



Galáxias Elípticas

Capítulo 6 do livro-texto

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?

- 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
- https://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/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: $< 3 \times 10^9 L_{\odot}$

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

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

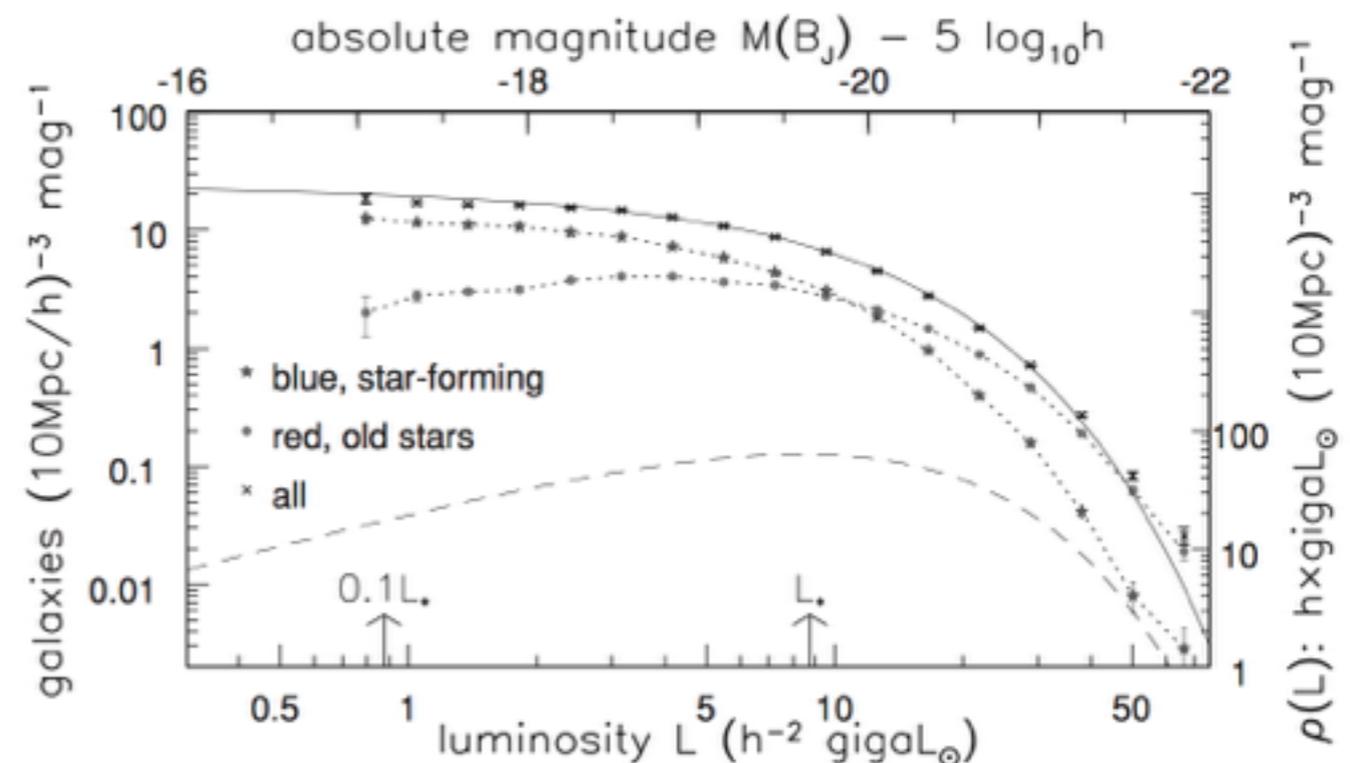


Fig. 1.16. Number of galaxies per 10 Mpc cube between absolute magnitude $M(B_J)$ and

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.

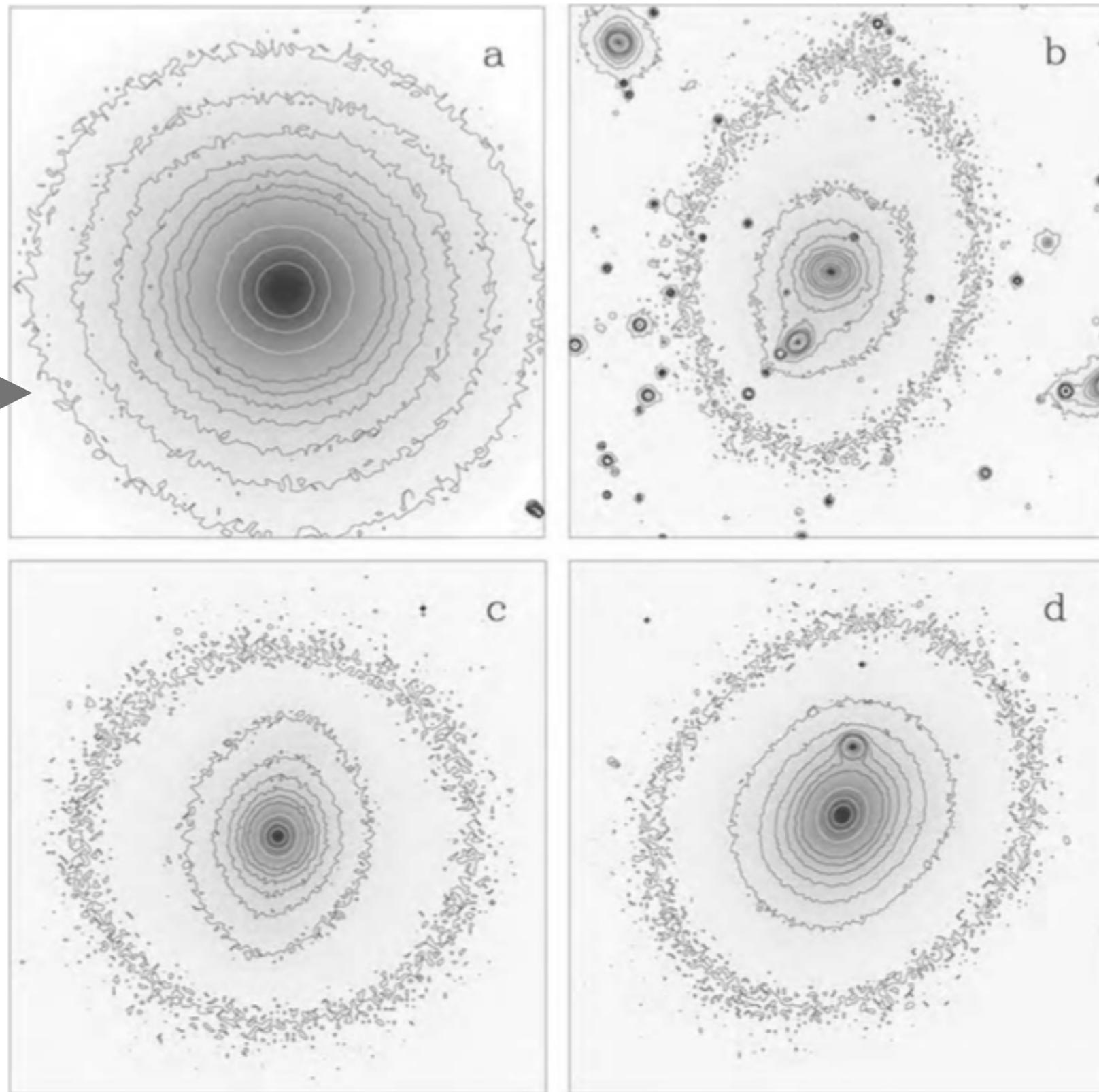


Fig. 6.1. Isofotas in the R band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw 159-89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

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 $n \sim 1$

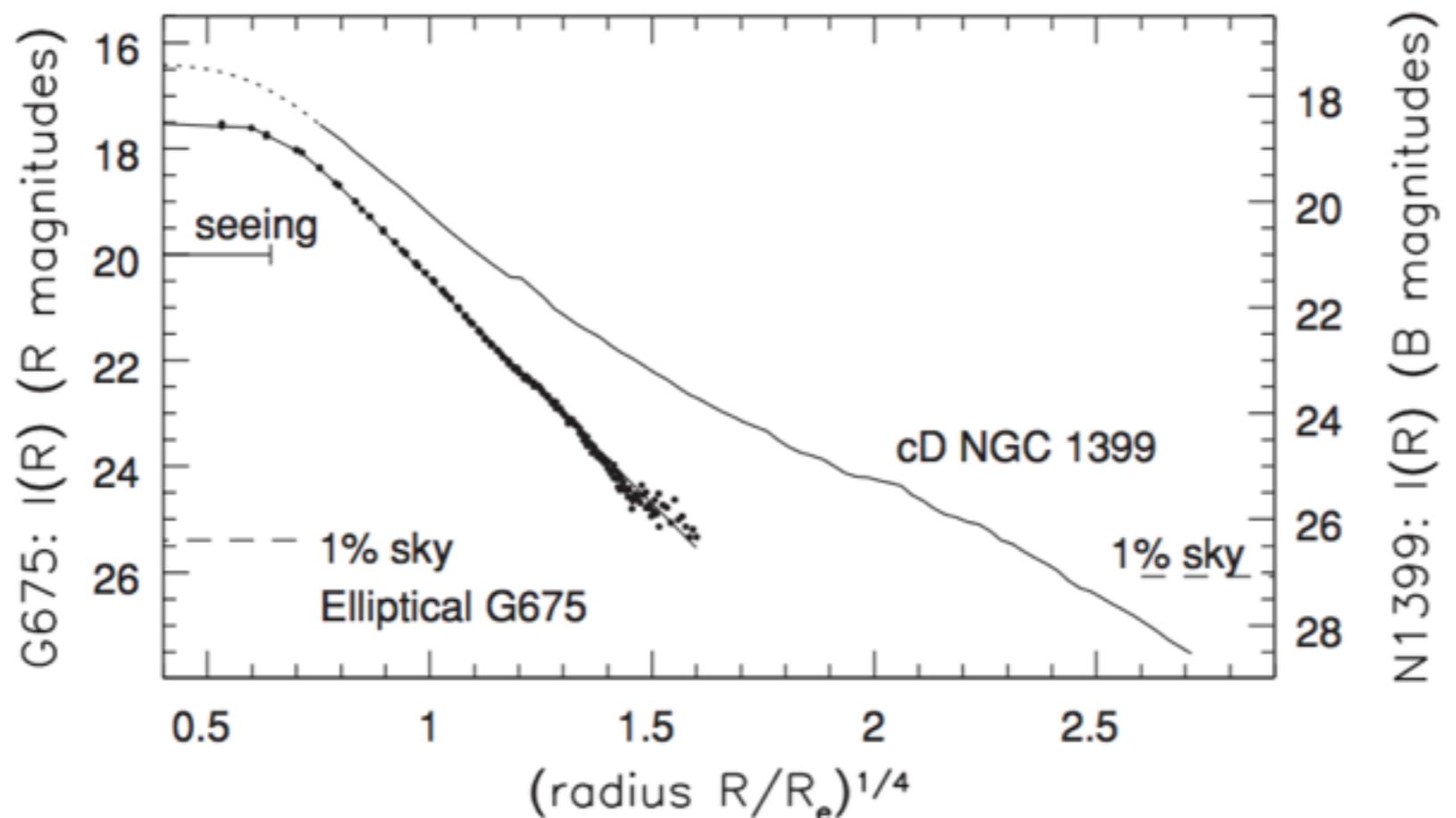
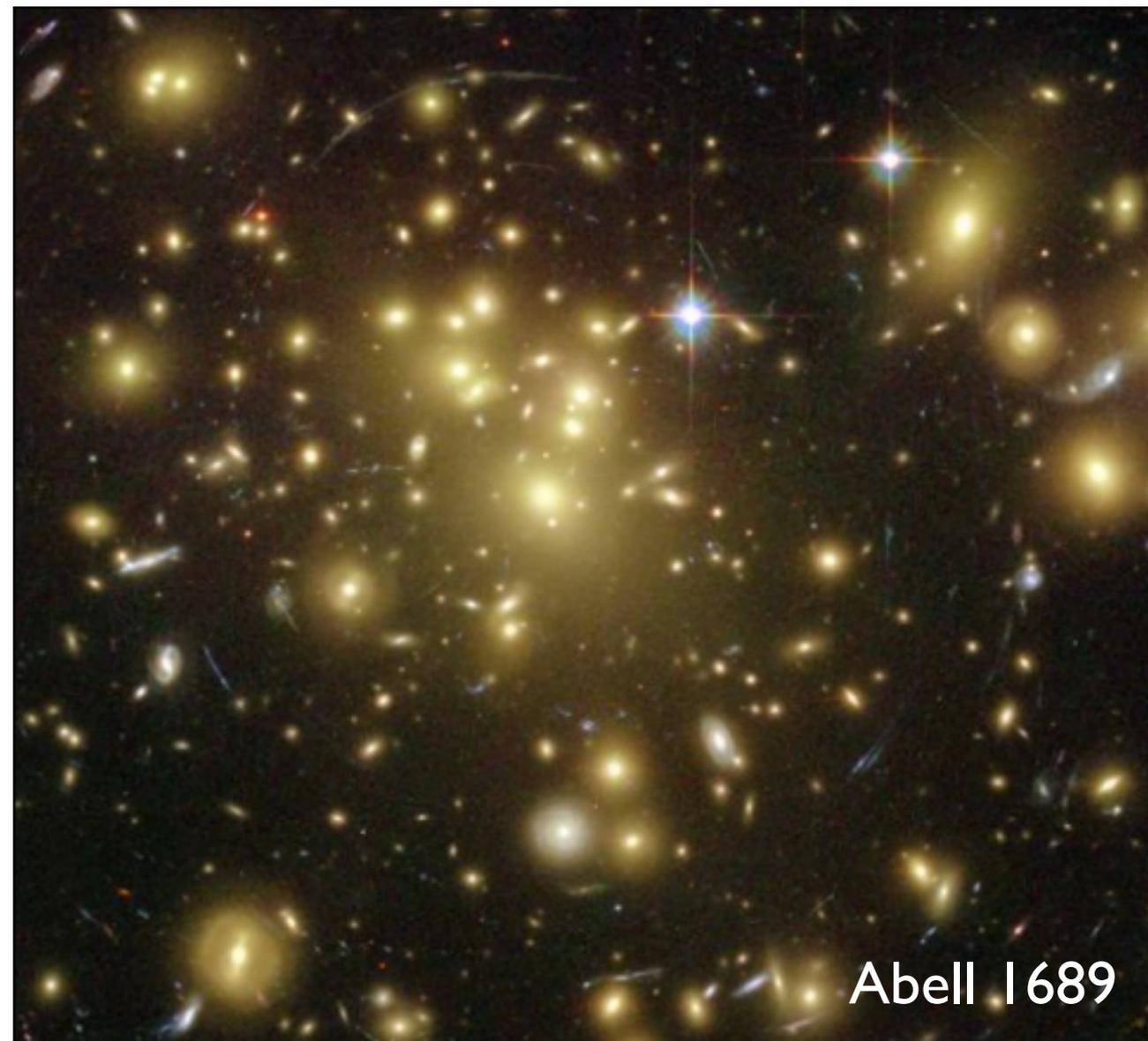


Fig. 6.3. Surface brightness of two luminous ellipticals: an $R^{1/4}$ law corresponds to a straight line.

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 recentemente identificadas nas regiões externas de algumas galáxias elípticas

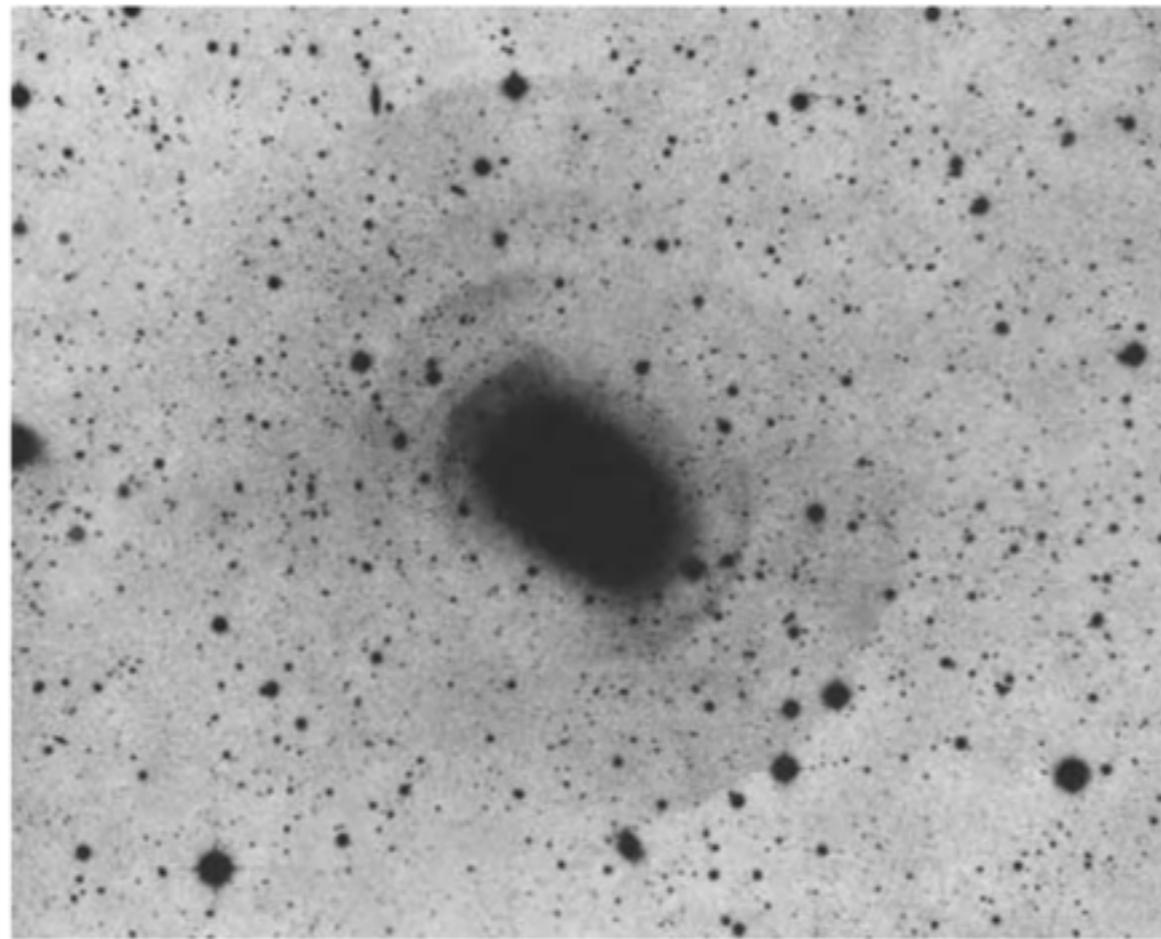


Fig. 6.5. A negative image shows faint arclike shells around elliptical galaxy NGC 3923; an out-of-focus copy was subtracted from the original photograph, allowing faint but sharp features to stand out. The picture is $18'$ across, or 110 kpc at $d \approx 21 \text{ Mpc}$. This is a luminous galaxy ($L_B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

