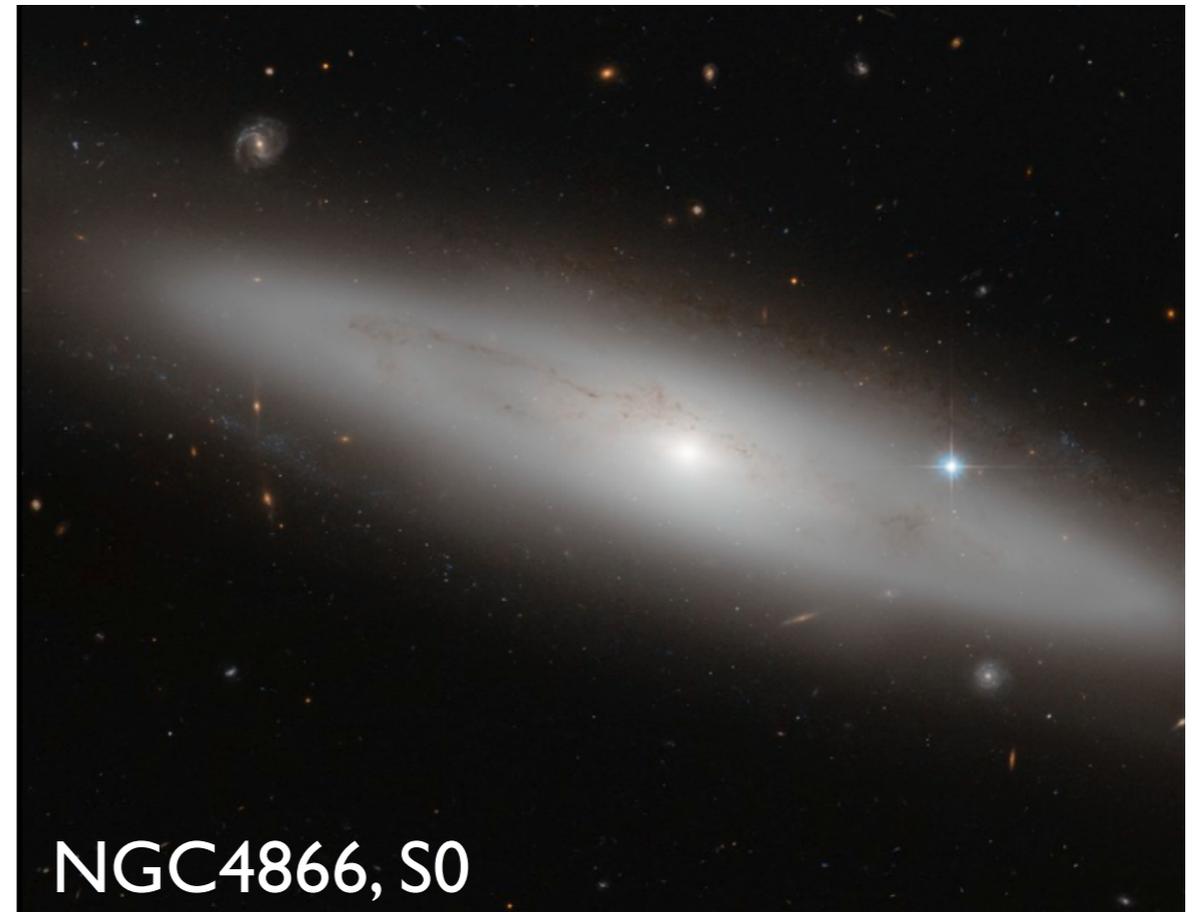


Galáxias Espirais e S0

Capítulo 5 do livro-texto

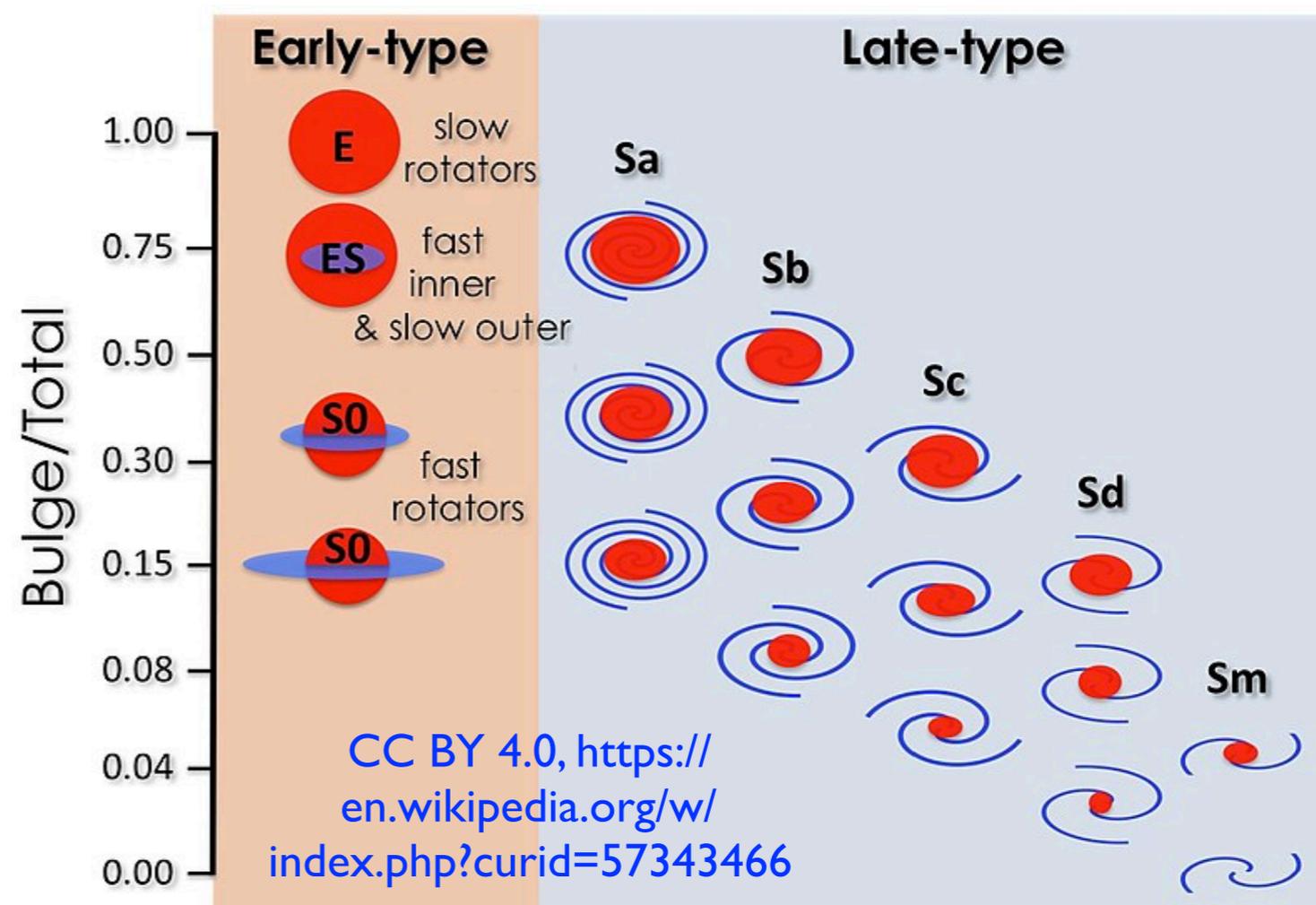
Características gerais

- Espirais e S0 tem em comum o disco, uma estrutura dinamicamente fria.
- A principal diferença está na presença/ausência de braços espirais: as S0 já perderam o seu gás ou o converteram todo em estrelas
- Os dois grupos podem ter barras



Características gerais

- A maioria das galáxias luminosas tem um halo estelar ($L_B \approx 6 \times 10^9 L_\odot$)
- S0, Sa e Sb tem bojos proeminentes : bojos são em geral sistemas dinamicamente quentes e altas densidades de estrelas (10^4 maior do que na vizinhança solar). Em alguns aspectos podem ser considerados como pequenas galáxias elípticas dentro do disco.
- Espirais são as galáxias gigantes mais numerosas do Universo



Fotometria de galáxias disco

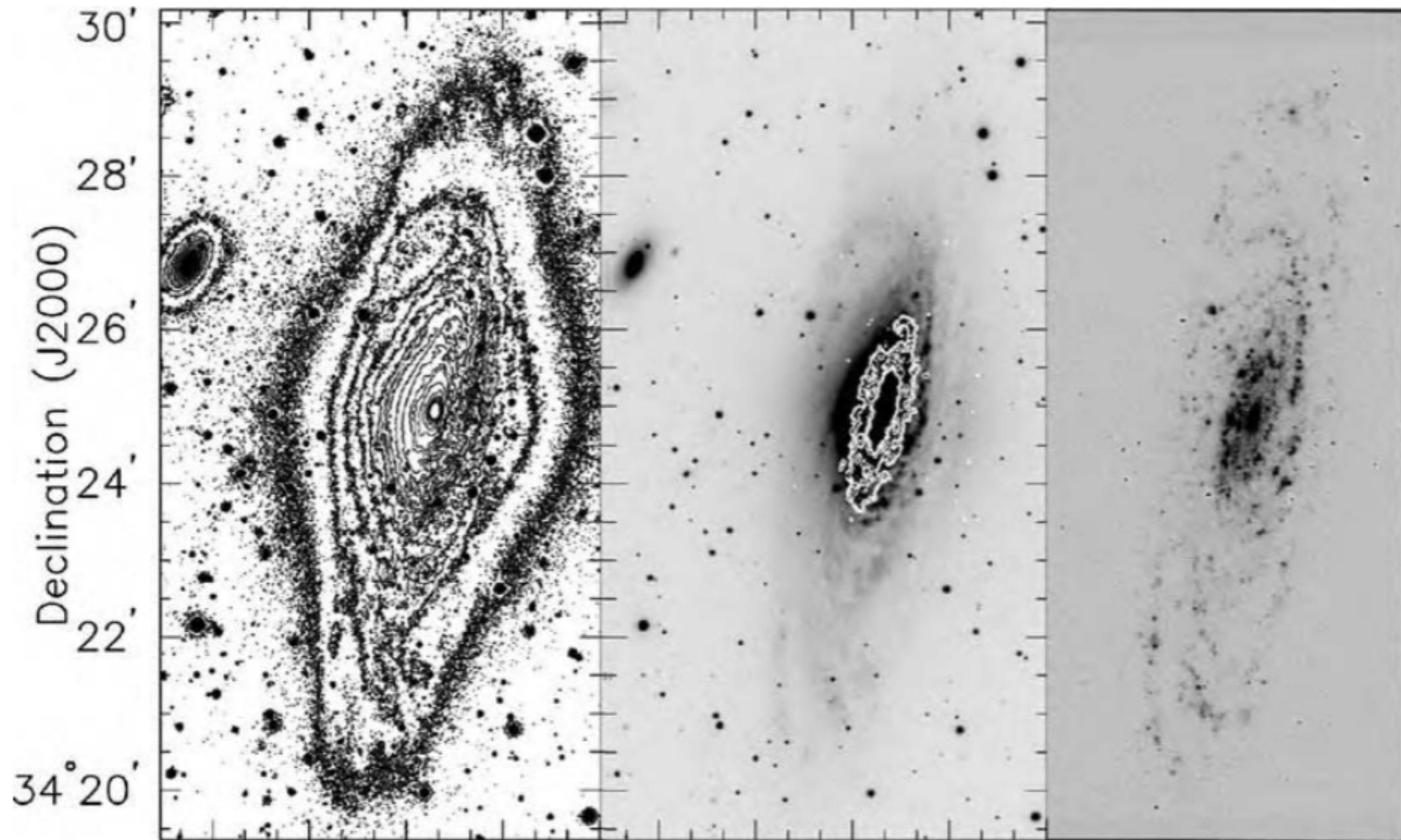


Fig. 5.3. Sb spiral galaxy NGC 7331. Left, isophotes in the *R* band; center, negative image in the *R* band, including a background galaxy, with contours of CO emission overlaid. Right, negative image in $H\alpha$, showing HII regions in the spiral arms – A. Ferguson, M. Thornley, and the BIMA survey of nearby galaxies.

Isofotas

Linhas de brilho superficial constante

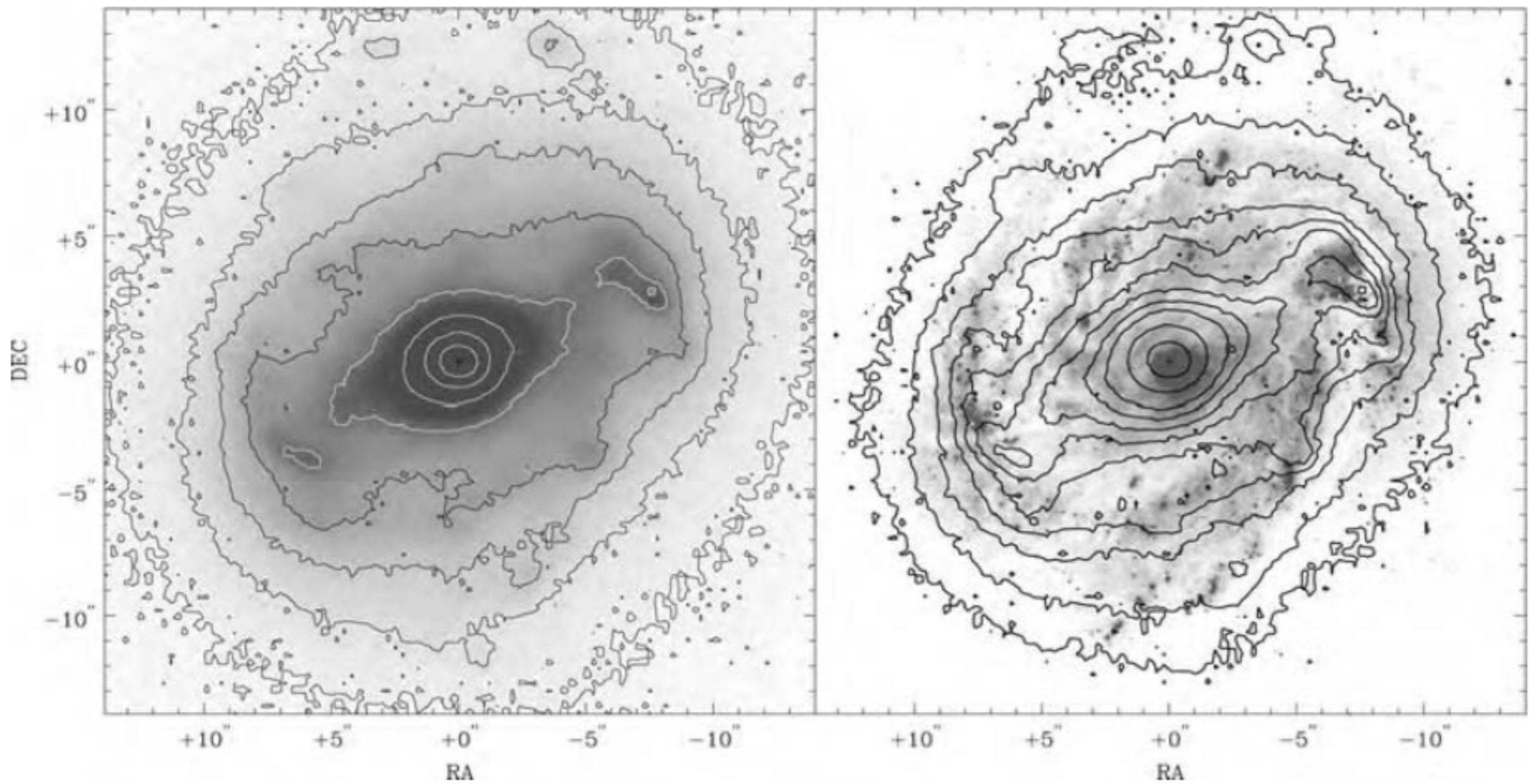


Fig. 5.9. A negative image of inner parts of Sbc galaxy M100 (NGC 4321): $26'' = 2$ kpc. Left, *K*-band image and isophotes at $2.2 \mu\text{m}$, showing a central bar. Right, $\text{H}\alpha$ (visible light) emission from gas around young massive stars, with *K*-band isophotes superposed; the bar is hidden by dust – J. Knapen 1995 *ApJ* **443**, L73.

