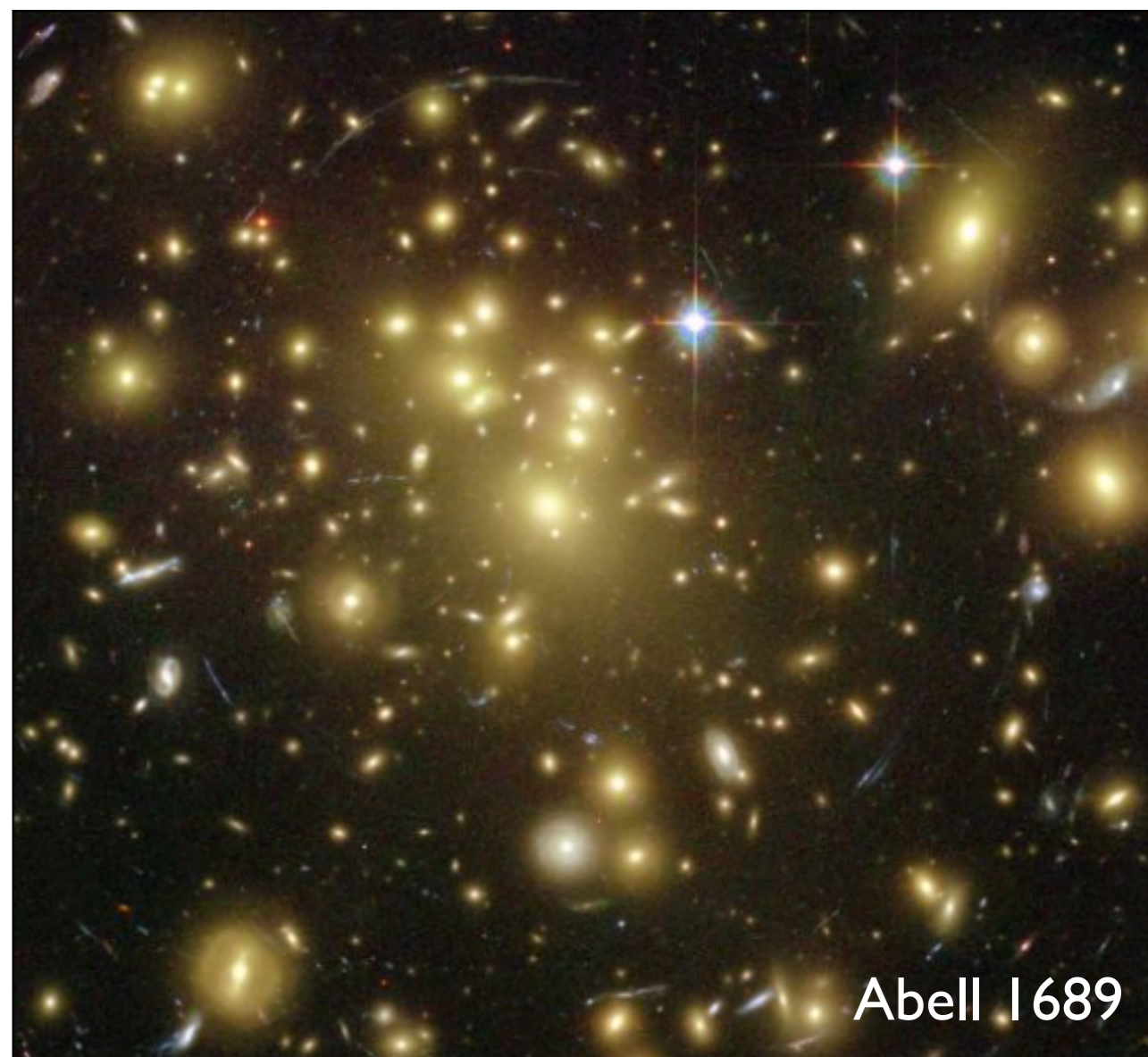


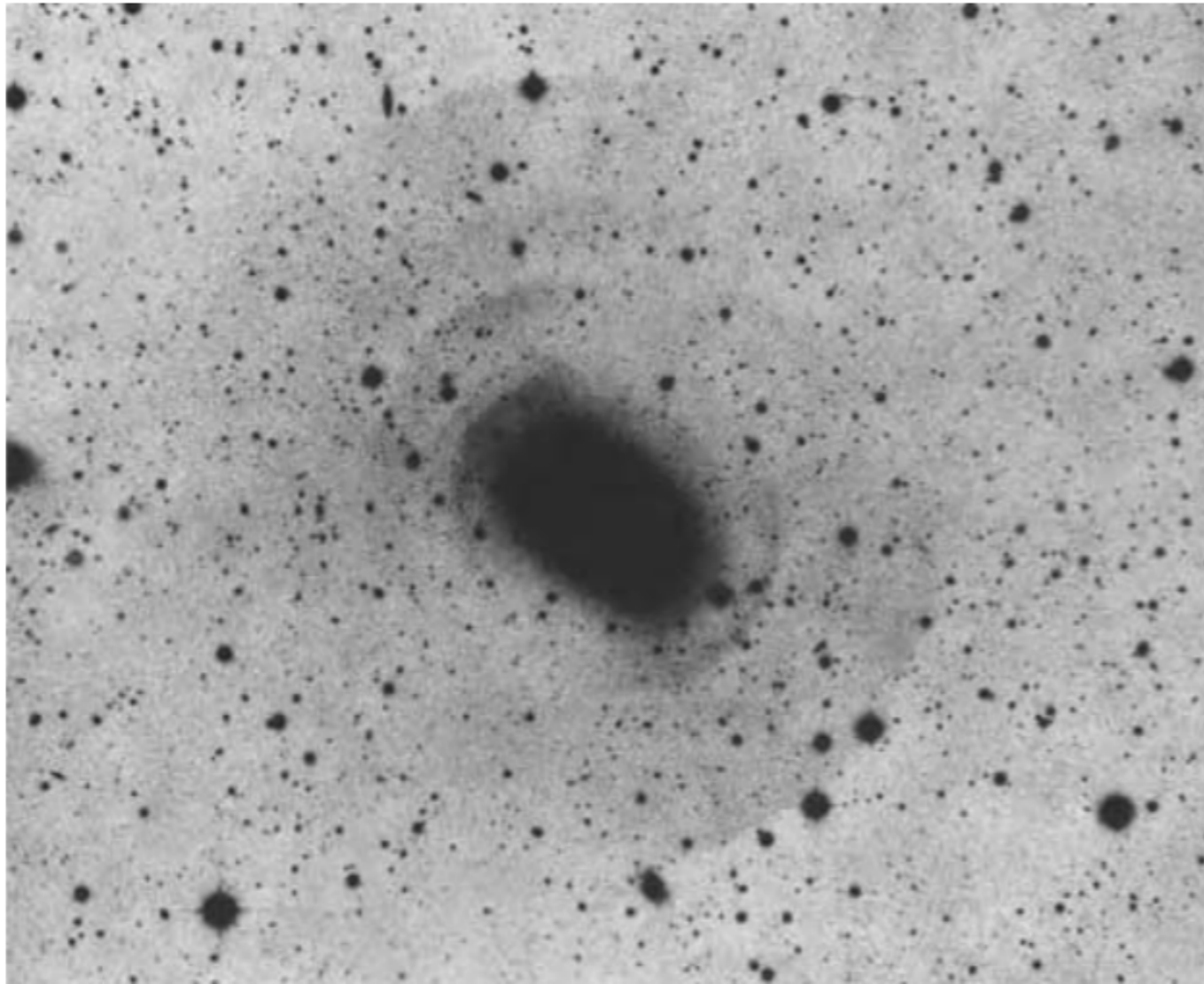
Fig. 6.3. Surface brightness of two luminous ellipticals: an $R^{1/4}$ law corresponds to a straight line.

Galáxias cD

- Os maiores sistemas estelares conhecidos $L \approx 2L_{\star}$
- O perfil de brilho segue $R^{1/4}$ até cerca de $R \sim 20R_e$; além desse raio há um excesso de luz, um envelope característico de cDs
- Não são encontradas isoladas, apenas no centro de aglomerados
- cD vem da classificação de Yerkes, 'c' é usado para galáxias gigantes, e 'D' é usado para galáxias difusas
- IC1101: raio efetivo 65 +- 12 kpc, mas o halo é medido até cerca de 660 kpc



Arcos e conchas



- Estruturas foram identificadas nas regiões externas de algumas galáxias elípticas

Fig. 6.5. A negative image shows faint arclike shells around elliptical galaxy NGC 3923; an out-of-focus copy was subtracted from the original photograph, allowing faint but sharp features to stand out. The picture is $18'$ across, or 110 kpc at $d \approx 21$ Mpc. This is a luminous galaxy ($L_B \approx 4 \times 10^{10} L_\odot$) in a loose group; it appears normal apart from the shells – D. Malin 1983 *ApJ* **274**, 534.

Relação entre brilho superficial central $I(0)$ e luminosidade

Raio de core: onde o brilho superficial cai a metade do valor central

“a menor das elípticas gigantes”

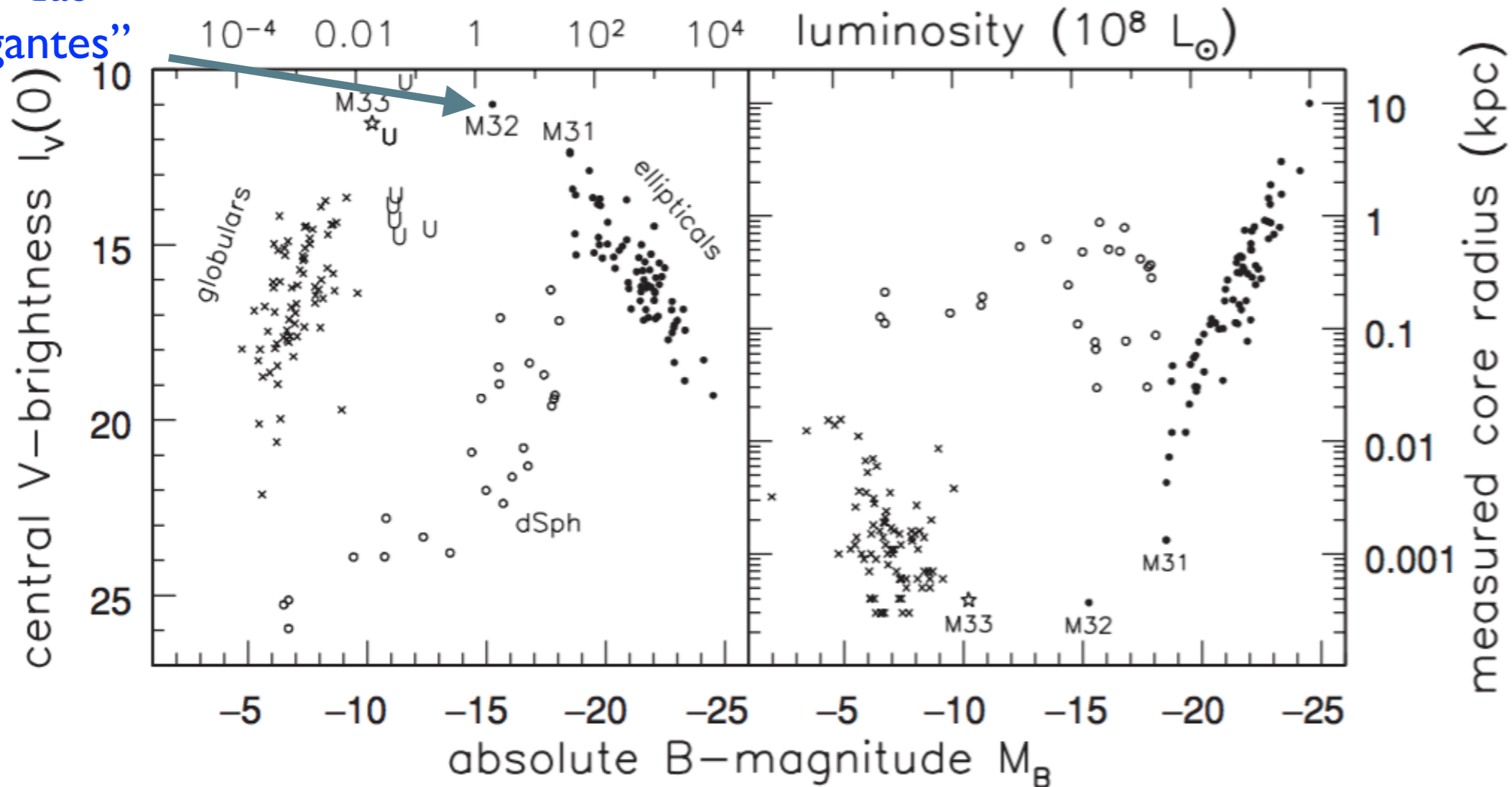


Fig. 6.6. Central surface brightness $I_V(0)$, in mag arcsec $^{-2}$ in the V band, and core radius r_c plotted against B-band luminosity M_B . Filled circles are elliptical galaxies and bulges of spirals (including the Andromeda galaxy M31); open circles are dwarf spheroidals; crosses are globular clusters; the star is the nucleus of Sc galaxy M33. ‘U’ denotes an ultracompact dwarf elliptical in the Fornax or Virgo cluster – J. Kormendy and S. Phillipps.

Relações de escala

- Compreendemos relativamente bem porque as estrelas populam apenas algumas regiões de diagrama HR: luminosidade e temperaturas estão associadas à sua massa e às zonas onde ocorre fusão nuclear.
- Explicar a distribuição das galáxias em figuras como a 6.6 é mais difícil, porque provavelmente reflete as condições nas quais as galáxias se formaram, ao invés dos processos apenas internos às galáxias.
- O padrão nos indica que formação de galáxias tem alguma regularidade e que como a galáxia se formou está relacionado com sua massa. Mas essa evidência requer interpretação, o que até o momento é “work in progress”.

Fotometria

- 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: $< 3 \times 10^9 L_{\odot}$

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)



Perfil de brilho central

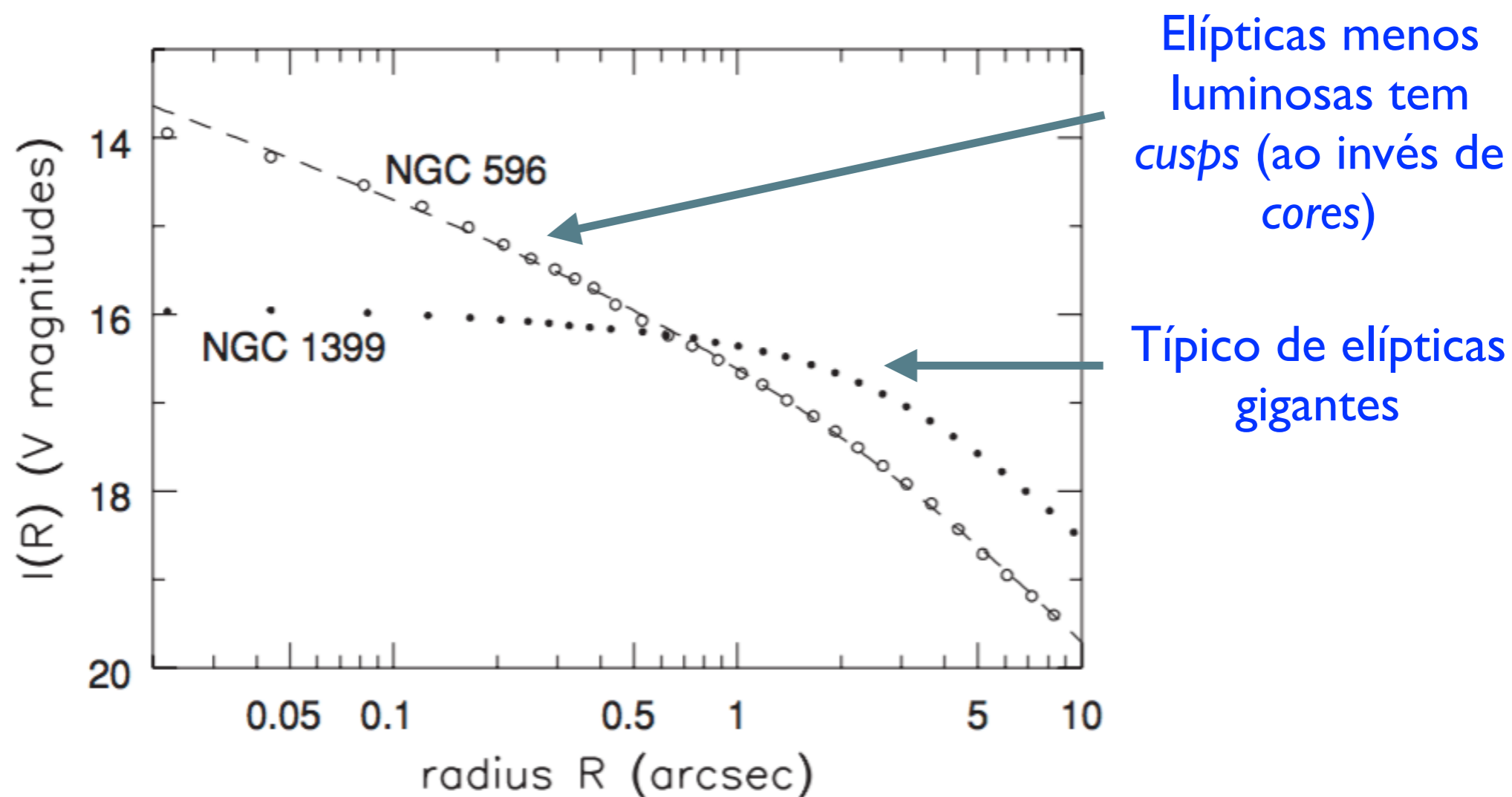
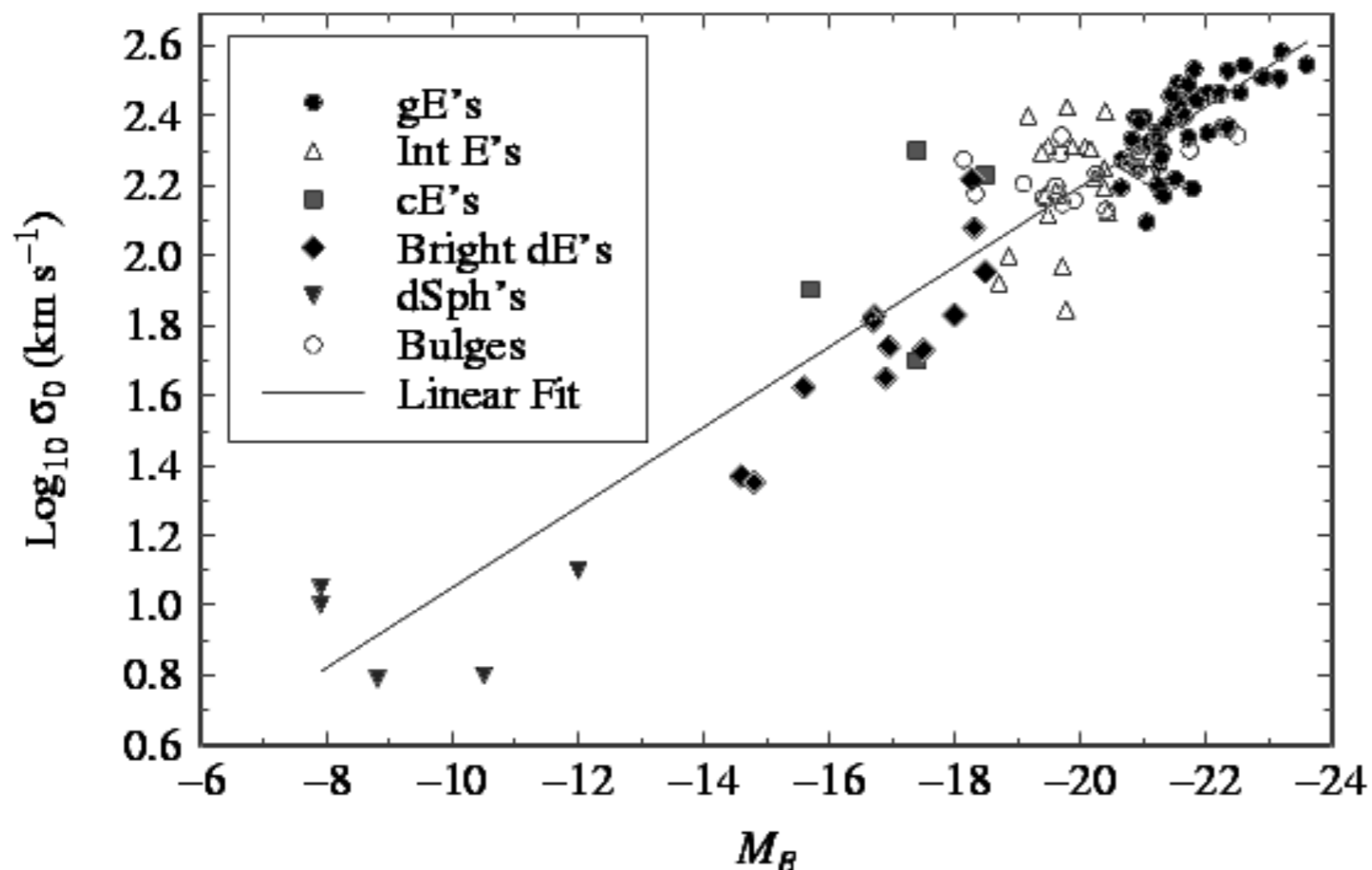