Relação entre $I(0)$ e luminosidade

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

“a menor das elípticas gigantes”

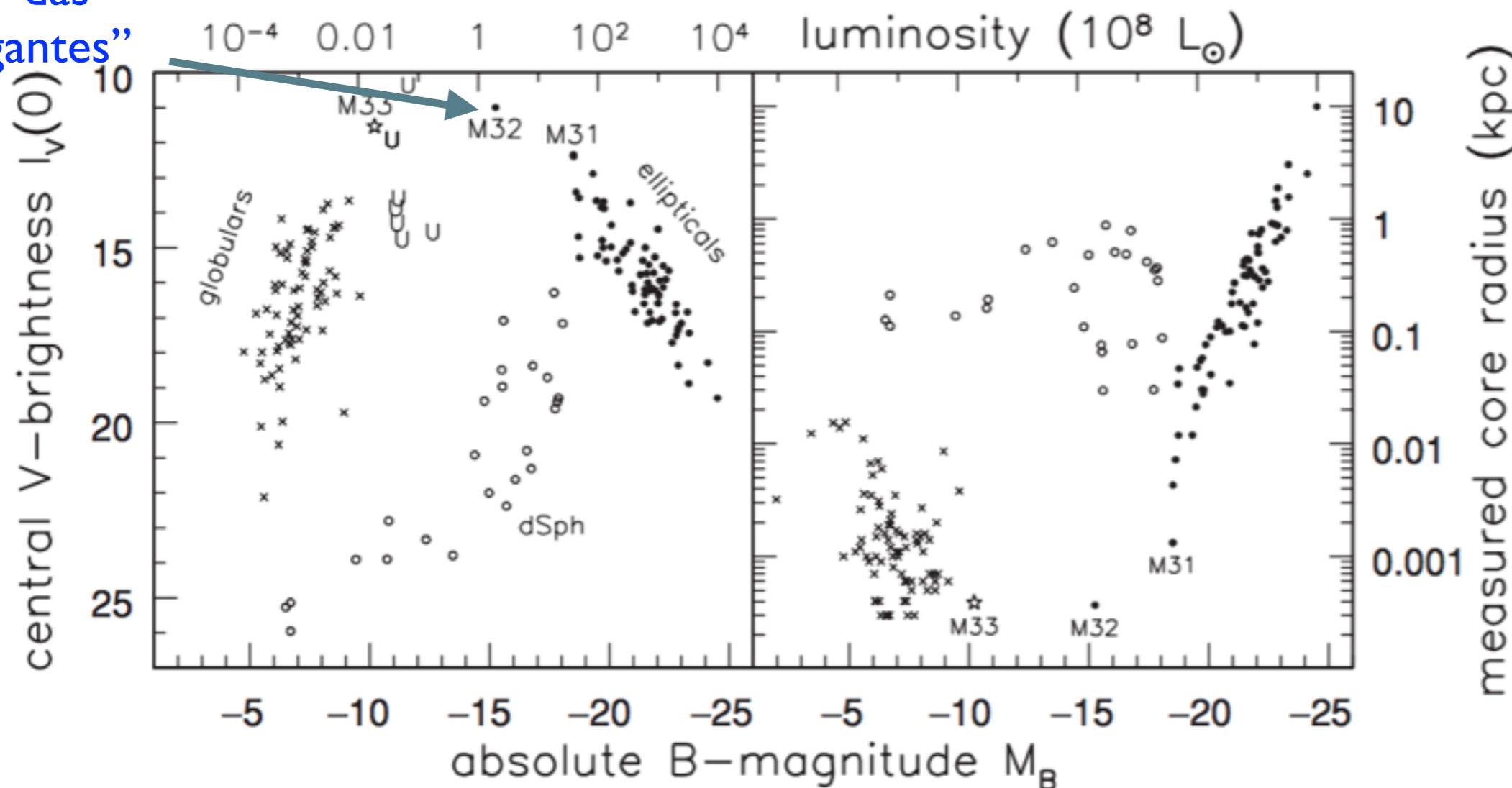
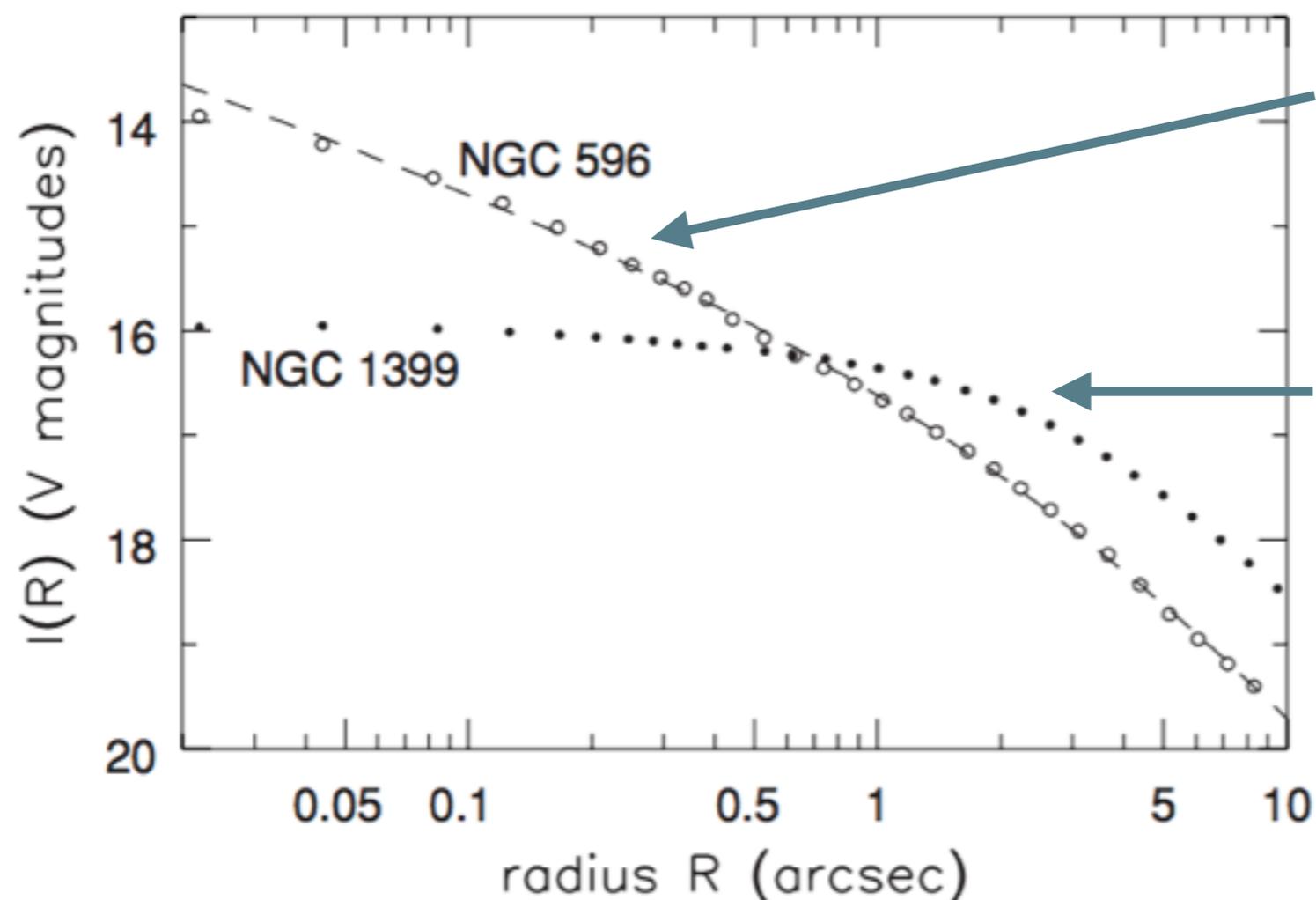


Fig. 6.6. Central surface brightness $I_V(0)$, in mag arcsec $^{-2}$ in the V band, and core radius r_c plotted against B-band luminosity M_B . Filled circles are elliptical galaxies and bulges of spirals (including the Andromeda galaxy M31); open circles are dwarf spheroidals; crosses are globular clusters; 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.

Elípticas pouco luminosas

- Elípticas compactas cE (tem alta rotação)
- Anãs elípticas dE (não tem rotação importante)
- Anãs esferoidais dSph (versões menos luminosas de dEs)

Perfil de brilho central



Elípticas menos
luminosas tem
cusps (ao invés de
cores)

Típico de elípticas
gigantes

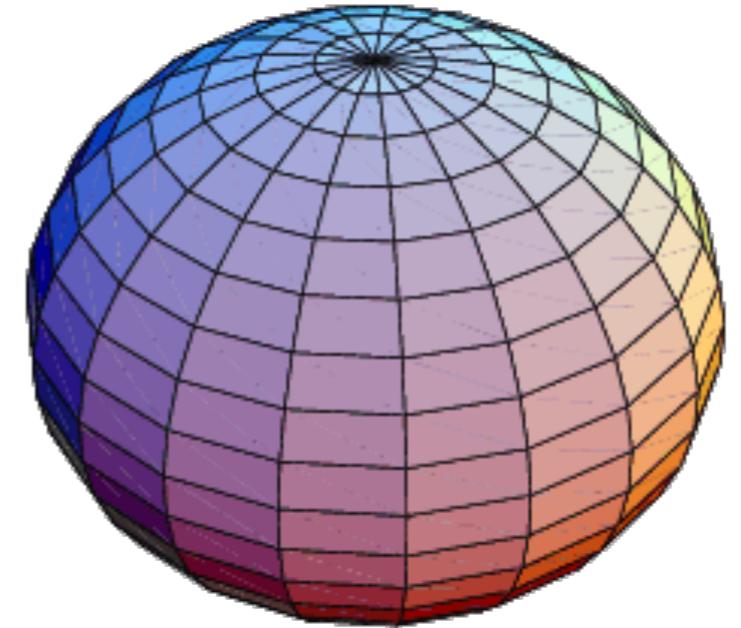
Fig. 6.7. Surface brightness $I_V(R)$ in the V band at the centers of two elliptical galaxies. The cD galaxy NGC 1399 ($M_V = -21.7$) has a *core* at $R \lesssim 1''$, where $I(R)$ is nearly constant. NGC 596 ($M_V = -20.9$) is half as luminous; the surface brightness continues to rise as a *cusp*. The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

As formas das galáxias elípticas

- Esferóide oblato: rotação de uma elipse em torno de seu eixo menor

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \quad \text{where } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2},$$

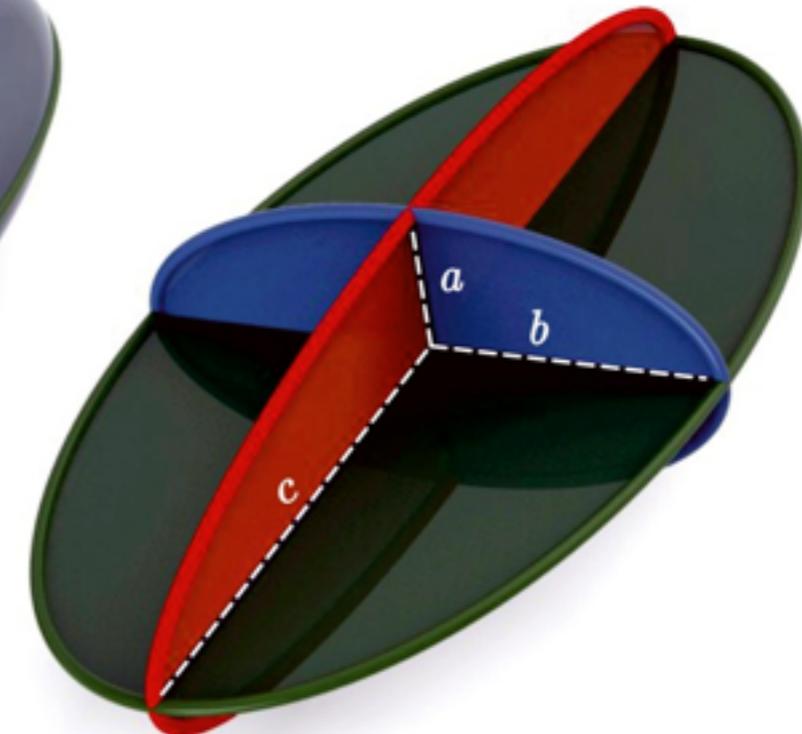
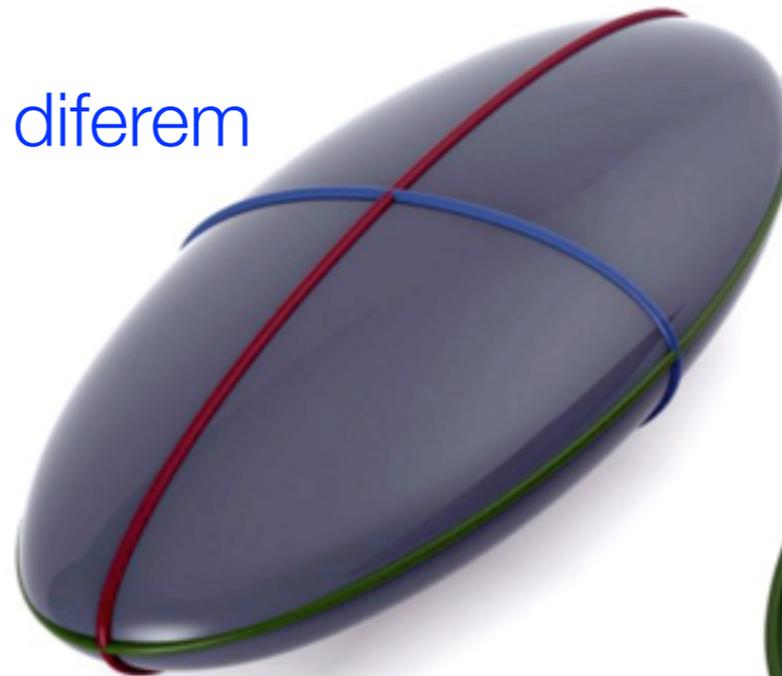
$$q_{\text{obl}}^2 = (b/a)^2 = (B/A)^2 \sin^2 i + \cos^2 i;$$



- Elipsóide triaxial: os três eixos diferem

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2),$$

$$\text{where } m^2 = \frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} + \frac{z^2}{C^2}.$$



Projeções

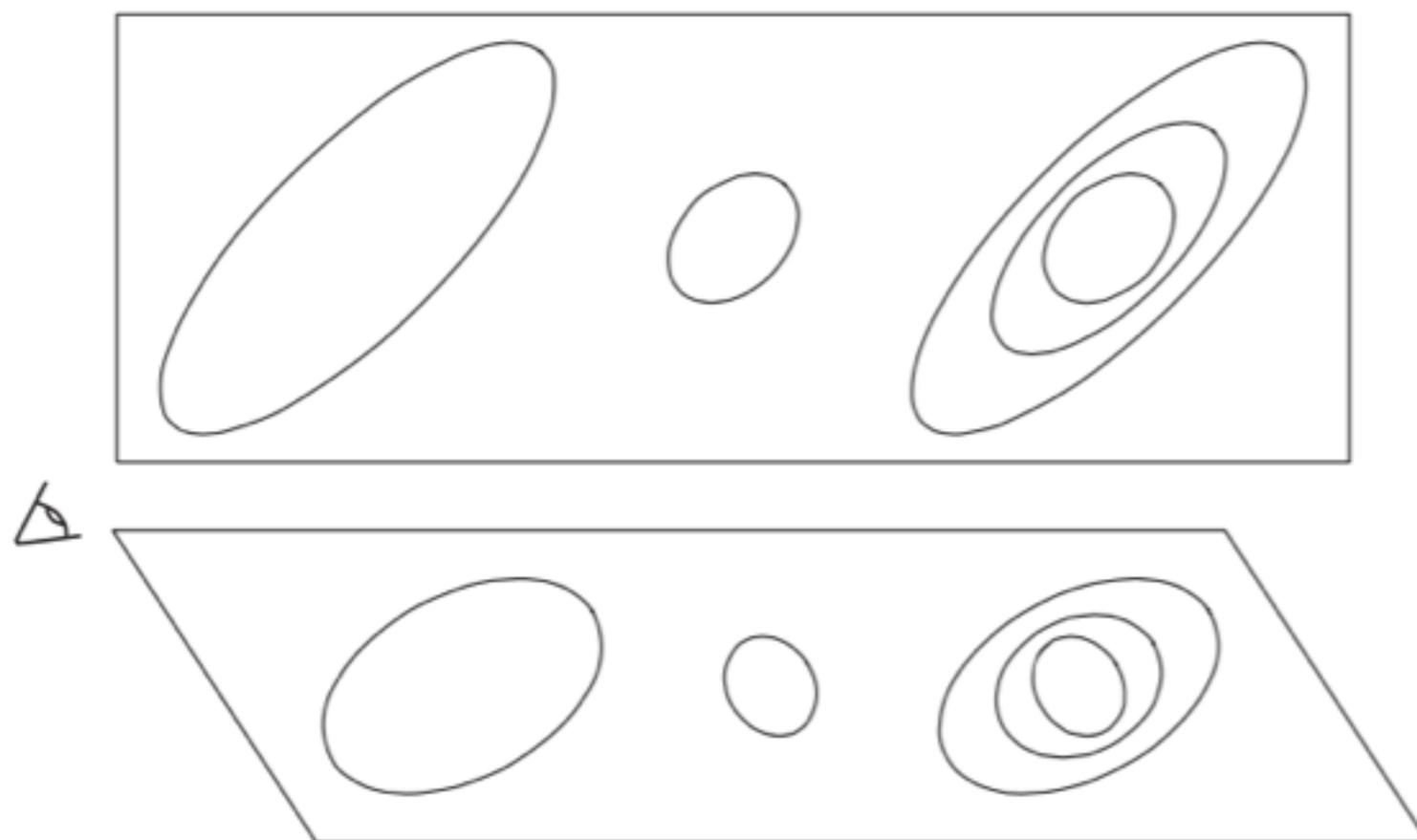


Fig. 6.10. A two-dimensional analogue of isophote twisting in a triaxial galaxy: ellipses on a flat surface (top) are viewed from below left (lower panel). The left ellipse still points to top right; but the long axis of the rounder center ellipse now heads to lower right. The rightmost set of ellipses 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

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.