Barra ou braços?

Depende da banda fotométrica



Fig. 5.10. SBb barred spiral galaxy NGC 3351 (M95). The left image combines ultraviolet light at 1530 \AA and 2300 \AA . We do not see the bar, since it lacks young blue stars; star-forming knots give the spiral arms a fragmented appearance. Right, in visible light we see a strong central bar, surrounded by a ring and smooth spiral arms – GALEX.

Classificação
morfológica

Depende da banda fotométrica.
Morfologia de galáxias em alto redshift
devem ser comparadas a morfologia de
galáxias locais observadas no UV.

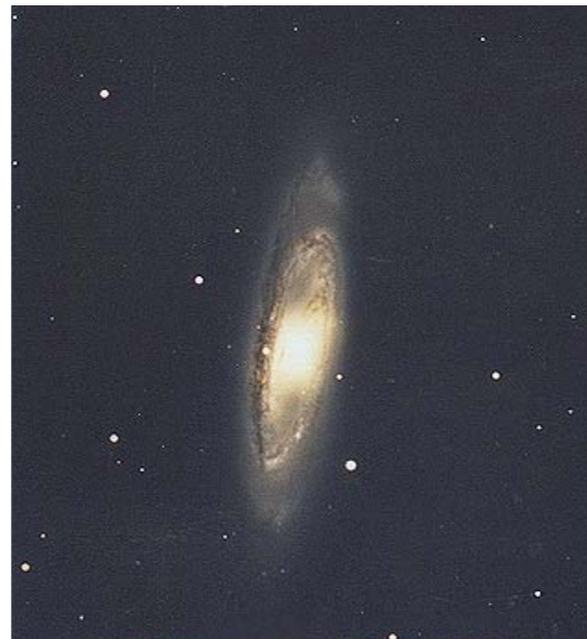
Fotometria de discos

- Se assumirmos que o disco é circular e fino, ele será observado como uma elipse com razão de eixo $\cos i$, onde i é o ângulo de inclinação do disco a partir da posição face-on
- Como os discos tem alguma espessura, aparecerão um tanto mais arredondados
- A inclinação dos discos aumentam o brilho superficial por um fator $1/\cos i$ (ignorando-se efeitos de extinção)

Edge-on



Face-on



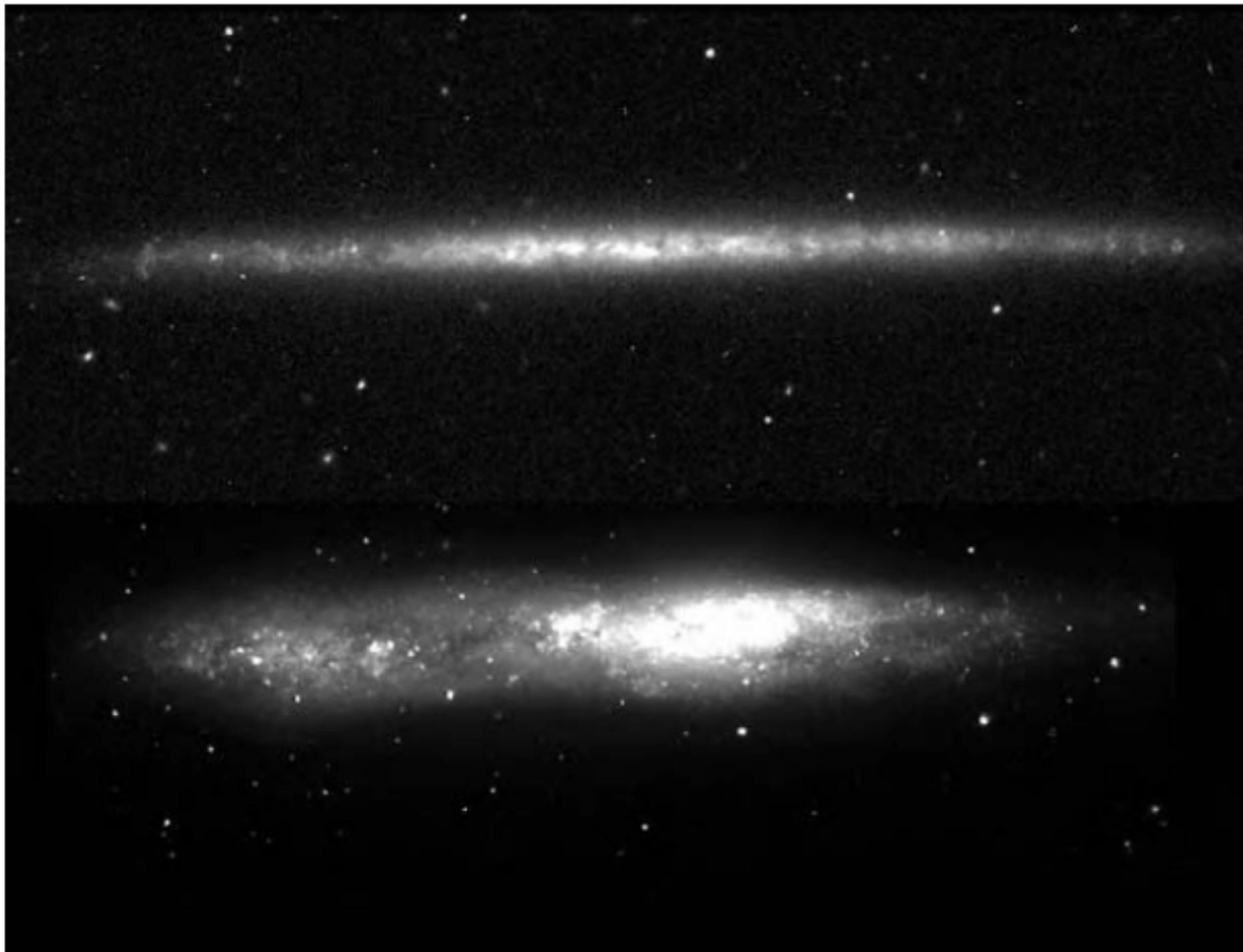


Fig. 5.7. *B*-band images of two very different late-type disk galaxies. Top: ‘superthin’ Sd UGC 7321, viewed $\lesssim 2^\circ$ from edge-on. This is a small galaxy: $L_B \approx 10^9 L_\odot$ at $d = 10$ Mpc – L. Matthews, WIYN telescope. Below: nearby barred Magellanic or irregular NGC 55, about 10° from edge-on. Its linear size is about half that of UGC 7321, and $L_B \approx 2 \times 10^9 L_\odot$ at $d = 1.5$ Mpc. Note the fluffy disk, and off-center concentration of light in the bar – A. Ferguson.

Fotometria de superfície em galáxias disco



NGC891

$$I(R) = I(0) \exp(-R/h_R),$$

$$I(R, z) = I(R) \exp(-|z|/h_z).$$

$$h_z \approx 0.1h_R$$

Em cerca de $(3-5)h_R$, o brilho superficial cai mais bruscamente, fugindo da função exponencial, apesar de gás neutro ainda poder ser detectado além desse R_{max} .

Fotometria de superfície em galáxias disco

Excesso de luz, associado ao bojo.

$$I(R) = I(0) \exp(-R/h_R)$$

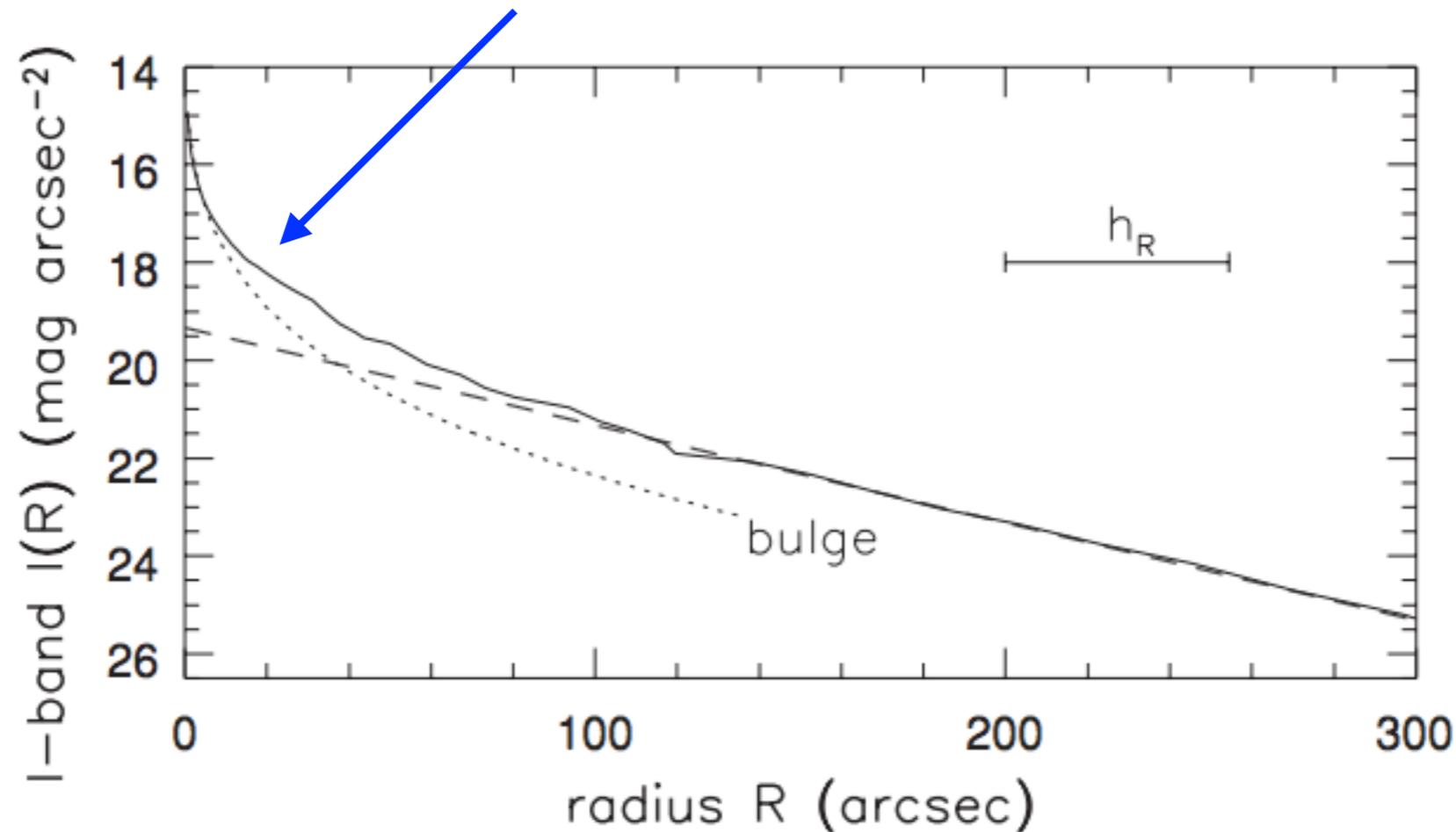


Fig. 5.4. NGC 7331: the solid line shows surface brightness in the I band, near 8000 Å. The dashed line is an exponential with $h_R = 55''$; the dotted line represents additional light – R. Peletier.

Magnitude total aparente de uma galáxia é calculada pela integração do brilho superficial por todo o raio (ex, até a isofota $I_B = 25 \text{ mag arcsec}^{-2}$). As vezes extrapolações são feitas.

Análise estrutural de uma galáxia lenticular

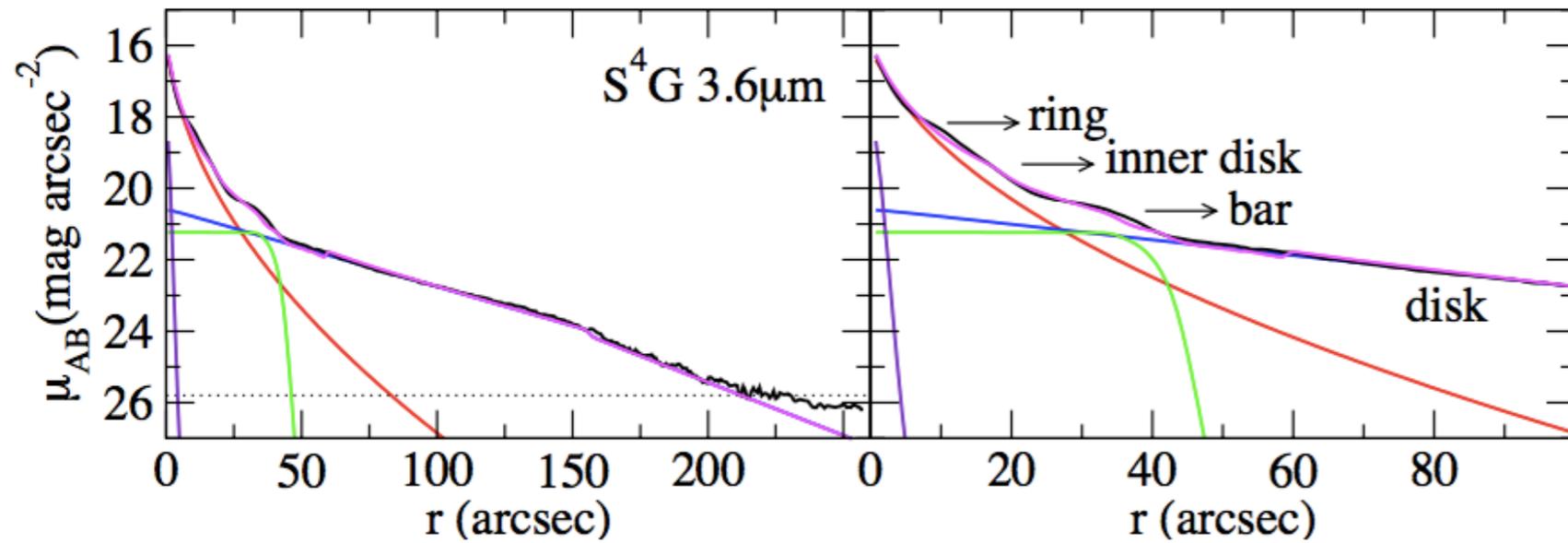


Fig. 2. Surface brightness radial profile of NCG 4371. The top panels show only the profile derived from ellipse fits to the S⁴G image. The bottom panels also show the profiles of the different model components obtained with BUDDA: bulge in red, disc in blue, bar in green, and central point source in violet. The profile corresponding to the total BUDDA model is in magenta. The horizontal dotted line marks the surface brightness level below which the background noise becomes important. The panels on the right focus on the inner 90". The outer exponential

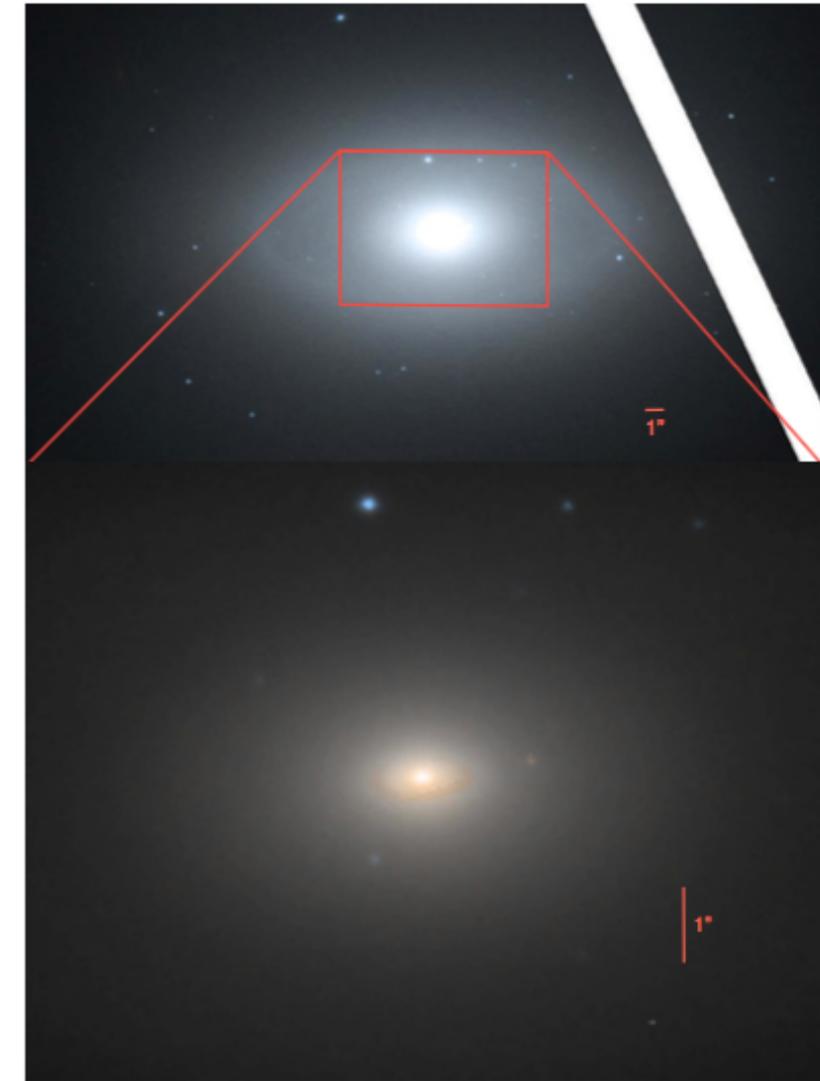


Fig. 7. Colour composites produced from HST images (*F850LP* and *F475W*) at the *Hubble Legacy Archive* website. *Top*: a clear view of the 10" ring. *Bottom*: the very inner region of NGC 4371. The blue point source in the north is $\approx 4''$ from the centre. The *bottom panel* clearly shows distinct features in the very centre, all elongated, with major axes positioned along the east-west direction. From inside out, a bright yellow-reddish, slightly less elongated structure with a semi-major axis of $\approx 0.15''$. Further out, a dusty ring with semi-major axis of $\approx 0.6''$, and just at the outer rim of it, at $\approx 0.8''$, a bluish ring. These dusty disc-like structures were also noted by Ferrarese et al. (2006; see also Comerón et al. 2010). North is up, east is to the left.