Fig. 6.7. Surface brightness $I_V(R)$ in the V band at the centers of two elliptical galaxies. The cD galaxy NGC 1399 ($M_V = -21.7$) has a *core* at $R \lesssim 1''$, where $I(R)$ is nearly constant. NGC 596 ($M_V = -20.9$) is half as luminous; the surface brightness continues to rise as a *cusp*. The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

Relação Faber - Jackson

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



- 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

Alargamento de linhas em galáxias

- Em galáxias ricas em gás, usamos linhas de emissão (H 21 cm por exemplo) para medir velocidades; mas na ausência de gás temos apenas as linhas de absorção de estrelas e isso requer maiores S/N (mais tempo de observação)
- o alargamento de linhas em um espectro de galáxia é combinação de: resolução instrumental, alargamento intrínseco nas estrelas da galáxia, e a dispersão de velocidades

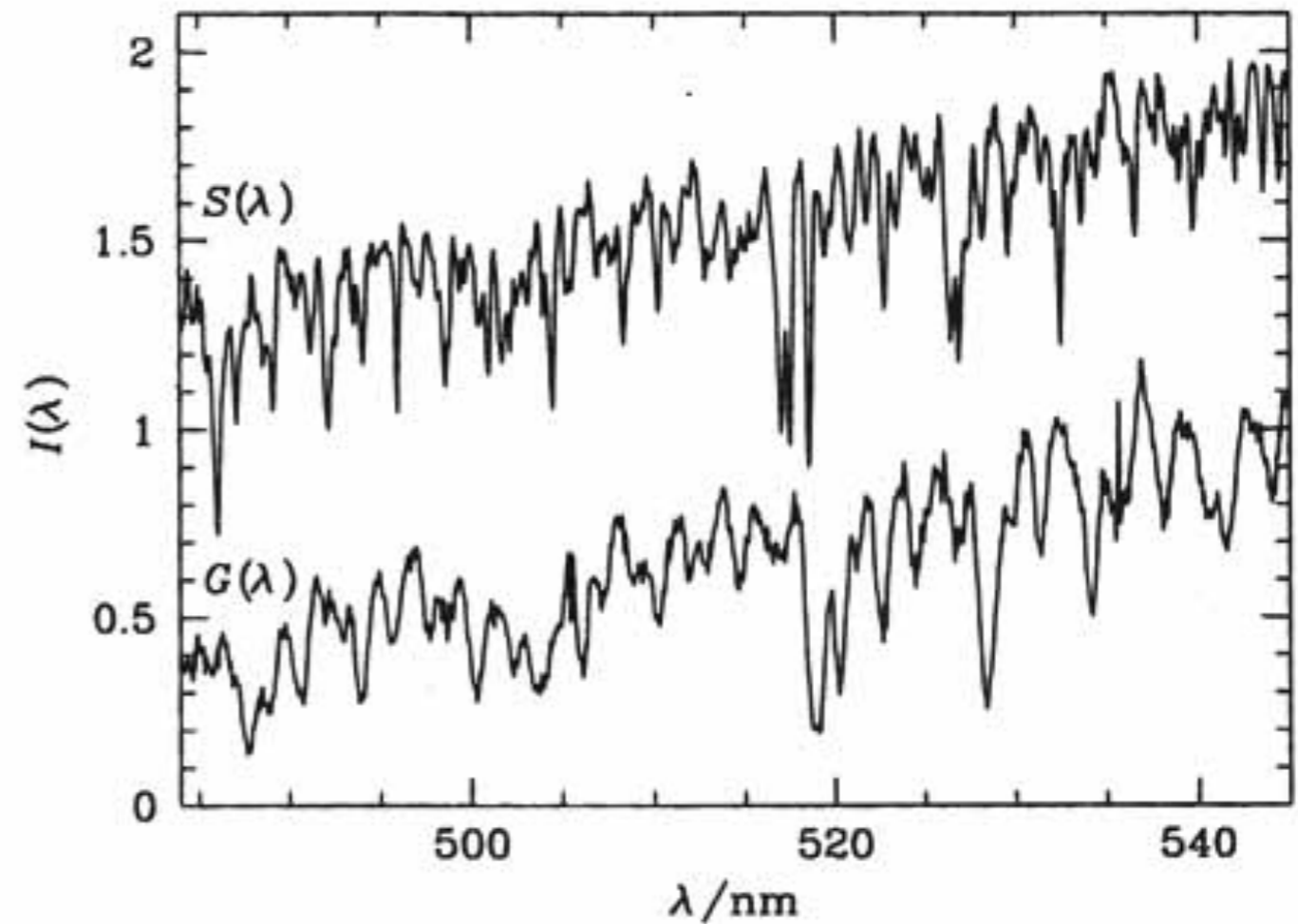
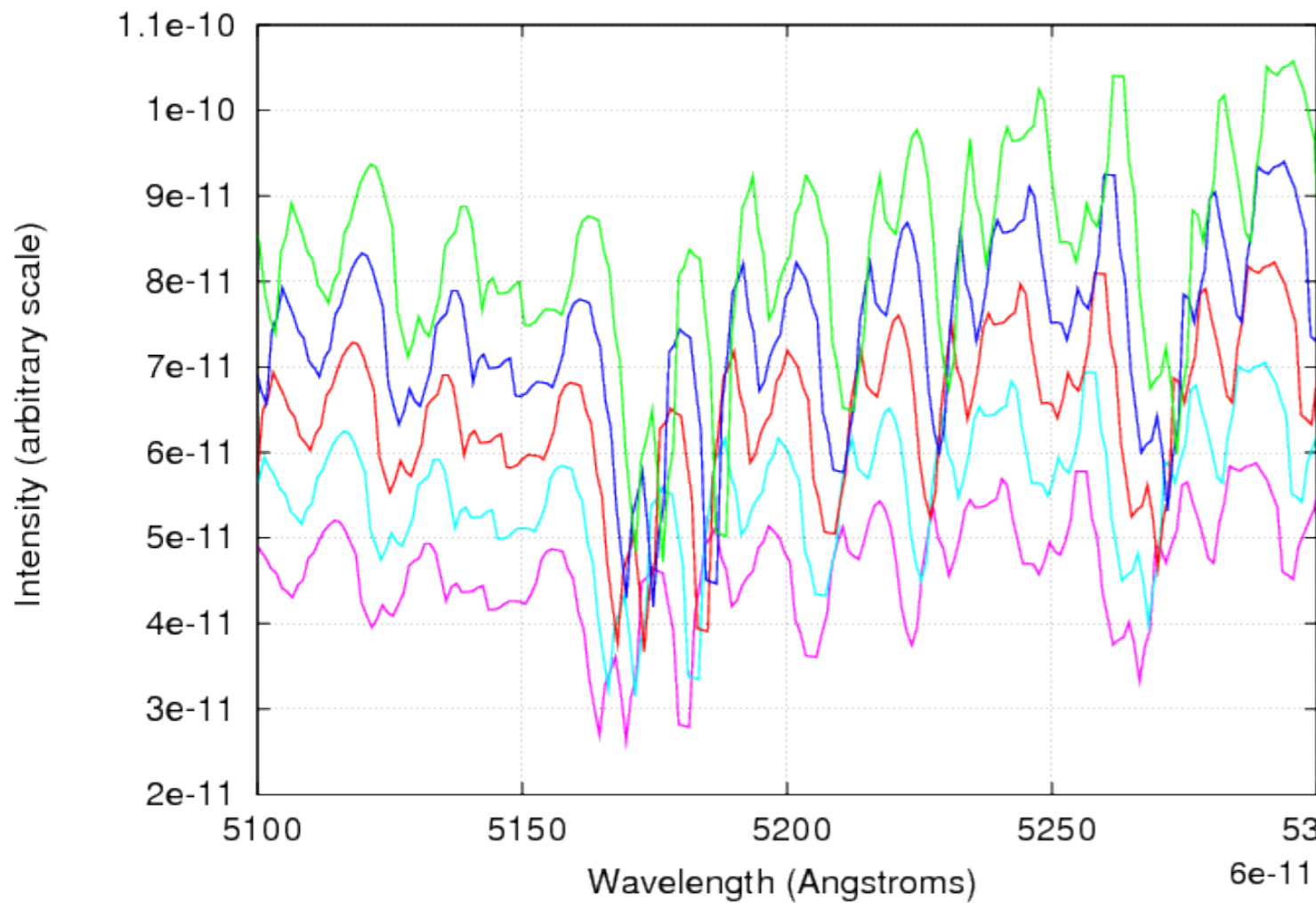
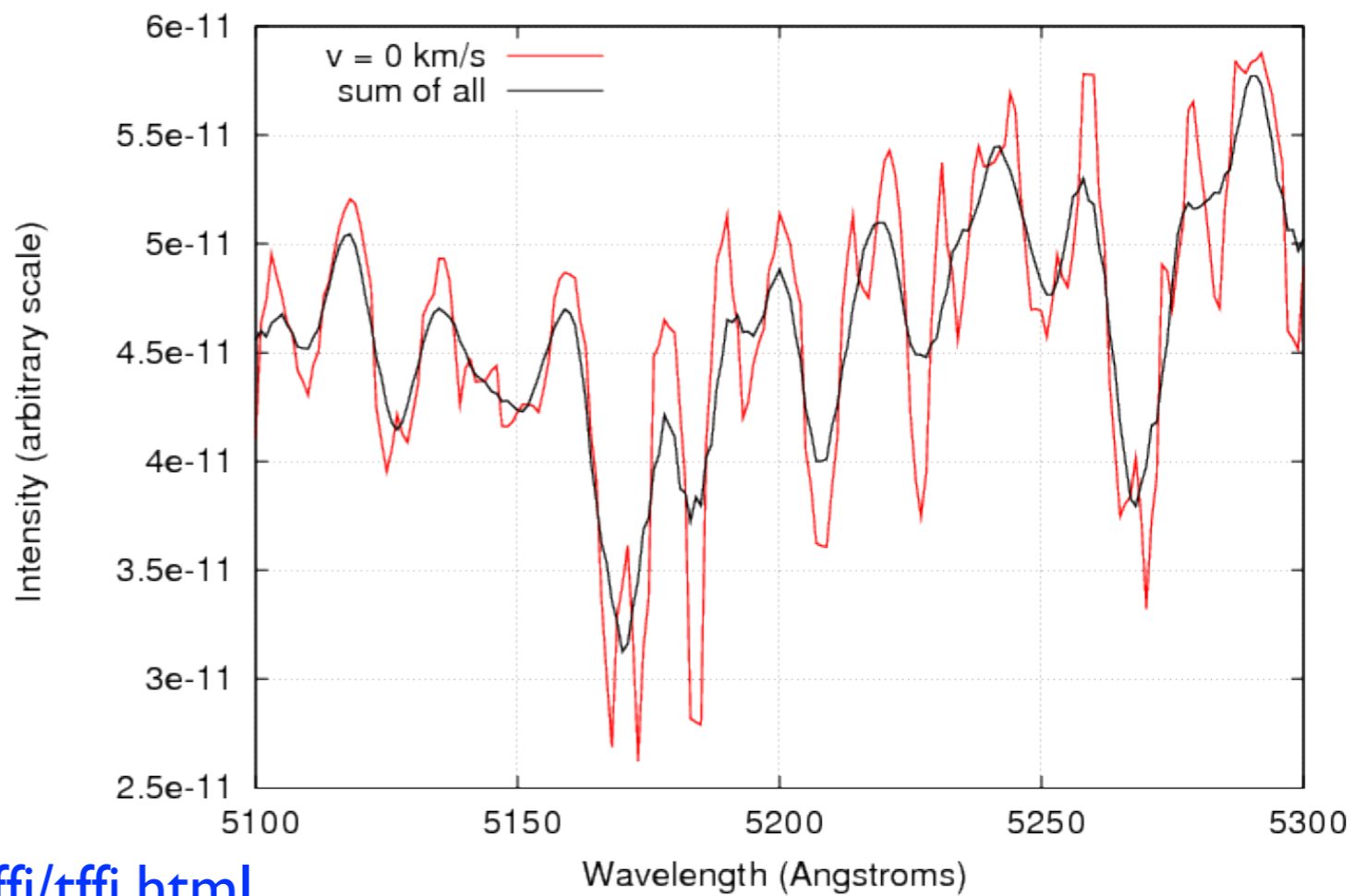


Figure 11.1 Spectra of a K0 giant star (S) and the center of the lenticular galaxy NGC 2549 (G). These data cover a small part of the optical spectrum around the strong Mg b absorption feature at 518 nm.

Spectrum of a K3 III star: $v = -200, -100, 0, +100, +200$ km/s



Adding spectra of K3 III stars: $v = -200, -100, 0, +100, +200$ km/s



Alargamento de linhas em galáxias

- Sendo
 - $G(\lambda)$: espectro observado da galáxia
 - $S(\lambda)$: template estelar
 - $N(\lambda)$: line of sight velocity distribution LOSVD

$$G(\lambda) = S(\lambda) * N(\lambda)$$

- sendo que LOSVD é determinado por $\langle v \rangle$, σ e intensidade da linha

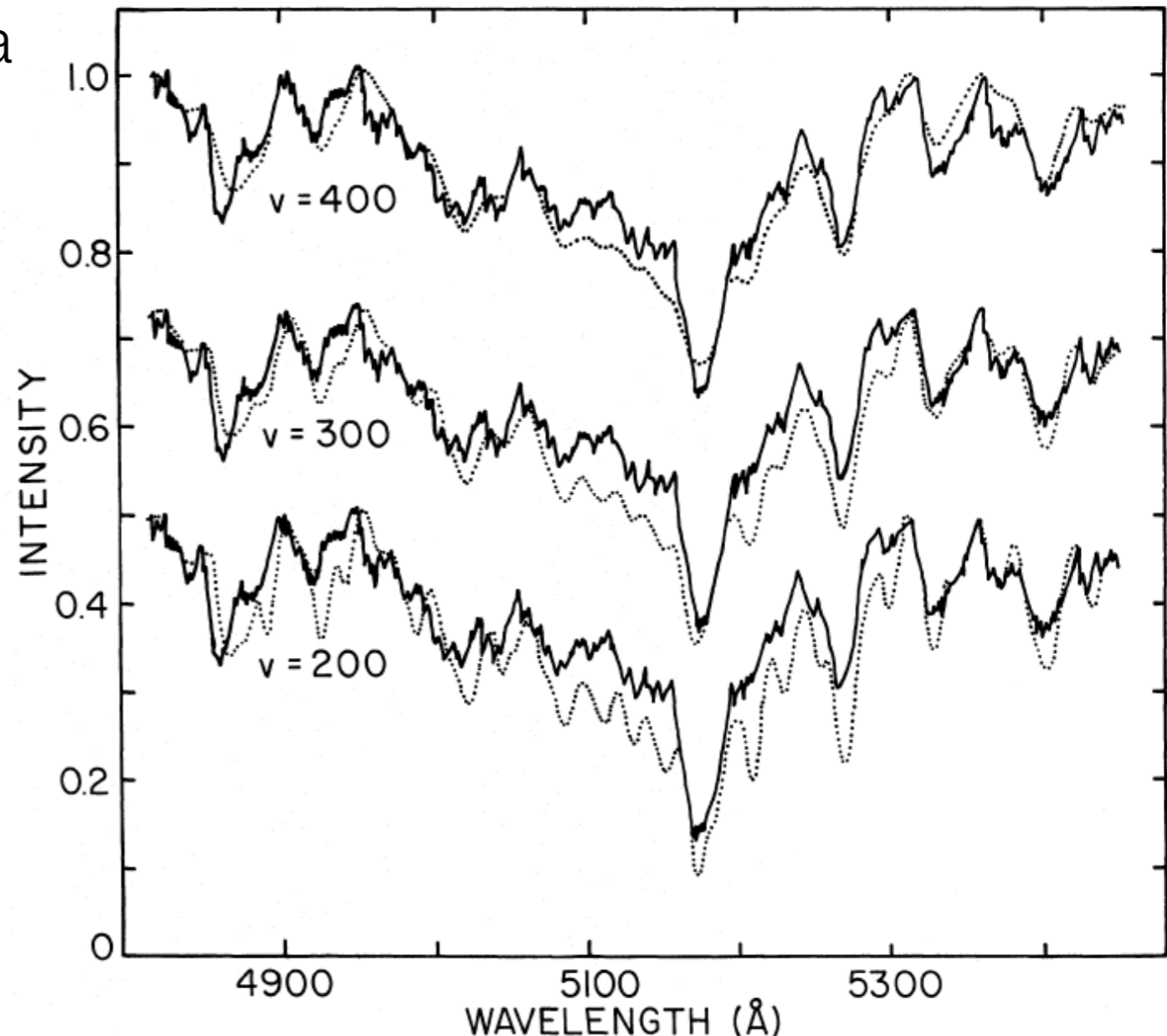


FIG. 3.—NGC 4472 compared with standard star HR 1805 (K3 III), broadened by various line-of-sight velocities (*dotted line*)

Velocidades

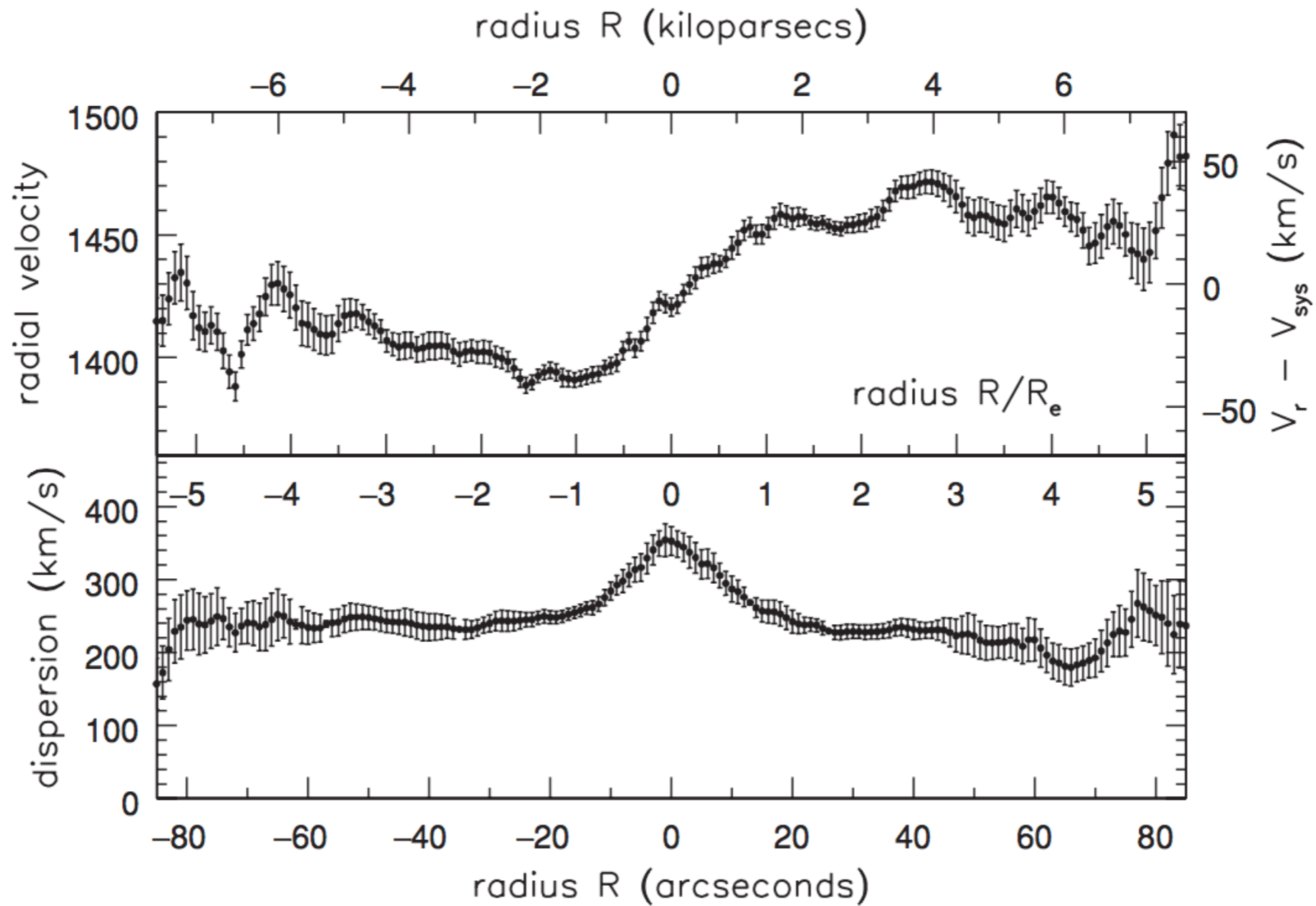


Fig. 6.12. Measured radial velocity V_r and velocity dispersion σ_r on the major axis of cD galaxy NGC 1399; vertical bars show uncertainties. Notice that $(V_r - V_{sys})/\sigma_r \ll 1$; V_r reverses slope in the central few arcseconds – A. Graham.