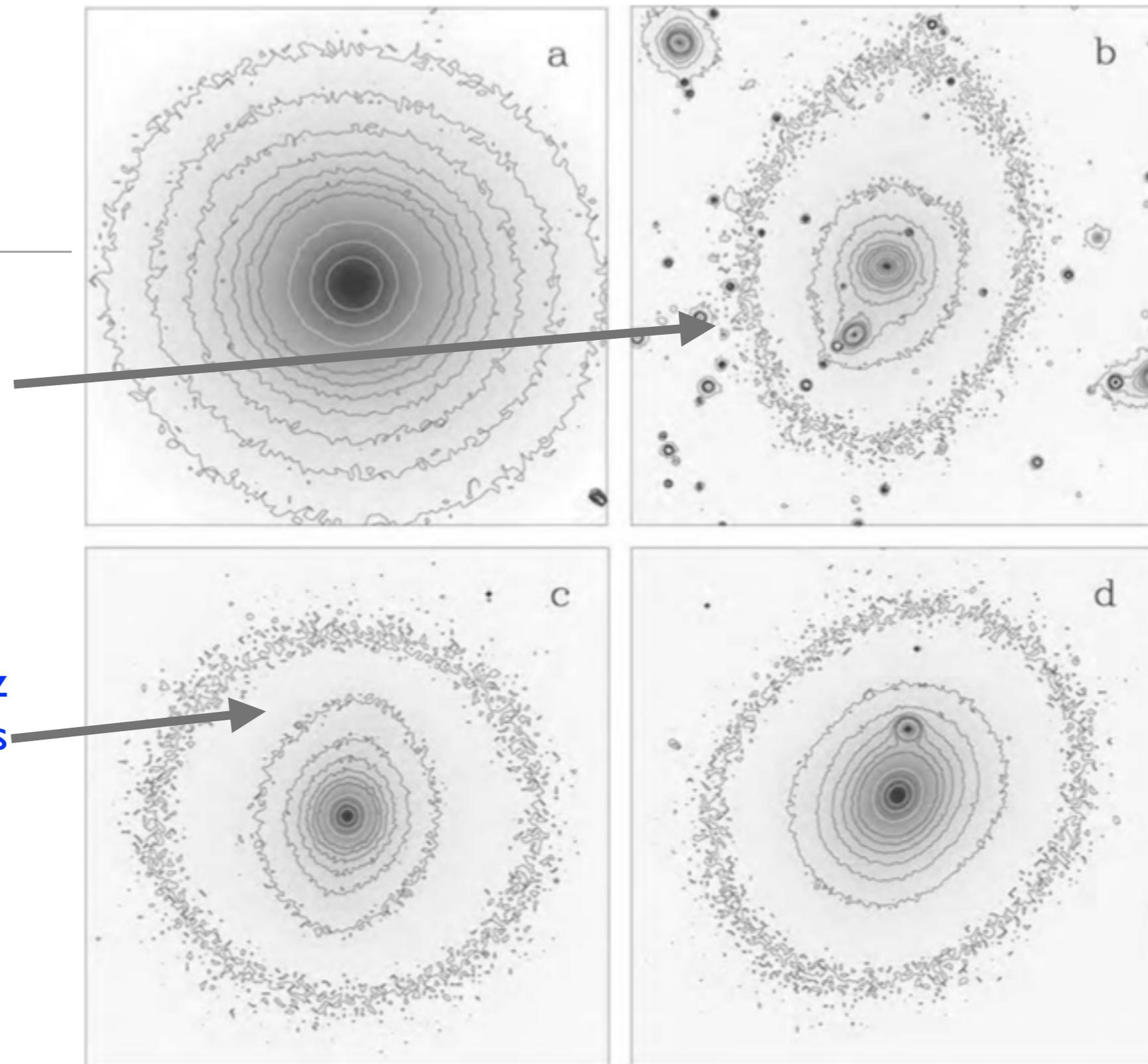


Fig. 6.1. Isofotes in the *R* band of four giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical (NGC 5846); (b) the long axis of the inner isophotes is roughly horizontal, twisting to near-vertical at the outer contour (EFAR J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes, with $a_4 \approx 0.03$ (Zw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

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

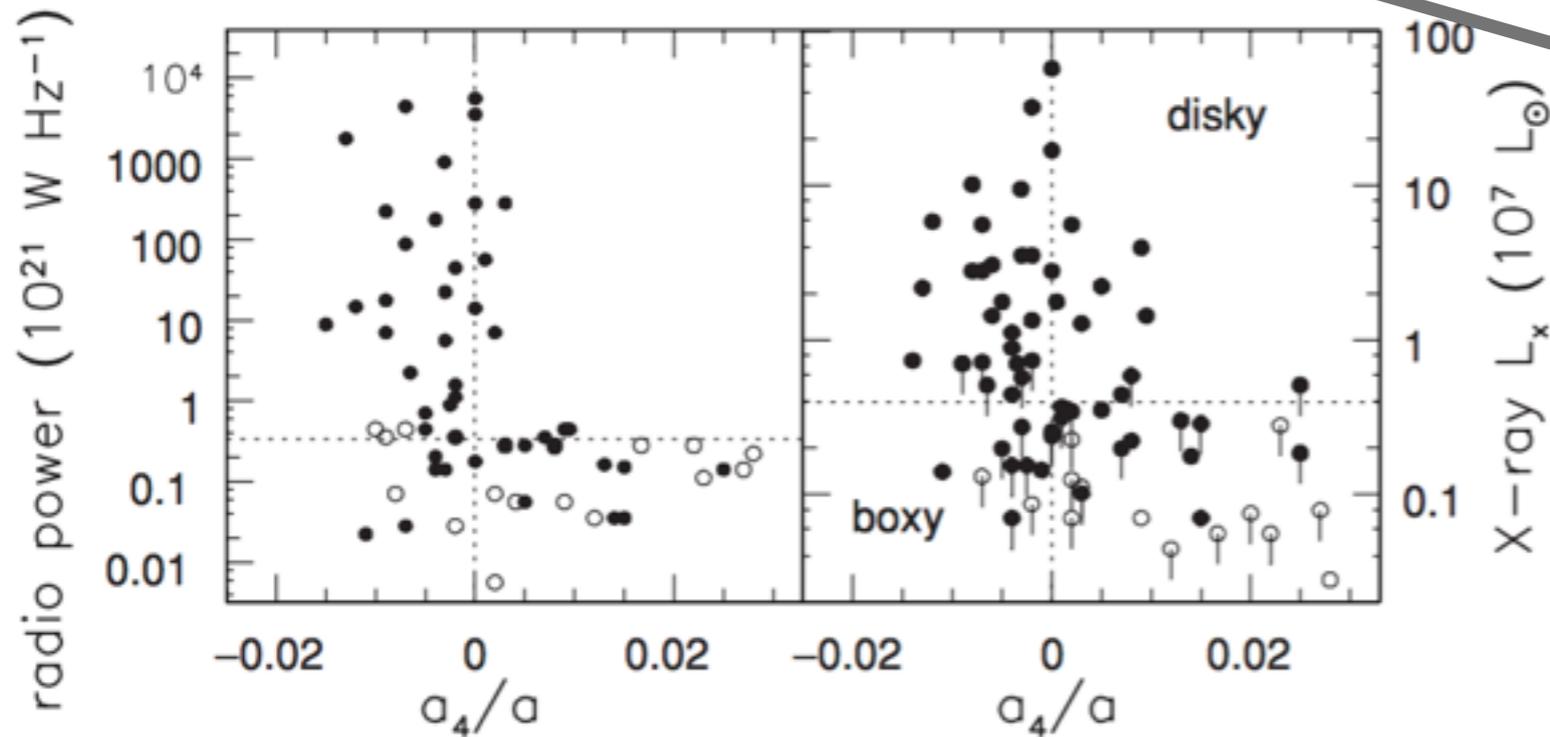
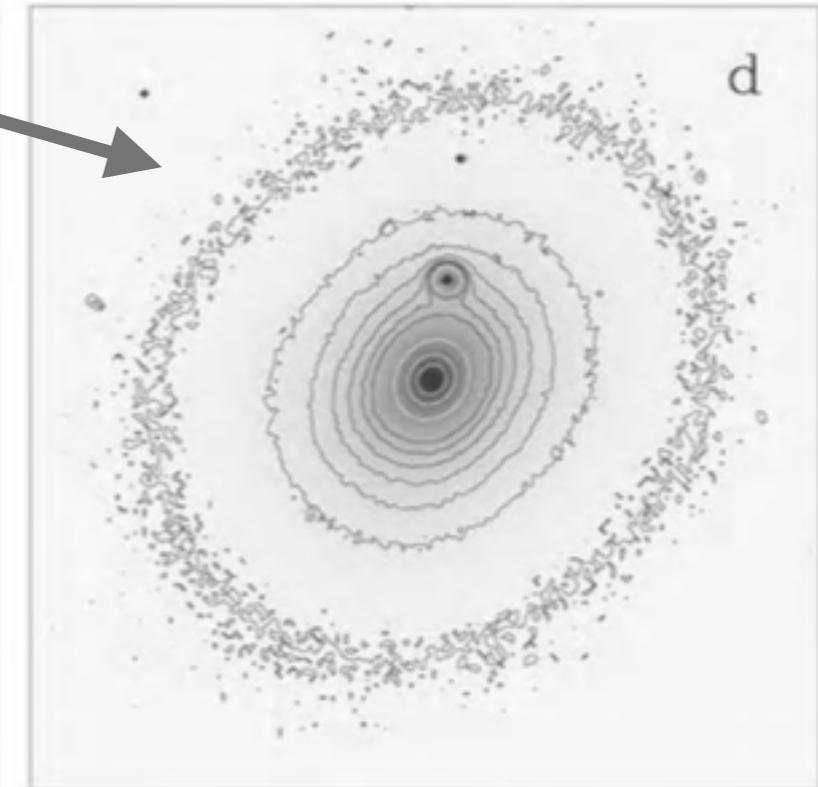
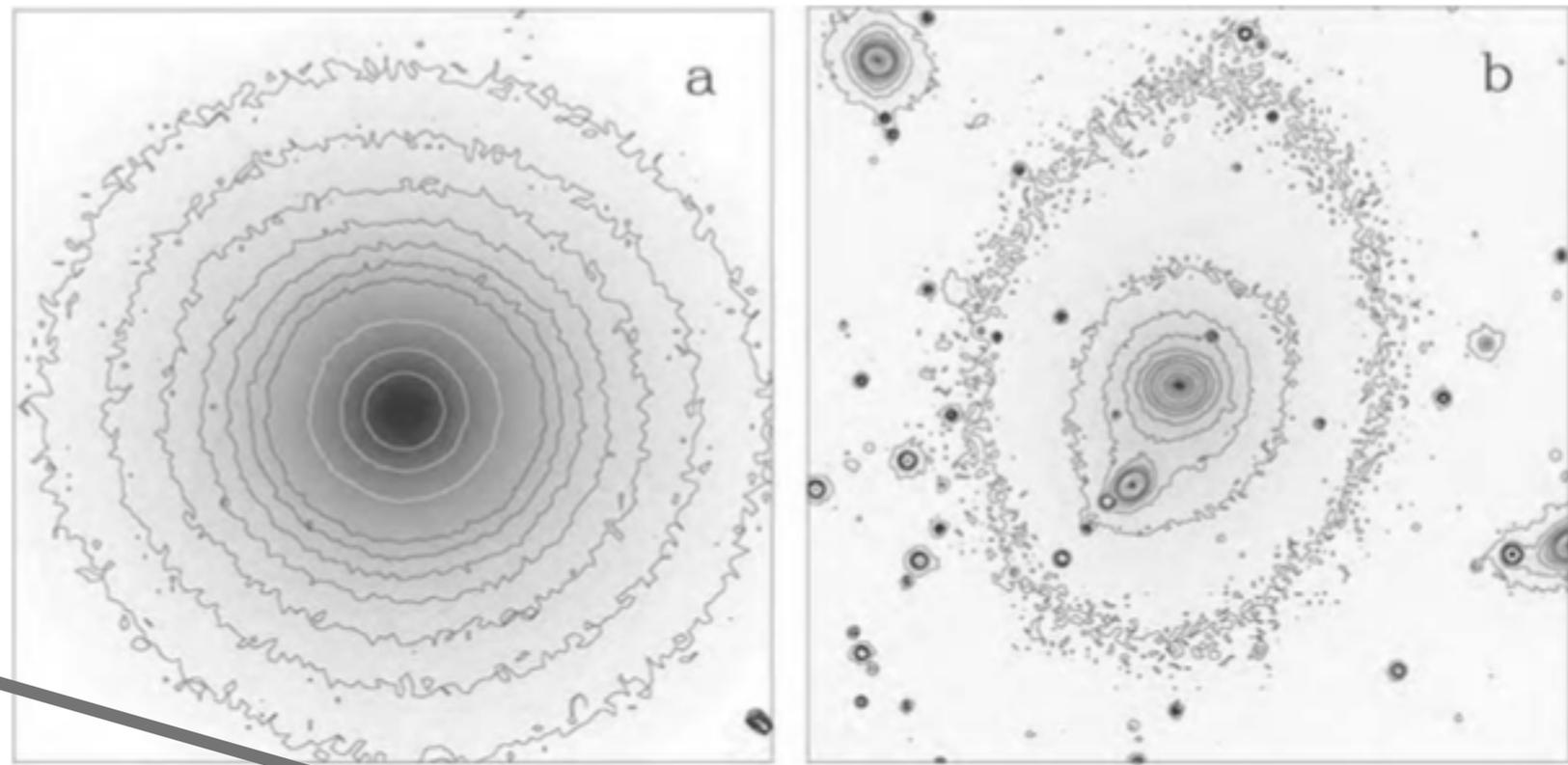


Fig. 6.11. Radio and X-ray power of elliptical galaxies. Boxy galaxies with $a_4 < 0$ tend to be strong sources; diskly ellipticals with $a_4 > 0$ are usually weak. Filled circles show bright objects, with $M_B < -19.5$; open circles are dimmer galaxies. Points with downward-extending bars show upper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

giant elliptical galaxies: (a) isophotes are elliptical
inner isophotes is roughly horizontal, twisting to
J16WG); (c) diamond-shaped 'disky' isophotes,
(b) rectangular 'boxy' isophotes, with $a_4 \approx -0.01$
especially prominent in (b), are mainly foreground

Movimento das estrelas

- 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
- Frequentemente as elípticas são sistemas triaxiais: a falta de isotropia da dispersão de velocidades indica que as elípticas não são sistemas completamente relaxados dinamicamente (estão em quasi-equilíbrio), e ainda preservam informação sobre suas origens (merger por exemplo)
- 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)