Análise estrutural de uma galáxia lenticular

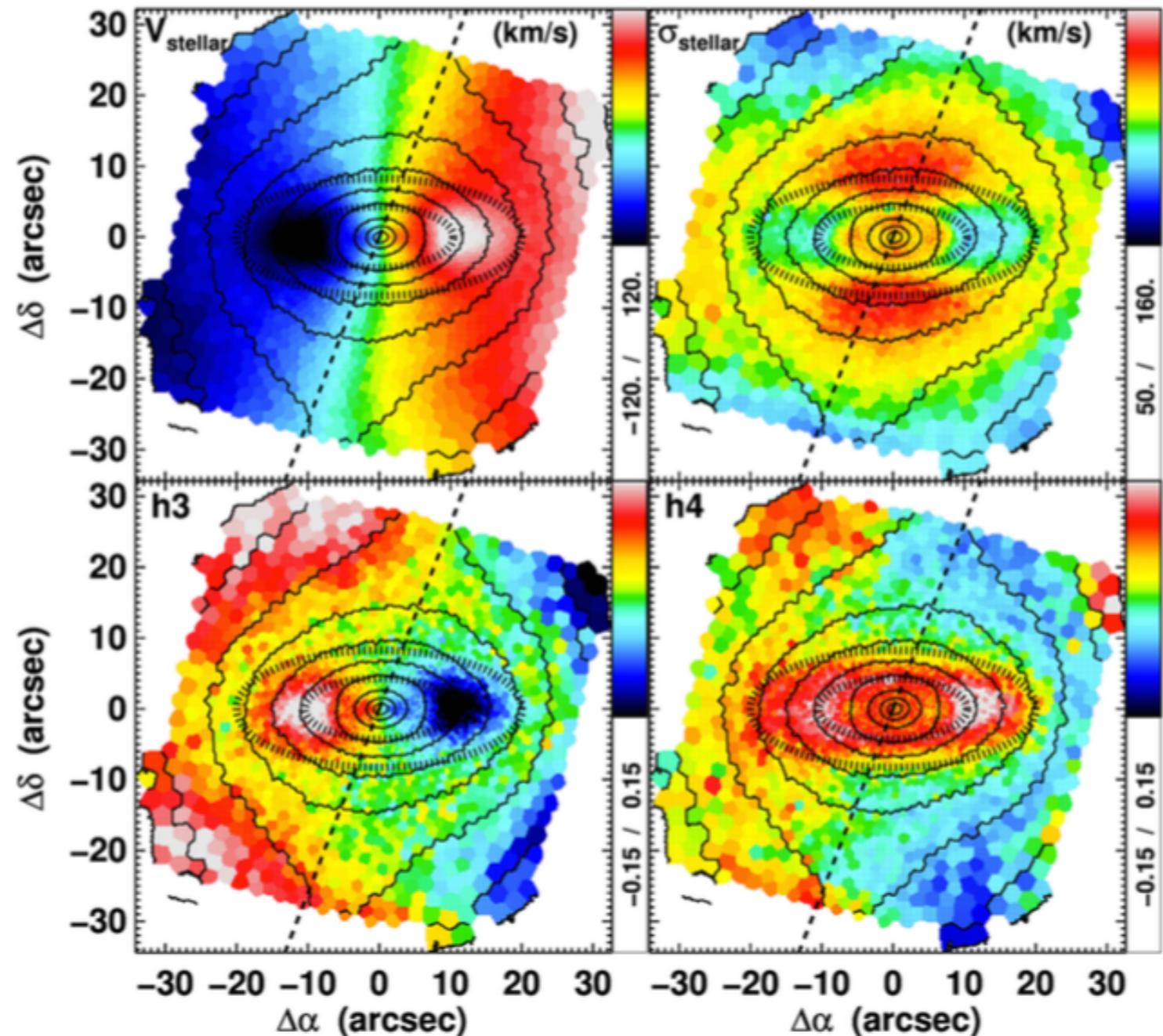


Fig. 10. Radial velocity, velocity dispersion, and h_3 and h_4 maps for the stellar component in NGC 4371, as indicated. The colour bars on the side of each panel indicate the plotted range of the parameter measured. For radial velocity and velocity dispersion these are given in km s^{-1} . The isophotes shown are derived from the MUSE cube reconstructed intensities and are equally spaced in steps of about 0.5 mag. North is up, east to the left. The nearly vertical dashed line indicates the position of the bar major axis. The horizontal elongated markings indicate the outer boundary of the region dominated by the inner disc, at $\sim 20''$, as derived through the ellipse fits, and the position of the $10''$ ring.

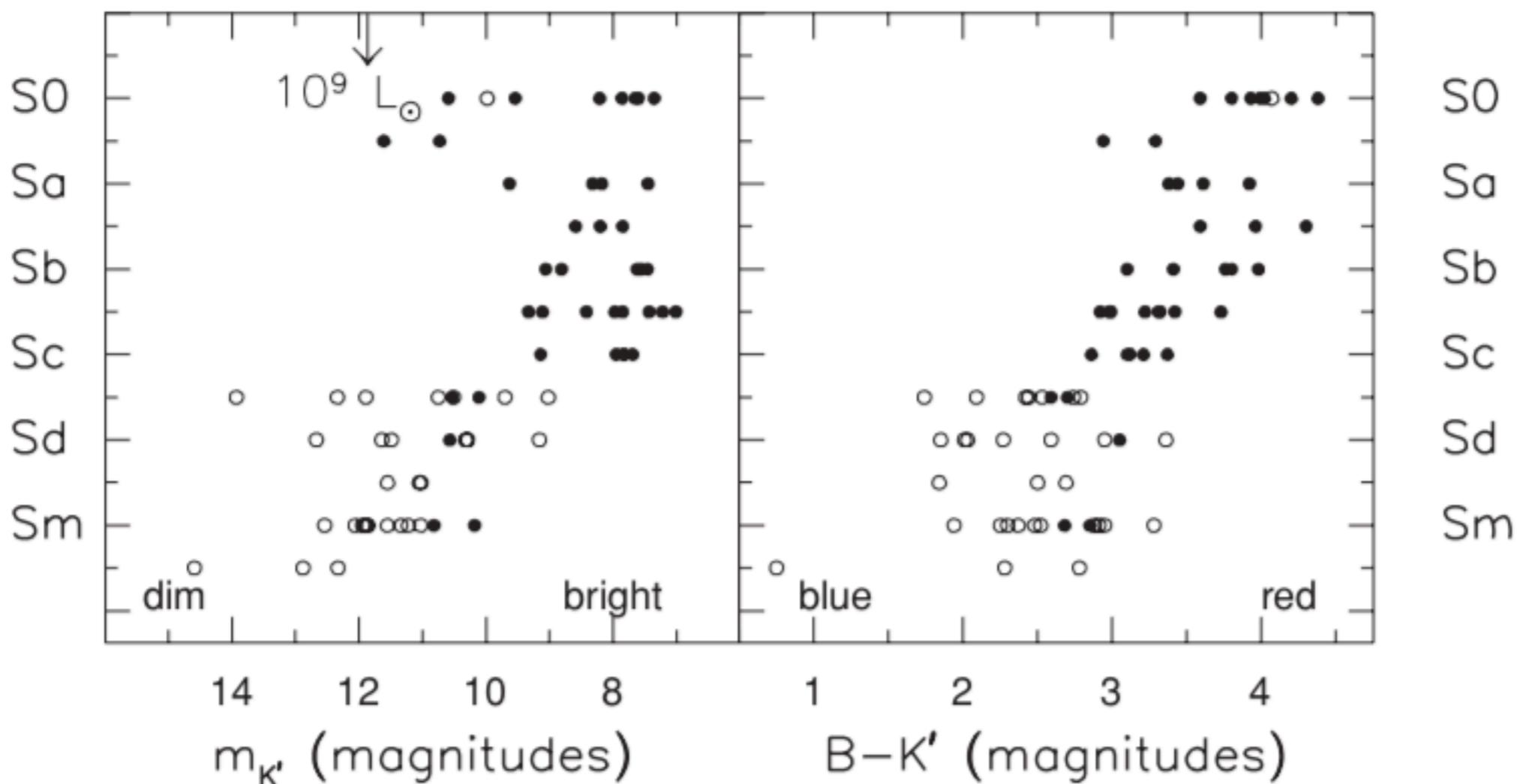


Fig. 5.6. Apparent magnitude $m_{K'}$ and $B - K'$ color of galaxies in the Ursa Major group, plotted by galaxy type. Galaxies to the right of the arrow have $L > 10^9 L_{\odot}$ at the group's distance of 15.5 Mpc. Open circles show galaxies for which the disk has lower central brightness: $I_{K'}(0) > 19.5$. On average, S0 galaxies are luminous and red, while the Sd and Sm systems are fainter and bluer – M. Verheijen.

Sobre espirais e barras

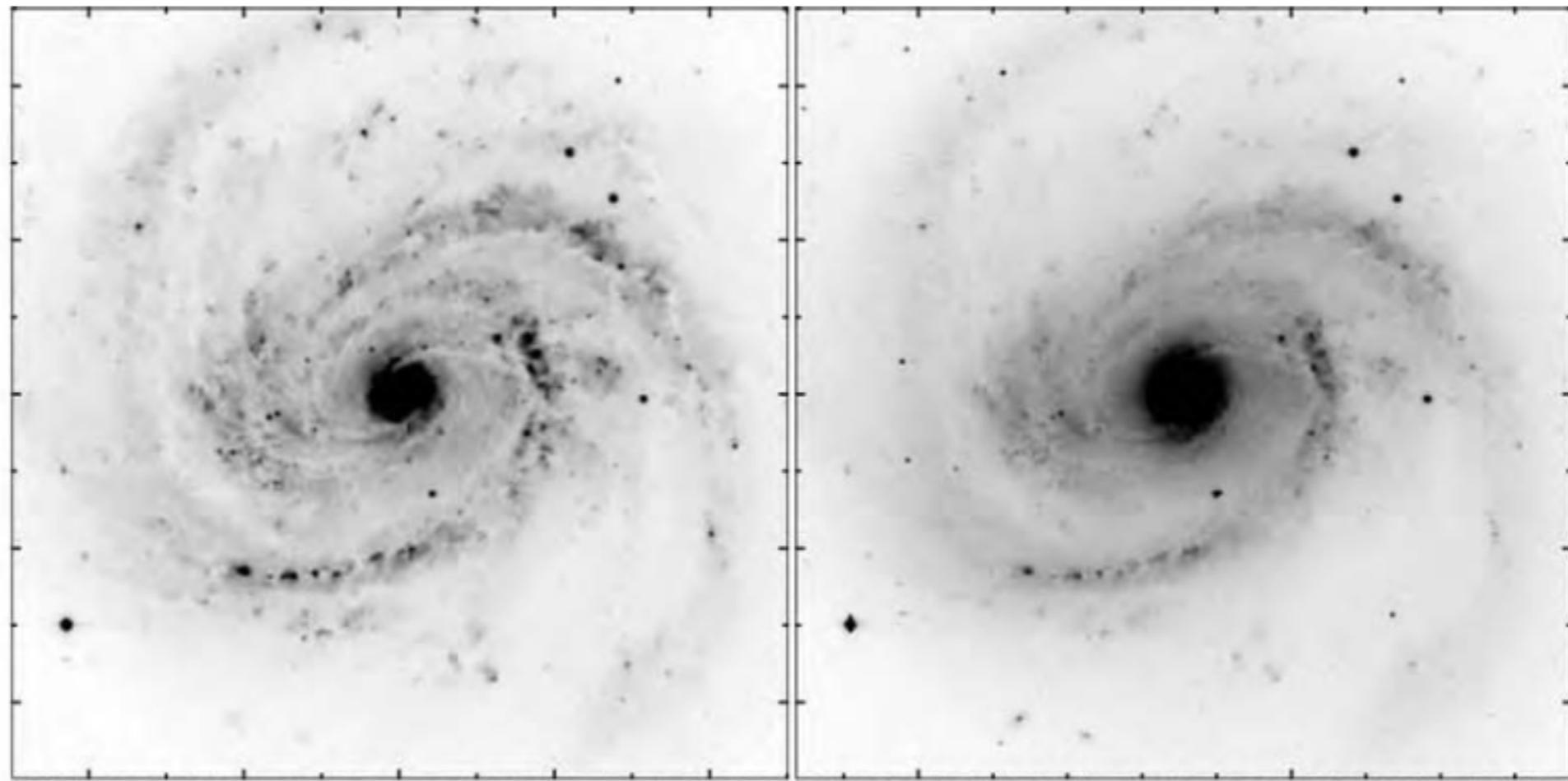
Espirais & Barras

- Quase todas as galáxias luminosas que contêm gás frio tem braços espirais
- Duas propriedades do disco parecem ser essenciais:
 - rotação diferencial, que distorce nuvens de gás em segmentos "trailing"
 - auto-gravidade, que permite que o padrão espiral se fortaleça, alimentado pela energia de rotação galáctica
- Gás não parece ser essencial para barras: galáxias S0 tem aproximadamente a mesma frequência de barras de espirais ricas em gás