Um pouco de “história”

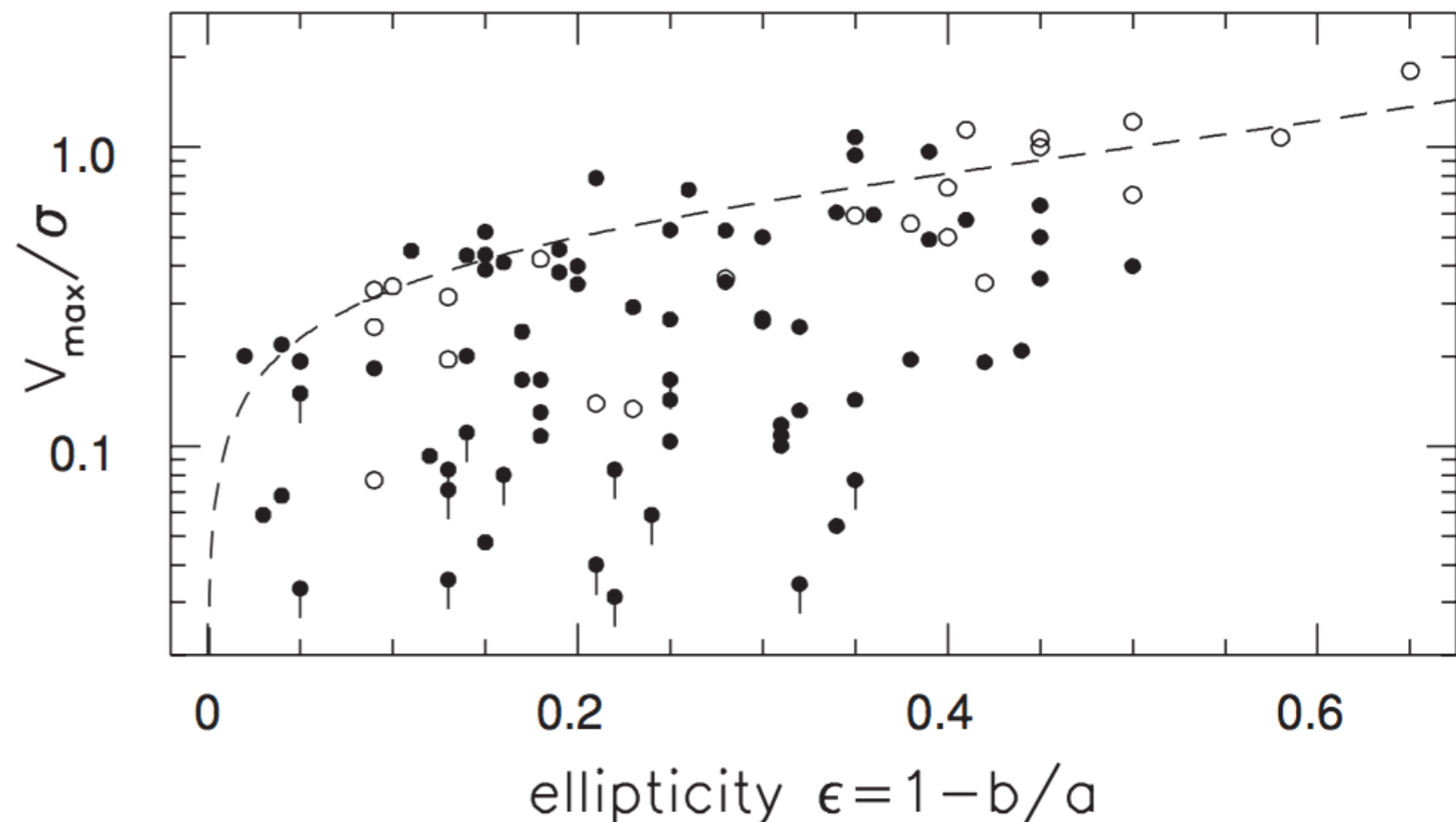
(seção 6.2.3 do livro-texto)

- 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 σ for elliptical galaxies, plotted against apparent ellipticity. The dashed line gives $(V/\sigma)_{\text{iso}}$, the fastest rotation expected for a given flattening.



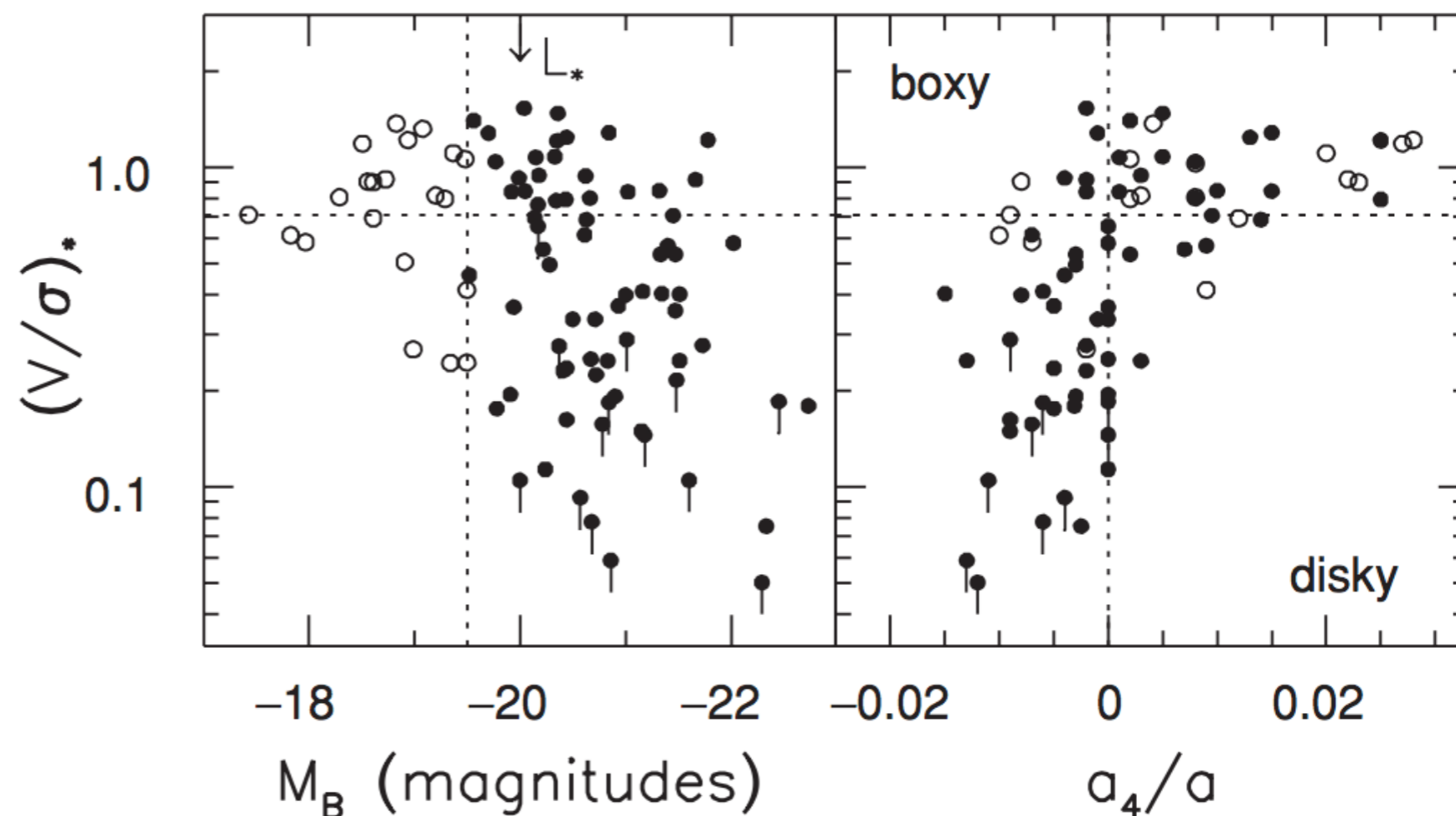
Elípticidade

- Nós não medimos a elípticidade real da galáxia B/A , apenas a razão aparente b/a
- Mas se a galáxia tiver um achatamento relativamente pequeno, pode-se demonstrar que os dois termos na equação 6.29 decrescem pelo mesmo fator $\sin i$, onde i é o ângulo de visada.

Um pouco de "história"

- Conclusão: o achatamento dessas galáxias não é causado por rotação, e sim por anisotropia de velocidades -> a dispersão de velocidades é diferente para cada eixo x, y, z da galáxia
- Elípticas gigantes (luminosas) tendem a ser mais anisotrópicas
- Elípticas normais (midsized) tem alta rotação

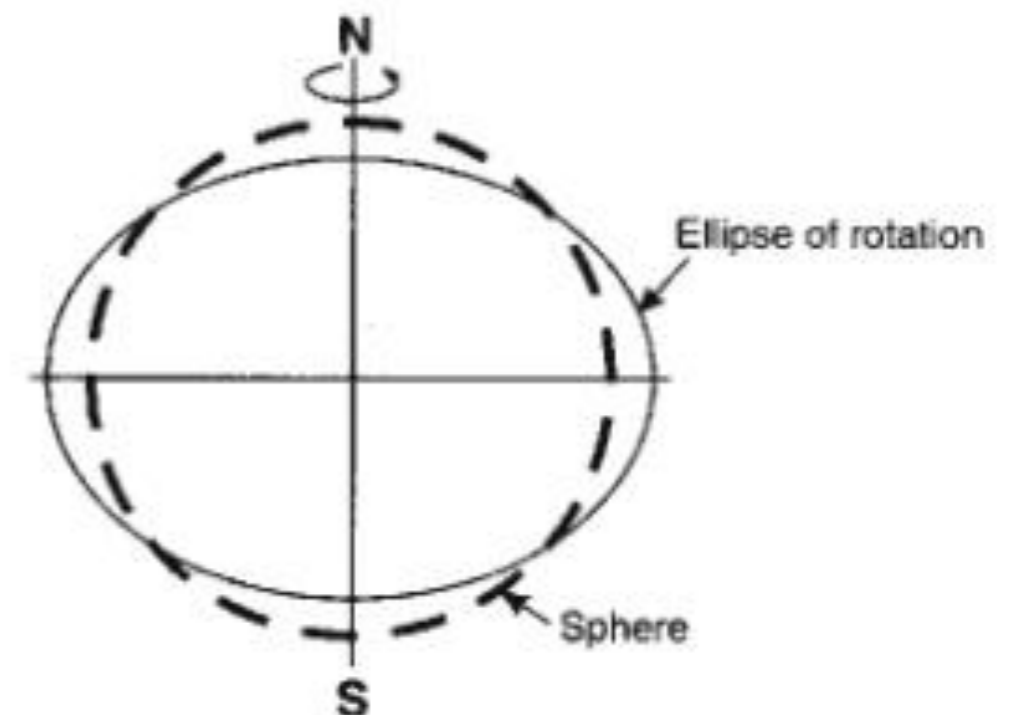
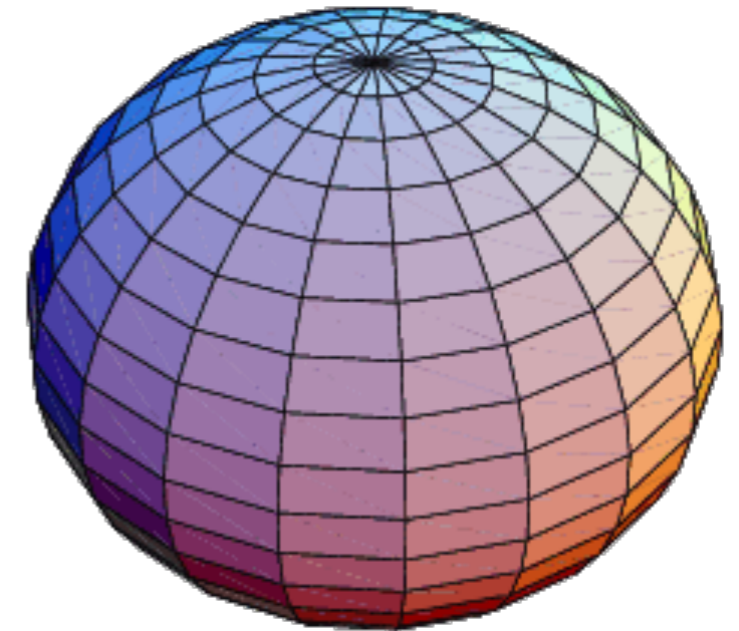
Fig. 6.15. The ratio $(V/\sigma)_*$ of measured V_{\max}/σ to $(V/\sigma)_{\text{iso}}$, the rotation expected for an oblate galaxy according to Equation 6.29. Filled circles are bright galaxies, with $M_B < -19.5$ for $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Left, luminous galaxies often rotate slowly, falling below the dotted horizontal line at $(V/\sigma)_* = 0.7$. Right, boxy galaxies, with $a_4 < 0$, are almost all slow rotators.



Rotação vs. Anisotropia

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

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

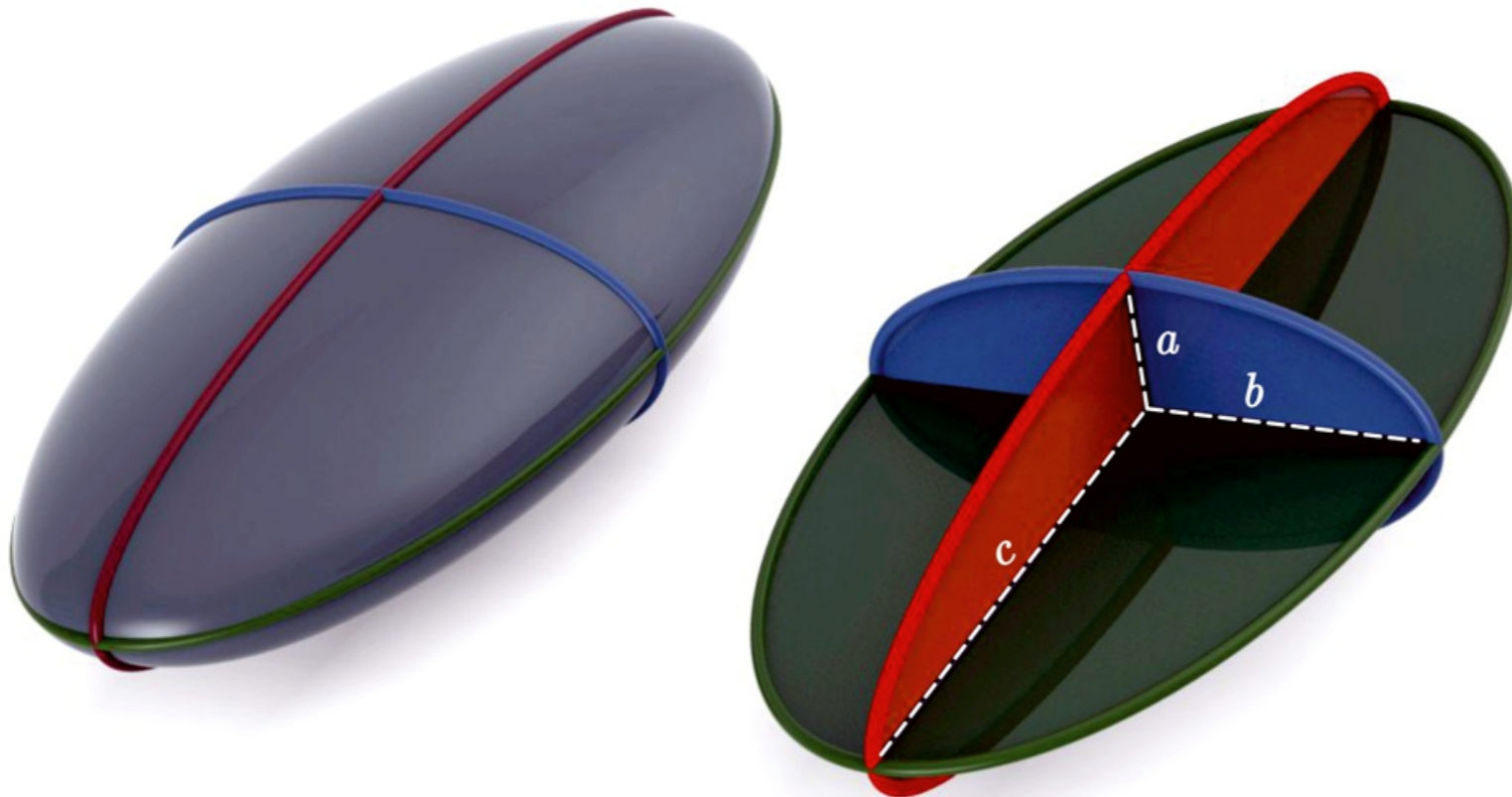
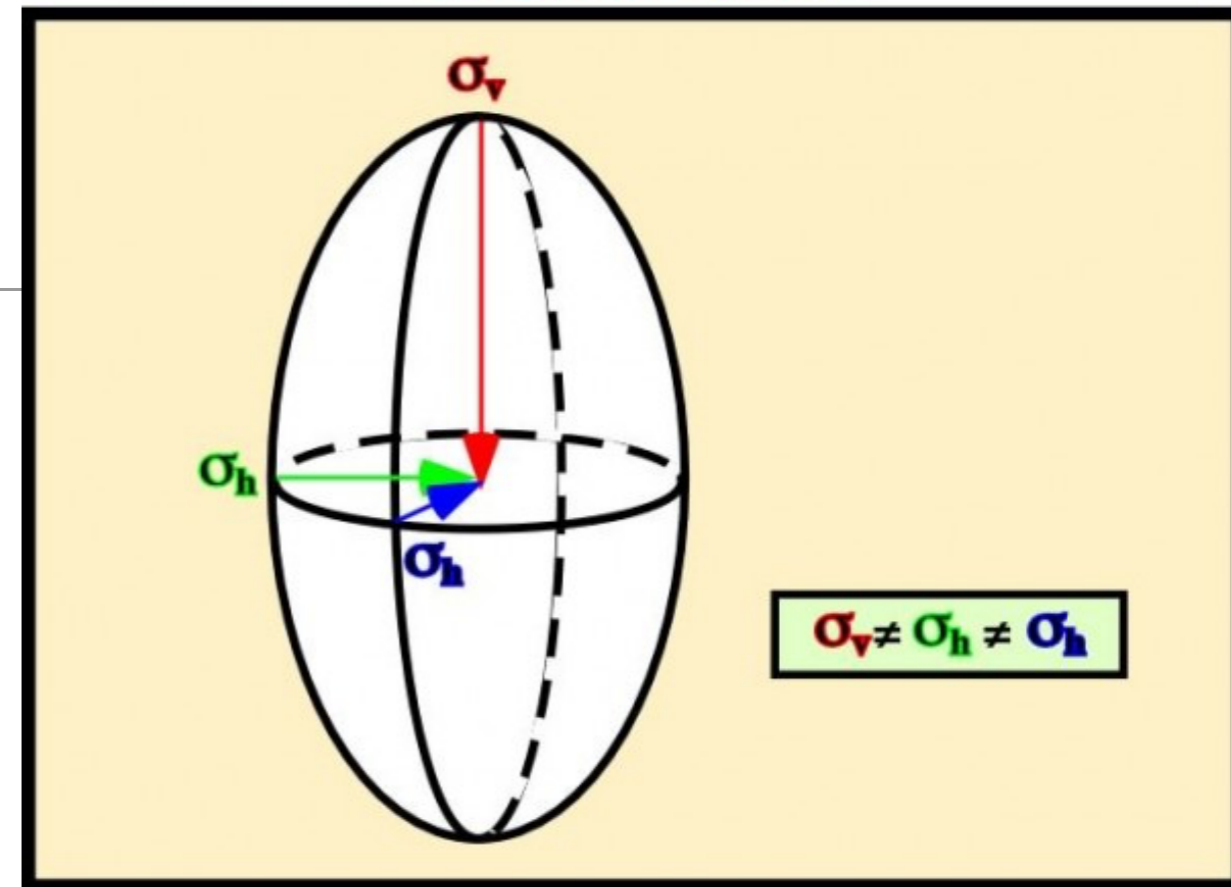


Rotação vs. Anisotropia

- Elipsóide triaxial: os três eixos diferem

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

Triaxial Ellipsoid



Projeções de isofotas (dedução em §6.1.1)

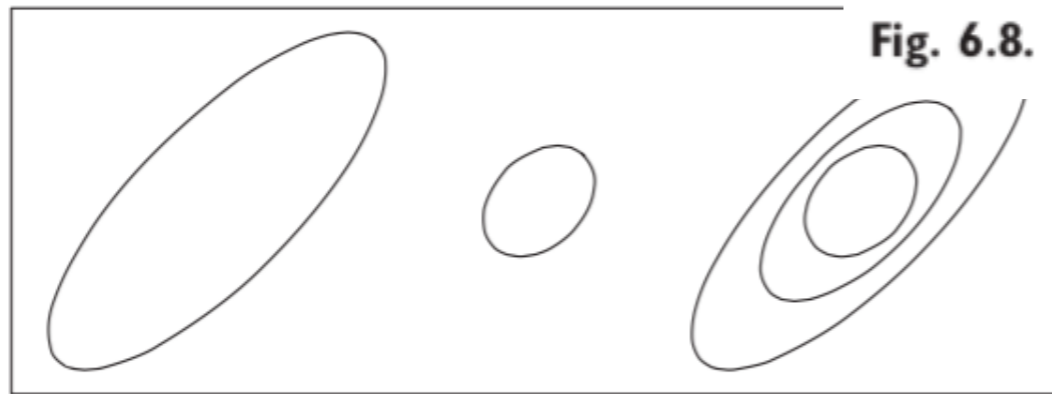
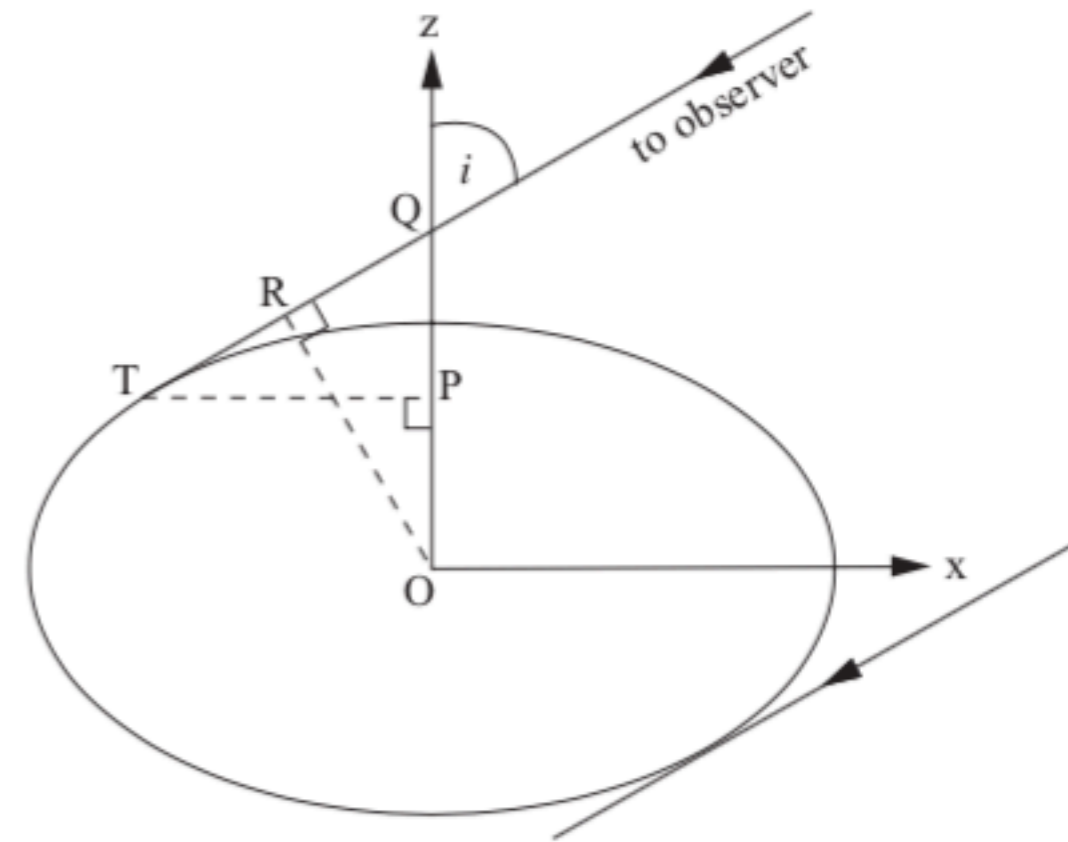


Fig. 6.8. Viewing angles for an oblate galaxy.