Alargamento de linhas em galáxias

- 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
- Resolução espectral

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta v}$$

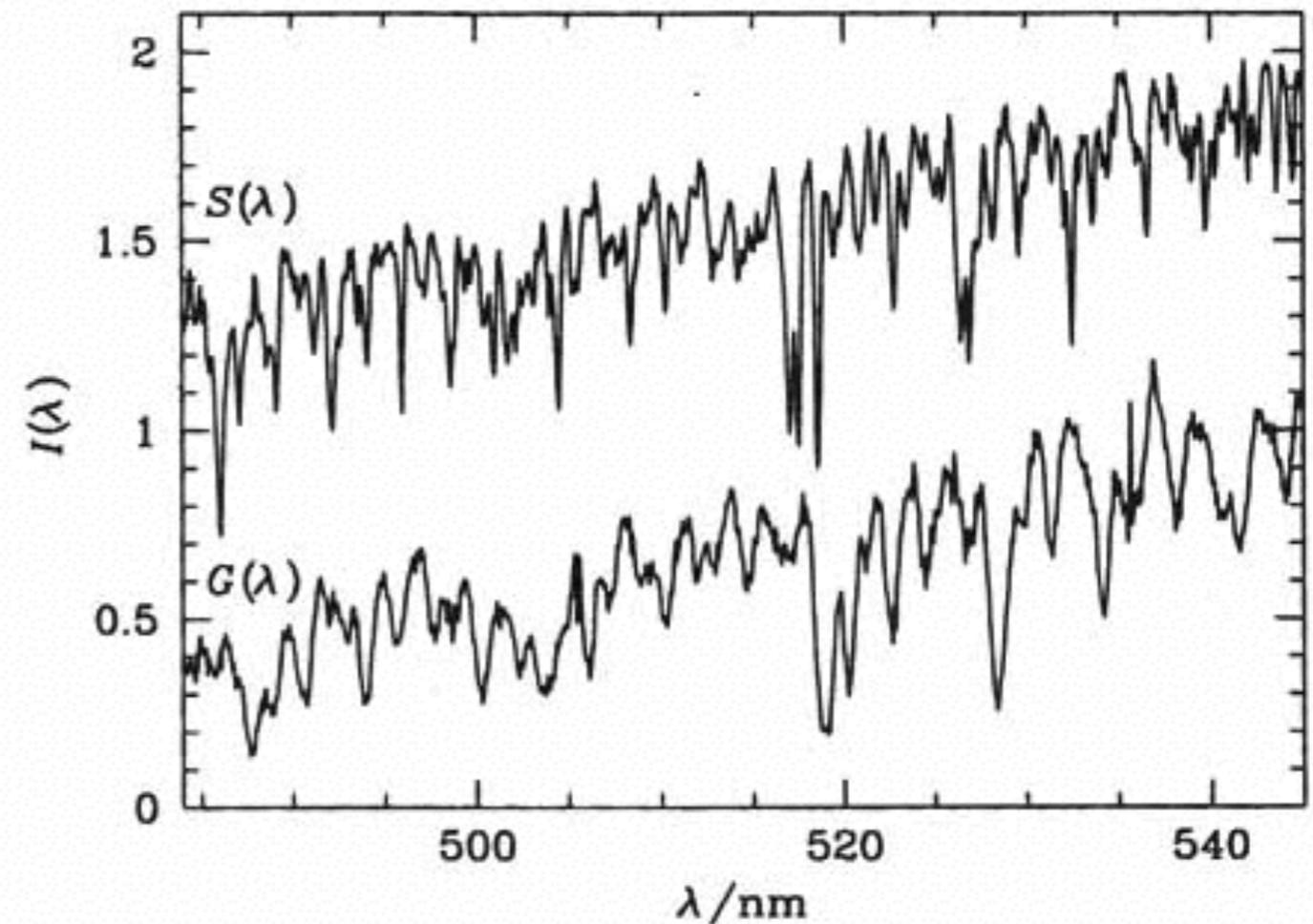
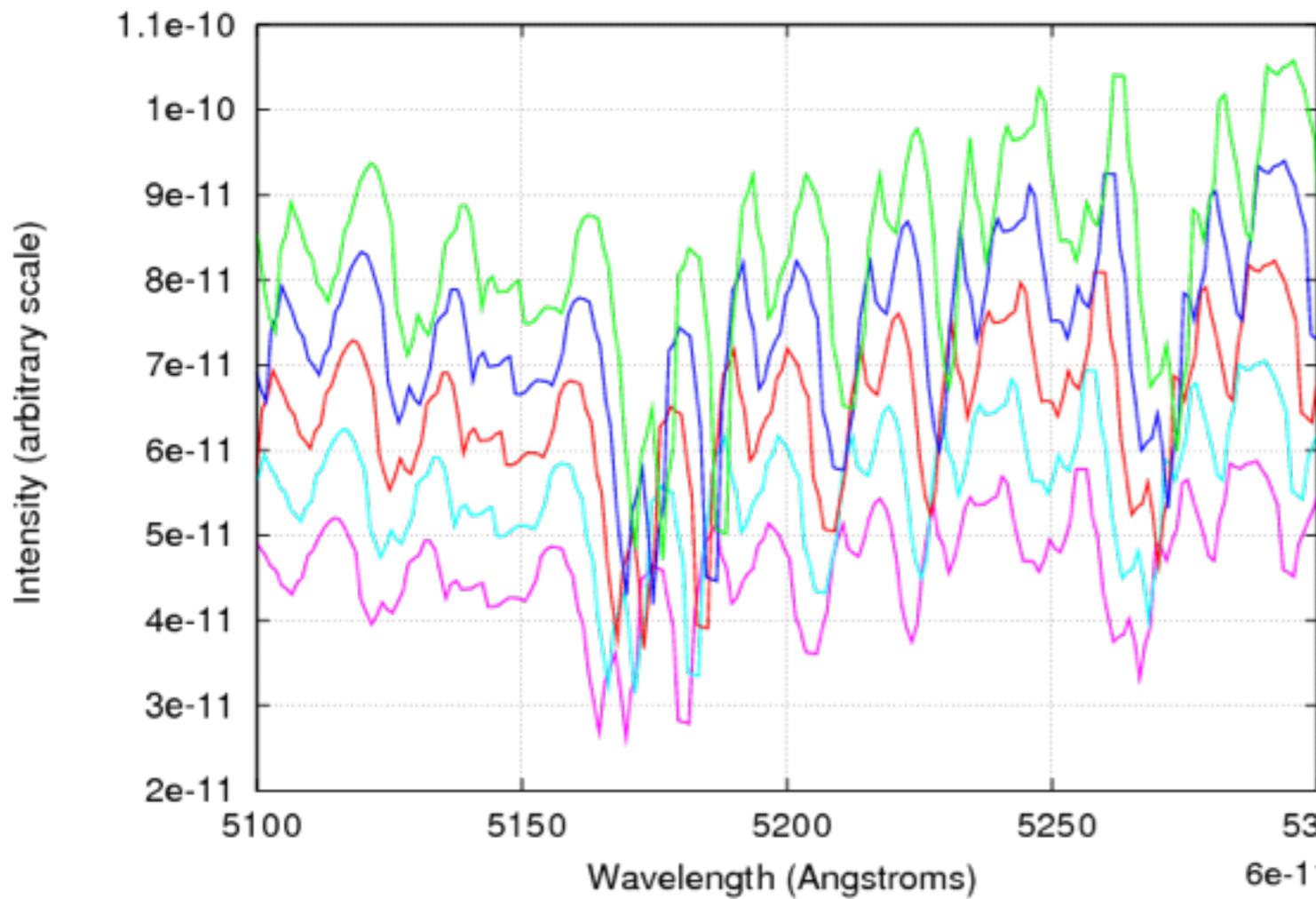
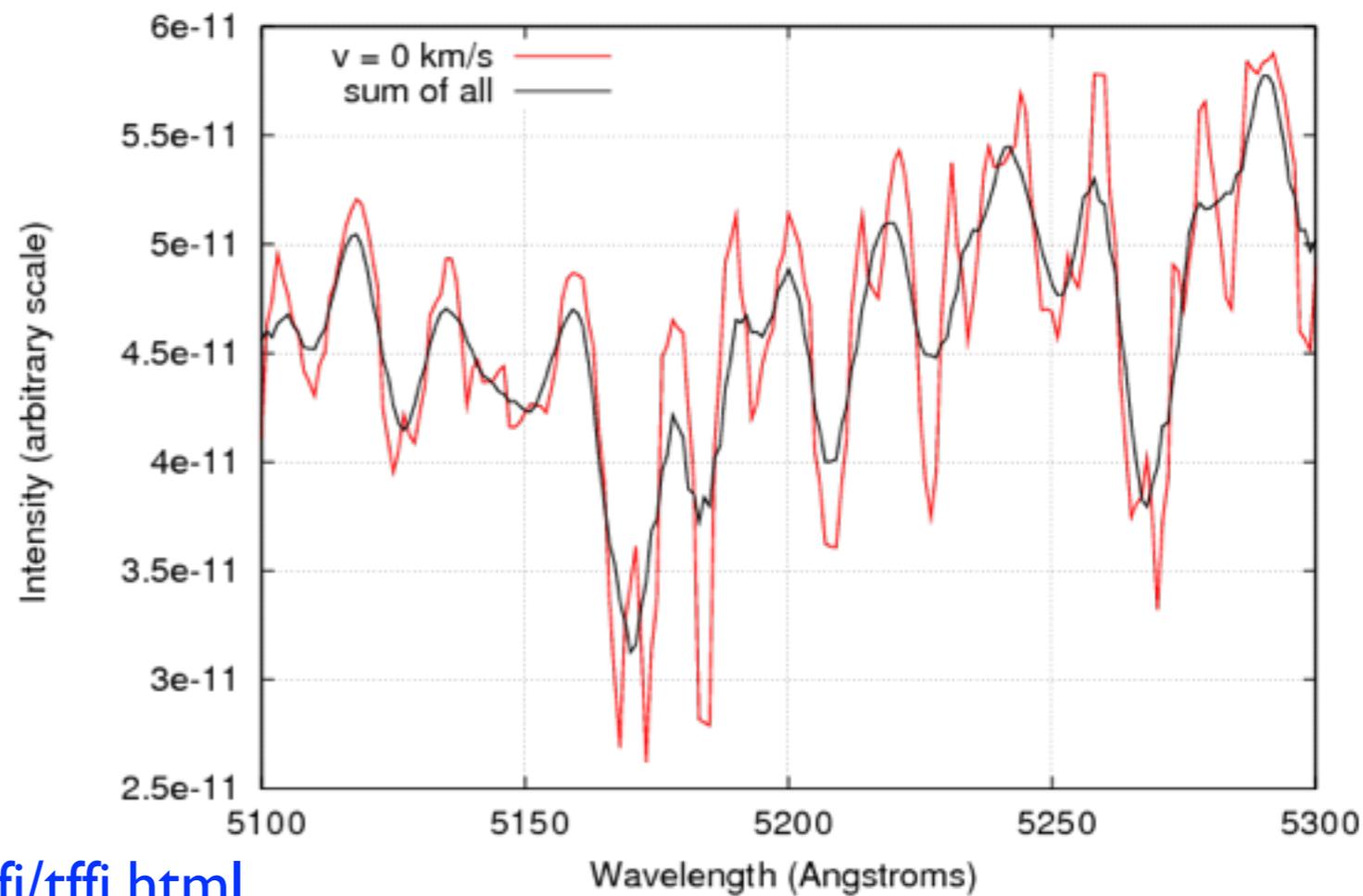


Figure 11.1 Spectra of a K0 giant star (*S*) and the center of the lenticular galaxy NGC 2549 (*G*). These data cover a small part of the optical spectrum around the strong Mg b absorption feature at 518 nm.

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 $\langle cz \rangle$, σ e intensidade da linha

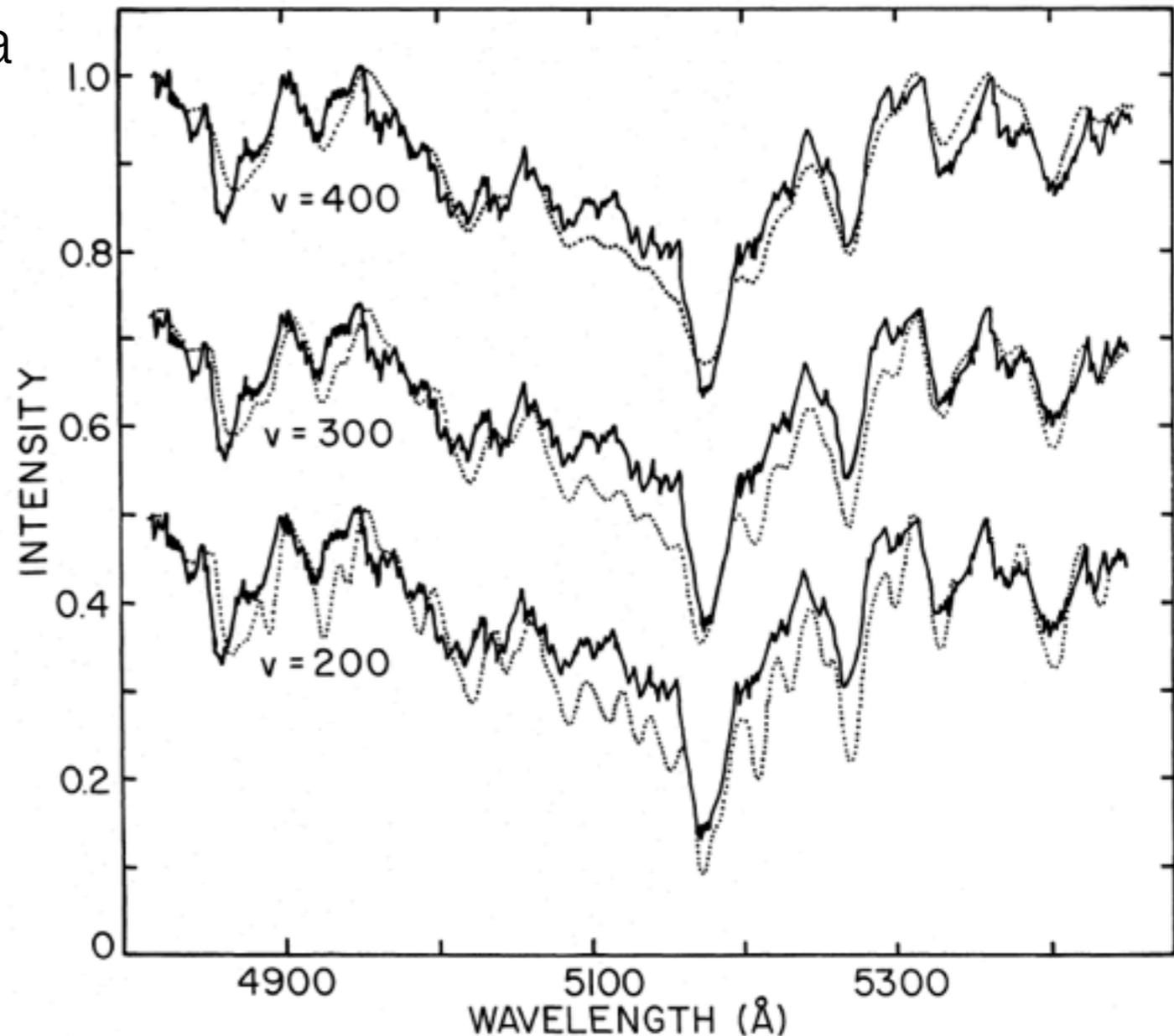


FIG. 3.—NGC 4472 compared with standard star HR 1805 (K3 III), broadened by various line-of-sight velocities (*dotted line*)

Velocidades

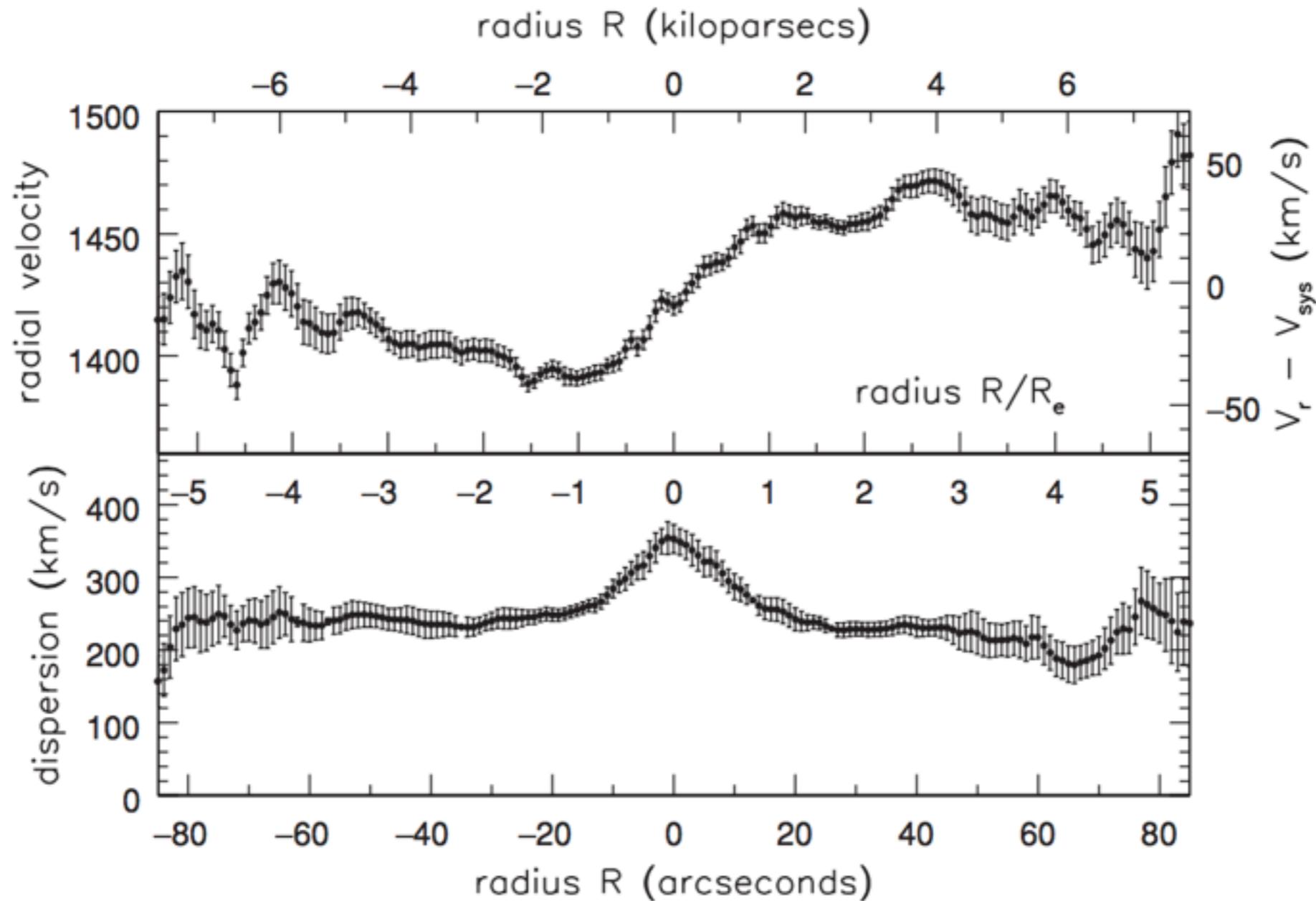


Fig. 6.12. Measured radial velocity V_r and velocity dispersion σ_r on the major axis of cD galaxy NGC 1399; vertical bars show uncertainties. Notice that $(V_r - V_{sys})/\sigma_r \ll 1$; V_r reverses slope in the central few arcseconds – A. Graham.