Os padrões espirais

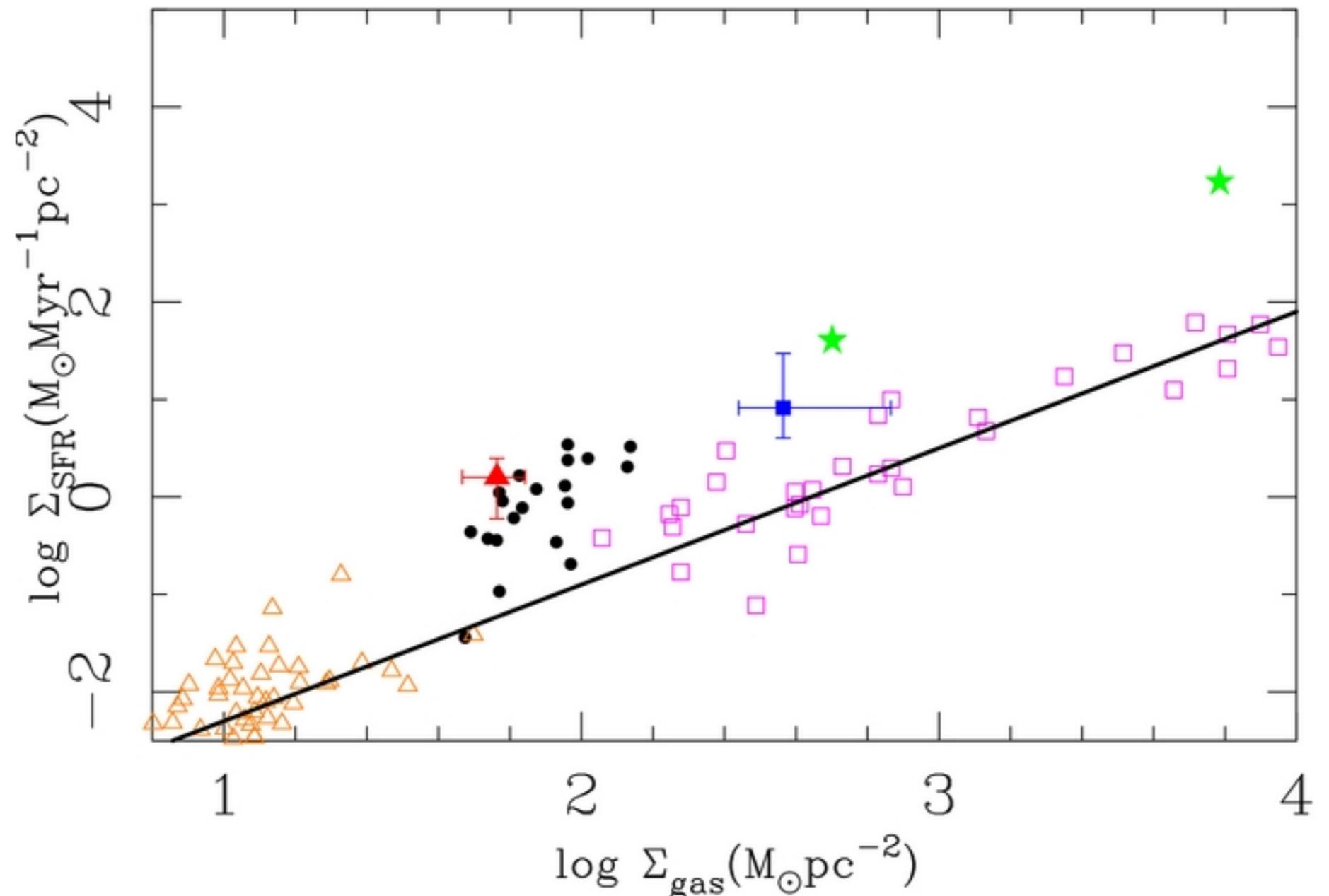
- Os braços são mais azuis do que o resto do disco, com emissão H α
- Estrelas energéticas o suficiente para ionizar o gás vivem apenas 10 Myr
- Padrões *grand design* podem ser traçados por vários radianos
- O número de braços em geral varia de 2 a 4

Fig. 5.26. Sbc galaxy
M100: $26'' = 2$ kpc. B
band (left) and I
band (right); in these
negative images, dark
dust lanes just inside
the bright spiral arms
appear as thin light
filaments.



Lei de Kennicutt - Schmidt

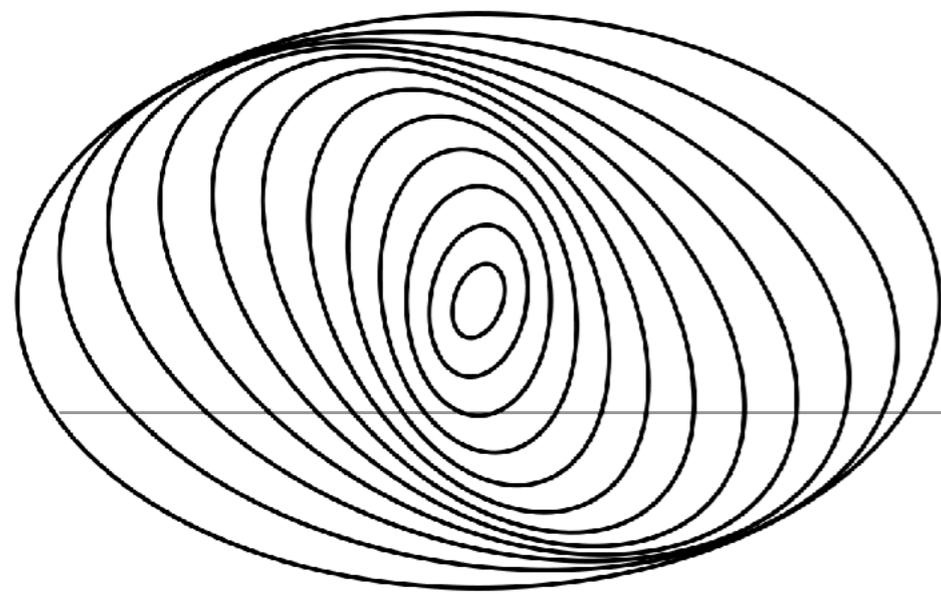
Kennicutt–Schmidt relation comparing the observed star formation rate surface density and gas mass surface density. NGC 6334 is the blue box and the error bars correspond to the uncertainty in the mass estimates of the YSO population and the molecular cloud. Orion is shown as a red filled triangle with corresponding errors bars at the star formation rate surface density derived with our method. Low-mass star-forming regions from Spitzer's c2d and GBS programs are plotted as filled black circles. W43 and G035.39, two Galactic massive star-forming regions identified as prototypical "mini-starbursts" (Motte et al. 2012), are plotted as green stars. The open triangles show a sample of normal spiral galaxies and the open boxes show starburst galaxies. The line marks the Kennicutt–Schmidt relation with $\alpha = 1.4$. The vertical offset between the extragalactic and the Galactic star-forming regions likely results from the beam of extragalactic observations being diluted by non-star-forming gas.



Teorias para a Estrutura Espiral

- A estrutura espiral é um fenômeno complexo e provavelmente não há apenas um processo responsável por todos os fenômenos espirais
- Os três modelos principais que co-existem são:
 - ***self-propagating star formation***, devido às regiões de formação estelar serem distorcidas pela rotação diferencial (espirais flocculentas)





Teorias para a Estrutura Espiral

- **Espirais cinemáticas,** formadas pelo deslocamento relativo entre órbitas estelares elípticas

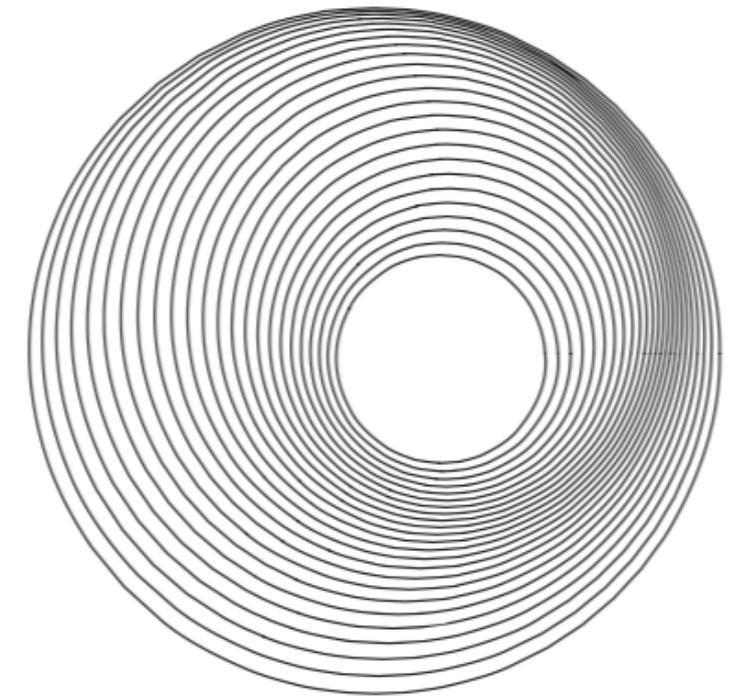
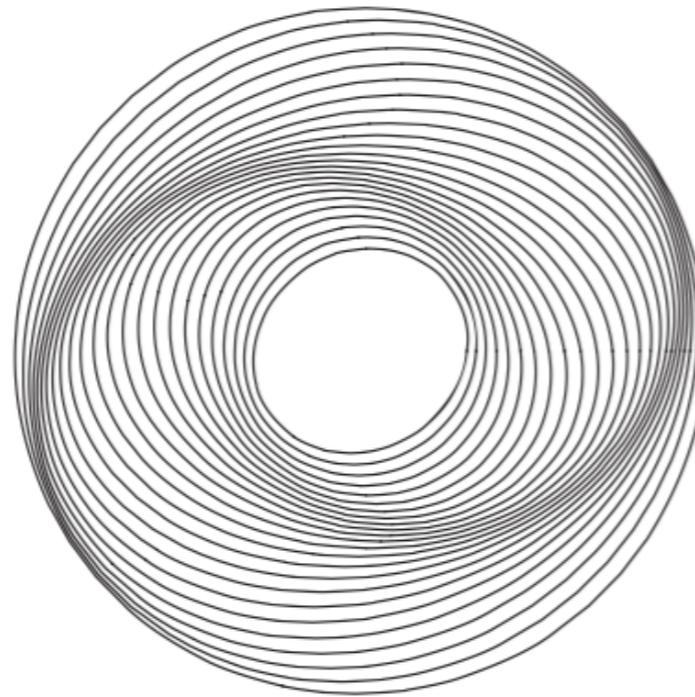
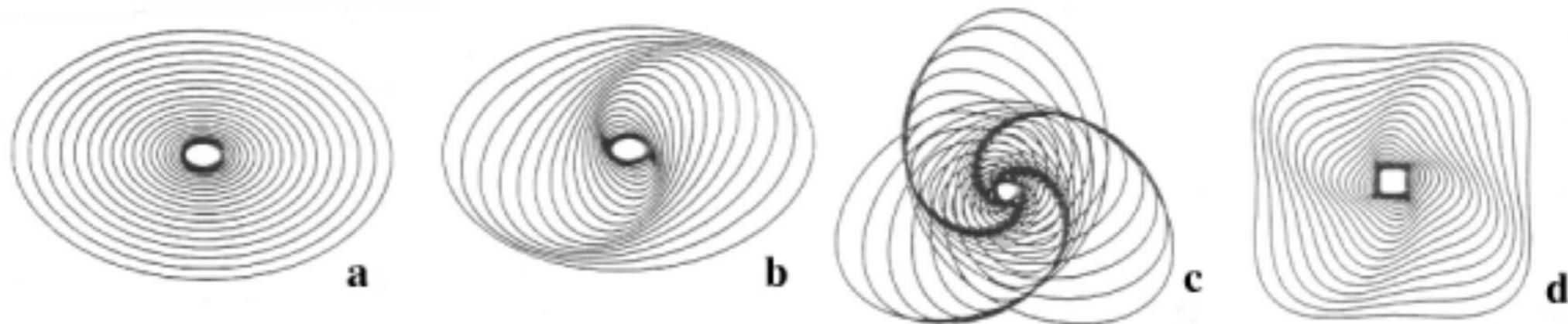
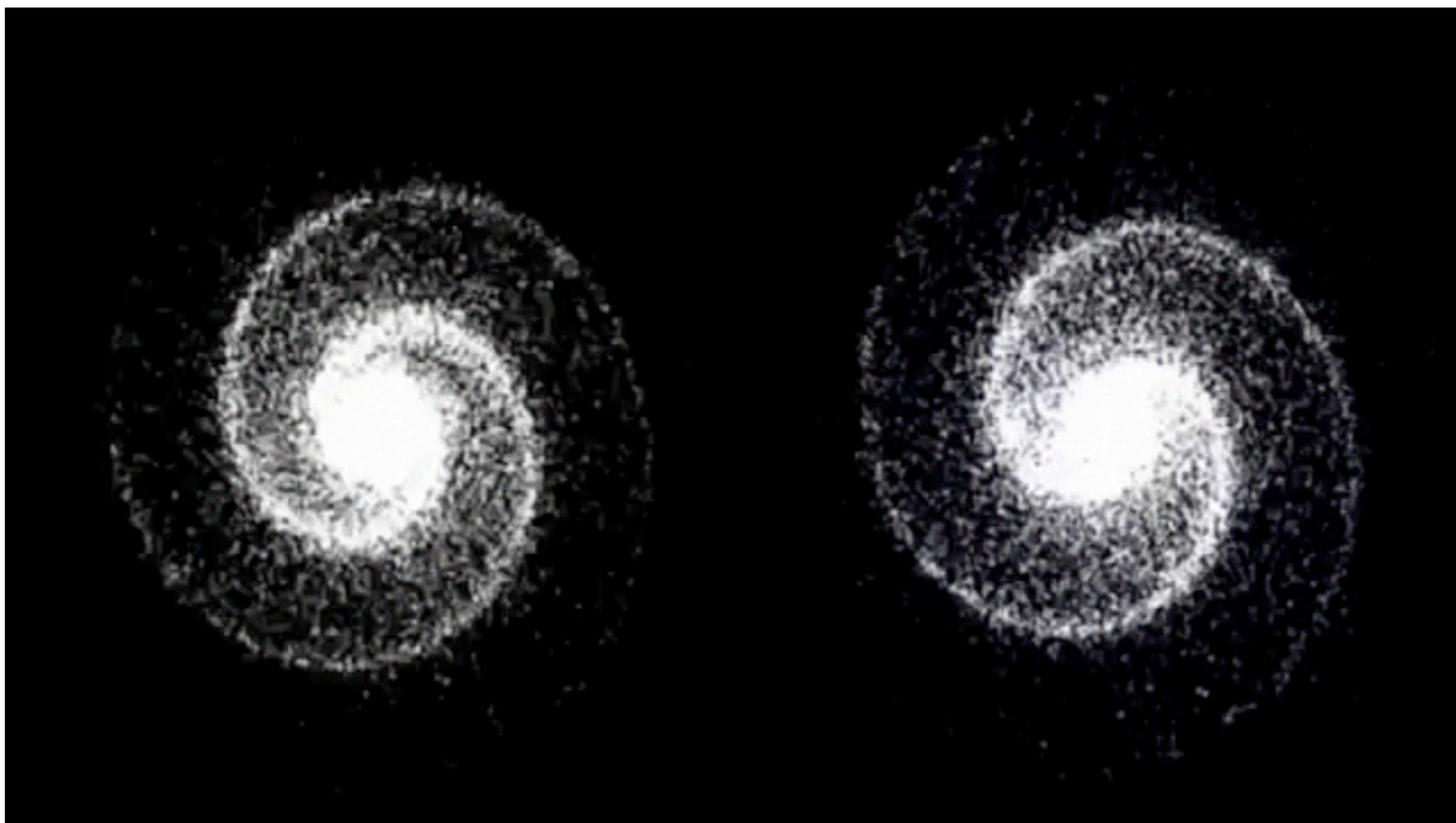


Fig. 5.29. Left, oval orbits nested to form a two-armed spiral; the equation of the pattern is $R = R_g \{1 + 0.075 \cos[2(5 - 5R_g + \phi)]\}^{-1}$, and $0.3 < R_g < 1$. Right, a one-armed spiral, with $R = R_g [1 + 0.15 \cos(5 - 5R_g + \phi)]^{-1}$.