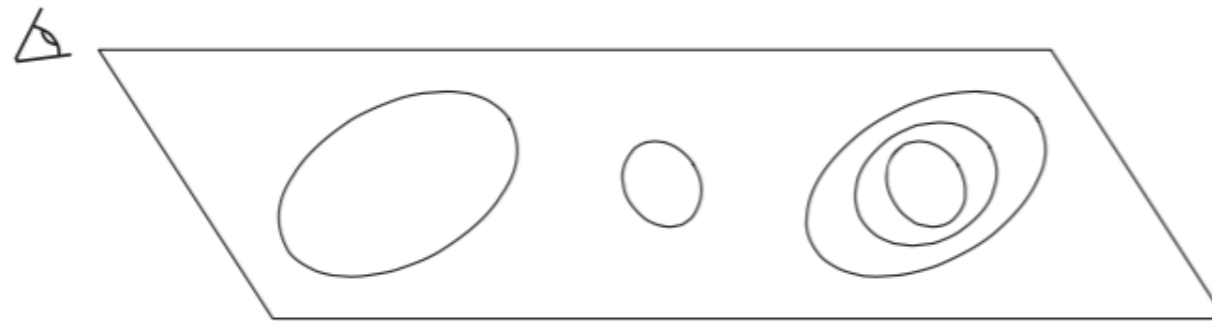


Fig. 6.10. A two-dimensional analogue of isophote twisting in a triaxial galaxy: ellipses on a flat surface (top) are viewed from below left (lower panel). The left ellipse still points to top right; but the long axis of the rounder center ellipse now heads to lower right. The rightmost set of ellipses shows how, if the axis ratios of a triaxial galaxy vary with radius, the isophotes may twist even when the principal axes do not – after J. Kormendy.

Isofotas

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

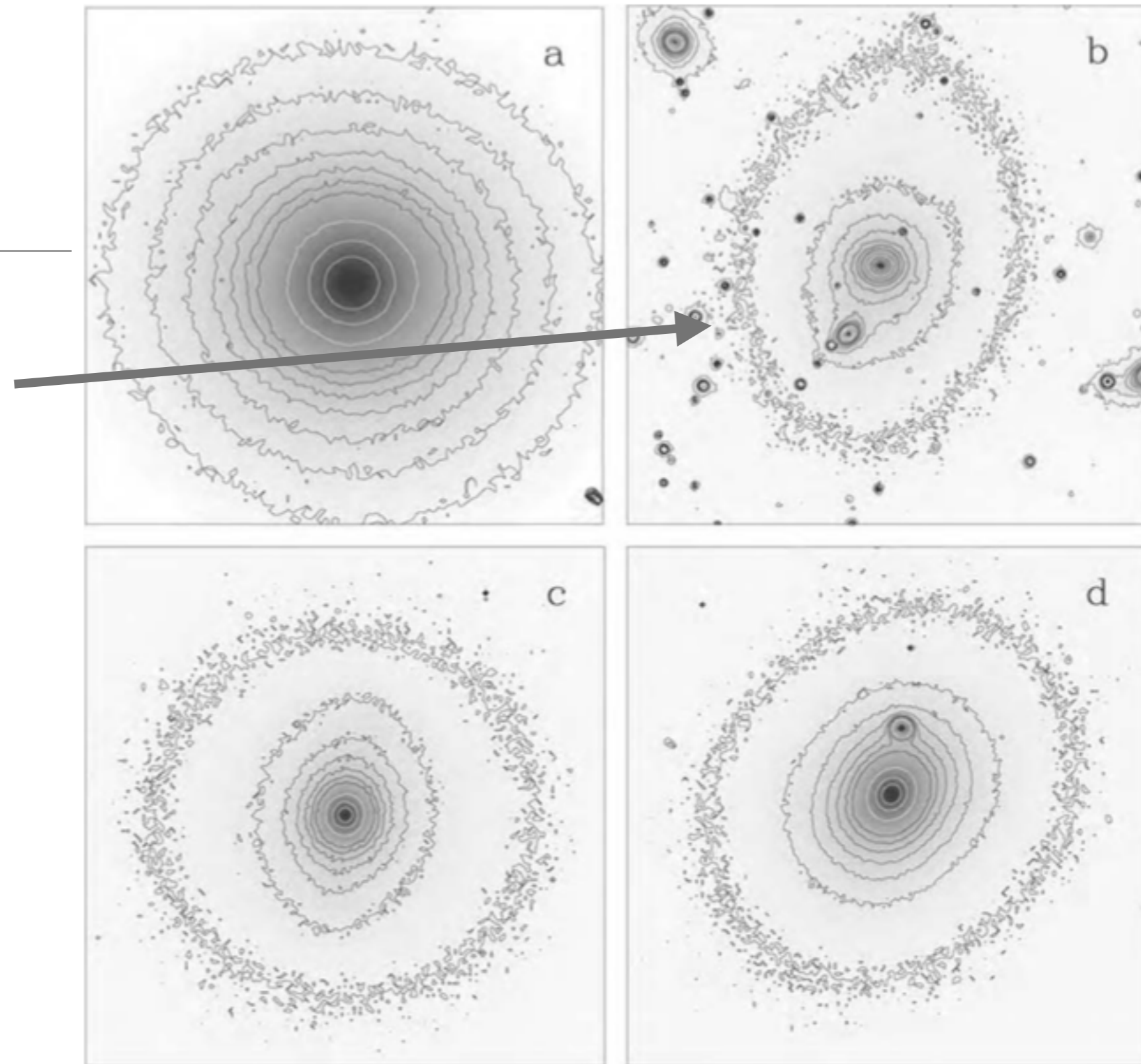


Fig. 6.1. Isophotes in the *R* band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw 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.

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

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

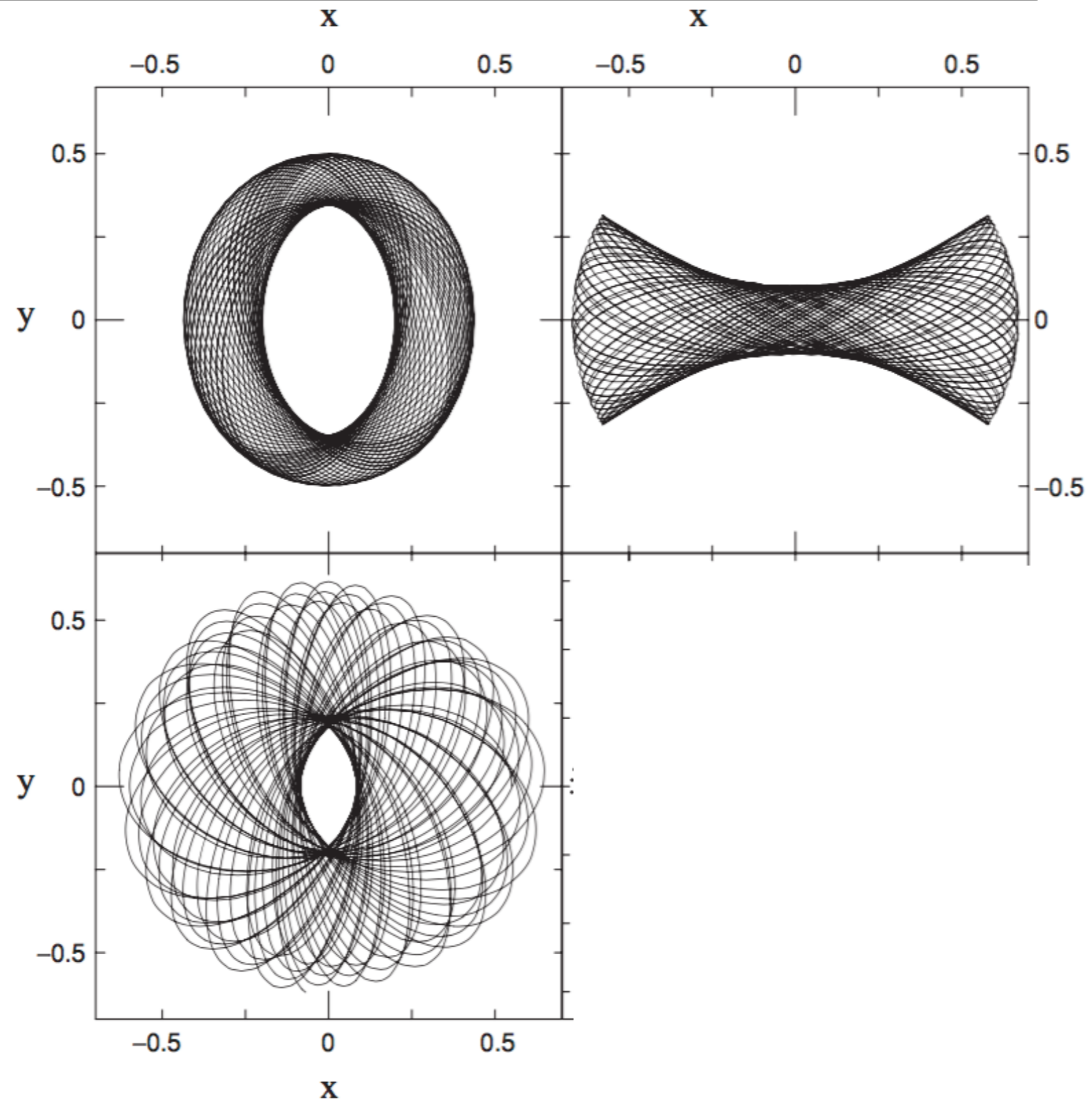


Fig. 6.16. Orbits in the potential of Equation 6.33, with $v_0 = 1$, $q = 0.8$, and $R_e = 0.14$; all have energy $E = -0.337$. The top left panel shows a loop orbit, which avoids the center; at the top right is a box orbit, which passes through it; lower left is a chaotic orbit, produced when a central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

Populações estelares e gás

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)

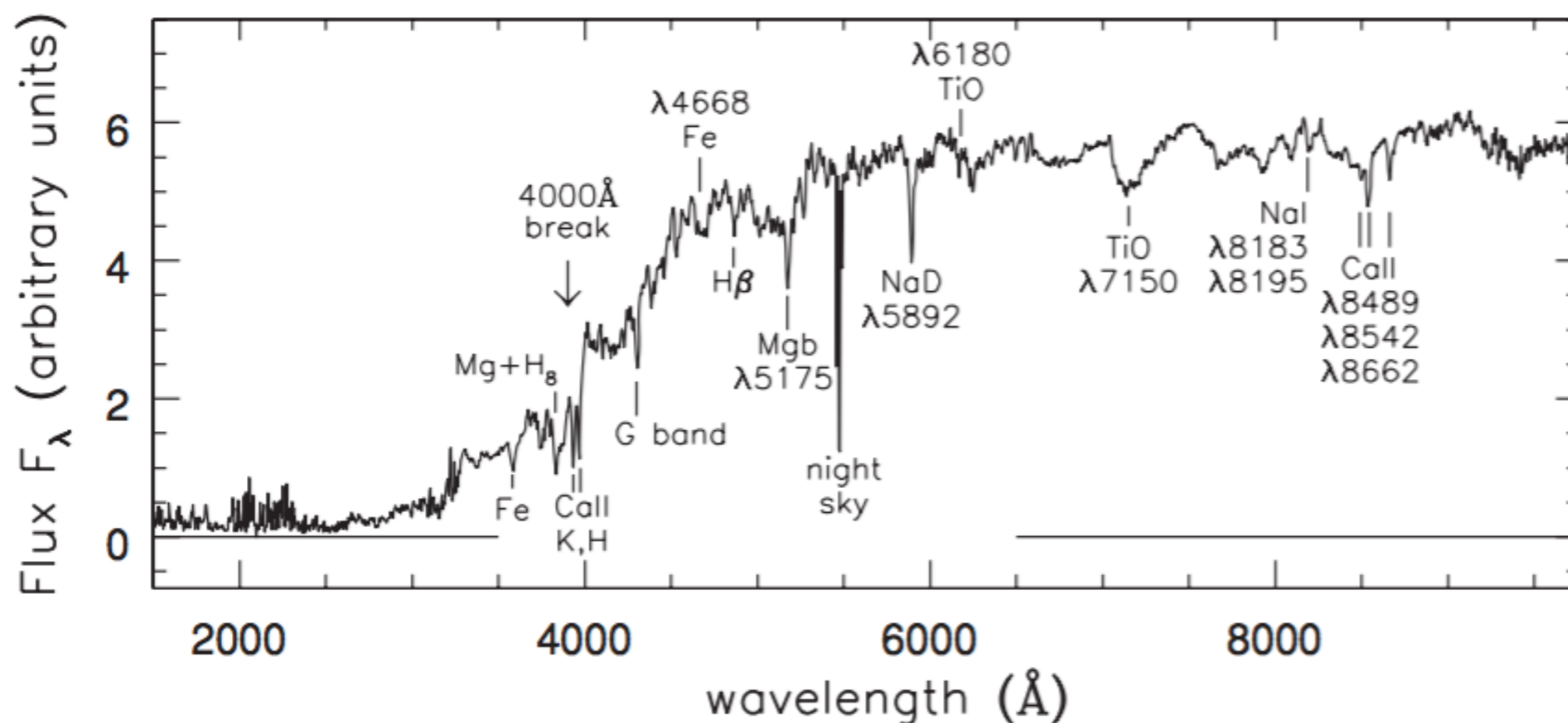


Fig. 6.17. The spectrum of an elliptical galaxy; compare this with the spectra of K and M stars in Figure 1.1, and those of disk galaxies in Figure 5.24 – A. Kinney.

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

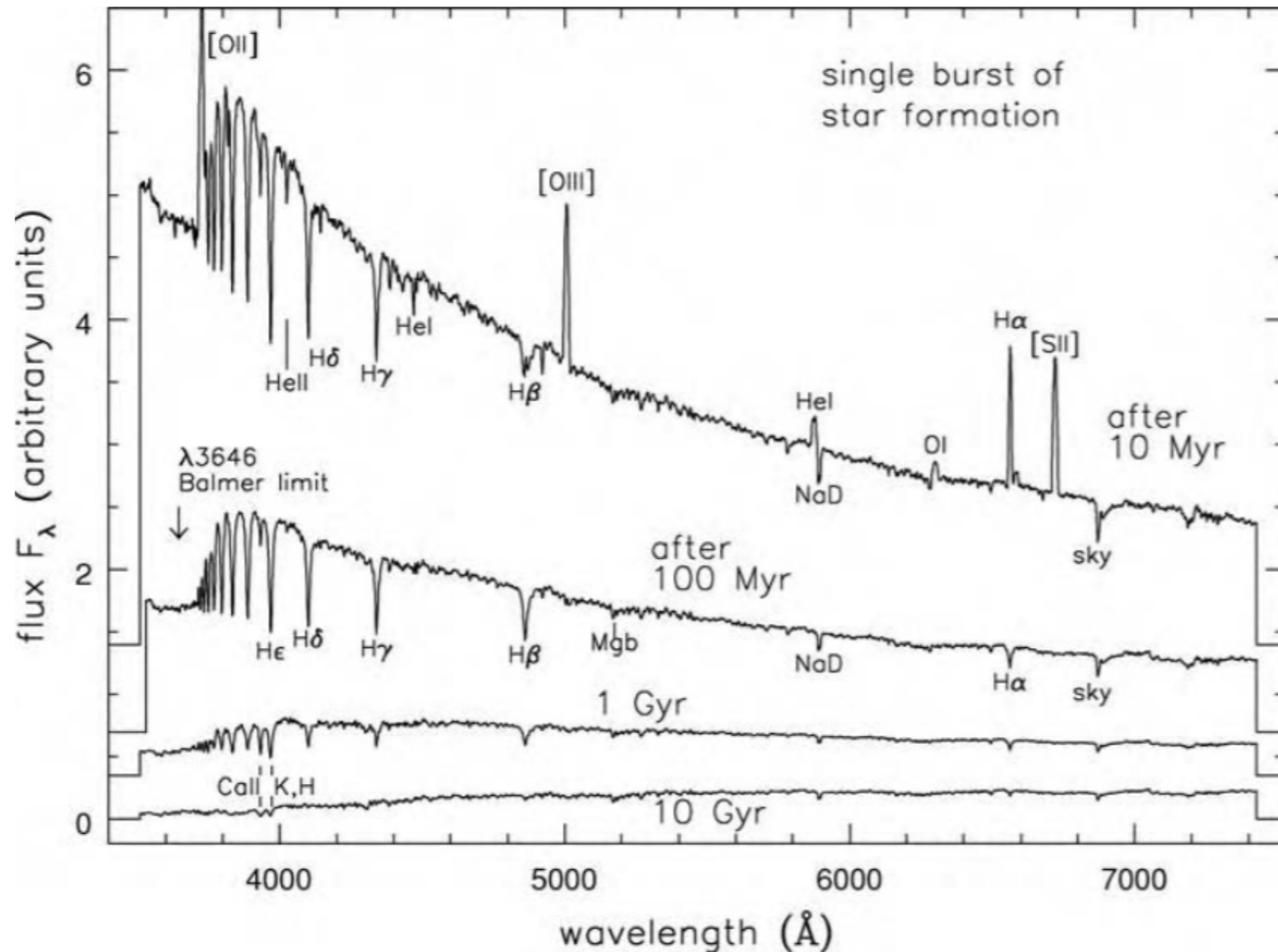
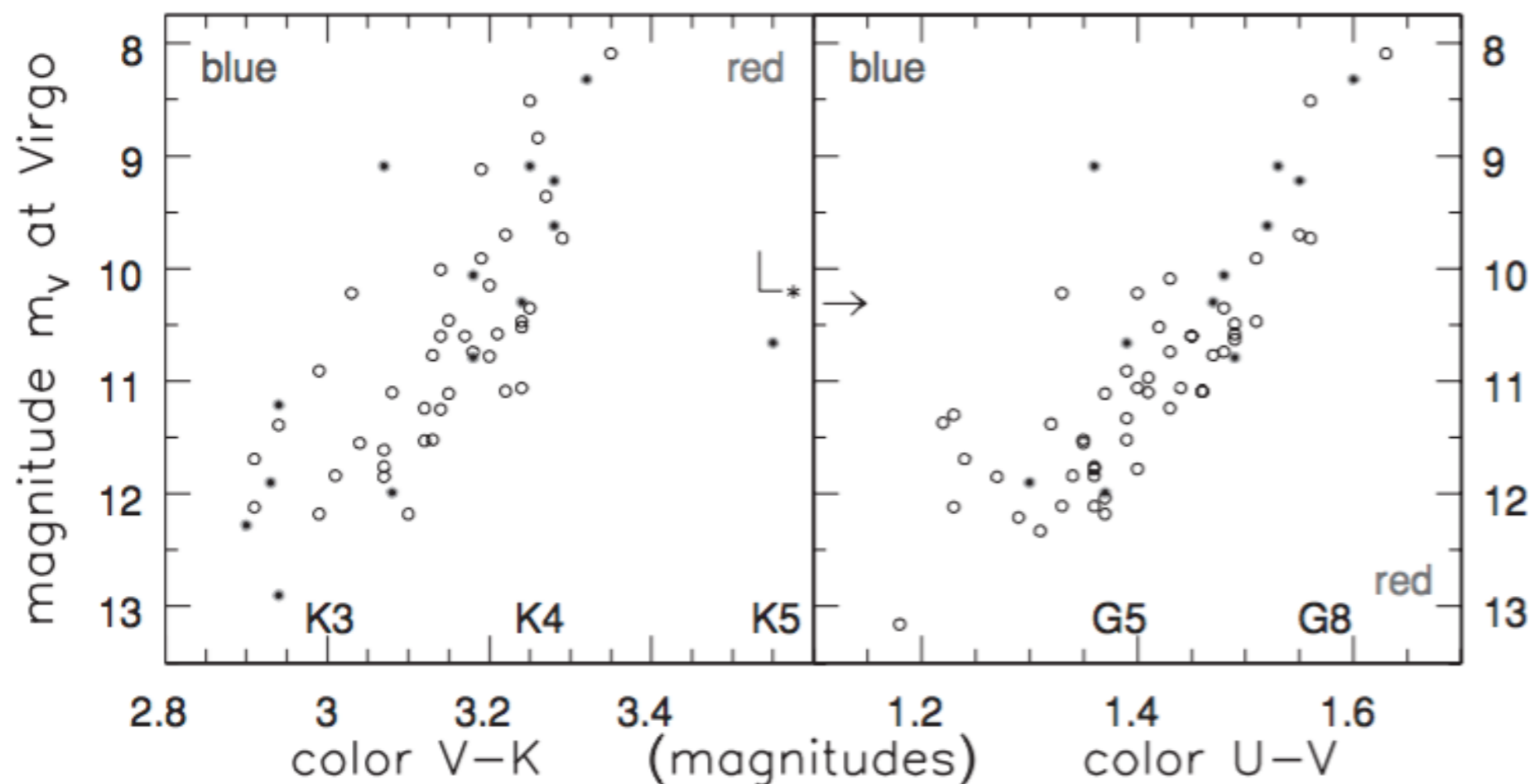


Fig. 6.18. Spectra for a ‘galaxy’ that makes its stars in a 10^8 yr burst, all plotted to the same vertical scale. Emission lines of ionized gas are strong 10 Myr after the burst ends; after 100 Myr, the galaxy has faded and reddened, and deep hydrogen lines of A stars are prominent. Beyond 1 Gyr, the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

Populações Estelares



Elípticas mais
luminosas são mais
velhas e/ou mais ricas
em metais.