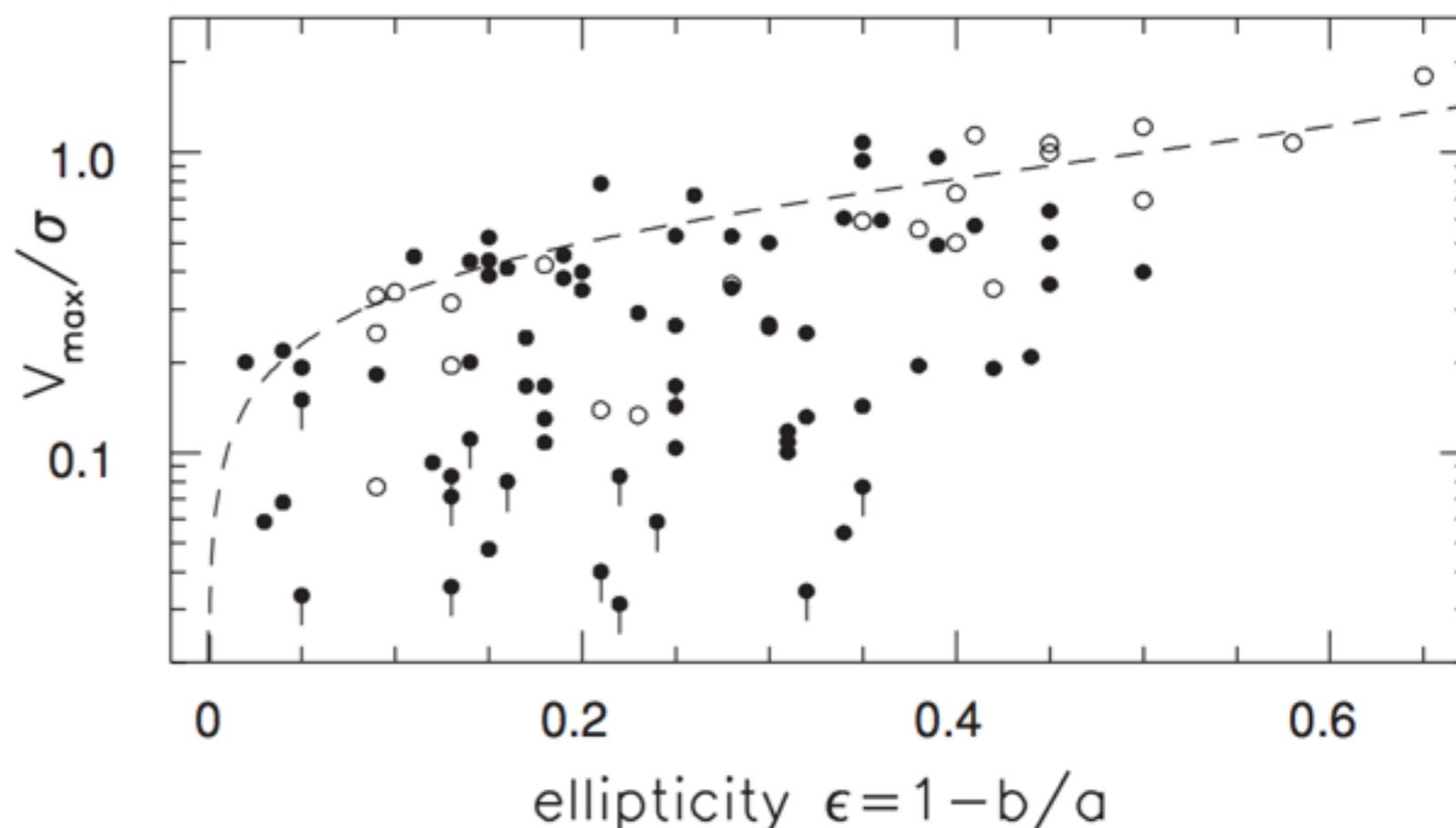
Um pouco de "história"

- 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., $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, 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!:

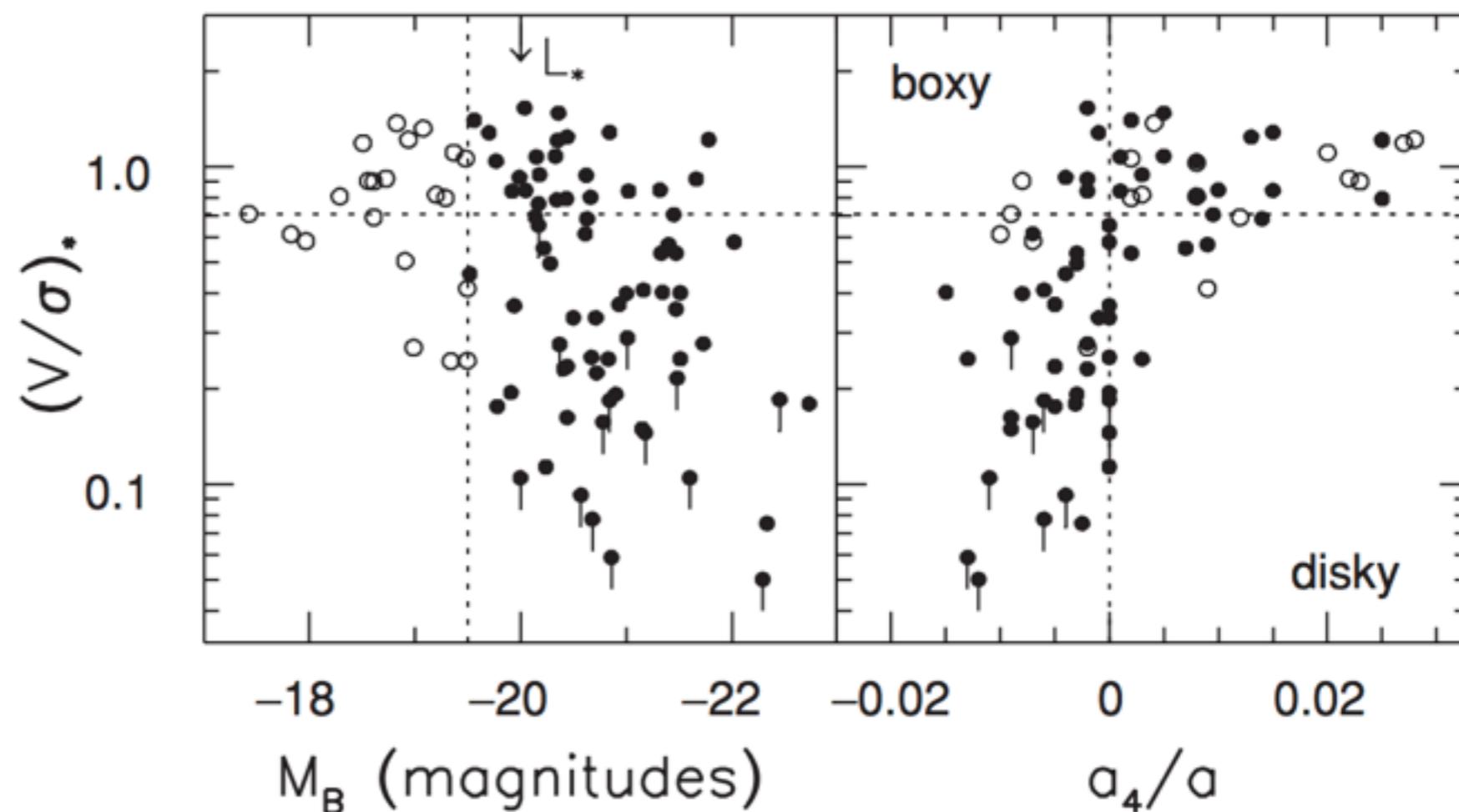
Fig. 6.14. The ratio of measured peak rotation speed V_{\max} to central velocity dispersion σ for elliptical galaxies, plotted against apparent ellipticity. The dashed line gives $(V/\sigma)_{\text{iso}}$, the fastest rotation expected for a given flattening.



Um pouco de "história"

- Conclusão: o achatamento dessas galáxias não é causado por rotação, e sim por anisotropia de velocidades.
- 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.



Um pouco de "história"

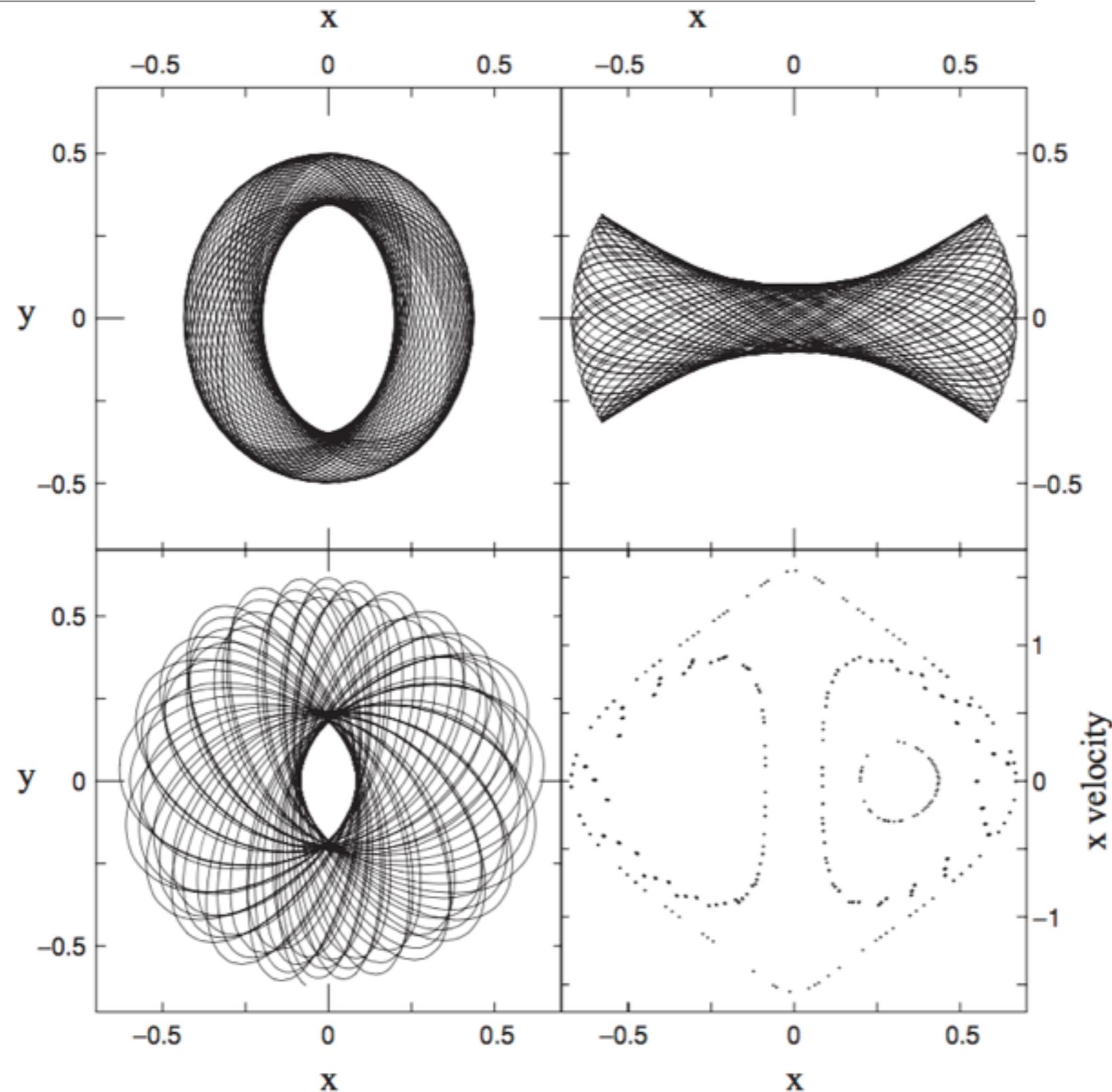
- Essas descobertas derrubaram a idéia vigente de que as elípticas eram “smooth” porque já havia relaxado dinamicamente (simétricas em torno de um eixo de rotação, isotropia de velocidades)
- Grande número de galáxias com cores cinematicamente desacoplados vem sendo descobertas. Número de descobertas 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. The lower right panel shows a *surface of section*: values of (x, x') for all three orbits are plotted each time the orbit crosses $y = 0$ in the direction $y' > 0$.



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)

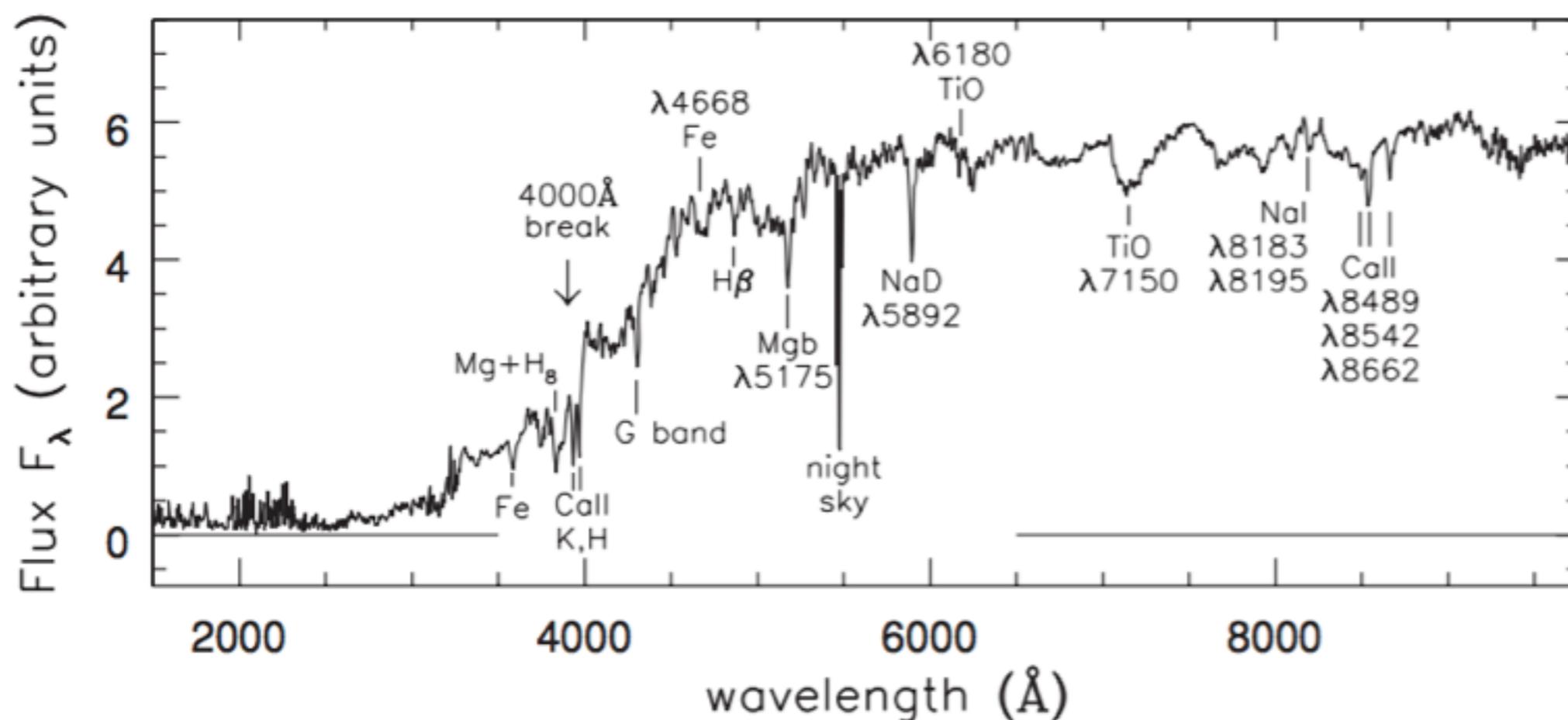


Fig. 6.17. The spectrum of an elliptical galaxy; compare this with the spectra of K and M stars in Figure 1.1, and those of disk galaxies in Figure 5.24 – A. Kinney.

Populações estelares

- depois de 10Myr, fortes linhas de emissão são visíveis
- em 1 Gyr, tem-se um espectro *poststarburst*, 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 poststarburst

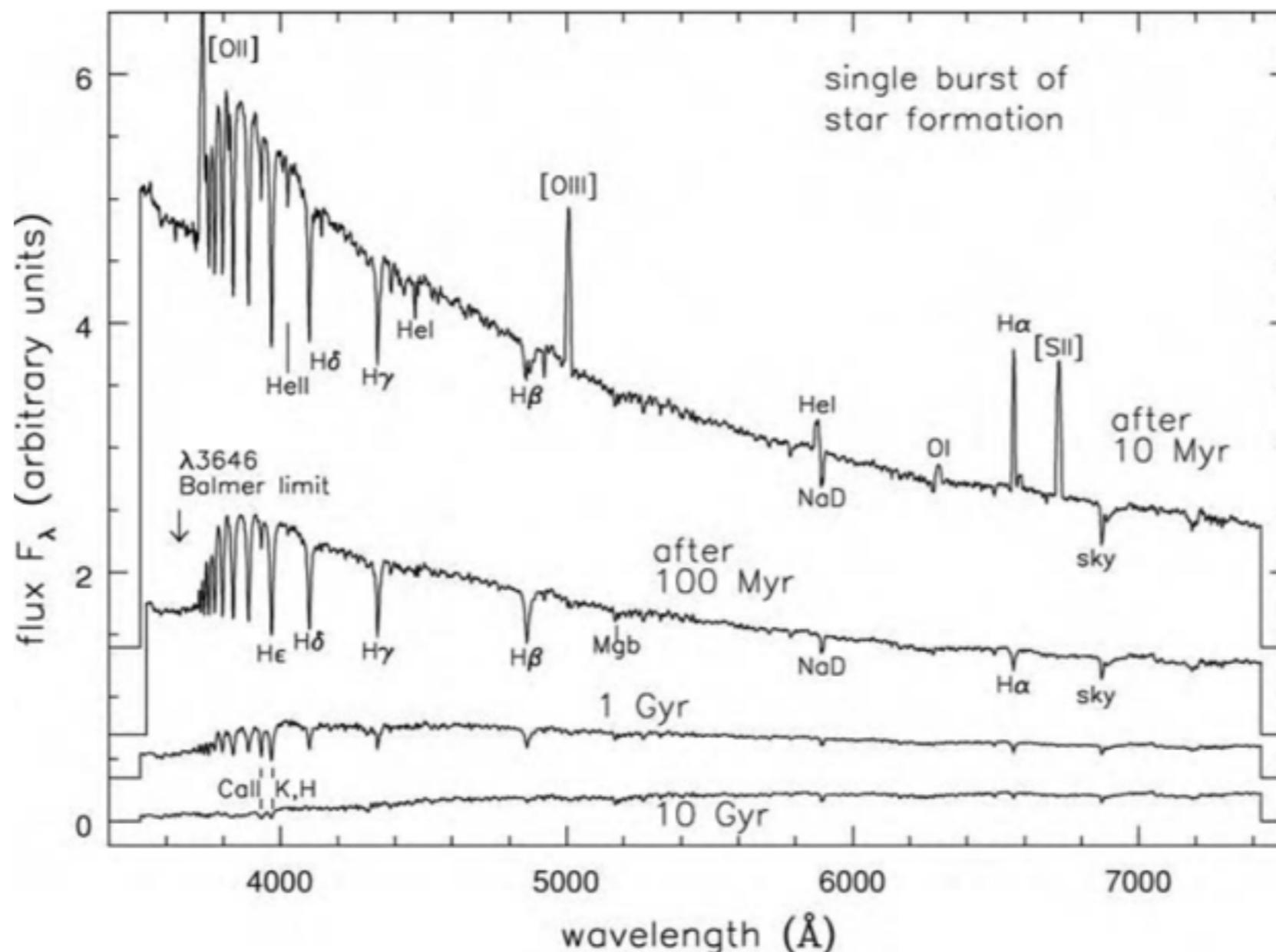


Fig. 6.18. Spectra for a 'galaxy' that makes its stars in a 10^8 yr burst, all plotted to the same vertical scale. Emission lines of ionized gas are strong 10 Myr after the burst ends; after 100 Myr, the galaxy has faded and reddened, and deep hydrogen lines of A stars are prominent. Beyond 1 Gyr, the 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.