Teorias para a Estrutura Espiral

- Ondas de Densidade de Lin-Shu (década 60): os braços espirais são manifestações de ondas de densidade de formato espiral



https://www.youtube.com/watch?v=_GNPvYdvZAQ

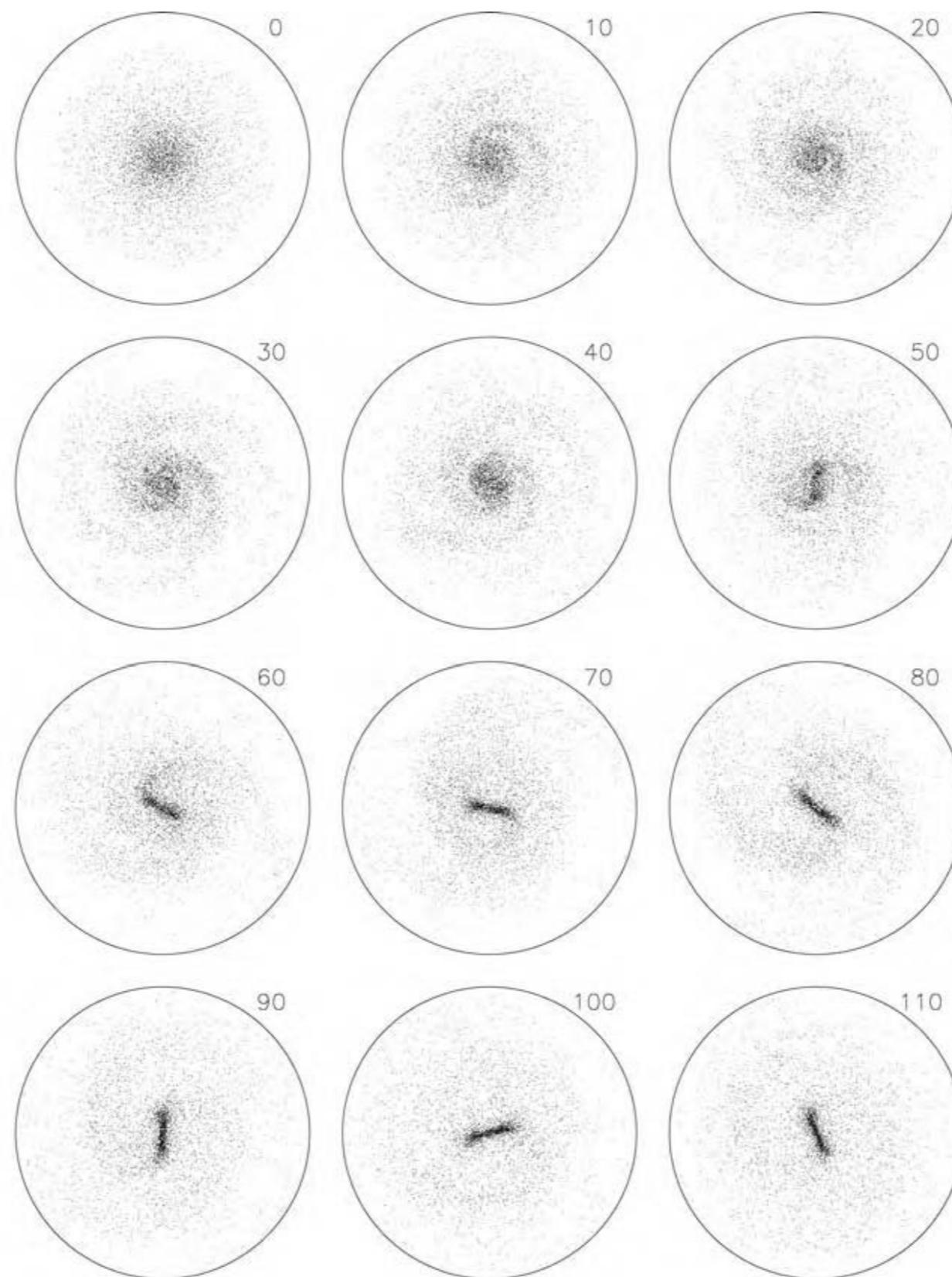


Fig. 5.31. Gravitational N -body simulation showing how a disk of 50 000 particles that attract each other by gravity develops first a two-armed spiral pattern, then a bar. The galactic bulge and dark halo are represented by a fixed inward force. The disk begins with $Q = 1$, as defined in Equation 5.12. For a galaxy of mass $2 \times 10^{11} M_{\odot}$ within the disk radius of 16 kpc, the run time corresponds to 2.65 Gyr – J. Sellwood.

Barras

- cerca de metade das galáxias disco tem uma barra, que contém aproximadamente 1/3 da luz total da galáxia
- as barras tem escala de altura semelhante a do disco, e as razões entre os eixos maiores e menores pode ser tão extremas quanto a galáxia NGC1300 (~1:5)
- ao contrário dos braços espirais, barras podem existir na ausência de gás



Fig. 5.32. The barred galaxy NGC 1300, classified as SBb or SBbc. The spiral arms trail; note the dust lanes on the leading edge of the bar – WIYN telescope.

Barras

- Ainda não entendemos muito bem como barras se formam
- Assim como os braços espirais, as barras não são estáticas e rotacionam com uma velocidade Ω_p .
- ao contrário de braços espirais, as barras **não** são ondas de densidade: as estrelas que estão na barra permanecem na barra
- dentro da barras, as órbitas não são mais quase-circulares
- as força gravitacionais altamente assimétricas da barra “ajudam” o gás a perder momento angular e cair em direção ao centro
- não há nada que previna uma galáxia de desenvolver uma barra com Ω_p diferente dos braços espirais (ou mais de um padrão espiral com velocidades diferentes!)

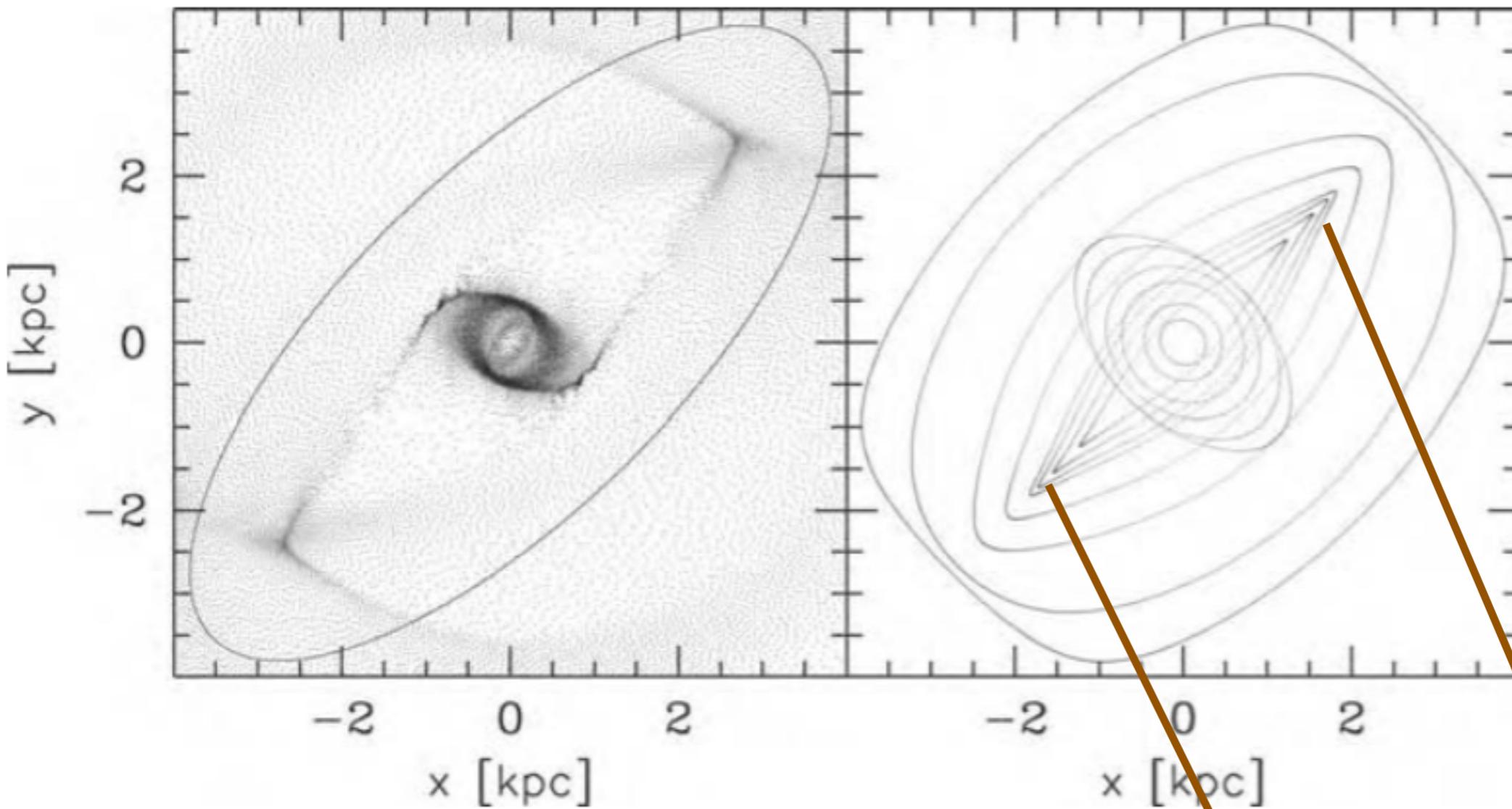


Fig. 5.33. Left, gas density from a computer simulation of flow within a bar; the solid curve outlines the bar, rotating clockwise. Right, particle orbits that close on themselves in a frame rotating with the bar. The gas flow is compressed in shocks along the leading edge of the bar, where the aligned orbits have their greatest curvature – P. Englmaier, after *MNRAS* **287**, 57 (1997).

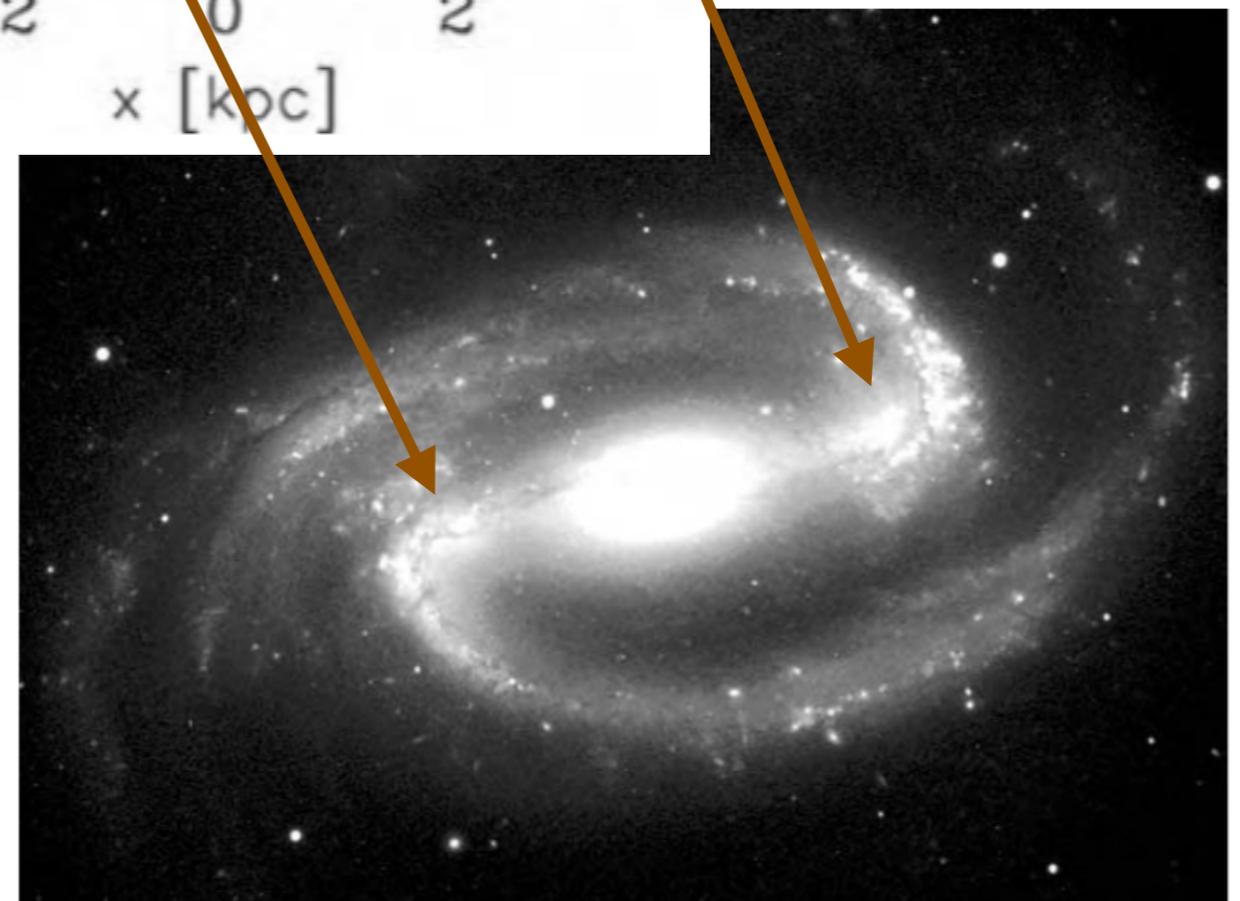
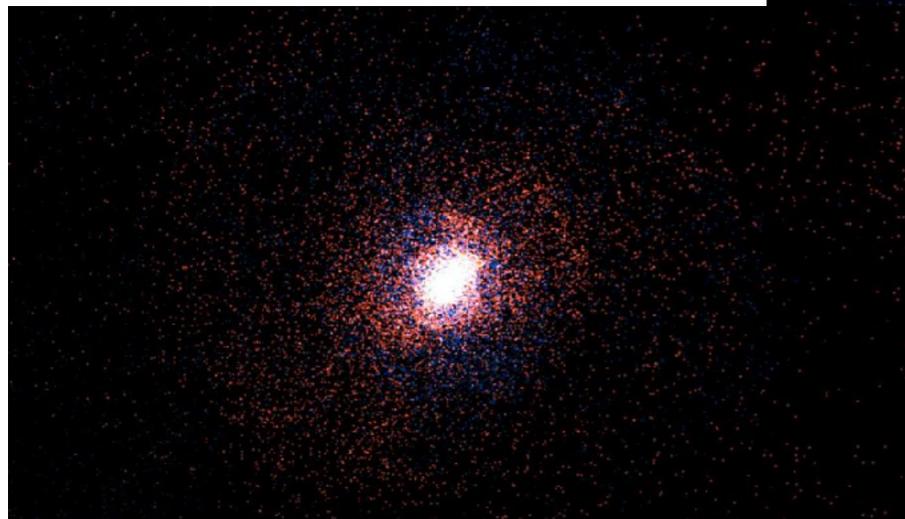
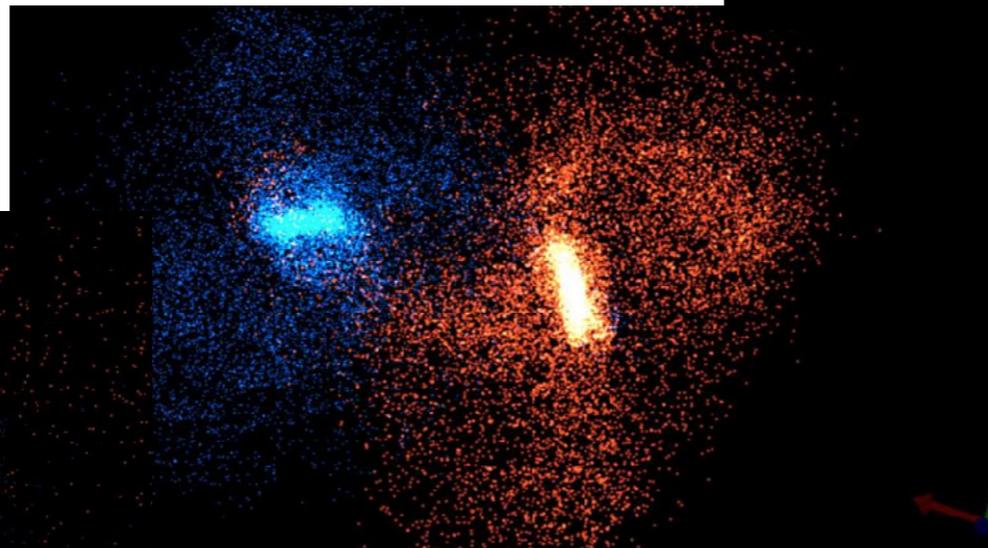
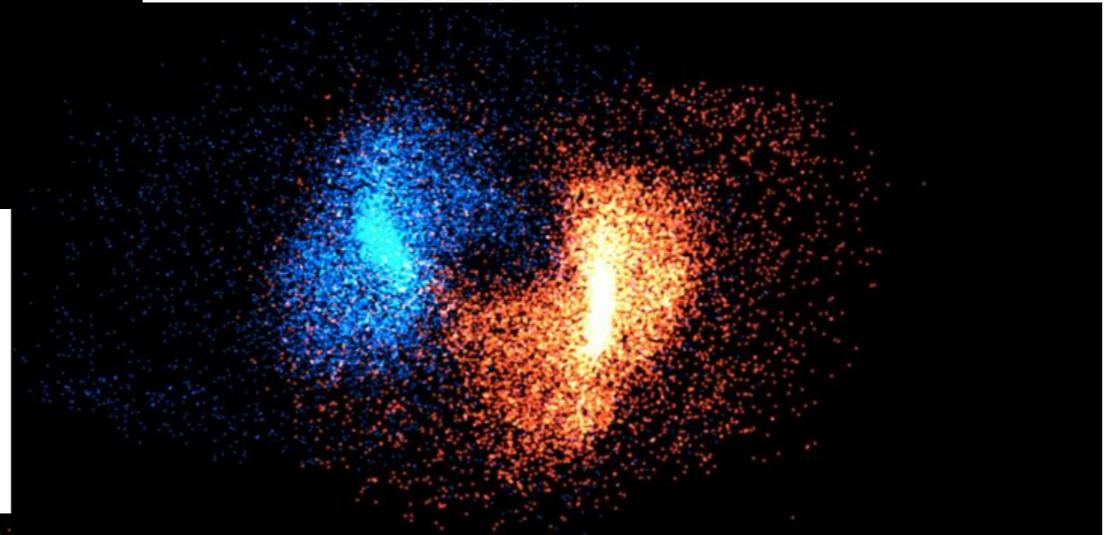
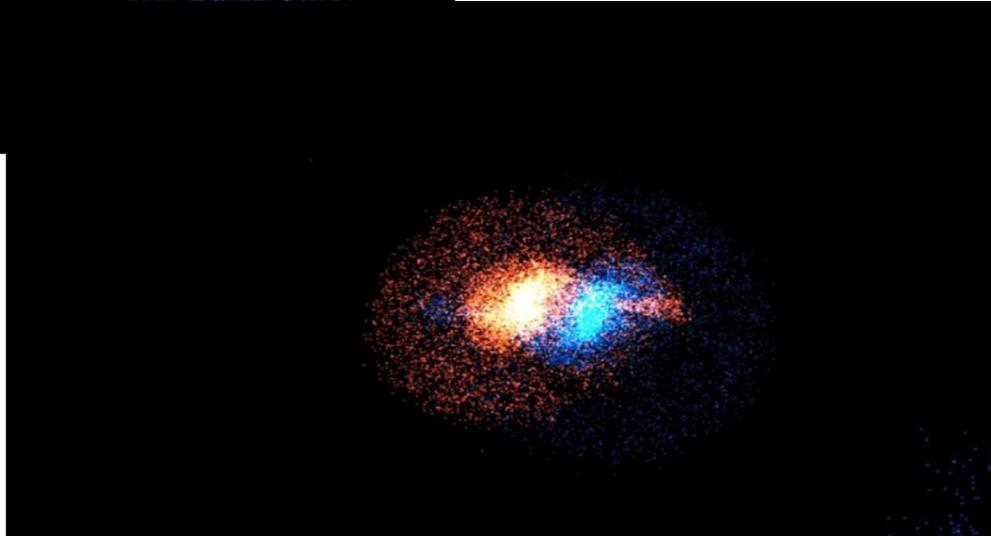
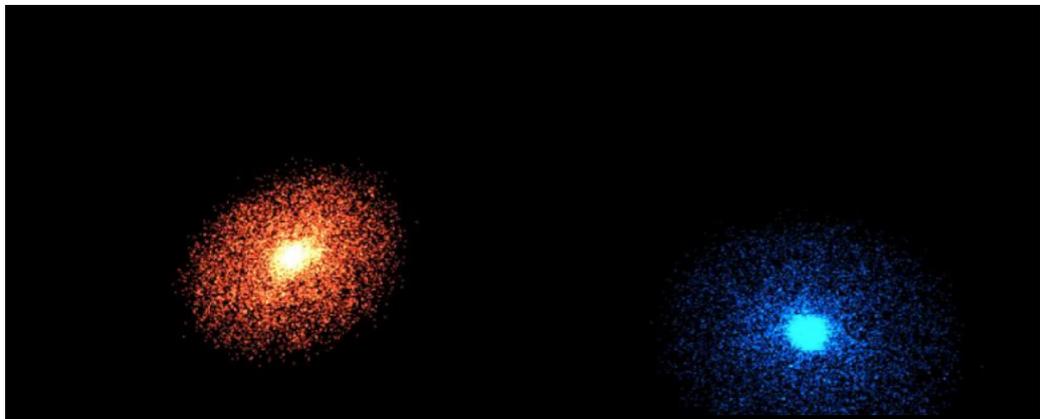