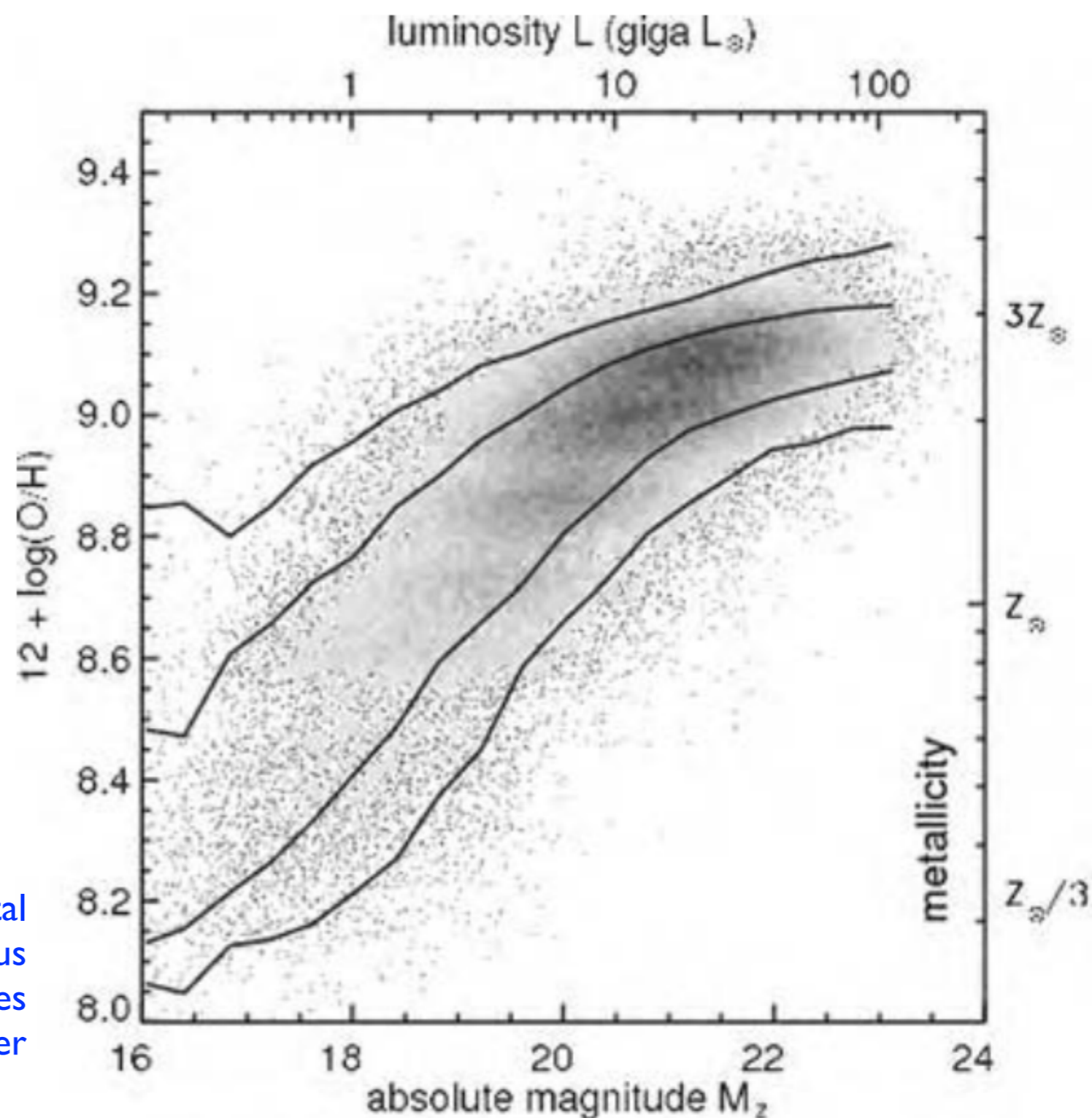
Fig. 6.19. For elliptical galaxies in the Virgo (open symbols) and Coma (closed symbols) clusters, the $U - V$ and $V - K$ colors are plotted against apparent magnitude. Colors of giant stars from Table 1.5 are indicated. Coma galaxies are shown 3.6 magnitudes brighter, as they would appear at the distance of Virgo – data from Bower *et al.* 1992 *MN* **254**, 601.

Populações Estelares

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

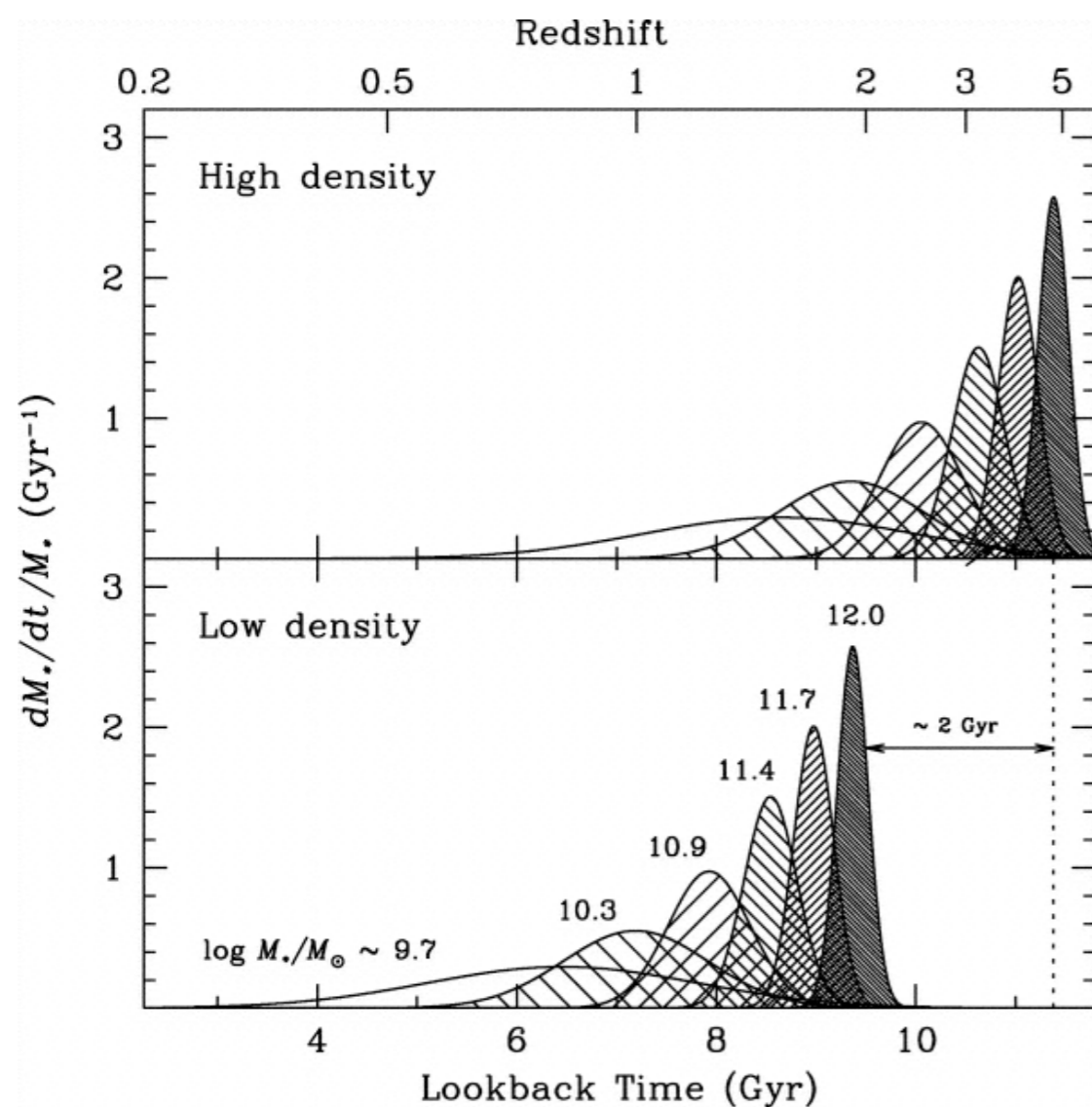
Qual o $[\alpha/\text{Fe}]$ você espera para
esses sistemas?

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.



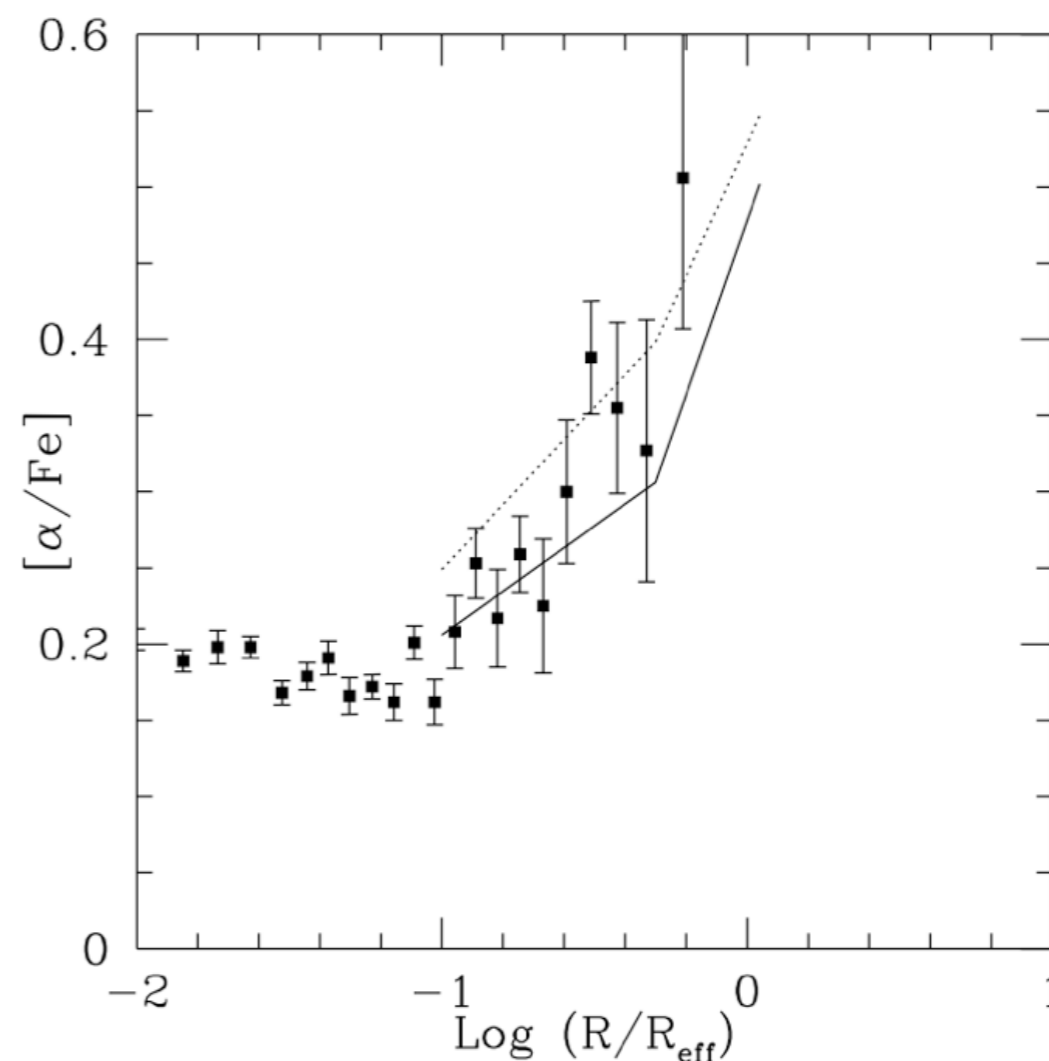
$[\alpha/\text{Fe}]$ em galáxias elípticas

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)

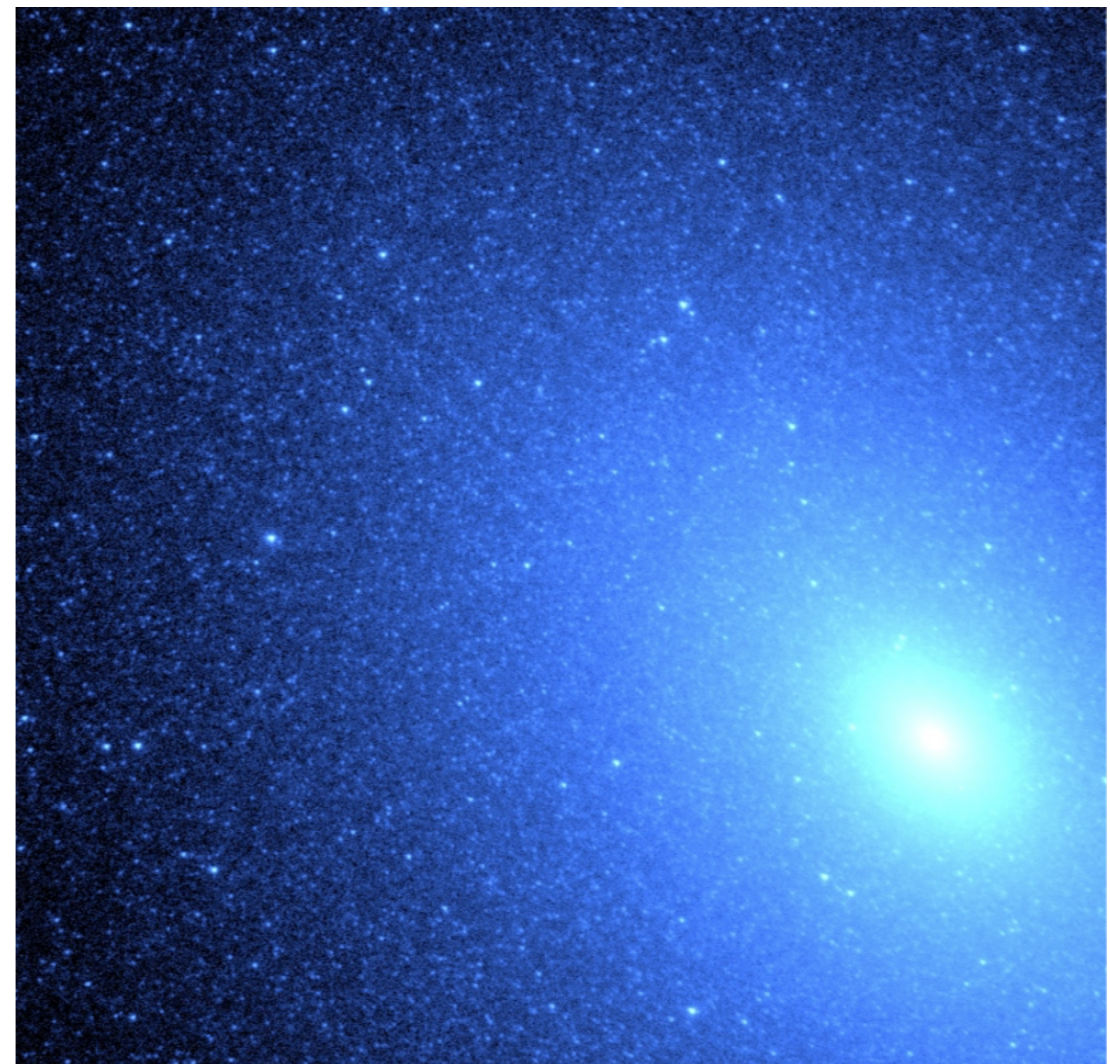


- $[\alpha/\text{Fe}]$ em função do raio para a galáxia elíptica NGC4697. Linhas correspondem a previsões de modelos de evolução química (formação “outside-in”).

Com uma população tipicamente velha, o que você espera em termos de emissão em comprimento de onda curtos? (UV e mais energéticos, como raios-X)

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
- Using M32 to Study Rapid Phases of Stellar Evolution
- <http://www.stsci.edu/~tbrown/research/padova.pdf> (próximos 4 slides)



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?