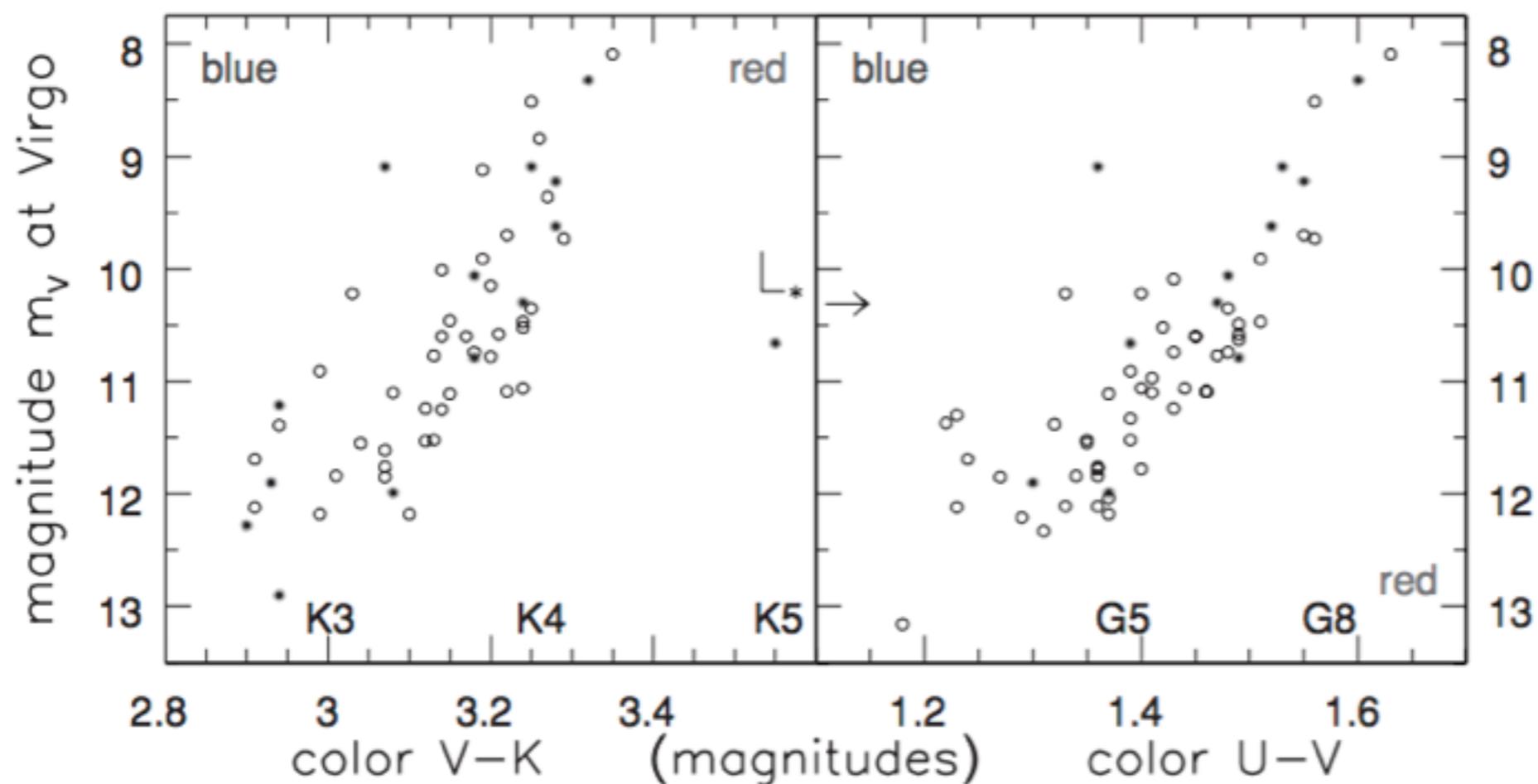


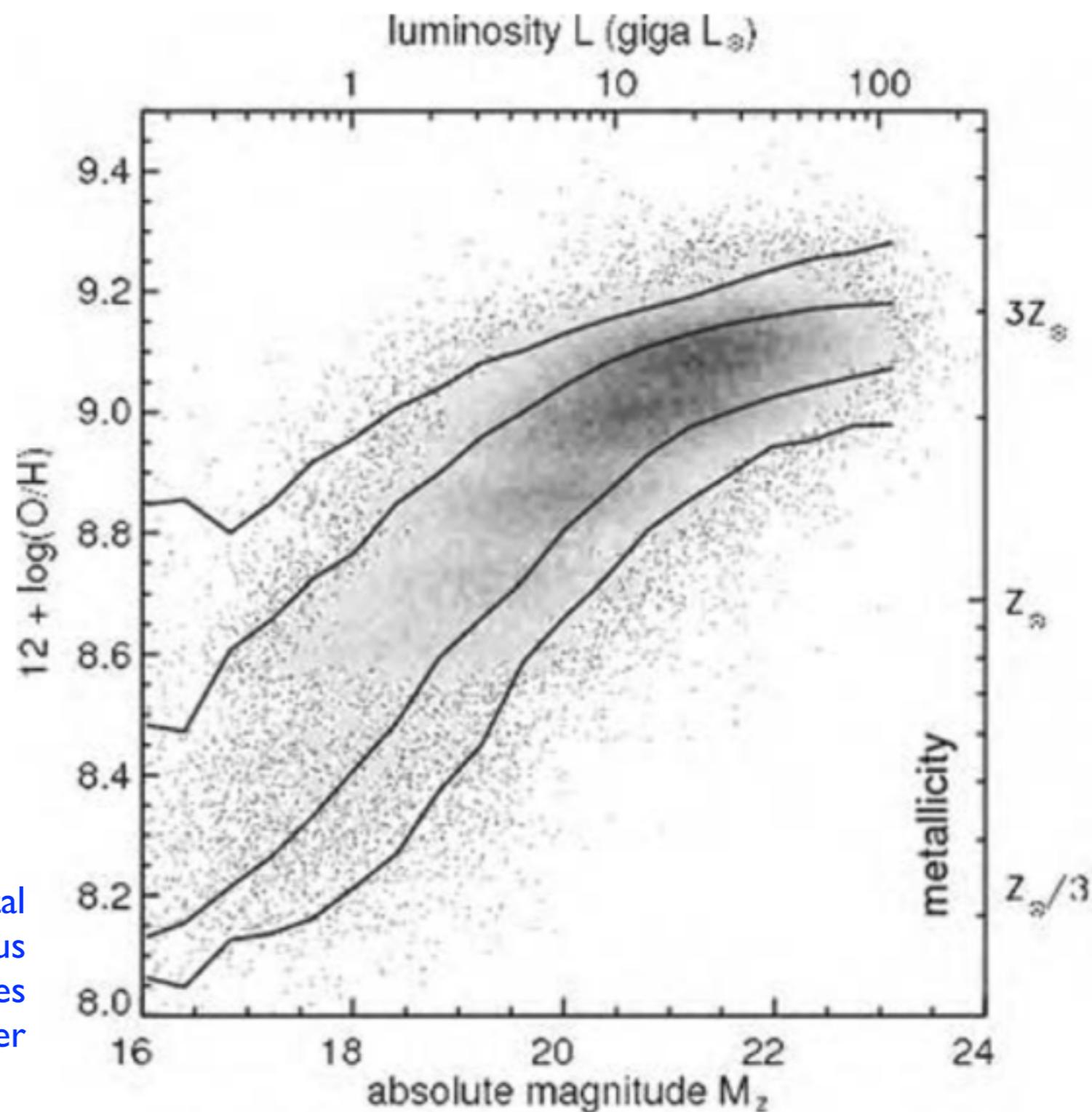
Fig. 6.19. For elliptical galaxies in the Virgo (open symbols) and Coma (closed symbols) clusters, the $U - V$ and $V - K$ colors are plotted against apparent magnitude. Colors of giant stars from Table 1.5 are indicated. Coma galaxies are shown 3.6 magnitudes brighter, as they would appear at the distance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

Populações Estelares

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

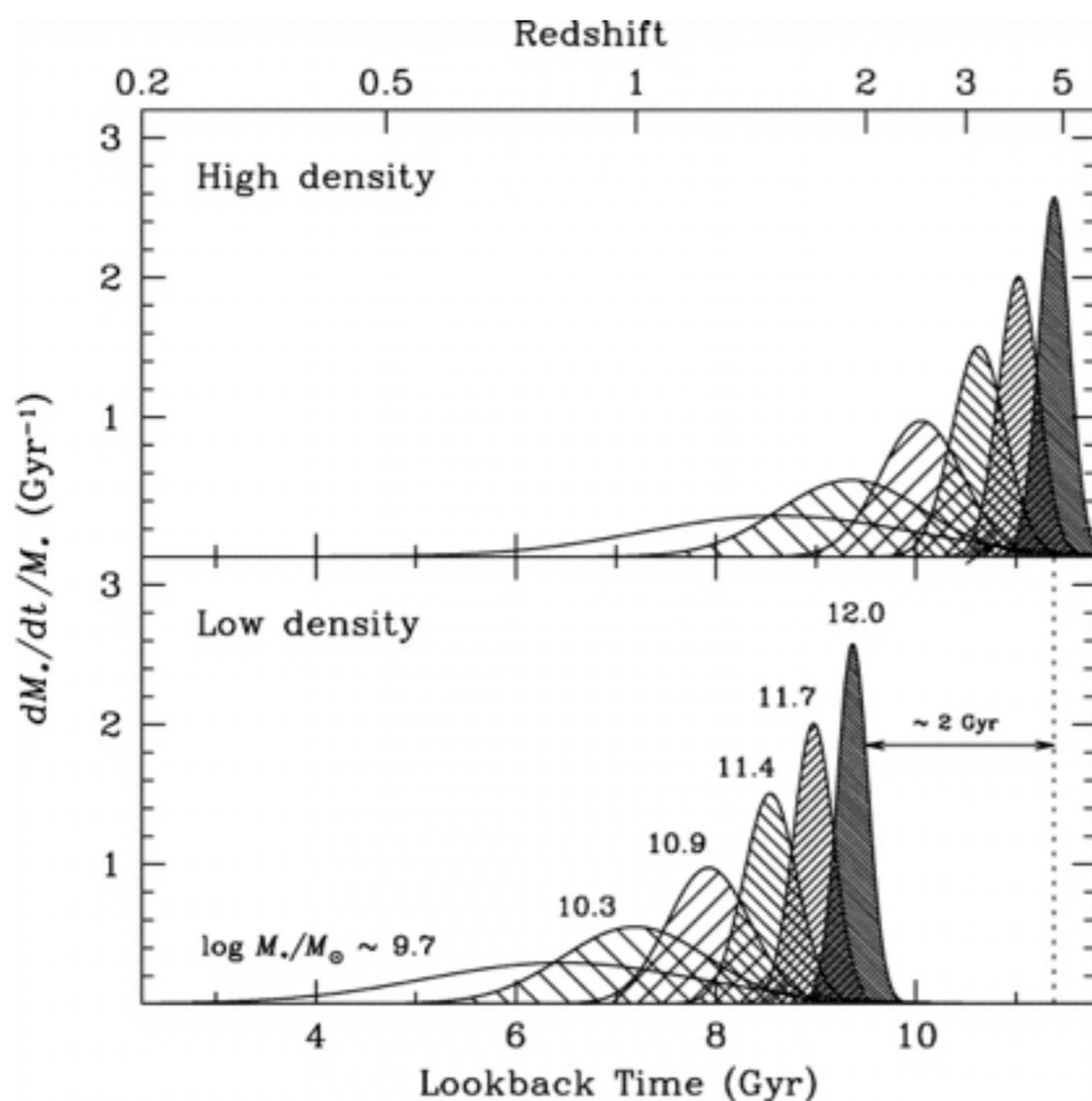
Qual o $[\alpha/\text{Fe}]$ você espera para
esses sistemas?

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.



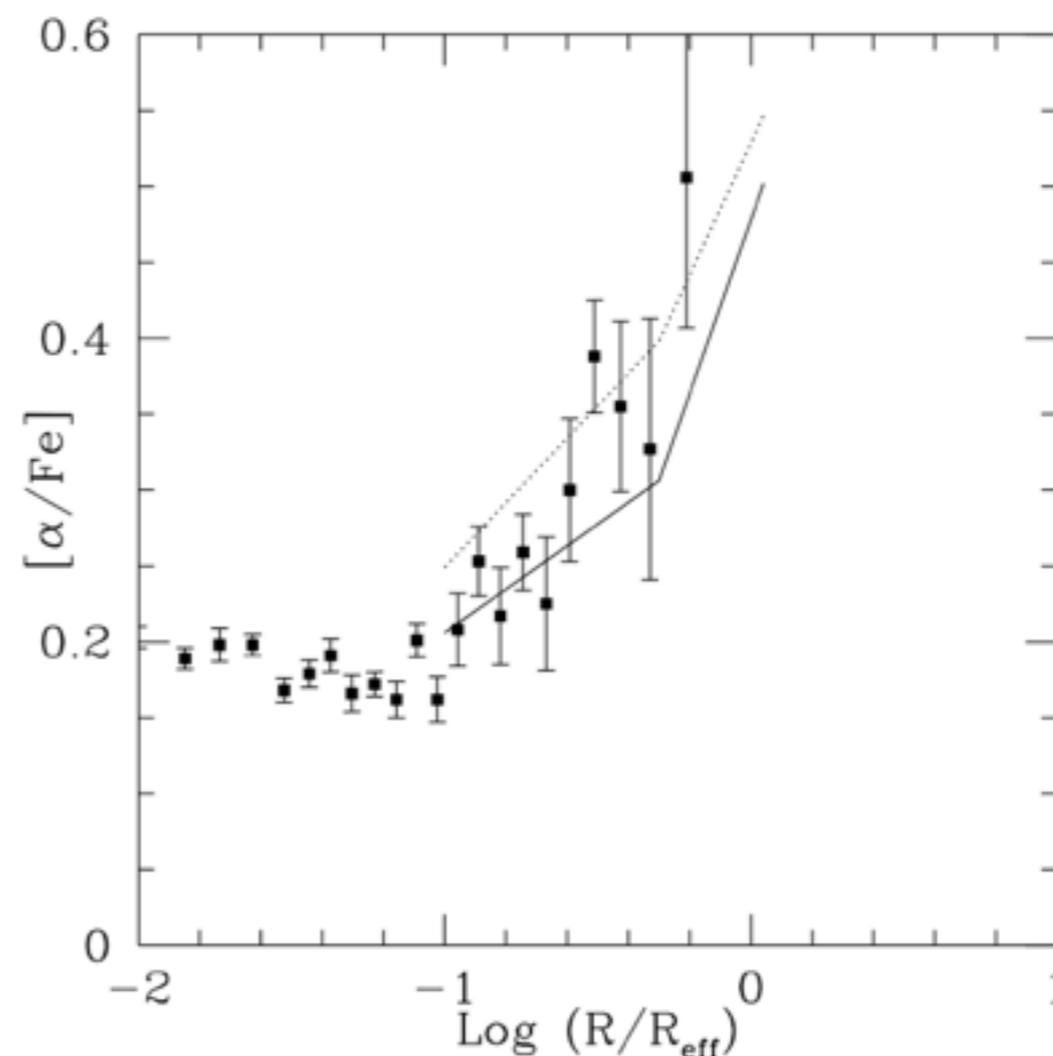
$[\alpha/\text{Fe}]$ em galáxias elípticas

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).