Fig. 5.32. The barred galaxy NGC 1300, classified as SBb or SBbc. The spiral arms trail; note the dust lanes on the leading edge of the bar – WIYN telescope.

Nossa simulação da fusão de dois discos



Anéis

Galáxia Cartwheel



NGC4650A

Polar ring lenticular galaxy



NGC660

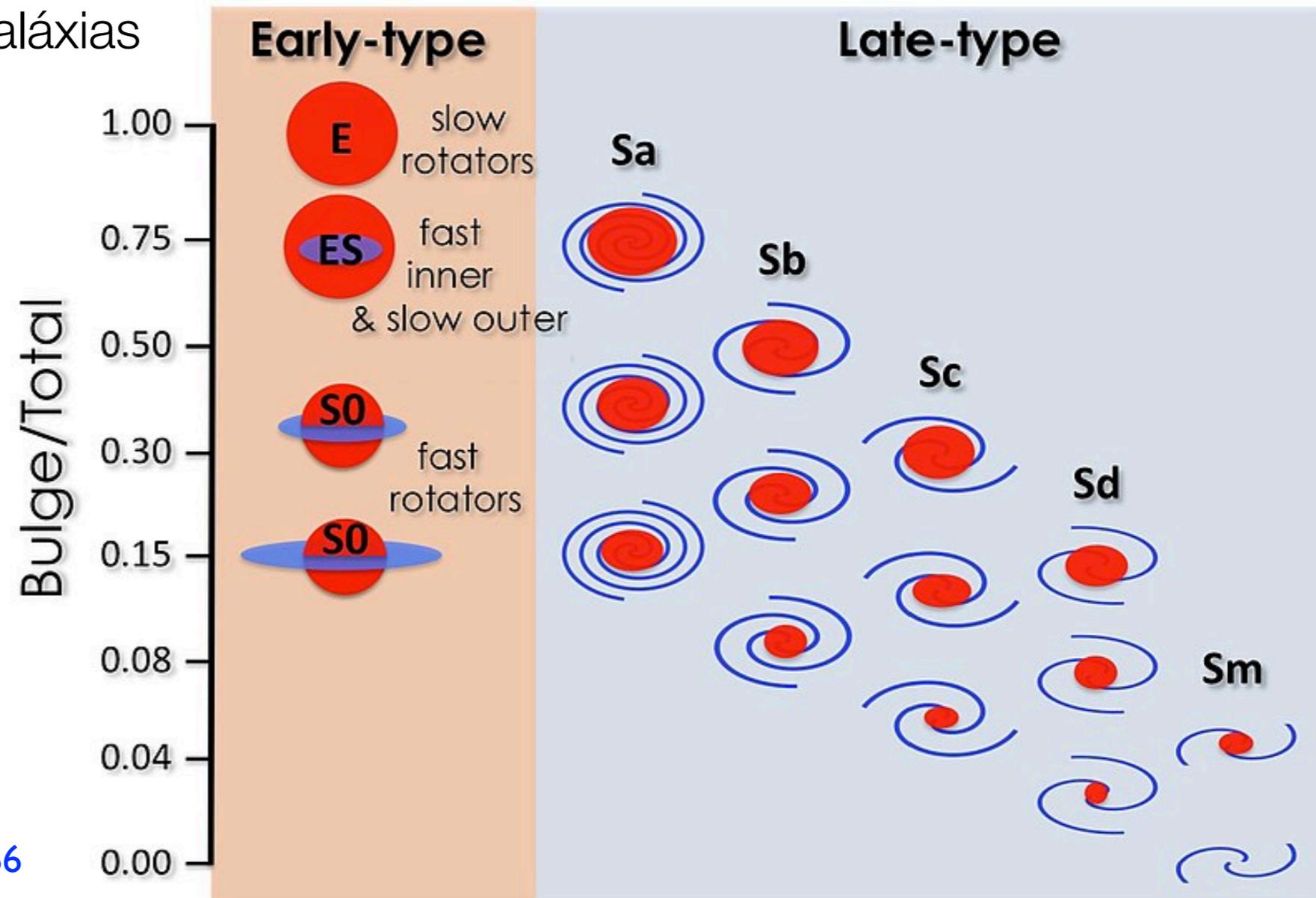


NGC4371



Lenticulares

- São únicas no sentido que contém tanto um disco proeminente quanto um bojo.
- Mas não tem a estrutura espiral característica de outras galáxias disco.



Bojos e as regiões centrais de galáxias disco

Bojos em galáxias disco



- Mais proeminentes em S0 e Sa
- Isofotas são mais arredondadas do que o disco
- Bojos e o centro de galáxias elípticas pequenas estão entre os sistemas estelares mais densos conhecidos

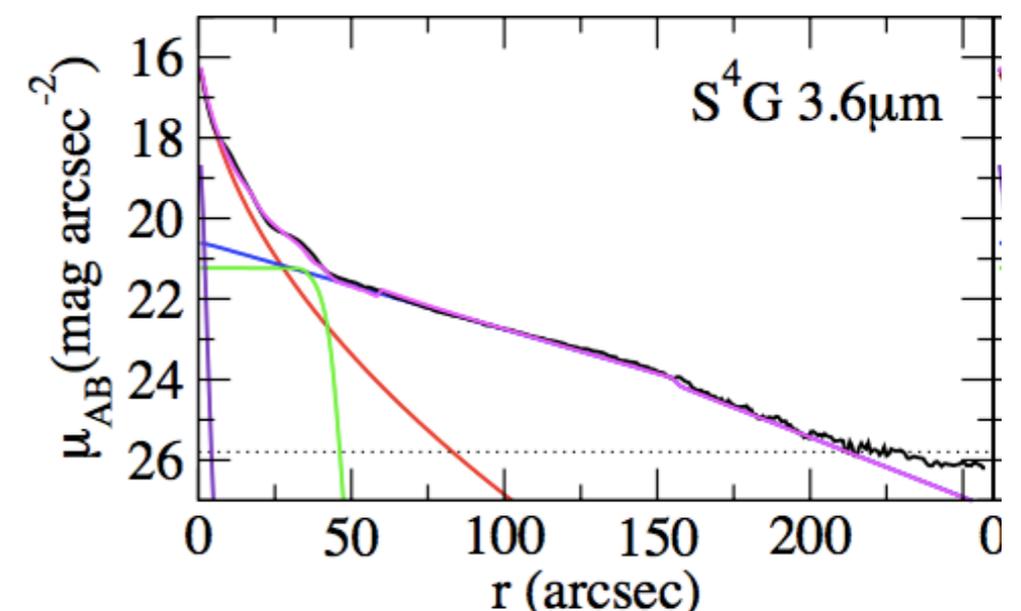
Fig. 5.5. A V -band image of Sa galaxy M104, the ‘Sombrero’ (NGC 4594): this is a luminous galaxy with $L_V \approx 8 \times 10^{10} L_\odot$, about 10 Mpc away. Note the large bulge and numerous globular clusters – A. Cole, WIYN telescope.

Bojos

- As estrelas do bojo tem um padrão de rotação em comum, mas são dinamicamente mais quentes do que o disco, com $V/\sigma \sim 1$
- O brilho superficial de um bojo é em geral bem descrito pela fórmula de Sérsic:

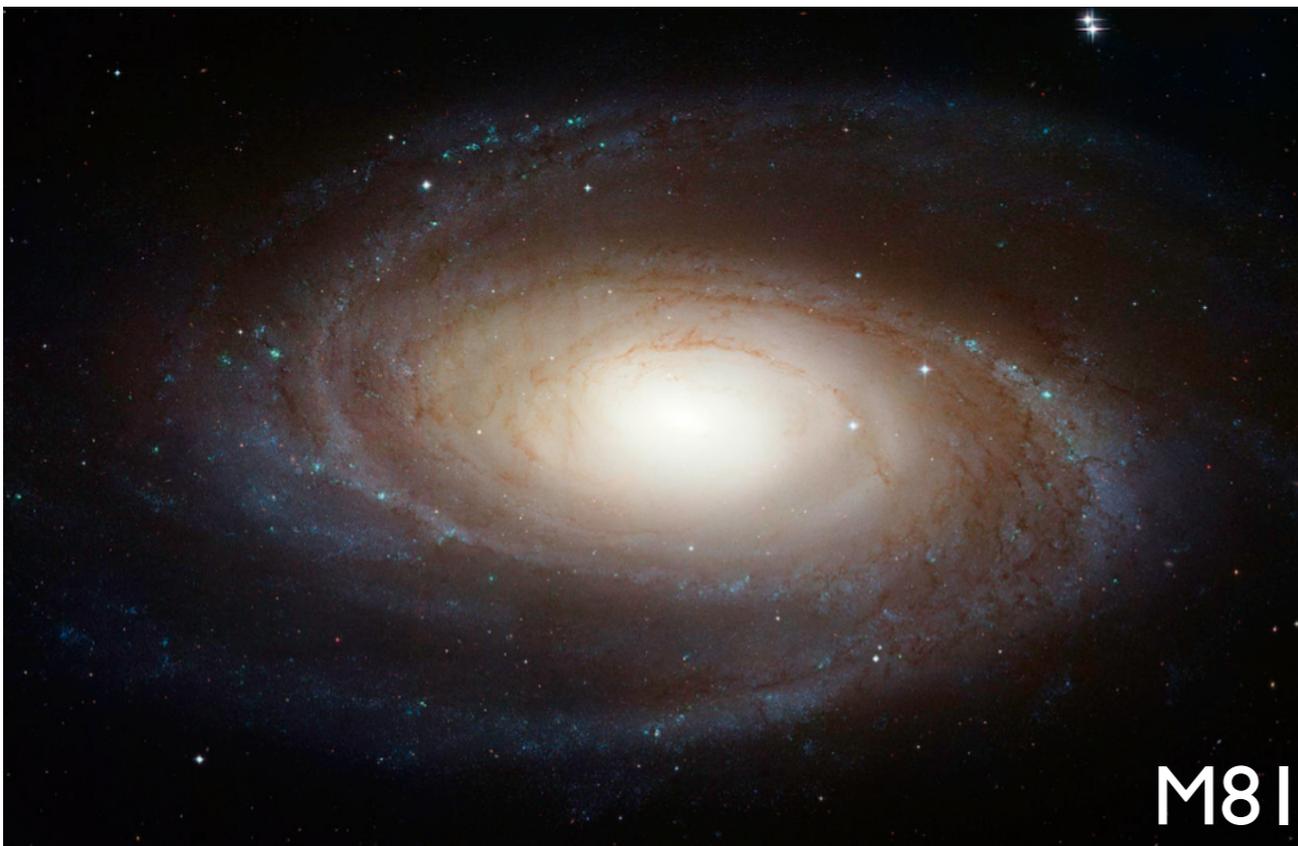
$$I(R) = I(0)\exp[-(R/R_0)^{1/n}]. \quad (5.13)$$

- quando $n = 1$, é a mesma expressão de um disco, e quando $n = 4$ temos o perfil de *de Vaucouleurs* (desenvolvido para descrever a distribuição de luz de galáxias elípticas)
- geralmente parametrizamos o tamanho de um bojo em termos do raio efetivo R_e , o raio que contém metade da luz do bojo



Bojos

- Em termos de morfologia, há duas famílias de bojos:
 - bojos clássicos, vistos como elipsoides arredondados
 - pseudo-bojos, sistemas achatados, como se fossem a parte central e mais brilhante do disco



Bojos

- Cerca de 20% dos bojos tem um formato de ‘amendoim’; alguns estudos mostram que bojos-amendoim podem na verdade ser barras com alta rotação



<http://www.eso.org/public/images/eso1339a/>

Bojos

- Em Sombrero, $R_e \approx 4 \text{ kpc}$
- Estudos indicam que há uma relação entre o tamanho do bojo e do disco

$$R_e/h_R \approx 0.1$$



- NGC7331 é uma galáxia onde as estrelas do bojo tem rotação contrária a do disco!