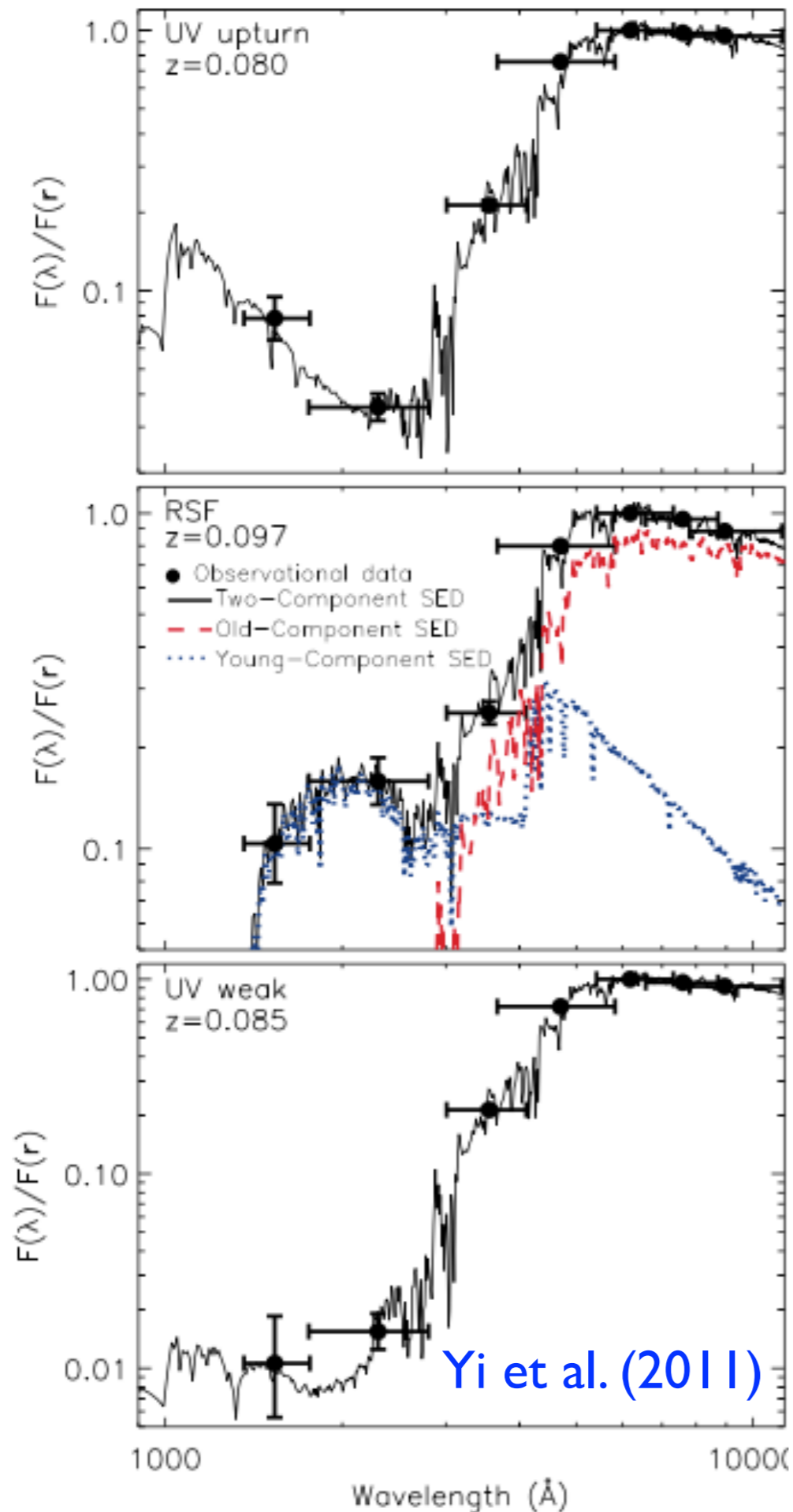
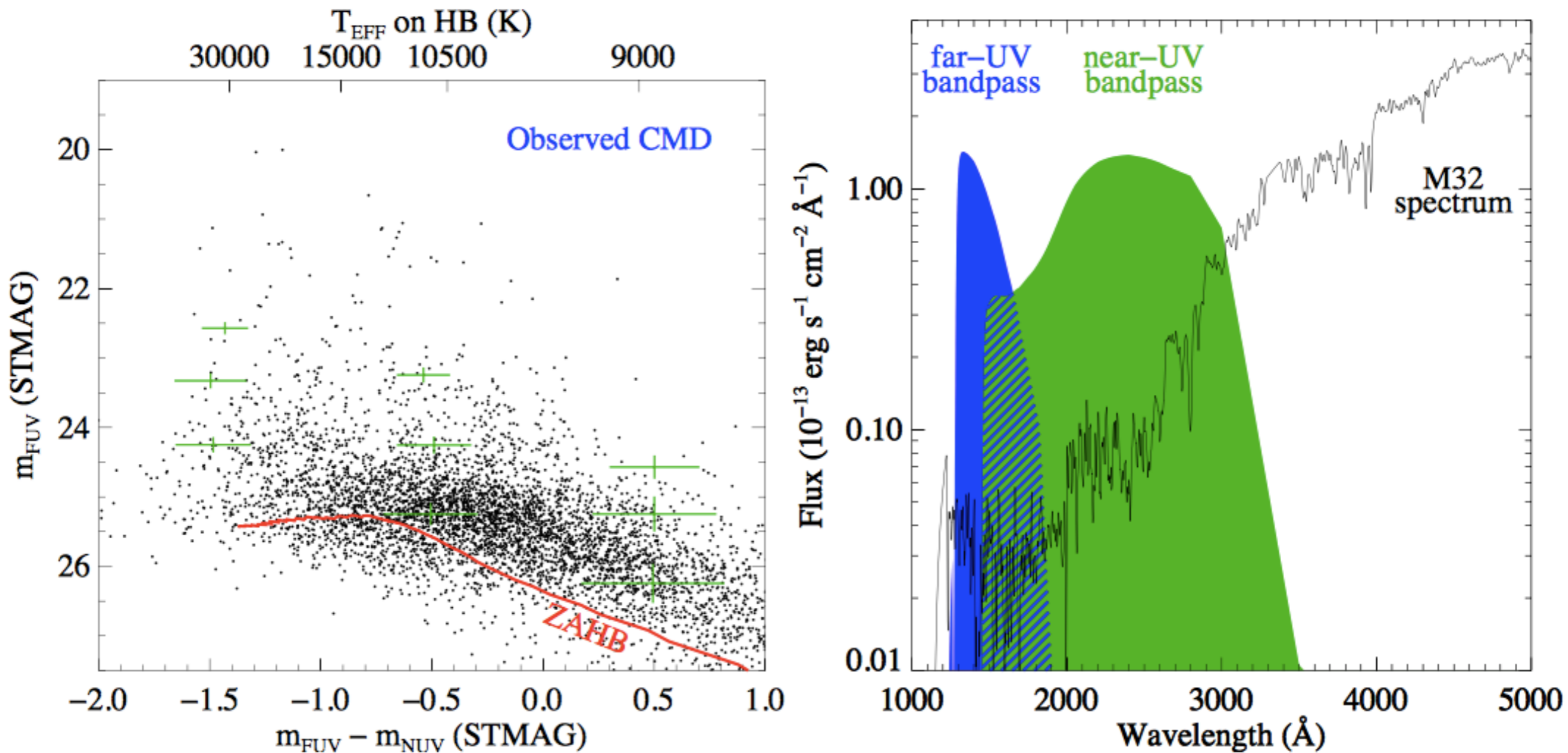
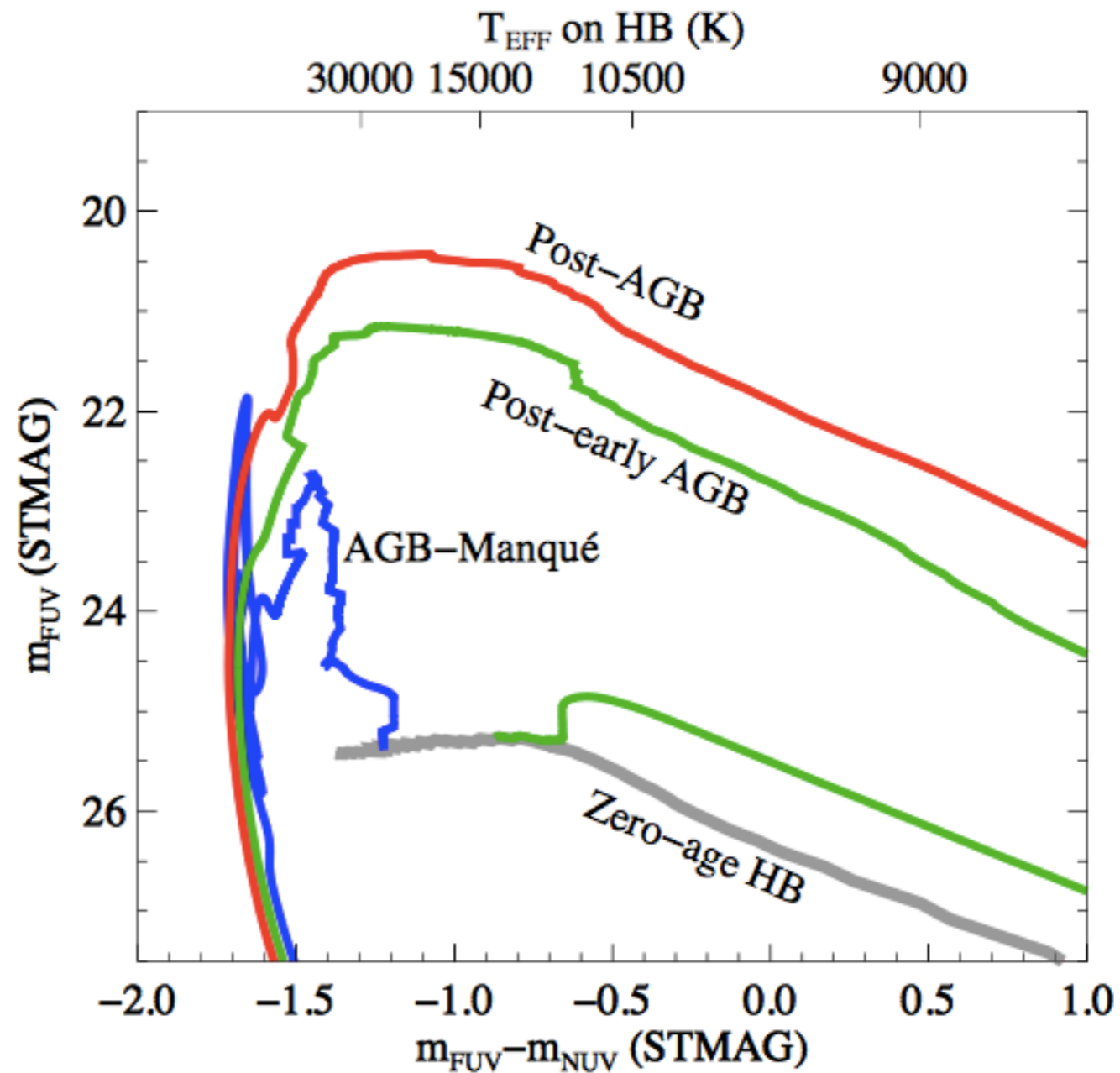
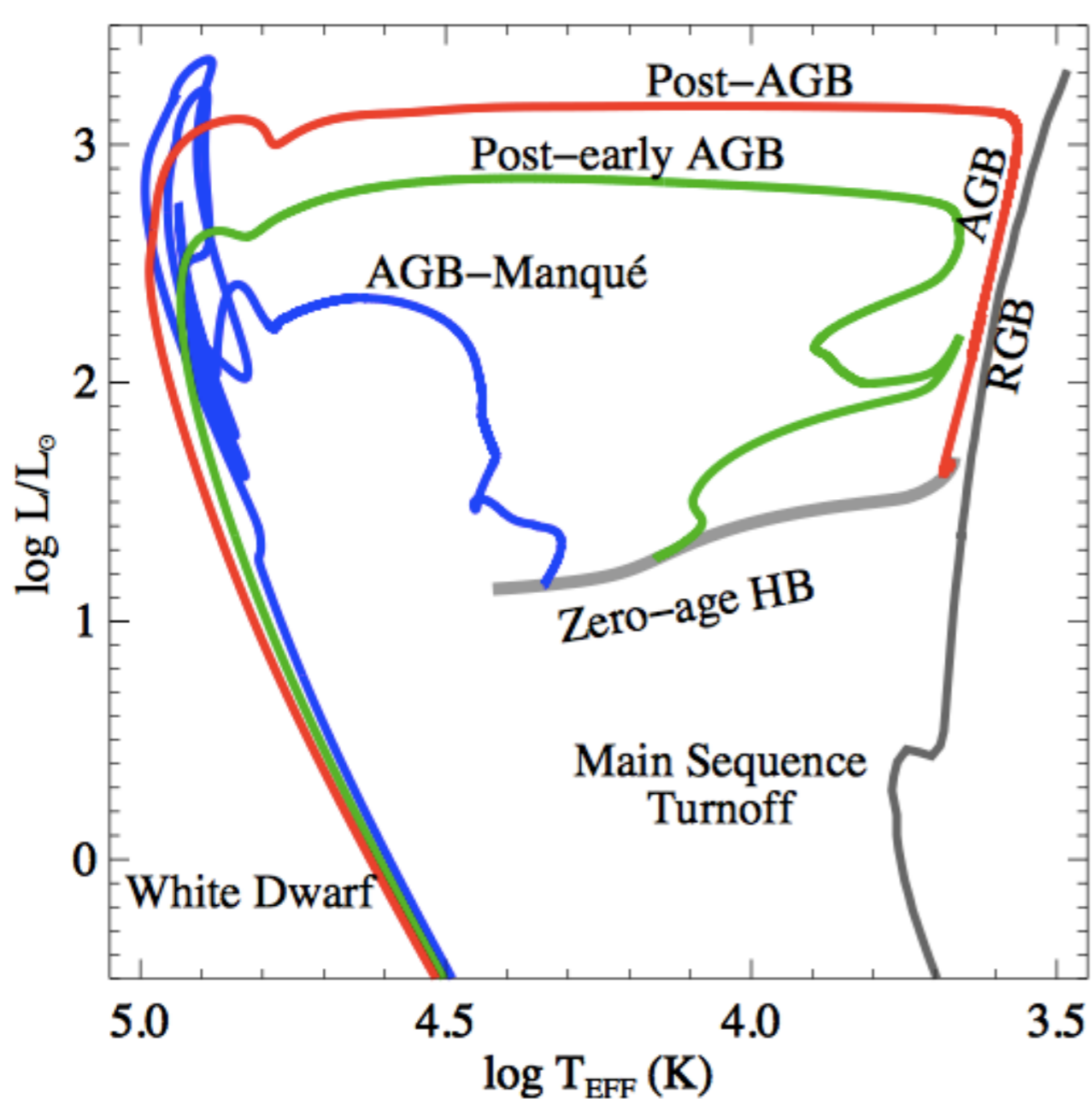


FIG. 3.— Spectral fits for the estimation of population parameters and k corrections. Top panel: An example of UV upturn galaxies. GALEX FUV , NUV , and SDSS $ugriz$ photometry are shown with band widths (horizontal) and measurement errors (vertical). The spectral fit is based on the Yi (2003) population 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.



Our observed UV CMD (left) and the spectrum of M32 (right; Calzetti, private communication). Prior to our near-UV image of M32, the very weak “UV upturn” seen in IUE spectra of M32 could have been attributed entirely to post-AGB stars. Instead, our near-UV image demonstrated that the UV flux comes from a minority population of hot HB stars and their AGB-Manque’ descendants (Brown et al. 2000). Because most of the core helium-burning stars fall on the red HB, most post-HB stars should follow post-early AGB and post-AGB tracks. Thus, we expect several hundred UV-bright stars above $m_{\text{FUV}}=22$ mag, but instead we see only 29 such stars. These stars should be the brightest stars in our UV images, so they cannot be missed due to incompleteness. The relative numbers of hot HB and AGB-Manque’ stars roughly agrees with theoretical expectations (10:1), but the expected gap between them is not discernible.



The evolution beyond the horizontal branch (HB) depends upon the envelope mass (and thus T_{eff}) of the HB progenitors. Here we show the theoretical tracks in physical and observed parameter space. Post-AGB and post-early AGB stars are UV-bright for 10^4 - 10^5 yrs, while AGB-Manqué' stars are UV-bright for 10^6 - 10^7 yrs. This relatively rapid evolution means few hot post-HB stars are found in globular clusters. The center of M32 provides a much larger stellar population, so we can better characterize these rapid phases of evolution. In our UV images (excluding a $4'' \times 2.7''$ ellipse on the crowded core), the integrated $V=9.95$ mag, and thus both the fuel consumption theorem (Renzini 1998) and the Bertelli et al. (1994) isochrones predict 0.003 stars/yr leaving the main sequence, and thus hundreds of UV-bright stars.

Gás Frio

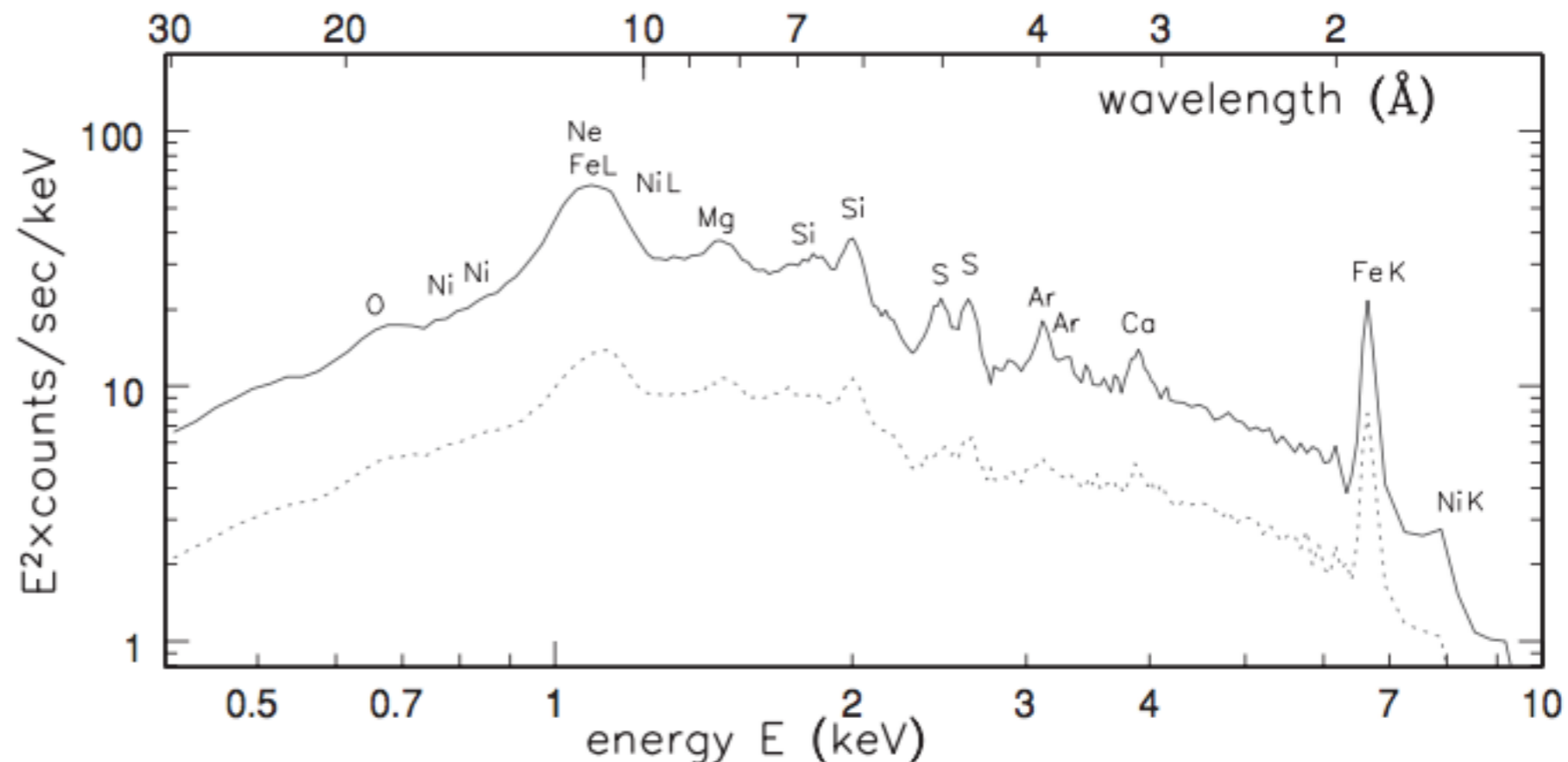
- Em geral não apresentam gás e poeira. Apenas 5%–10% das elípticas tem hidrogênio atômico e molecular suficiente para ser detectado
- Mas quase todas apresentam alguma poeira nas regiões nucleares
- Uma minoria de elípticas, em particular as que tem ‘peculiaridades’ (shells, lanes) tem tanto ou mais 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 $(1-3) \times 10^7 \text{ K}$,
- Essas “atmosferas” estendem por cerca de 30 kpc
- Mass de gás $(10^9-10^{11})M_{\odot}$ para as elípticas gigantes

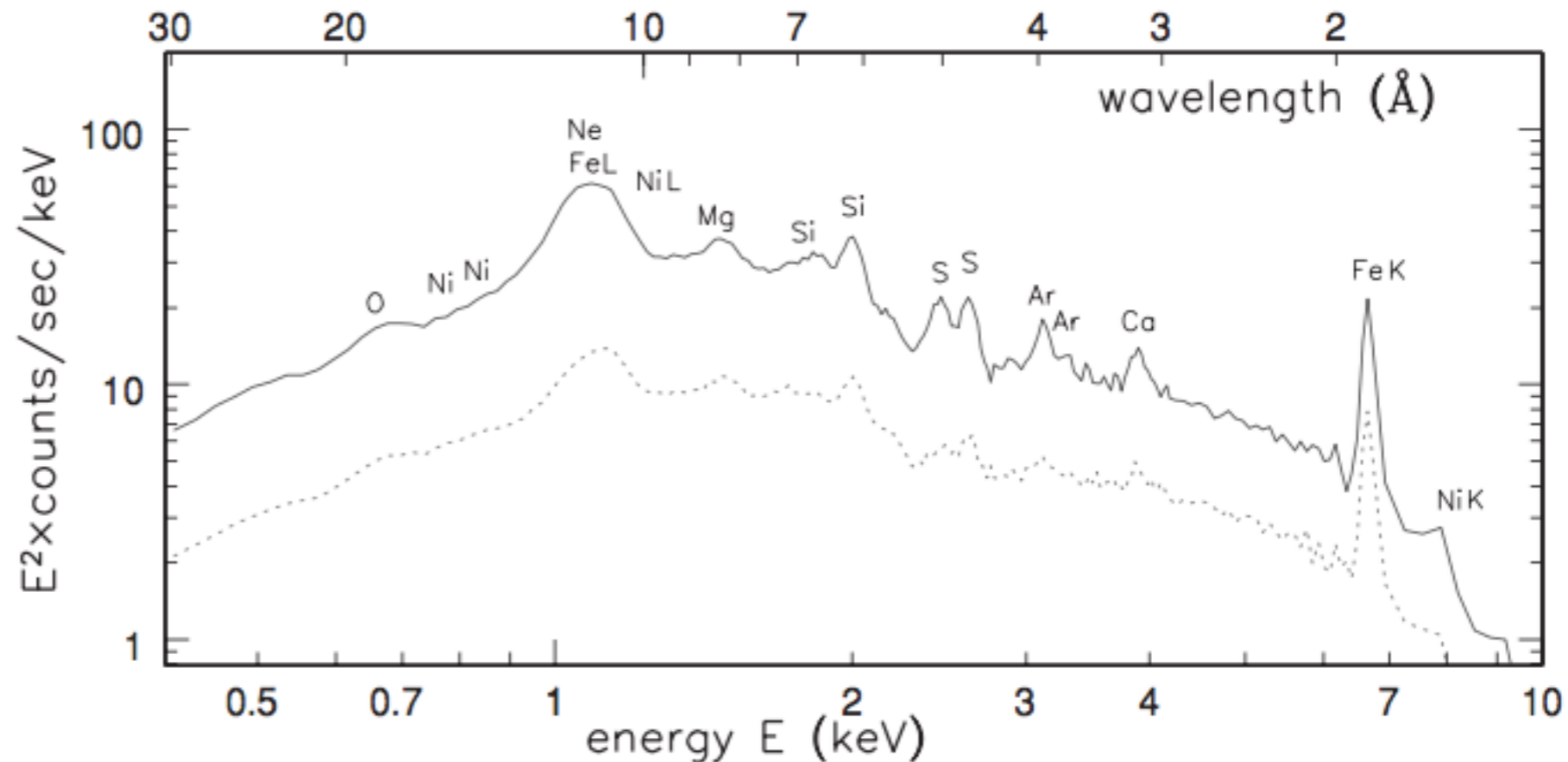
Fig. 6.21. The X-ray spectrum of hot gas at $T \sim 2 \times 10^7 \text{ K}$ around the luminous elliptical M87. The solid line shows emission from gas within $4'$ or 5 kpc of the center; the broken line is for gas between $4'$ and $8'$ radius. All lines except iron L and nickel L are emitted as electrons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