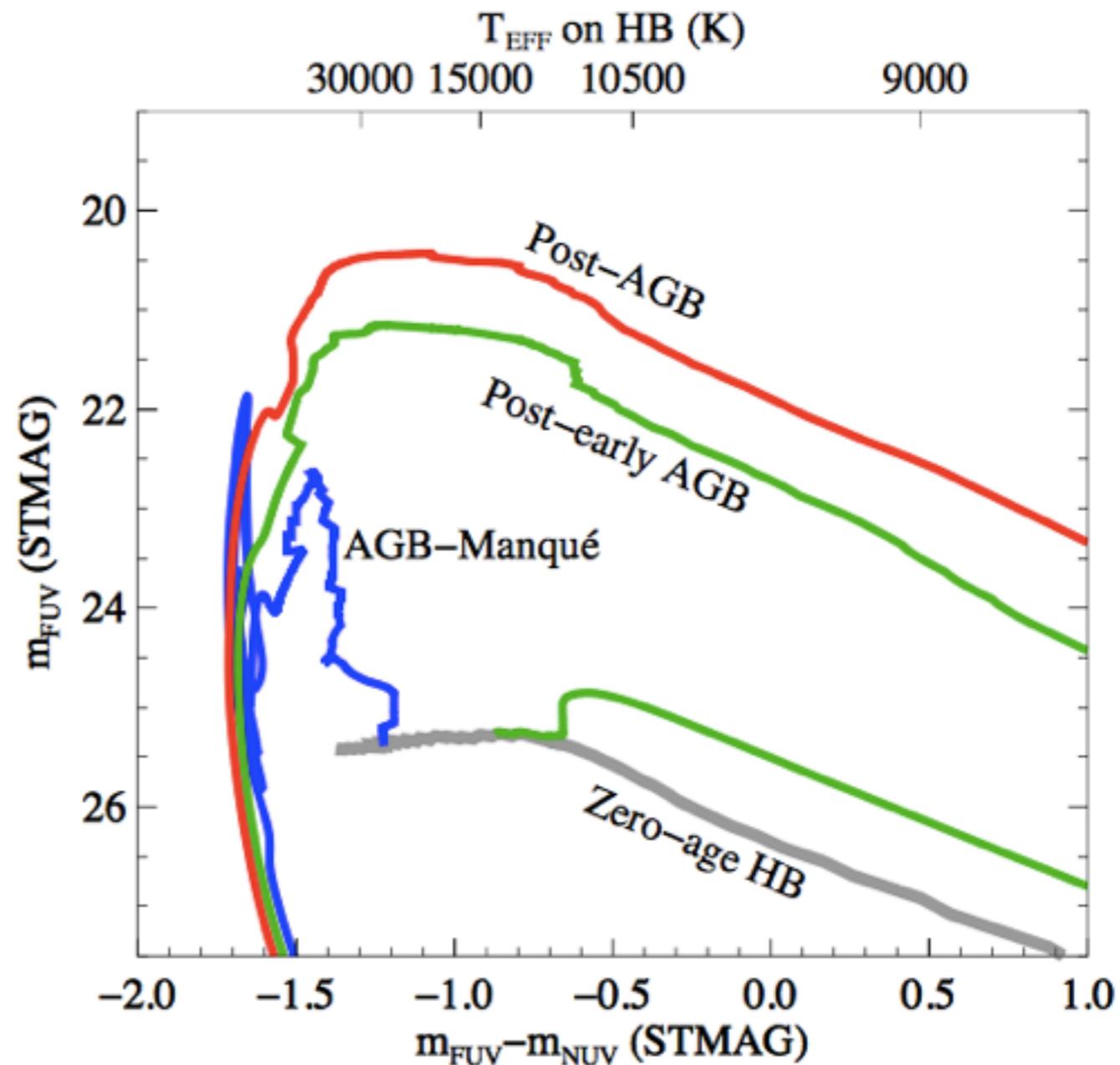
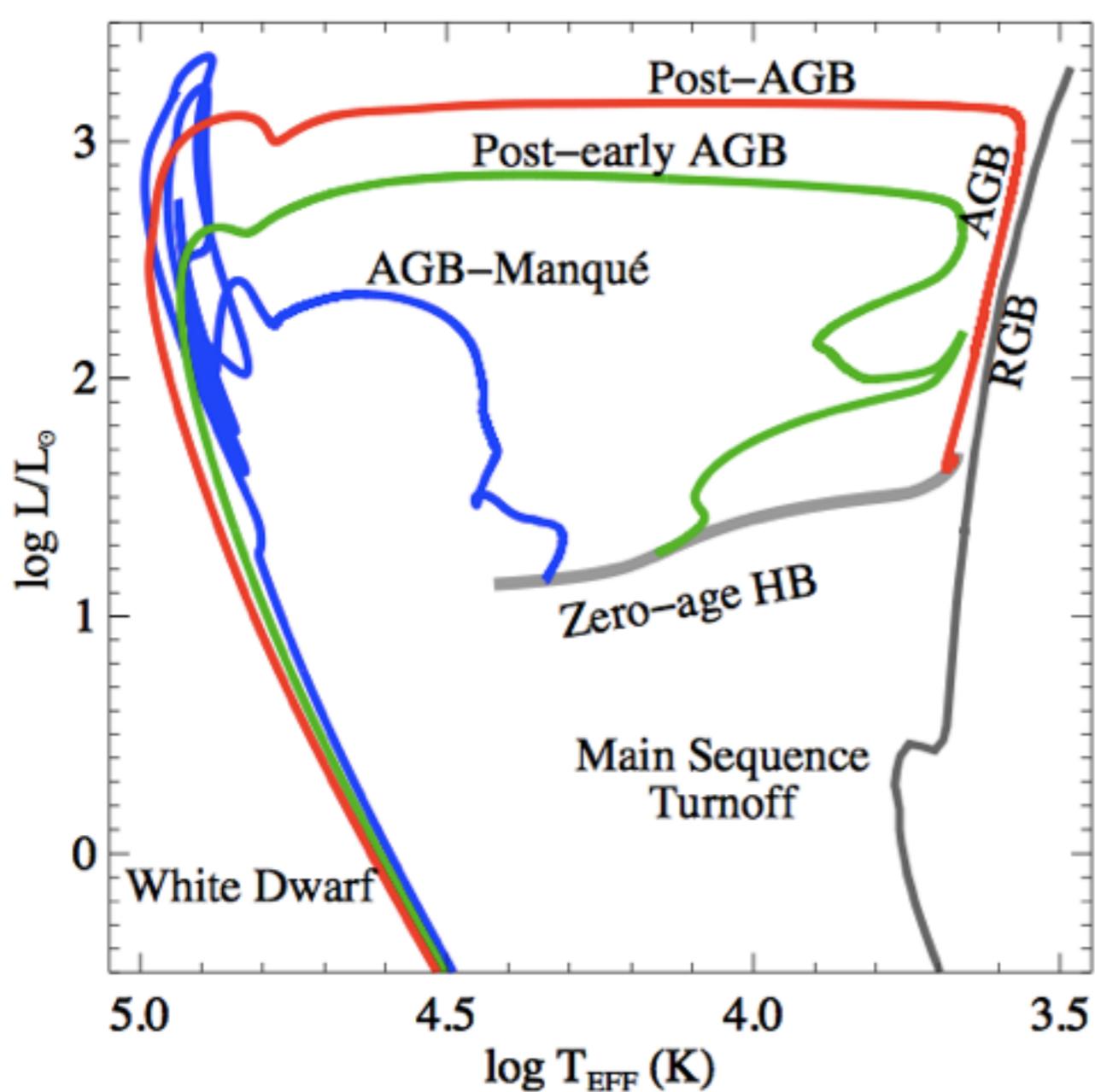
The Outside-In Formation of Elliptical Galaxies (Pipino et al. 2004)



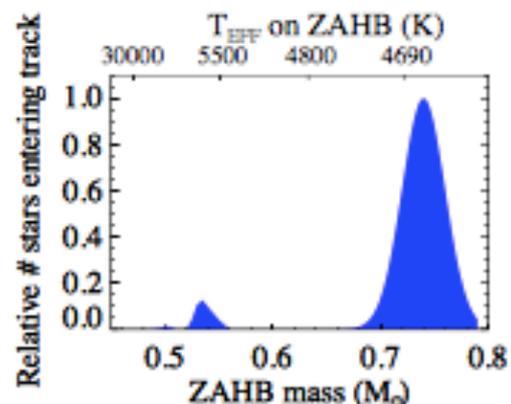
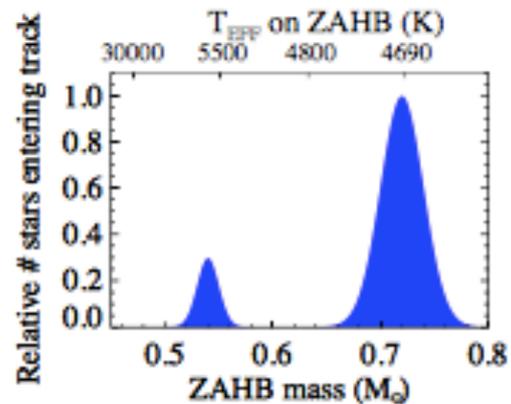
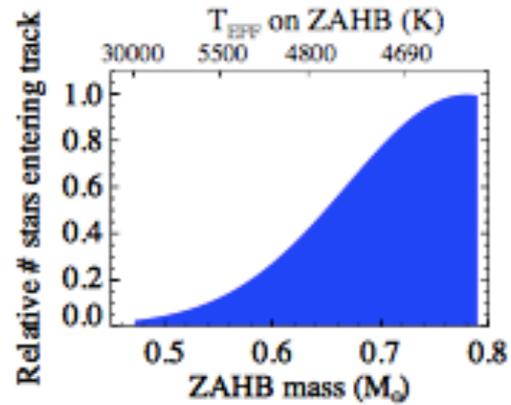
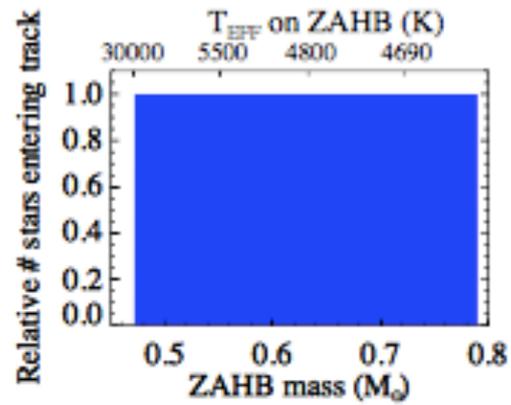
- $[\alpha/\text{Fe}]$ em função do raio para a galáxia elíptica NGC4697. Linhas correspondem a previsões de modelos de evolução química (formação “outside-in”).

Fluxo UV

- Apesar da ausência de formação estelar recente, as elípticas tem 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 temos na vizinhança solar
- Using M32 to Study Rapid Phases of Stellar Evolution
- <http://www.stsci.edu/~tbrown/research/padova.pdf> (próximos 4 slides)



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.

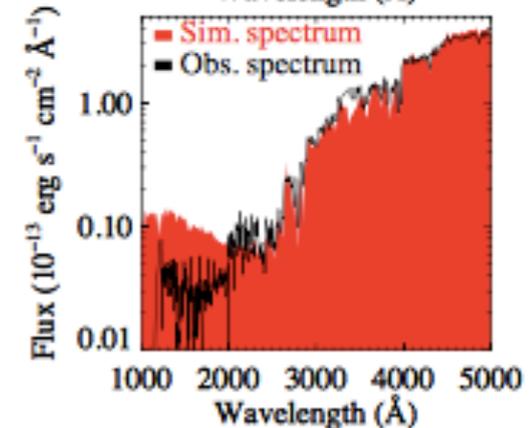
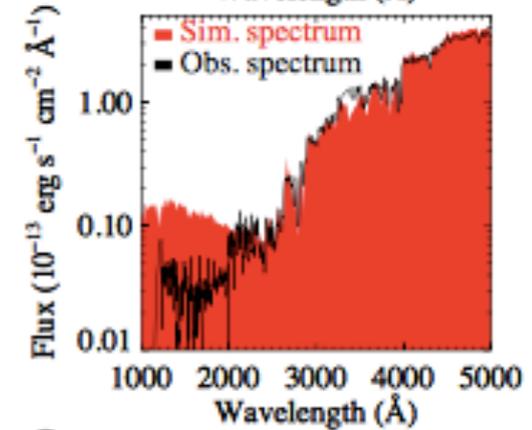
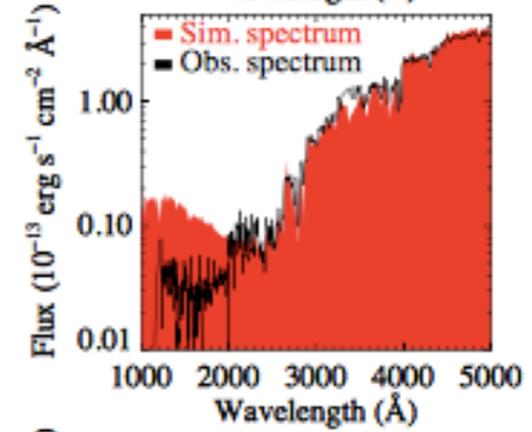
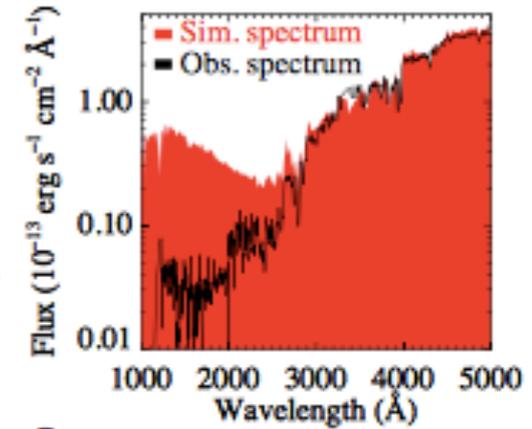


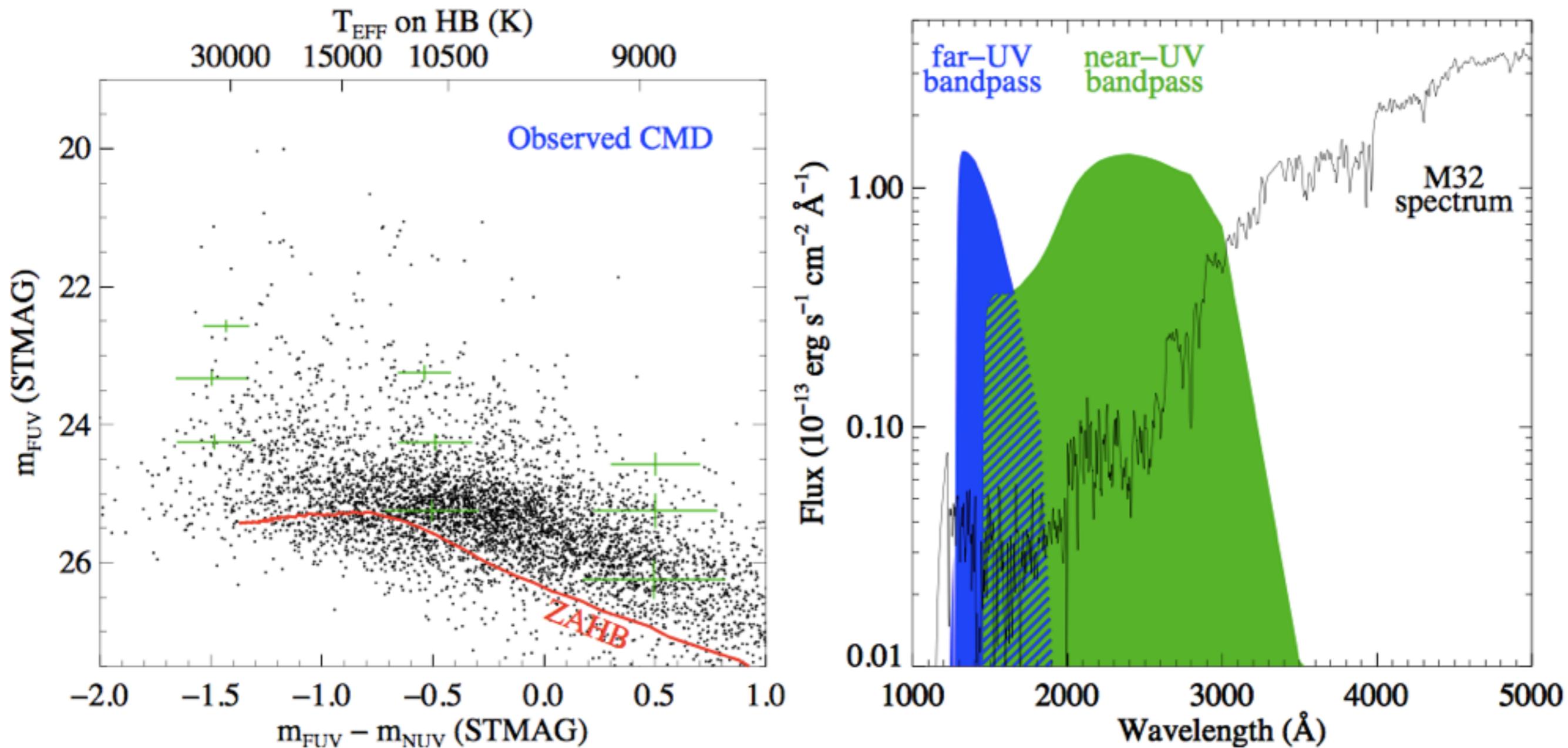
Flat HB mass distribution: Compared to the observed CMD, a uniform HB population produces 10x as many hot HB stars, and 30x as many PAGB/PEAGB stars. The UV upturn in the spectrum is also too strong. However, this simulation serves to show the relative lifetimes for all of the hot HB and post-HB phases.

Extended red HB distribution: We assume a Gaussian mass distribution centered at the red end of the HB, with a width that reproduces the correct number of blue HB stars. The resulting HB distribution is too blue. The number of UV-bright stars has decreased because more stars are entering the shorter-lived PAGB tracks instead of the PEAGB tracks.

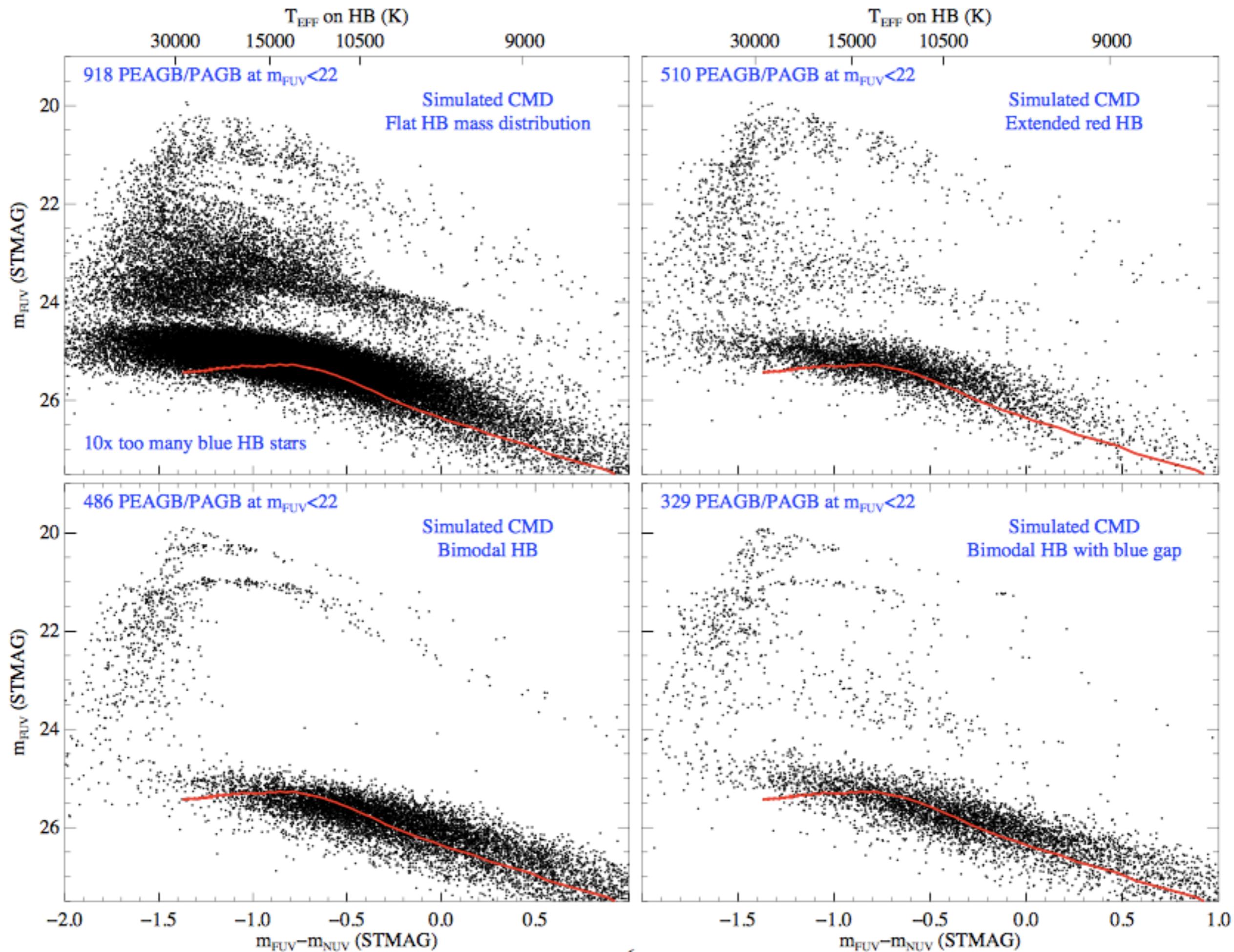
Bimodal HB distribution: We assume two Gaussians on the ZAHB. The blue peak was chosen to match the blue HB distribution, but we are missing the AGB-Manque' stars directly above the blue HB. The number of very UV-bright stars has decreased further, but it is still far larger than that in our observed CMD.