Bojos

- Kormendy & Kennicutt, 2004
- pseudo-bojos: formados inteiramente a partir do disco por processos de evolução secular
- boxy-peanut shape, perfis de brilho superficial exponenciais, dominados por rotação, mais achatados
- bojos clássicos: acredita-se que se formem de modo semelhante a galáxias elípticas



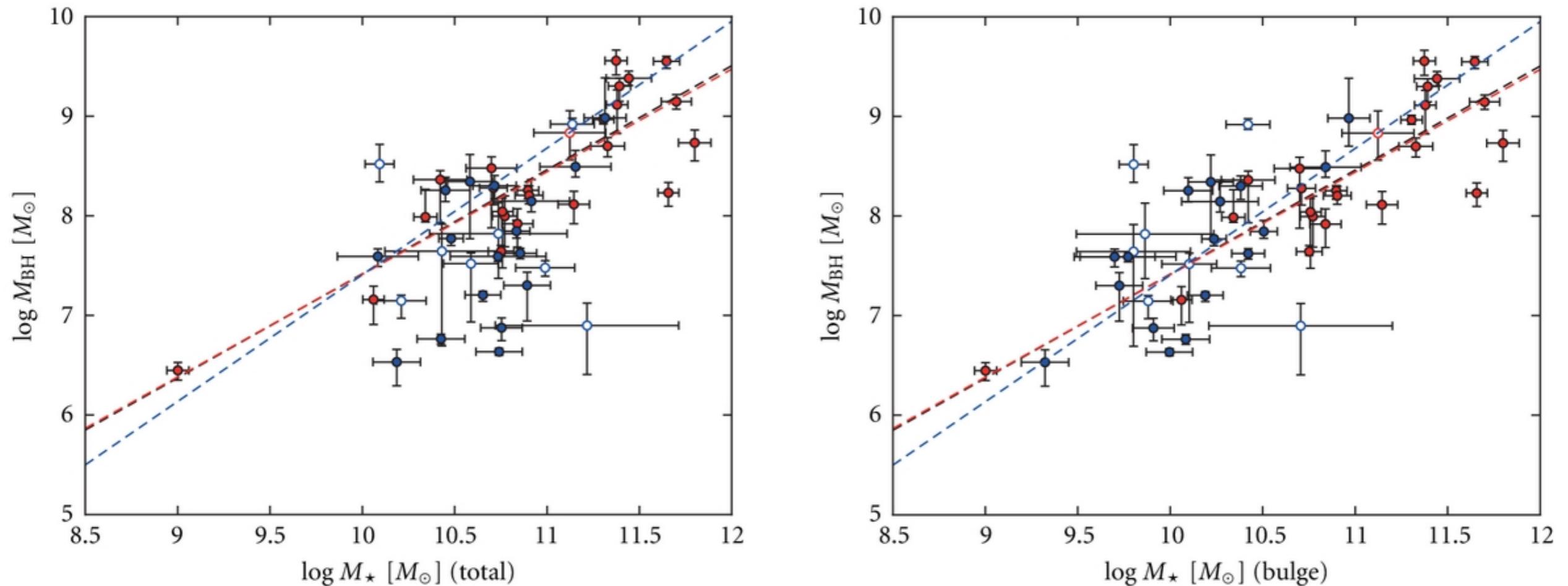
Formação de bojos

- Bojos massivos (S0 e Sa) compartilham muitas das propriedades de elípticas de luminosidade intermediária $-20.5 < M_B \leq -18.5$: são achatados por rotação, os perfis de brilho superficial obedecem as mesmas relações, e apresentam as mesmas relações cor-magnitude, metalicidade-luminosidade, plano fundamental e massa do buraco negro central com dispersão de velocidades.
- Esse acúmulo de evidências indica que os dois sistemas se formaram de modo semelhante: merger de progenitores ricos em gás. A diferença está se o disco consegue sobreviver ou crescer com acreção de massa após o merger.
- Bojos menos massivos tem perfil de brilho semelhantes a discos, são mais achatados, apresentam formato boxy ou peanut => pseudo-bojos
- um último processo que pode influenciar é a acreção de galáxias satélite e aglomerados globulares (fricção dinâmica) e portanto podem ter uma origem semelhante aos dos discos espessos

Evolução secular

- a presença de instabilidade globais (barras, braços espirais) faz com que a distribuição de massa e momento angular de galáxias disco evolua lentamente com o tempo
- estudos mostram que evolução secular tem um papel importante na evolução de galáxias disco
 - implica que as propriedades estruturais do disco podem estar mais relacionadas a processos evolucionários internos do que às propriedades dos seus respectivos halos de matéria escura
 - os processos pelos quais isso acontece ainda não são bem compreendidos, mas os principais mecanismos em ação são “resonance coupling”, presença de gás (efeitos hidrodinâmicos), “bending instability” (direção vertical, peanut shape).

Relação entre bojo e buraco negro central

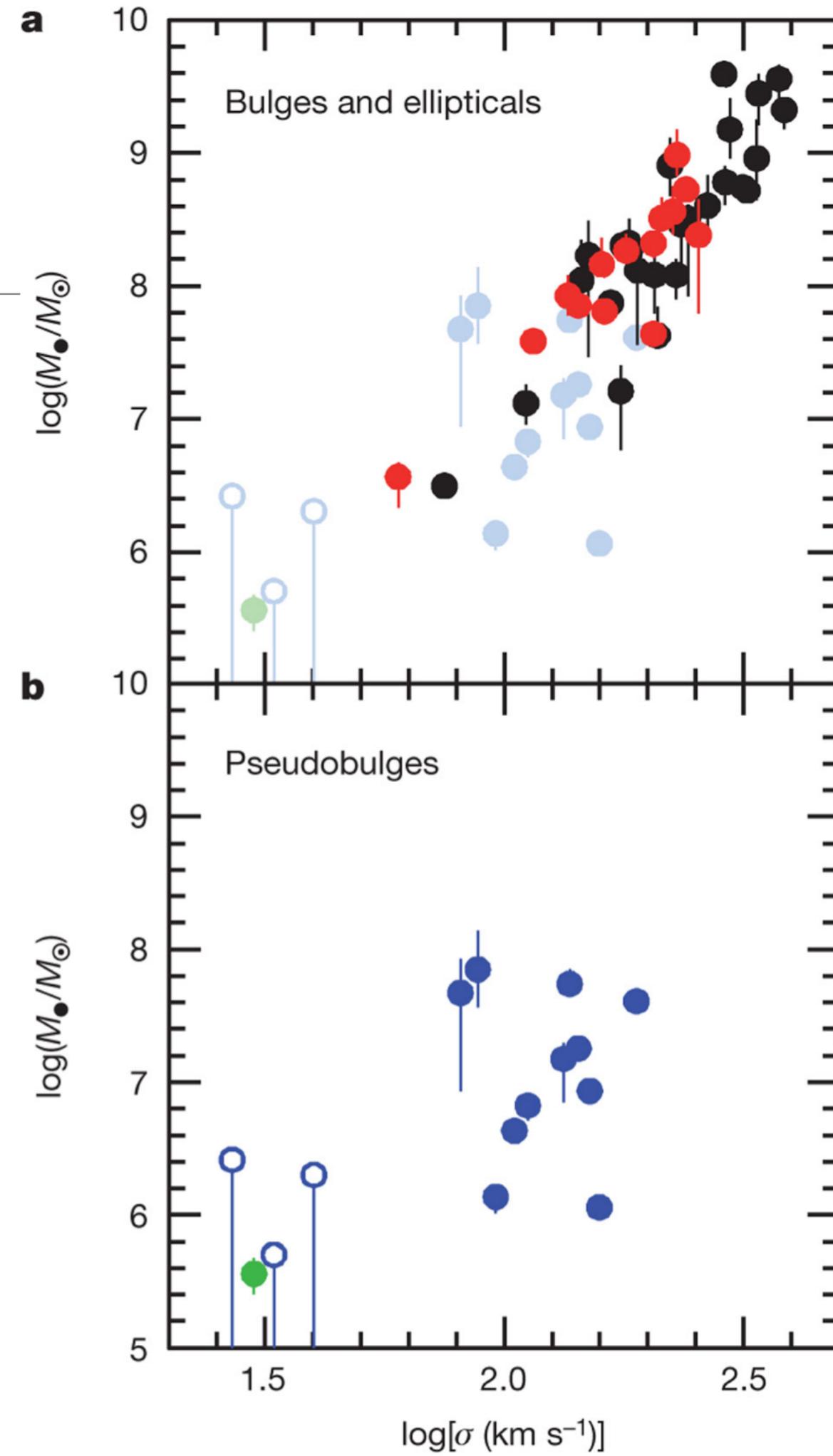


SMBH mass (red: elliptical galaxies, blue: disk galaxies) versus total galaxy stellar mass. (b): SMBH mass versus bulge stellar mass. The diagonal dashed lines are the best fits to the relation for the whole sample (black), for the elliptical galaxies (red), and for bulges of the disk galaxies (blue). Open symbols are galaxies without precise distances, which are not used in the fits. It is clear that the SMBH masses of S0 and spiral galaxies (blue) correlate better with the bulge stellar mass than with total galaxy mass.

Bojos

- Em linhas gerais, acredita-se que bojos clássicos são sistemas genuinamente velhos, formados em eventos de mergers; e pseudo-bojos são formados por processos seculares

Figure 2: Correlation of dynamically measured black-hole masses with the velocity dispersions of their host galaxies.
http://www.nature.com/nature/journal/v469/n7330/fig_tab/nature09694_F2.html



NGC6503



Galáxias sem bojo

Tem importância cosmológica: não sofreram virtualmente nenhum merger. O mais próximo que podemos observar dos discos primordiais previstos em simulações.

Regiões nucleares

- gás tende a se concentrar no centro, principalmente na presença de barras
- nas regiões centrais, a curva de rotação tende a crescer linearmente e a velocidade angular $V(R)/R$ é \sim constante
- as nuvens moleculares não são destruídas pela rotação diferencial e colapsam, se tornando densas o suficiente para formar estrelas
- em algumas galáxias, um *starburst* central está ocorrendo: a taxa de formação estelar é tão alta que exauri o gás dentro de ~ 100 Myr,

Aglomerados Estelares Nucleares

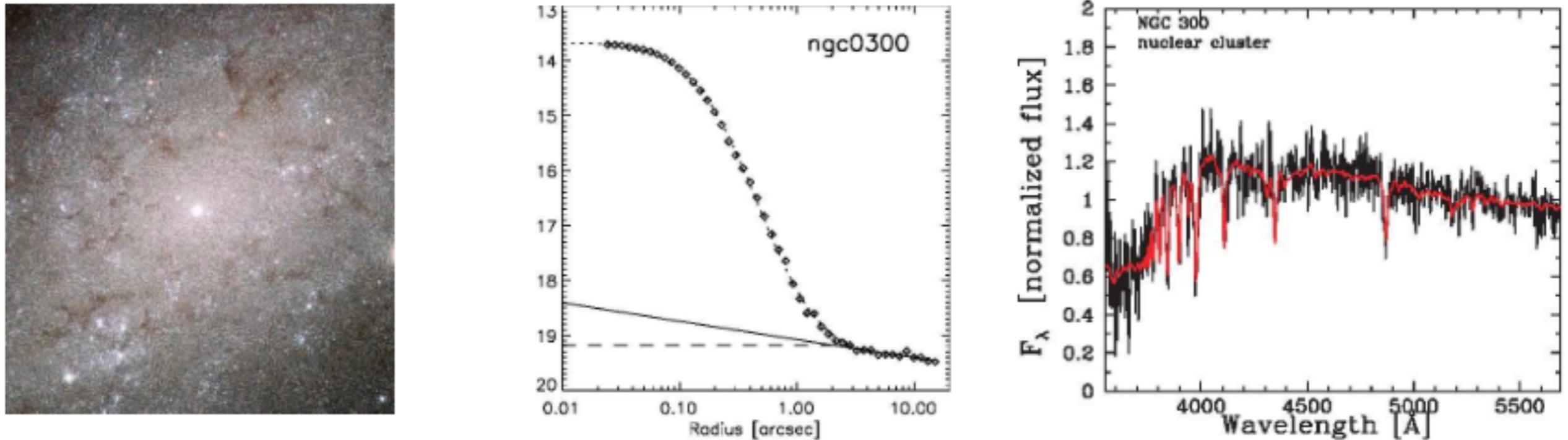
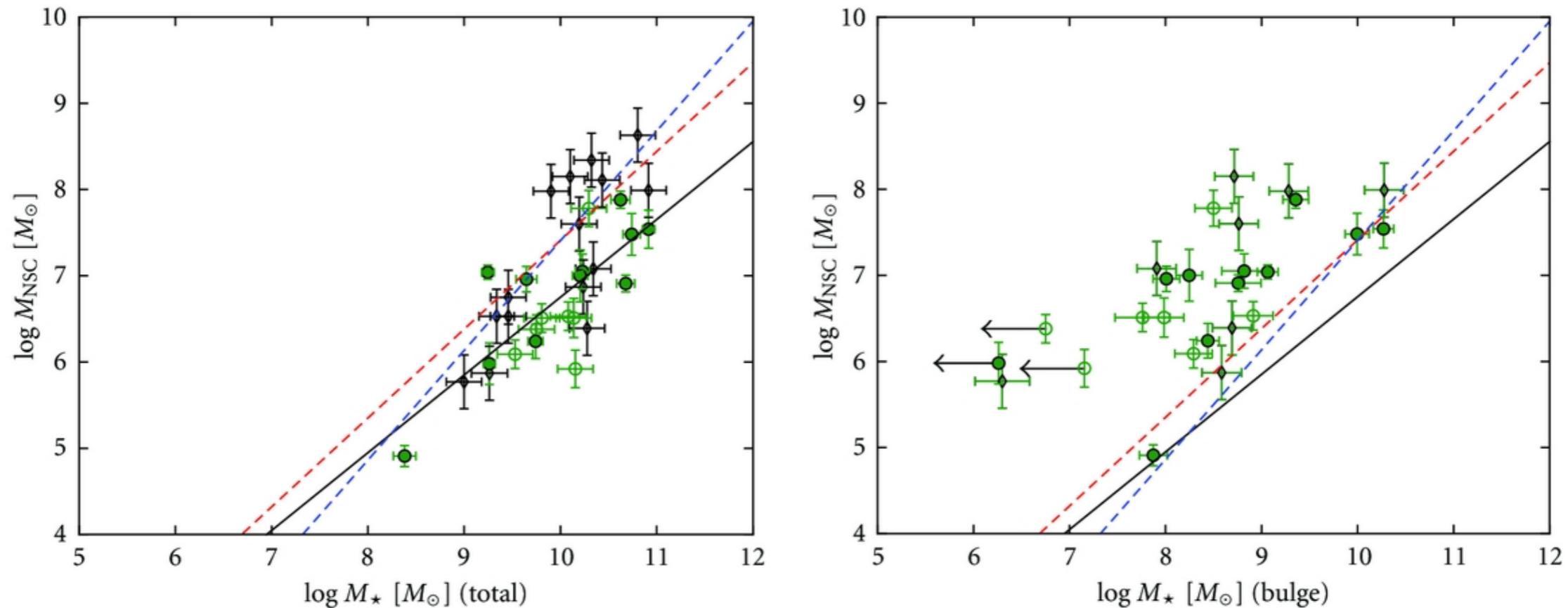


Figure 1. (a) HST/ACS color composite image of the central 1.2×1.2 kpc of the Sd galaxy NGC 300 at $D \approx 1.8$ Mpc (from the observations of Bresolin et al. 2005). A prominent nuclear star cluster (NC) resides at the center of the galaxy. (b) *I*-band surface brightness profile in $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ for the central $\sim 10'' = 87$ pc, as determined from HST/WFPC2 data of the same galaxy (Boeker et al. 2002). The NC is evident as a marked upturn in the brightness profile, as compared to inward extrapolations (solid, dashed lines) of the the brightness profile at large radii. King-model fits to the two-dimensional image imply a NC luminosity $L_I = 10^{6.2} L_\odot$ and effective radius $r_{\text{eff}} = 2.9$ pc (Boeker et al. 2004). (c) HST/STIS spectrum of the NC in NGC 300 (from Rossa et al. 2006). The red curve shows the best spectral population fit, which has $Z = 0.004$, $A_V = 0.4$, a luminosity-weighted mean $\langle \log(\text{age}/\text{Gyr}) \rangle = 8.63$ and $M/L_B = 0.51 M_\odot/L_{B,\odot}$. The implied NC mass is $M = 10^{5.7} M_\odot$.