Fontes de raios-X

- AGN
- Gás quente
- 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:



Aglomerados Globulares

- Elípticas são mais ricas em AGs do que espirais, a cD NGC1399 tem cerca de 7000 (!) aglomerados

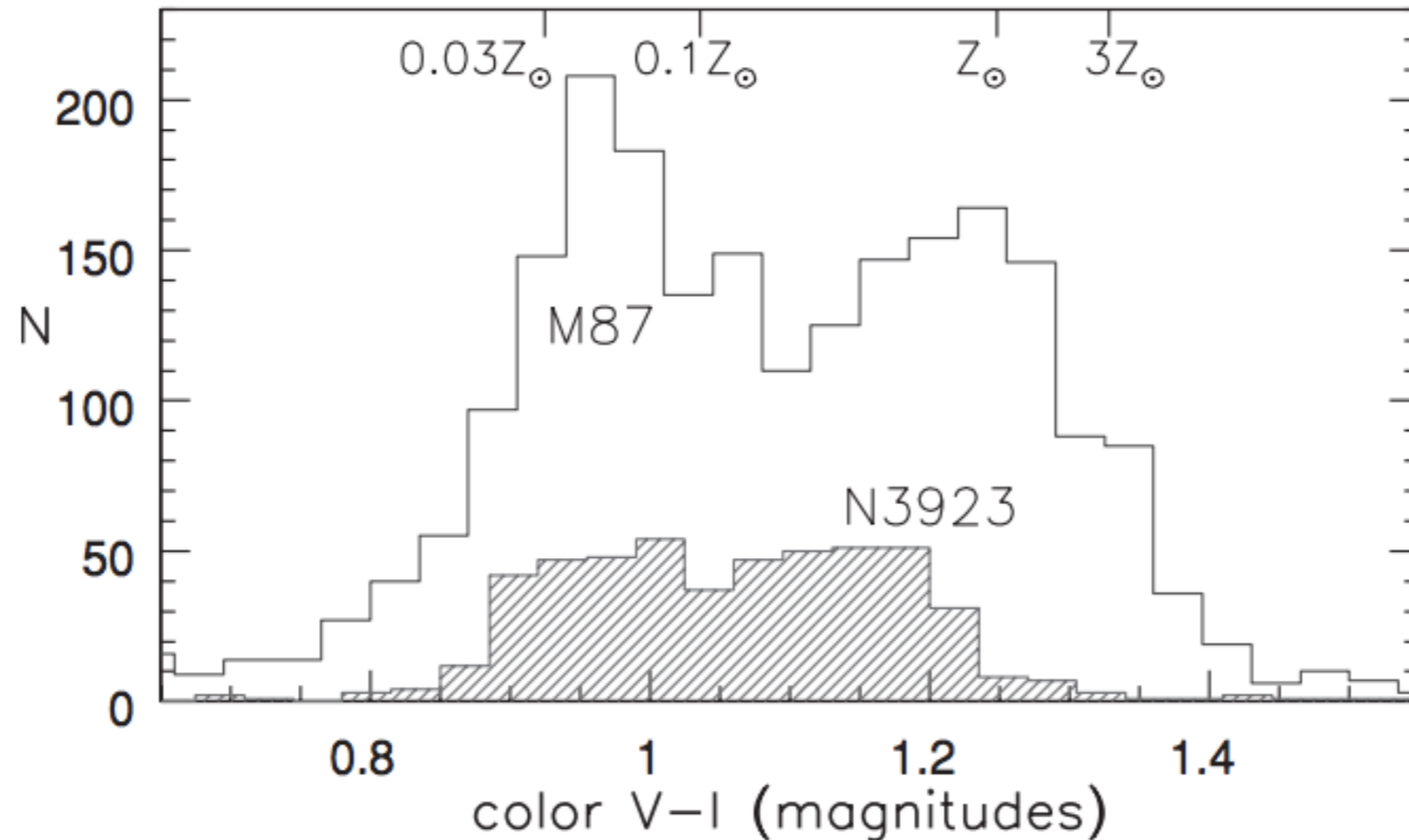
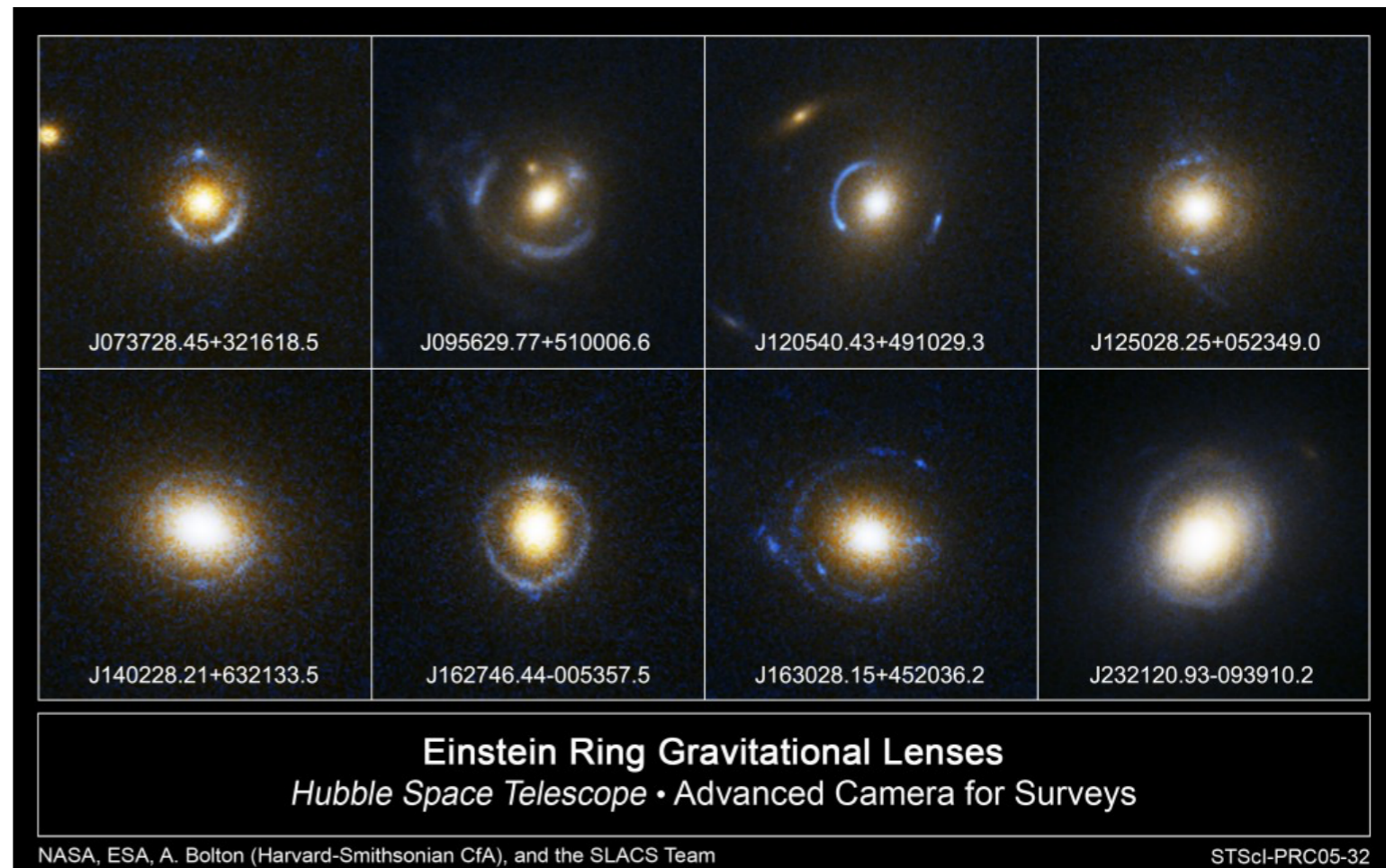


Fig. 6.22. Colors of globular clusters around giant elliptical M87 and shell galaxy NGC 3923, with a rough estimate of metal abundance – A. Kundu and S. Zepf.

Halos de matéria escura

- Para as poucas elípticas que tem um disco de gás, pode-se medir curvas de rotação como se faz em espirais (ex. E4 NGC 5266)
- Para a maioria das elípticas, usa-se comparação a modelos de população estelar. Partes centrais tem: $3 \lesssim M/L_V \lesssim 5$, halos tem $M/L \gtrsim 20$.
- Usa-se também as velocidades dos aglomerados globulares. Em NGC 1399 chega-se a $M/L_V \sim 50$
- Mais recentemente tem se usado lentes gravitacionais pra medir a massa total de galáxias luminosas



Buracos Negros centrais

$$V^2(r) \approx \frac{G\mathcal{M}_{\text{BH}}}{r} \gtrsim \sigma_c^2.$$

$$\mathcal{M}_{\text{BH}} \approx 2 \times 10^8 \mathcal{M}_{\odot} \times \left(\frac{\sigma_c}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{4.86}$$

Elípticas geralmente têm um núcleo de rádio brilhante pequeno, não mais do que alguns parsecs de raio. Se as fontes de rádio das elípticas brilhantes normais são versões de baixa potência do que observamos em núcleos ativos, esta pode ser a melhor evidência de que buracos negros com massa $> 10^6 \mathcal{M}_{\odot}$ espreitam nos centros de praticamente todas as galáxias elípticas mais luminosas que $L \sim L^*$.

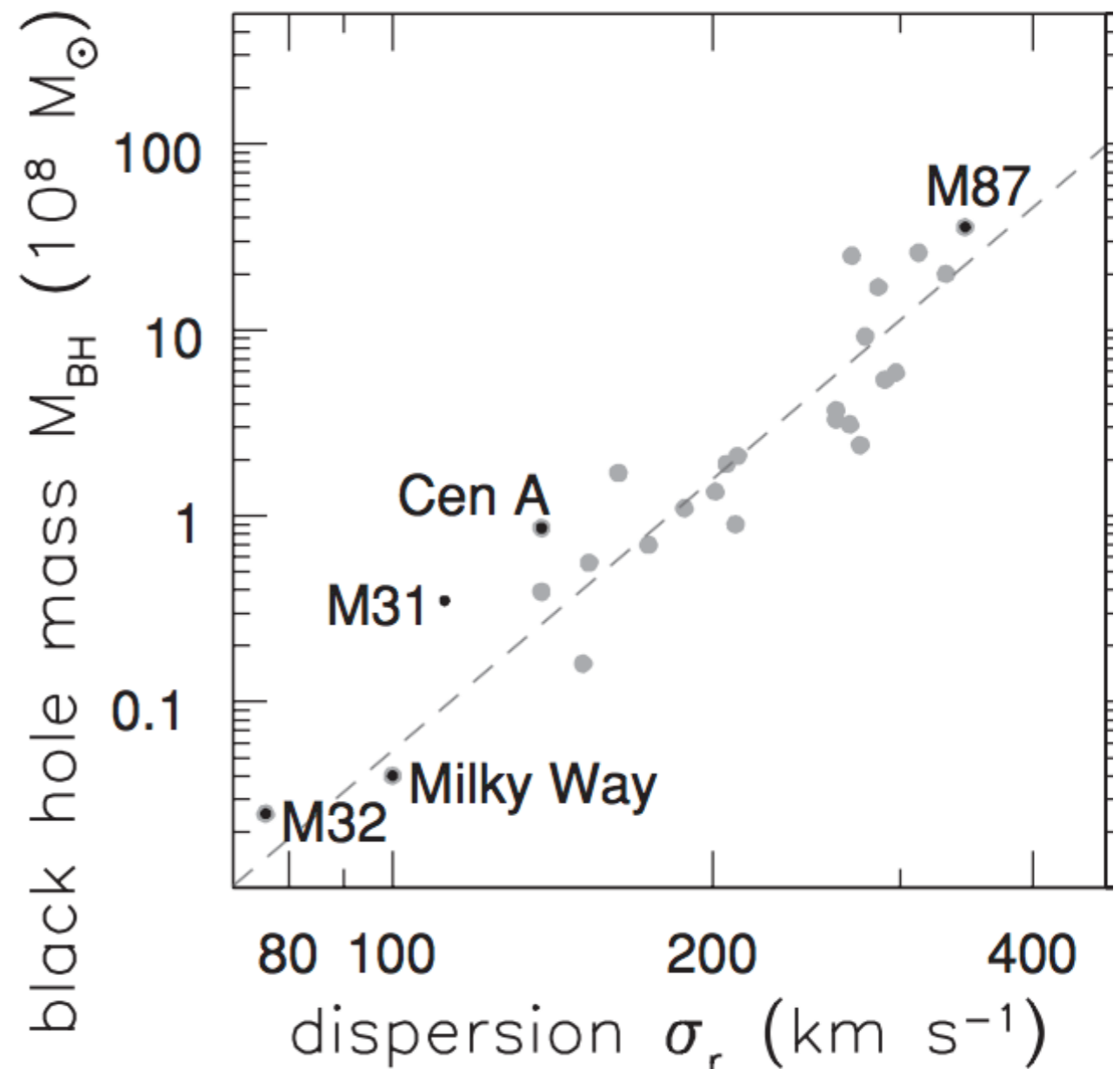


Fig. 6.23. The central compact mass, probably a black hole, grows with velocity dispersion σ_c of the galaxy's central region; the dashed line is from Equation 6.36.

O Plano Fundamental

Lembrando: relação de Tully-Fisher

$$L \propto V_{\max}^4$$

- Há uma correlação entre a velocidade máxima e a luminosidade de galáxias espirais

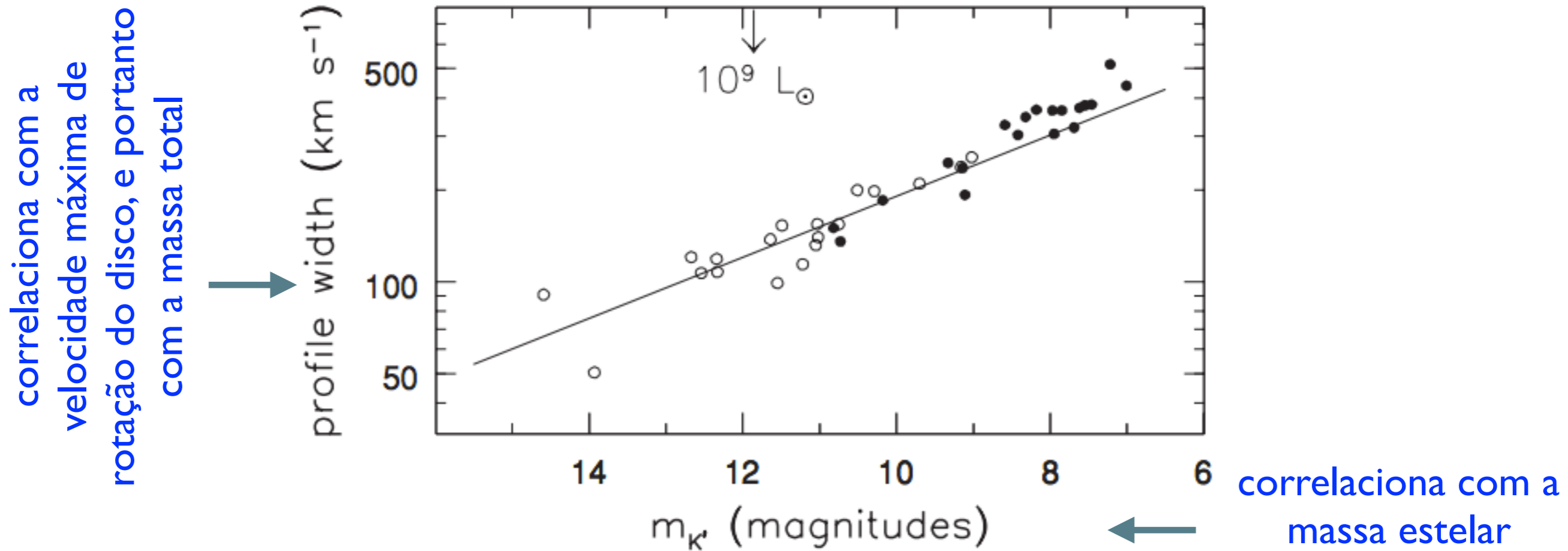
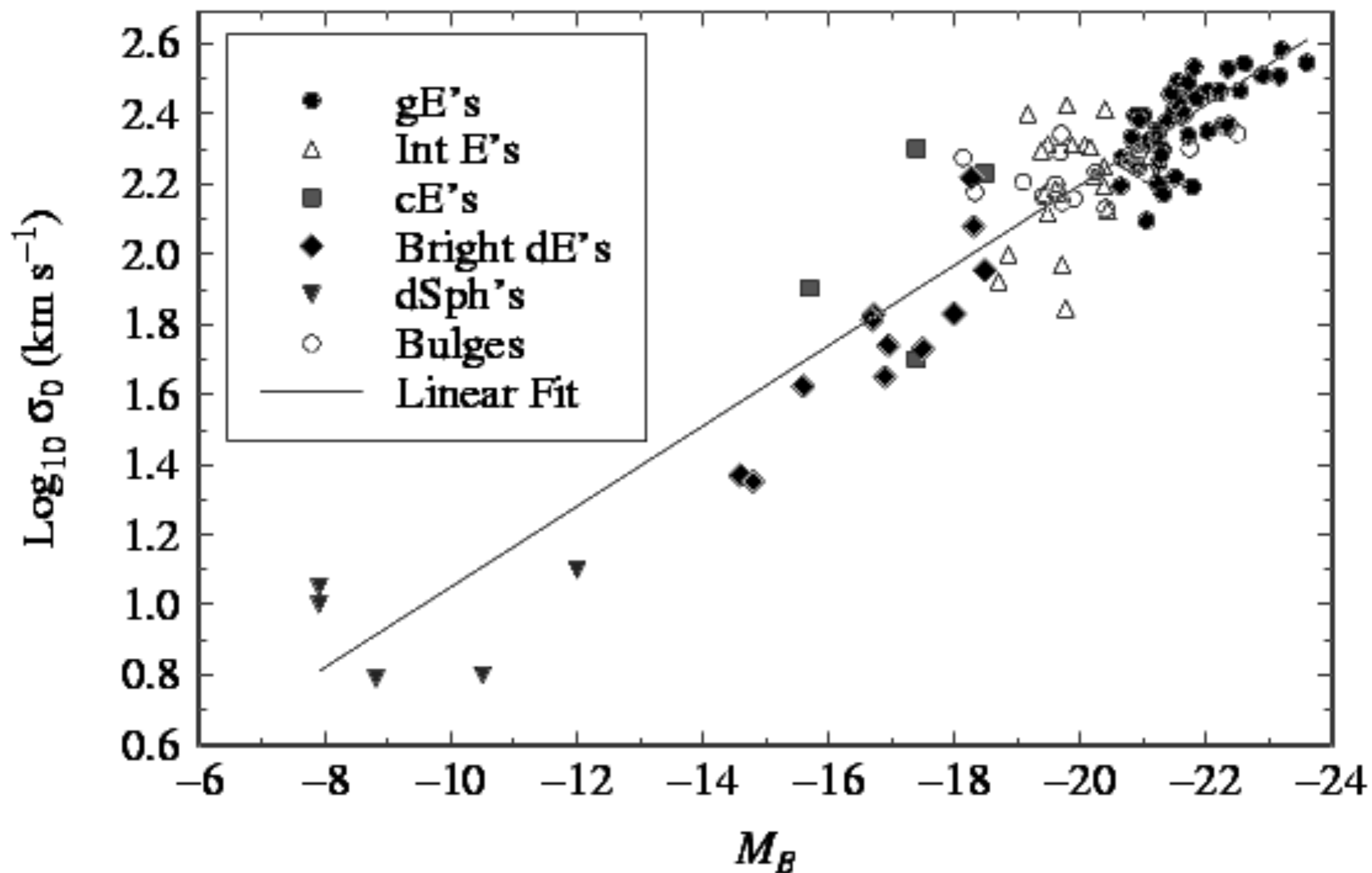


Fig. 5.23. For galaxies in the Ursa Major group: from the HI global profile, width $W/\sin i \approx 2V_{\max}$ plotted against apparent K' -magnitude. Low-surface-brightness galaxies (open circles) follow the same relationship as do those of high surface brightness (filled circles). The solid line passing through $L = 3 \times 10^{10} L_{\odot}$, $V_{\max} = 205 \text{ km s}^{-1}$ has slope $L \propto V_{\max}^4$ – M. Verheijen.