Bimodal HB distribution with blue gap: Many globular clusters show gaps within the blue HB (e.g., NGC2808 has a bimodal HB with gaps). If we assume such a distribution here, we can roughly reproduce the distribution of hot HB and AGB-Manque' stars, but we still obtain 10x too many PAGB/PEAGB stars.





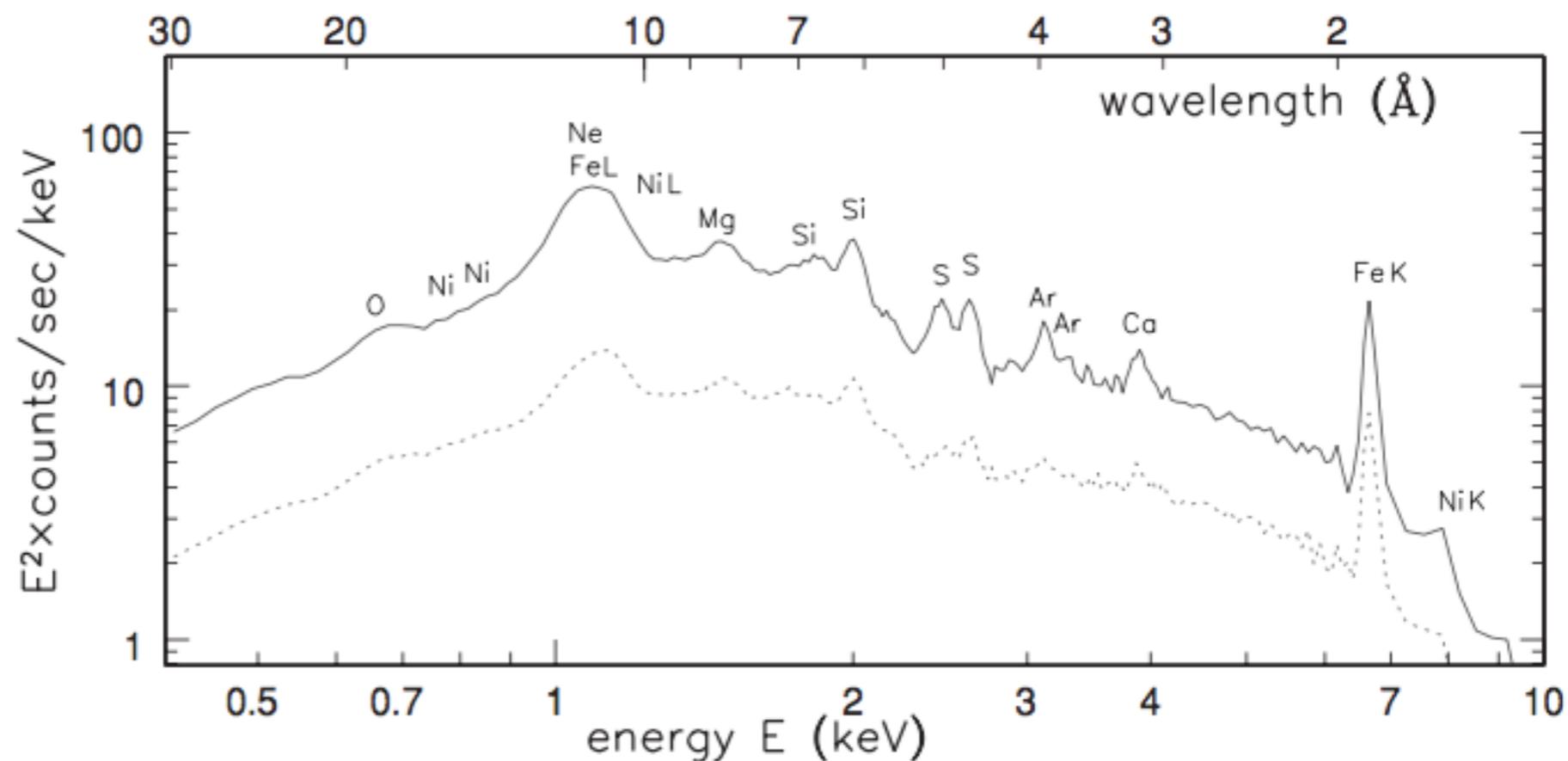
Our observed UV CMD (left) and the spectrum of M32 (right; Calzetti, private communication). Prior to our near-UV image of M32, the very weak “UV upturn” seen in IUE spectra of M32 could have been attributed entirely to post-AGB stars. Instead, our near-UV image demonstrated that the UV flux comes from 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.



Gás quente em elípticas

- Temperaturas de $(1-3) \times 10^7$ K,
- Essas “atmosferas” estendem por cerca de 30kpc
- Mass de gás $(10^9-10^{11})M_{\odot}$ para as elípticas gigantes

Fig. 6.21. The X-ray spectrum of hot gas at $T \sim 2 \times 10^7$ 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

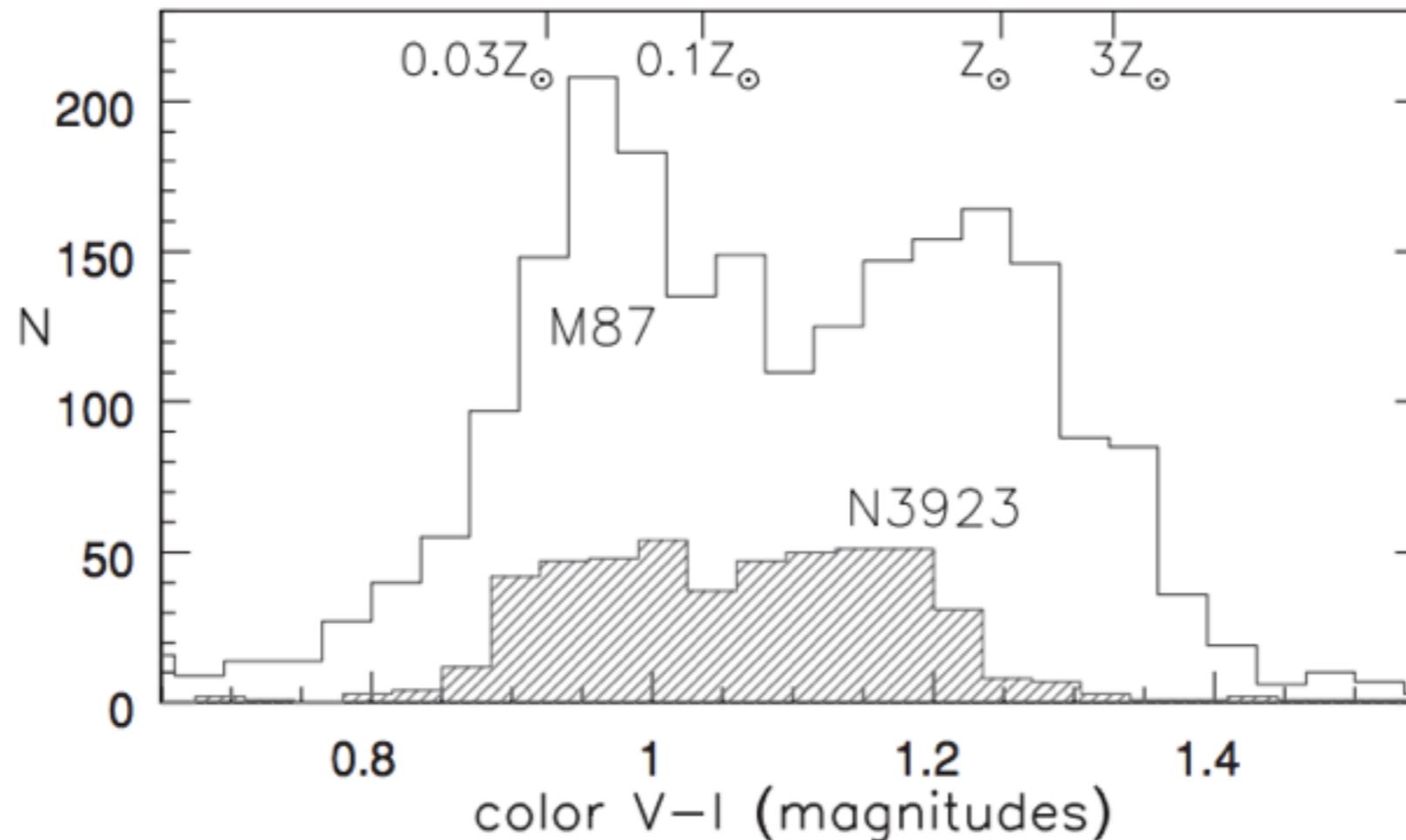


Fig. 6.22. Colors of globular clusters around giant elliptical M87 and shell galaxy NGC 3923, with a rough estimate of metal abundance – A. Kundu and S. Zepf.

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)
- Usa-se também as velocidades dos aglomerados globulares (NGC 1399, chega-se a $\mathcal{M}/L_V \sim 50$)
- A distribuição espacial de massa em halos de matéria escura é frequentemente adotada a partir de simulações de N-corpos:

- **Navarro-Frenk-White**, onde ρ_0 é escala de raio e R_s são parâmetros que mudam para cada halo

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s} \left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}$$

- **Einasto**, onde α controla o grau de curvatura do perfil

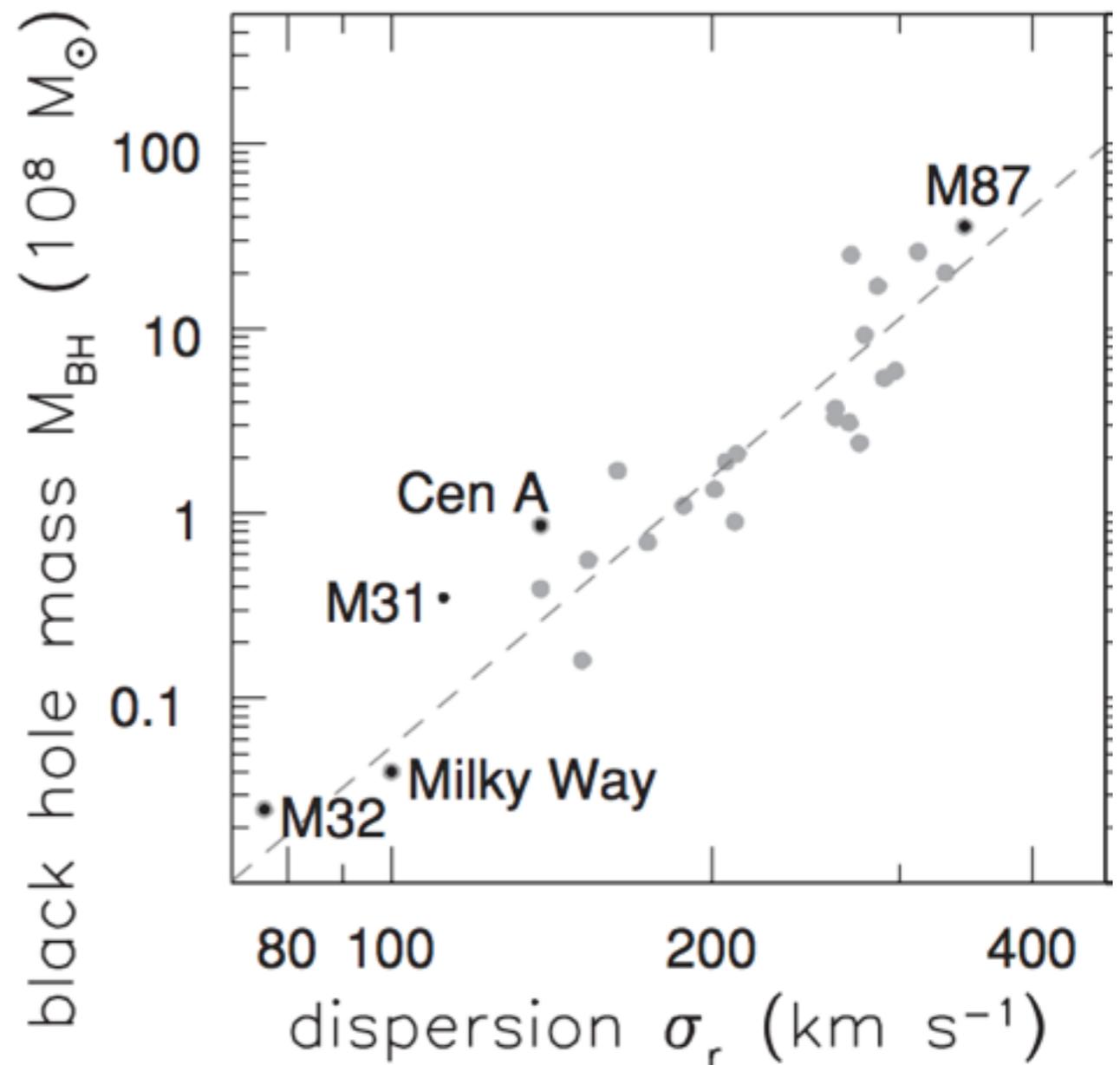
$$\rho(r) \propto \exp(-Ar^\alpha).$$

- "Cuspy halo problem"

Buracos Negros centrais

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

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.



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

Relação Faber-Jackson

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

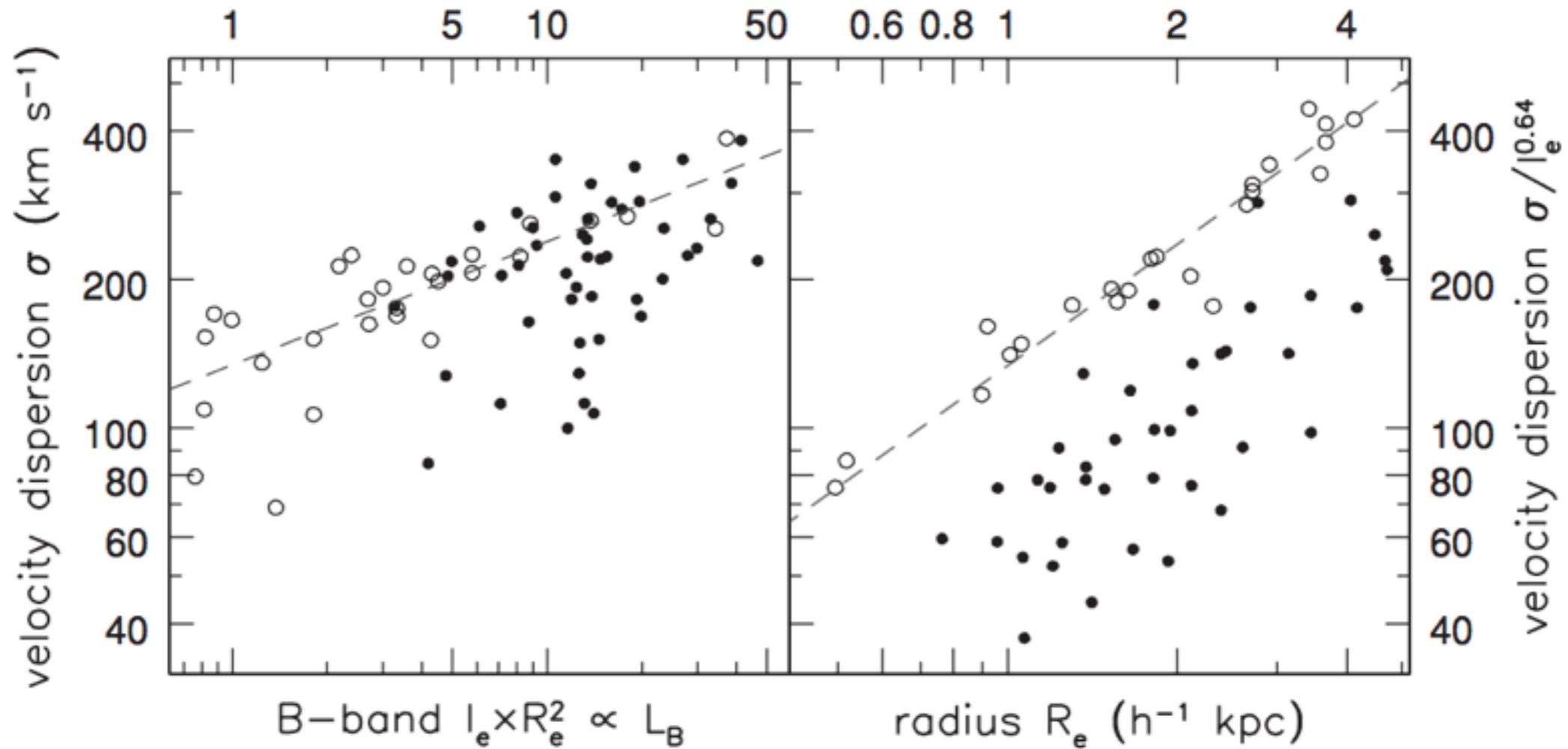


Fig. 6.13. Left, central velocity dispersion σ plotted against $I(R_e)R_e^2$ proportional to luminosity L_B in the B band; the dashed line shows $L_B \propto \sigma^4$. Right, the ‘fundamental plane’. Open circles represent elliptical galaxies in the Coma cluster; filled circles show those at redshifts $0.8 < z < 1.2$ – T. Treu.

Plano Fundamental

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

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