Aglomerados nucleares e buracos negros massivos?

<http://www.stsci.edu/~marel/pdfdir/nucleiAU24I.pdf>



NSC mass versus total stellar mass (a) and bulge stellar mass (b). Green circles are galaxies with dynamical mass estimates for their NSCs; black diamonds are the spectroscopically estimated masses of Rossa et al. [11] (bulge mass estimates are not complete for these galaxies). Filled symbols indicate galaxies with direct distance measurements (e.g., from Cepheid stars). Arrows show nominal upper limits for three bulgeless spirals. The diagonal black line is a fit of NSC mass to total stellar mass for the dynamical-mass sample (green circles); for comparison, the diagonal dashed red and blue lines are the fits for ellipticals (red) and disk galaxies (blue) from Figure 2. The situation is now the reverse of that for SMBHs: NSC masses clearly correlate better with total galaxy mass than they do with bulge mass.

Curvas de rotação

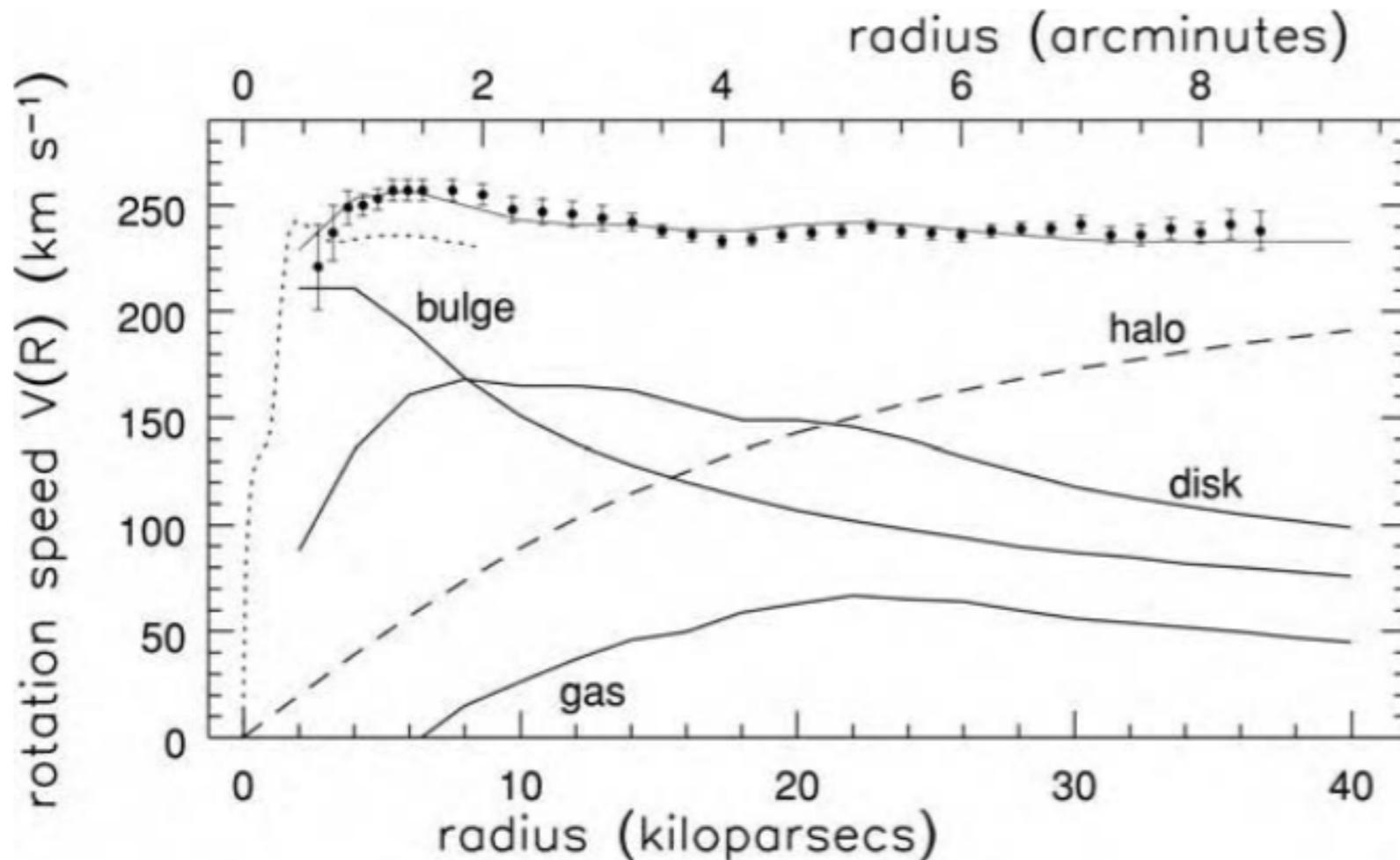


Fig. 5.20. Points give the rotation curve of NGC 7331, as found from the HI map of Figure 5.13; vertical bars show uncertainty. CO gas (dotted), observed with a finer spatial resolution, traces a faster rise. The lower solid curves show contributions to $V(R)$ from the gas disk, the bulge, and the stellar disk. A dark halo (dashes) must be added before the combined rotation speed (uppermost curve) matches the measured velocities – K. Begeman and Y. Sofue.

Para o disco estelar e o bojo, assumimos que a densidade de estrelas é proporcional a luz na banda R, e estima-se um valor de M/L .

Para o gás no disco, a densidade superficial é de aproximadamente 1.4 a medida de HI, uma vez que o He contribui com 40% de massa em relação ao H.

Quando se ajusta o M/L para o máximo possível, obtêm-se o modelo de "máximo disco" (maximum-disc model)

Curvas de rotação

$$5h \lesssim M/L \lesssim 25h$$

O círculo indica a escala de comprimento h_R e o máximo de velocidade V_{max} .

A quantidade de matéria escura requerida pra explicar essas observações varia de ~50% para Sa e Sb, a 80%-90% para Sd e Sm.

Esse é um limite mínimo para a matéria escura, dado que não temos medidas além do raio que conseguimos observar o H α .

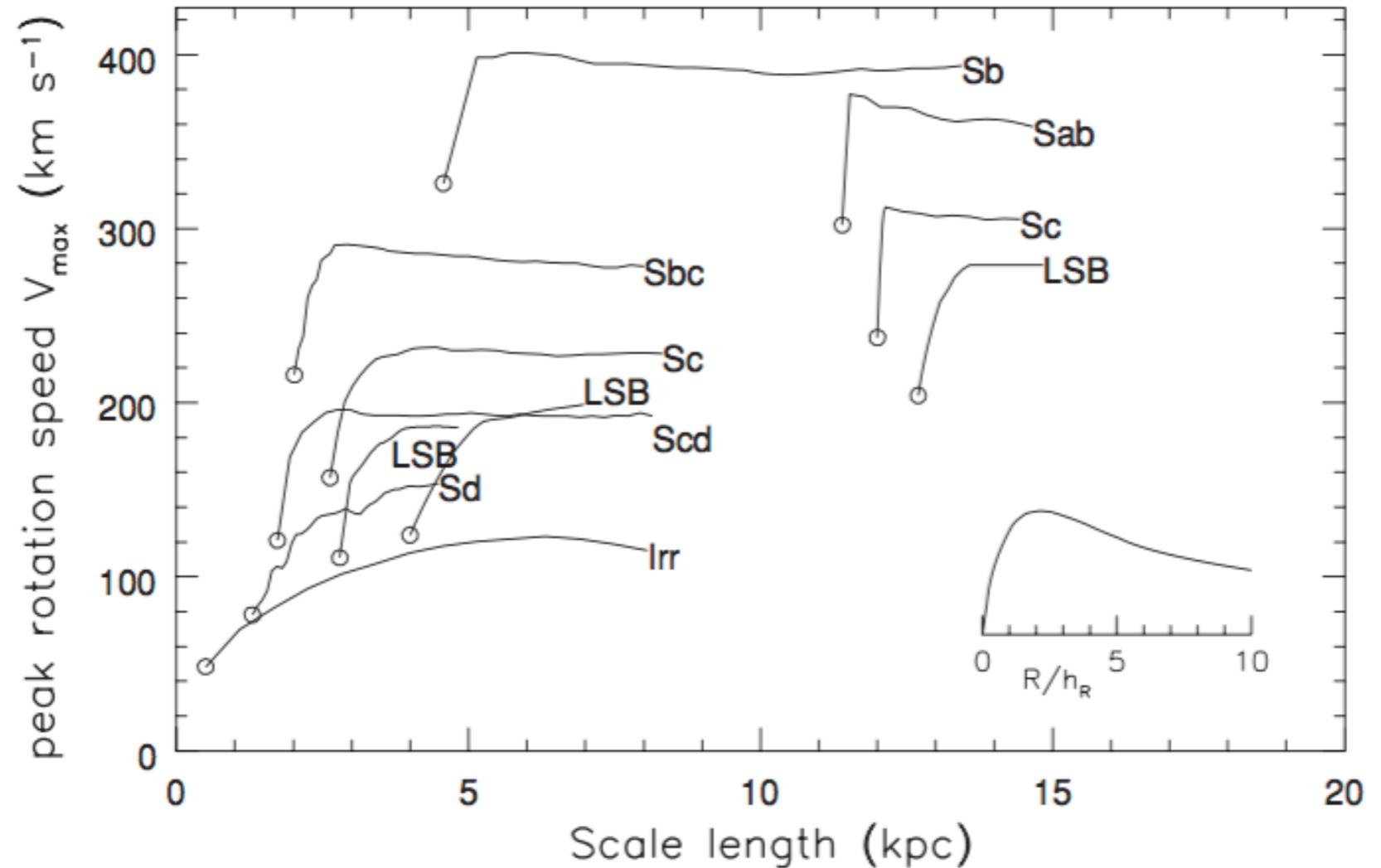


Fig. 5.21. Rotation curves for disk galaxies of various types. Open circles show the scale length h_R of the stellar disk and the peak rotation speed V_{max} for each galaxy. Curves are plotted in units of R/h_R , to the same horizontal scale as for the inset, showing $V(R)$ for the exponential disk (Equation 5.1). LSB denotes a low-surface-brightness galaxy. The measured rotation does not fall as it should if the stellar disk contained most of the mass – A. Broeils and E. de Blok.

A relação de Tully-Fisher

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

- Há uma correlação entre a velocidade máxima e a luminosidade da galáxia

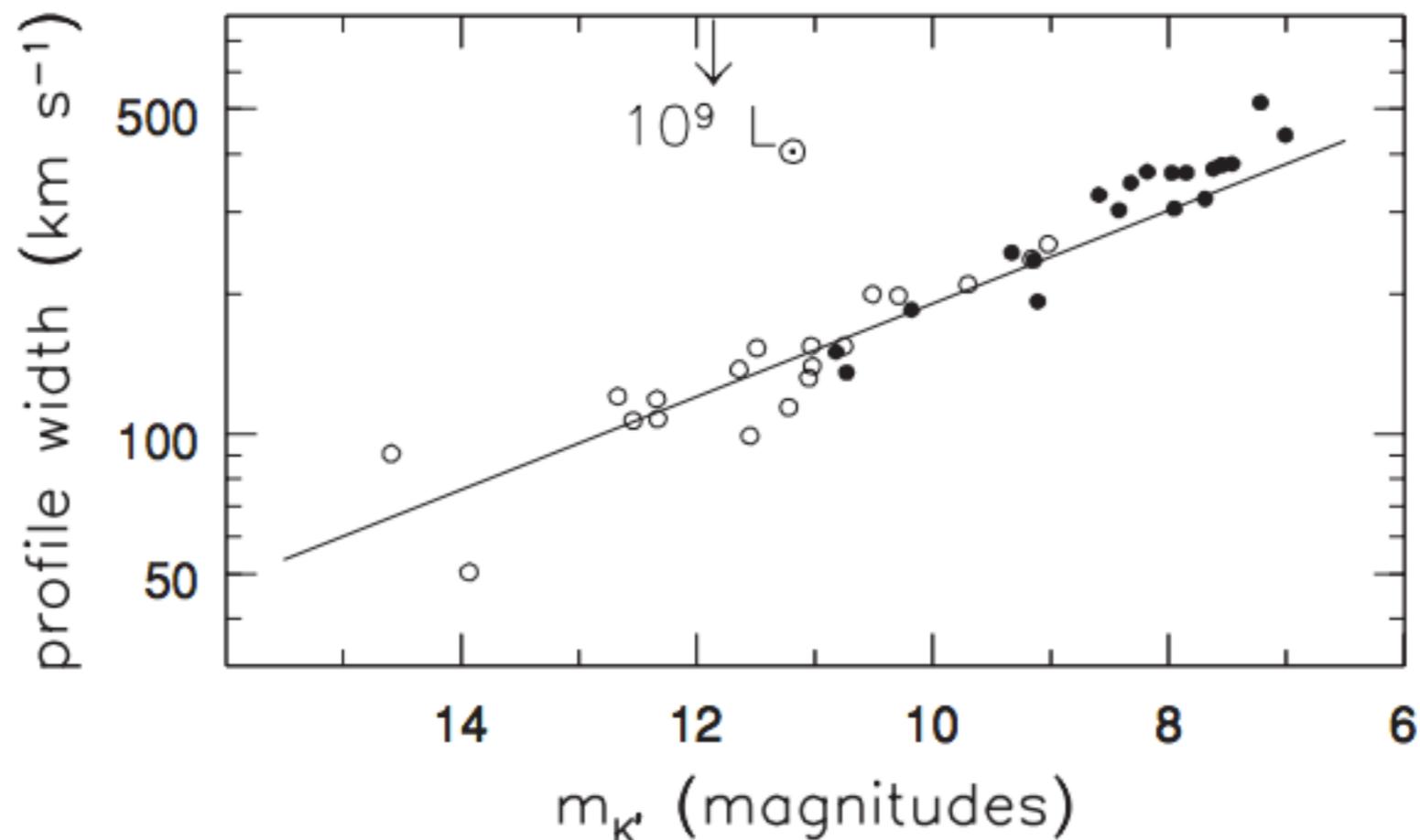


Fig. 5.23. For galaxies in the Ursa Major group: from the HI global profile, width $W/\sin i \approx 2V_{\max}$ plotted against apparent K' -magnitude. Low-surface-brightness galaxies (open circles) follow the same relationship as do those of high surface brightness (filled circles). The solid line passing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

A relação Tully-Fisher

- Luminosidade é proveniente de matéria bariônica luminosa
- Mas V_{max} está relacionada ao halo e matéria escura
 - de algum modo, a quantidade de matéria escura é coordenada com a quantidade de matéria luminosa
- A relação Tully-Fisher pode ser usada como escala de distâncias

Interlúdio: sequência de Hubble revista

Table 5.1 The sequence of luminous disk galaxies

<i>Characteristic</i>	<i>S0–Sa</i>	<i>Sb–Sc</i>	<i>Sd–Sm</i>
Spiral arms	Absent or tight		Open spiral
Color	Red: late G star	Early G star	Blue: late F star
$^a B - V$	0.7–0.9	0.6–0.9	0.4–0.8
$^a u - r$	2.5–3	1–3	1.5–2.5
Young stars	Few		Relatively many
HII regions	Few, small		More, brighter
Gas	Little gas		Much gas
$\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$	$\lesssim 0.05\text{--}0.1$		~ 0.25 to >1
L_B	Luminous $(1\text{--}4) \times 10^{10} L_\odot$		Less luminous $(<0.1\text{--}2) \times 10^{10} L_\odot$
$I(0)$	High central brightness		Low central brightness
$\mathcal{M}(<R)$	Massive $(0.5\text{--}3) \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$		Less massive $(<0.2\text{--}1) \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$
Rotation	Fast-rising $V(R)$		Slowly rising $V(R)$

Interlúdio

- Se no gráfico ao lado tivermos uma S0, Sc, Starburst e Sb. Quem é quem?