Para elípticas, temos a relação
Faber-Jackson

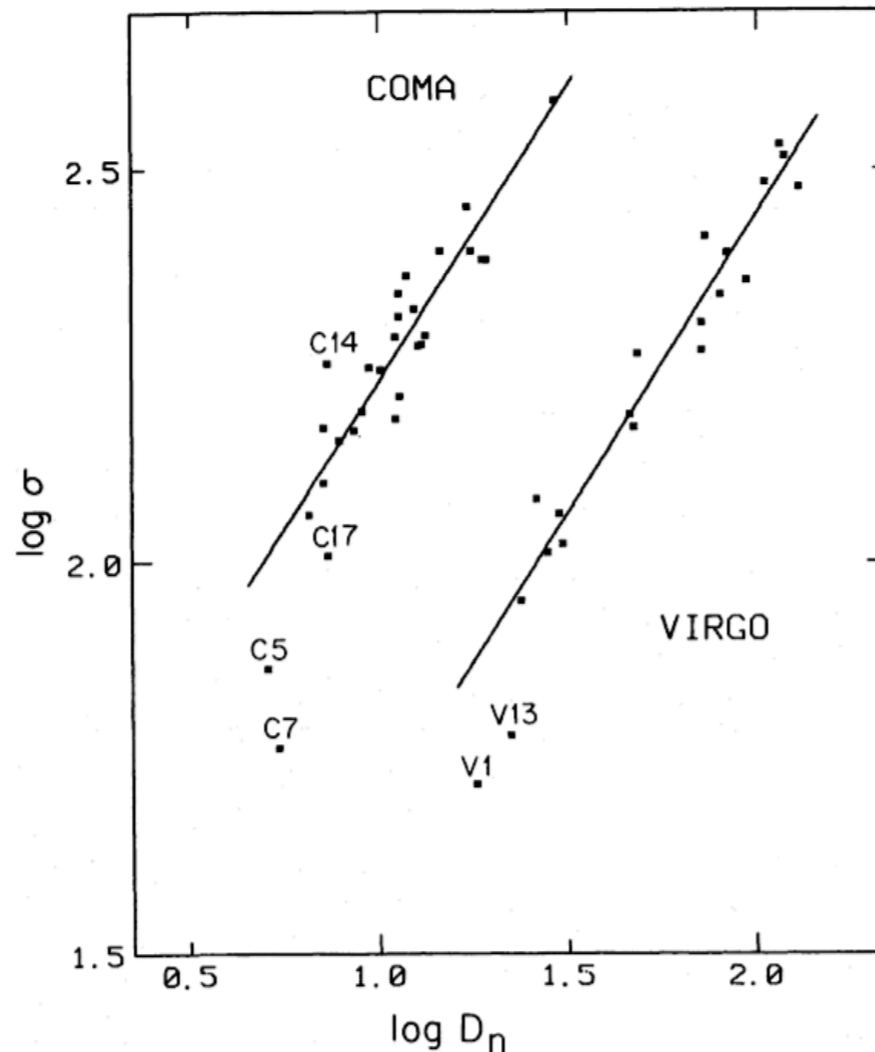
$$\frac{L_V}{2 \times 10^{10} L_\odot} \approx \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4.$$



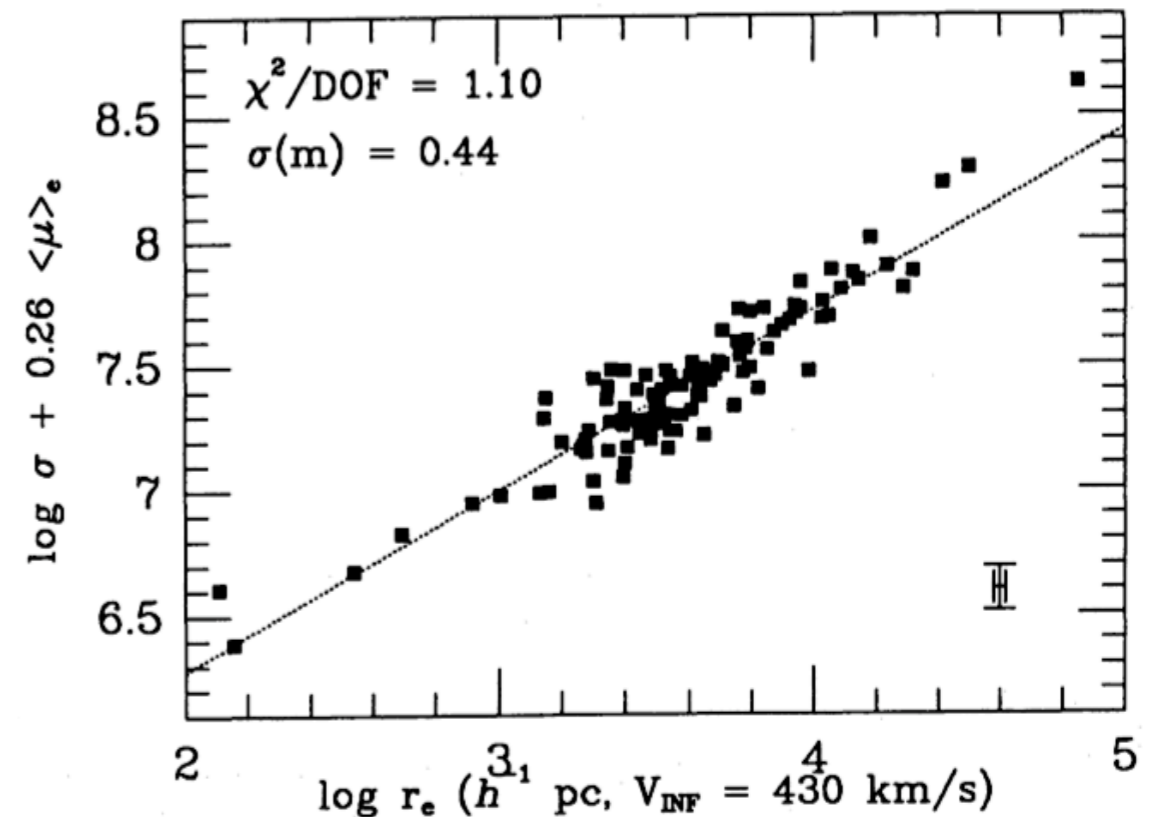
O que pode explicar a dispersão da relação FB? (Para melhorar a sua utilidade como indicador de distância?)

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 - σ , Dressler et al. 1997



R - σ - μ , Djorgovski & Davis (1987)



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

R = non-isophotal radius (r_e, r_η, \dots)

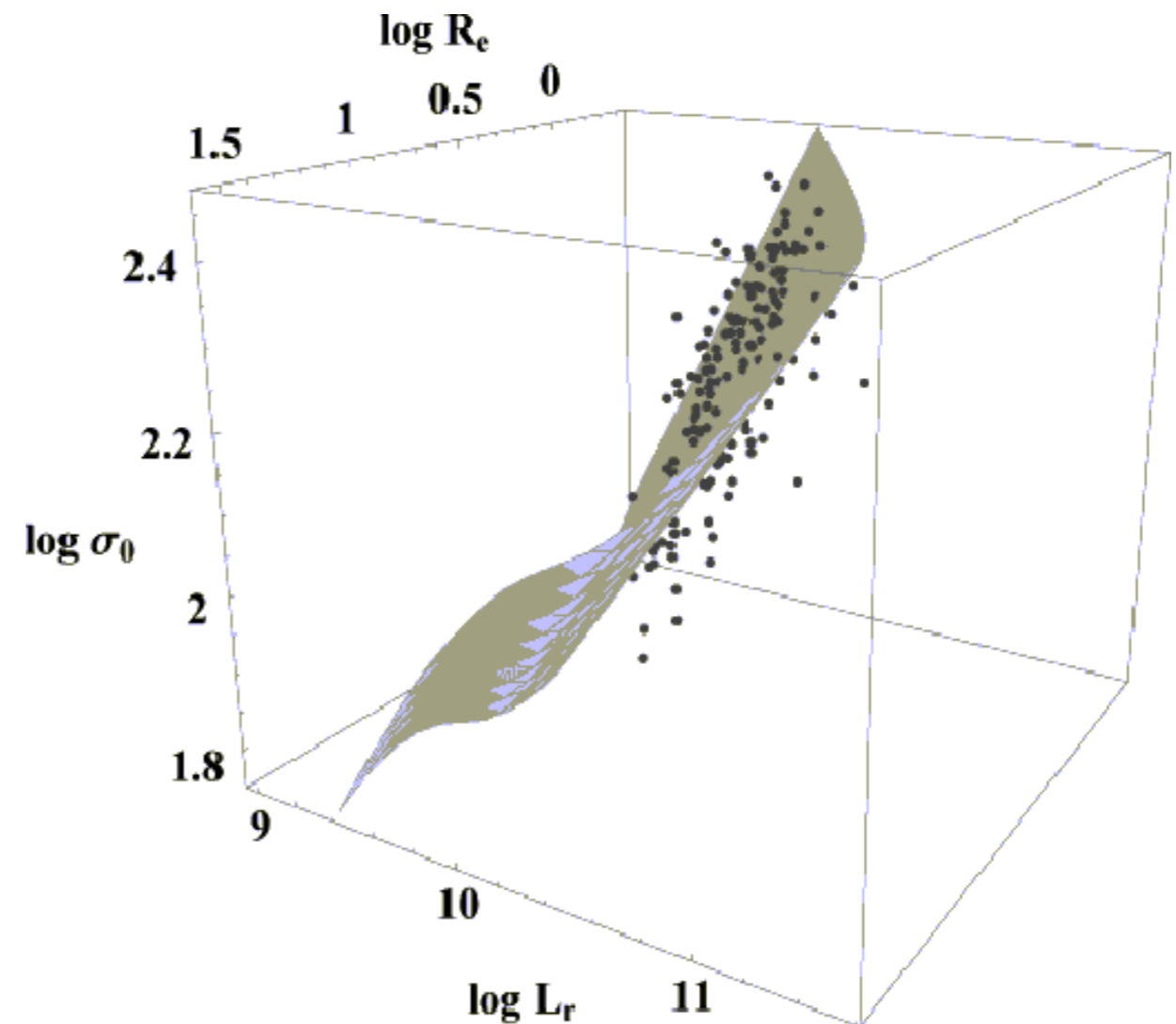
σ = central proj. velocity disp.

I = mean surf. br. in linear units

Plano Fundamental

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

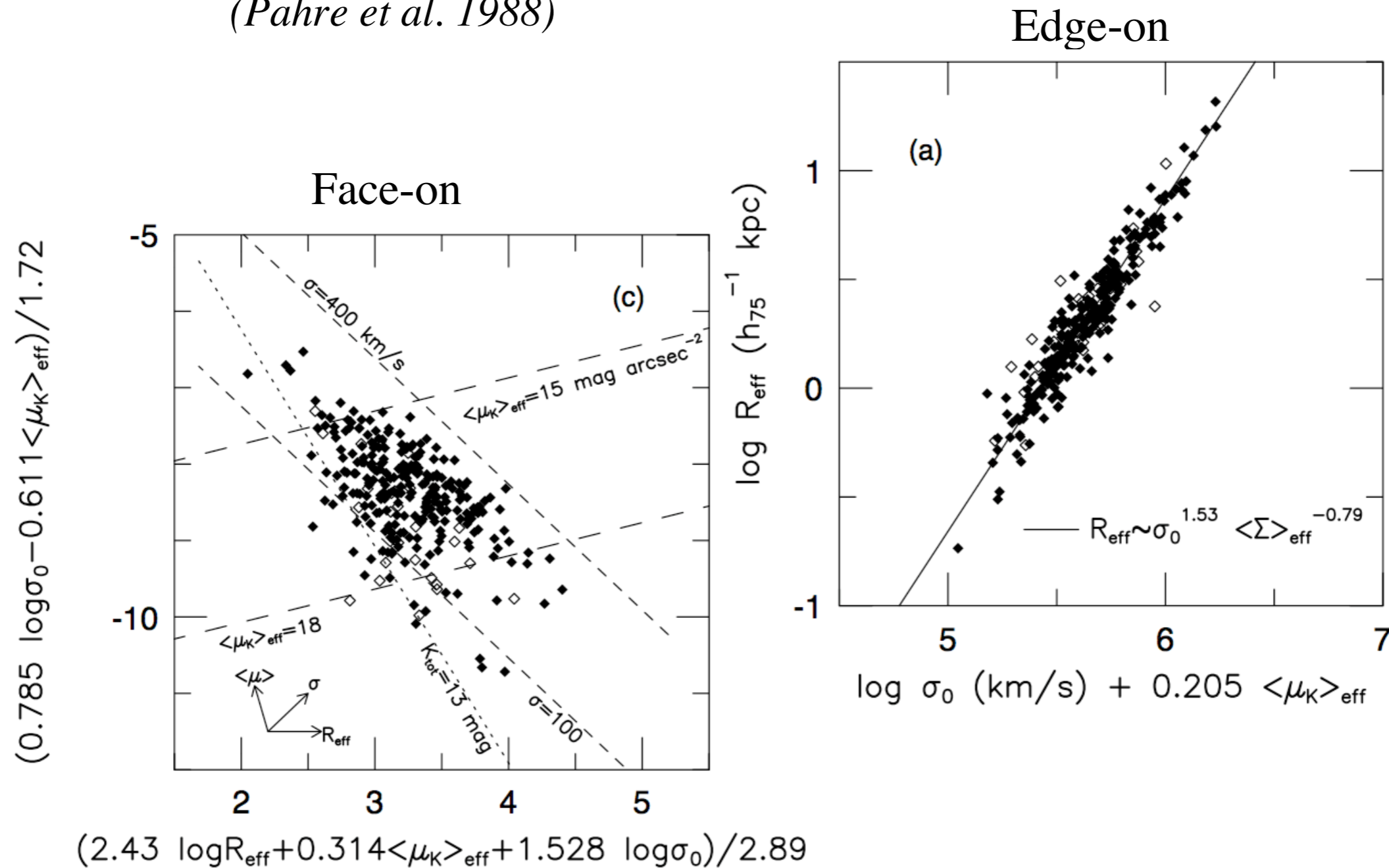
$$R_e \propto \sigma^{1.2} I_e^{-0.8}$$



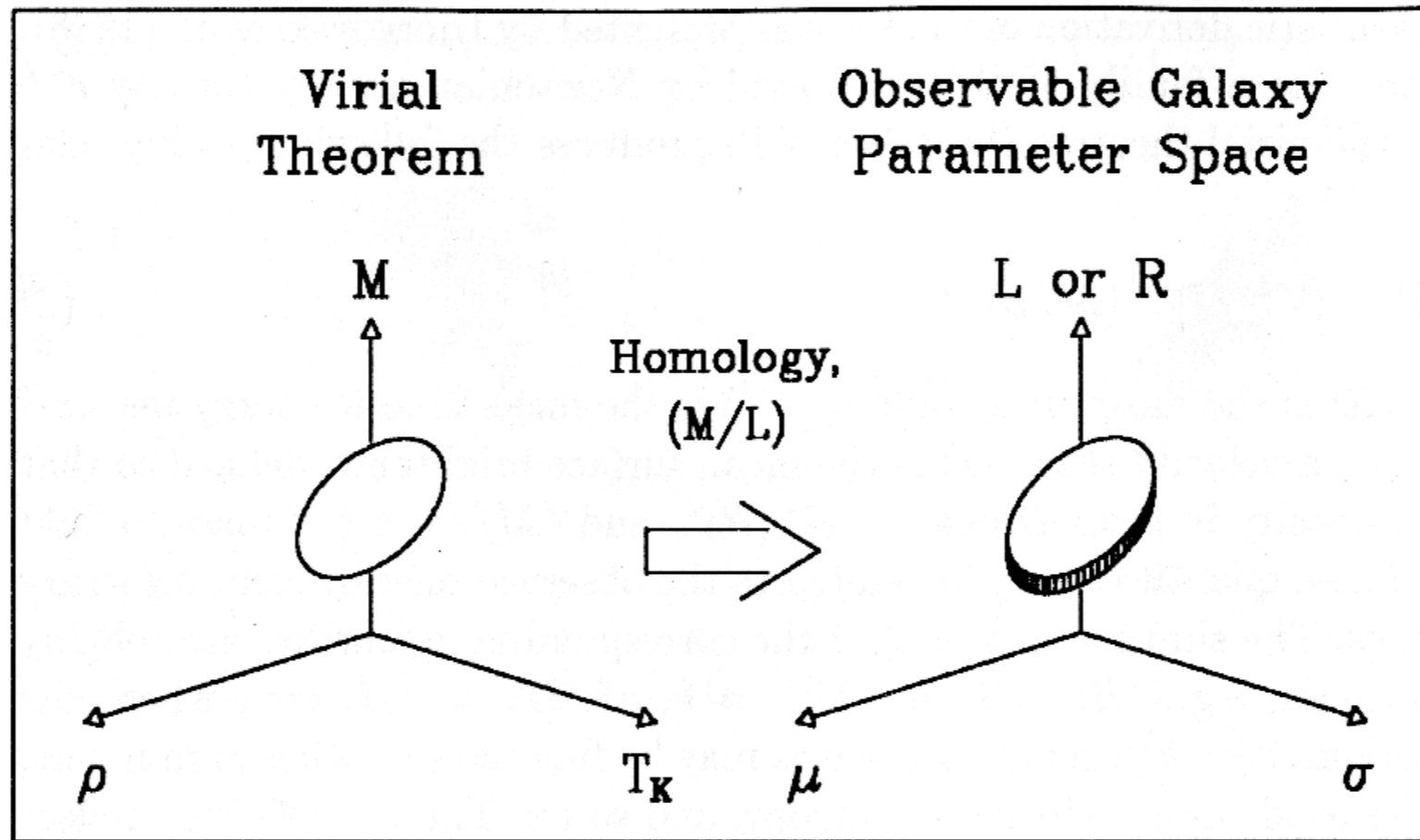
E suas projeções

FP in the K-Band (\sim nearly bolometric)

(Pahre et al. 1988)



From Virial Theorem to FP



- Galaxies must be on a “Virial Theorem Plane” in the space of mass, mean density, and kinetic temperature
- *If* galaxies represent a homologous family of structures *and* had $(M/L) = \text{const.}$, then they should follow the VTP: $R \sim \sigma^2 I^{-1}$
- Since they don't, and the observed FP scaling is: $R \sim \sigma^{1.4} I^{-0.8}$, either one or both of these assumptions must be broken

O Plano Fundamental das Elípticas

- Para **qualquer galáxia elíptica de hoje**, pequena ou grande, **com apenas dois números**, é possível determinar, dentro de poucos % ou menos:
 - massa, luminosidade (em qualquer banda)
 - raio efetivo
 - brilho superficial, ou densidade de massa projetada
 - dispersão de velocidade central projetada
 - 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

Como se interpreta a existência dessa relação?

Ex: Espaço- κ (Bender et al. 1992)

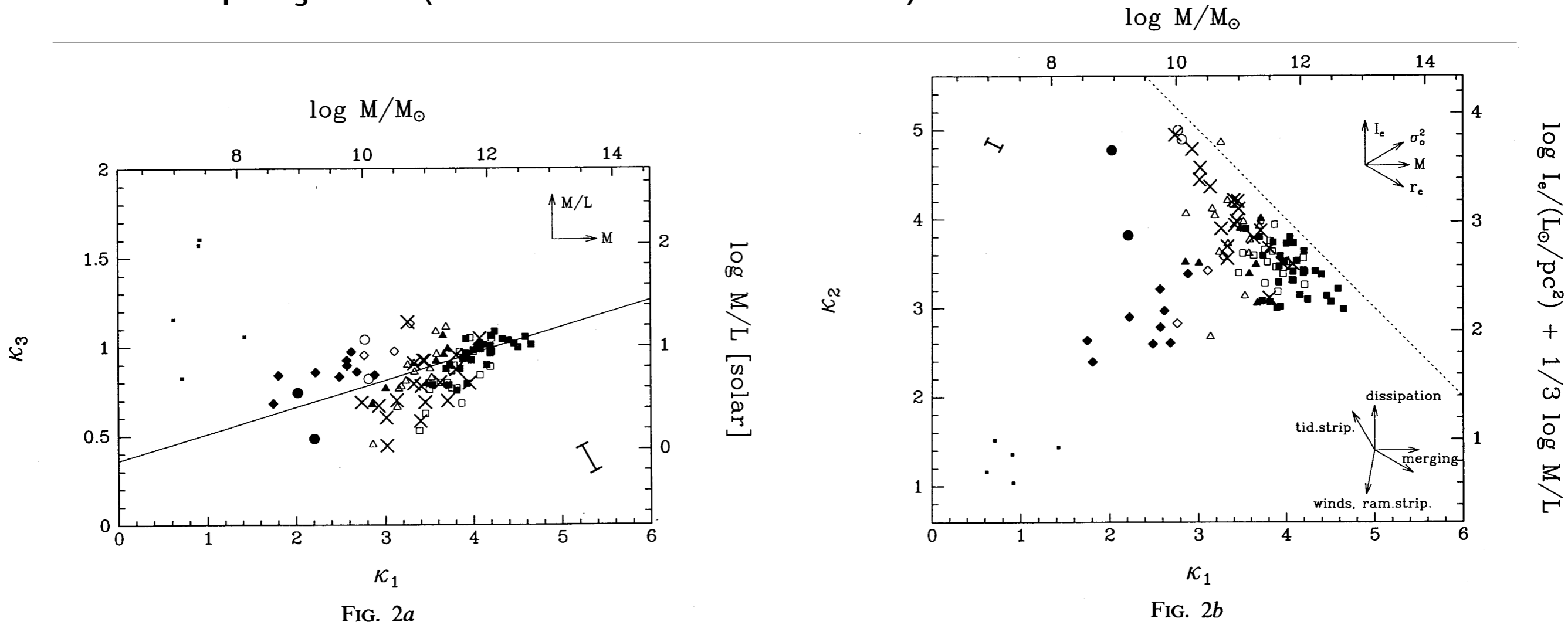


FIG. 2a

FIG. 2b

FIG. 2.—Distribution of all types of hot stellar systems in κ -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/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.