

# Galáxias Espirais e S0

Capítulo 5 do livro-texto (Sparke & Gallagher)

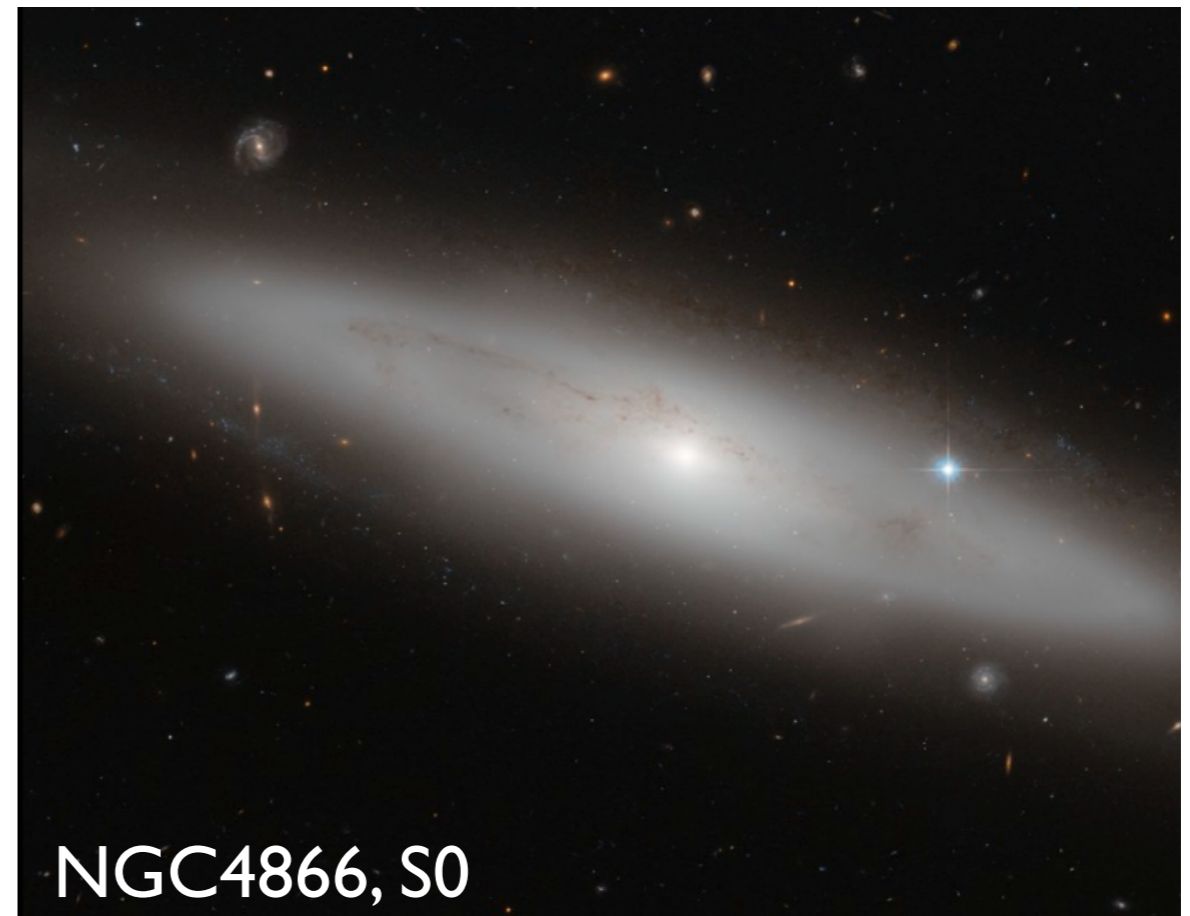
Profa. Paula R. T. Coelho

AGA0299 - Astrofísica Galáctica e Extra-galáctica

# Características gerais

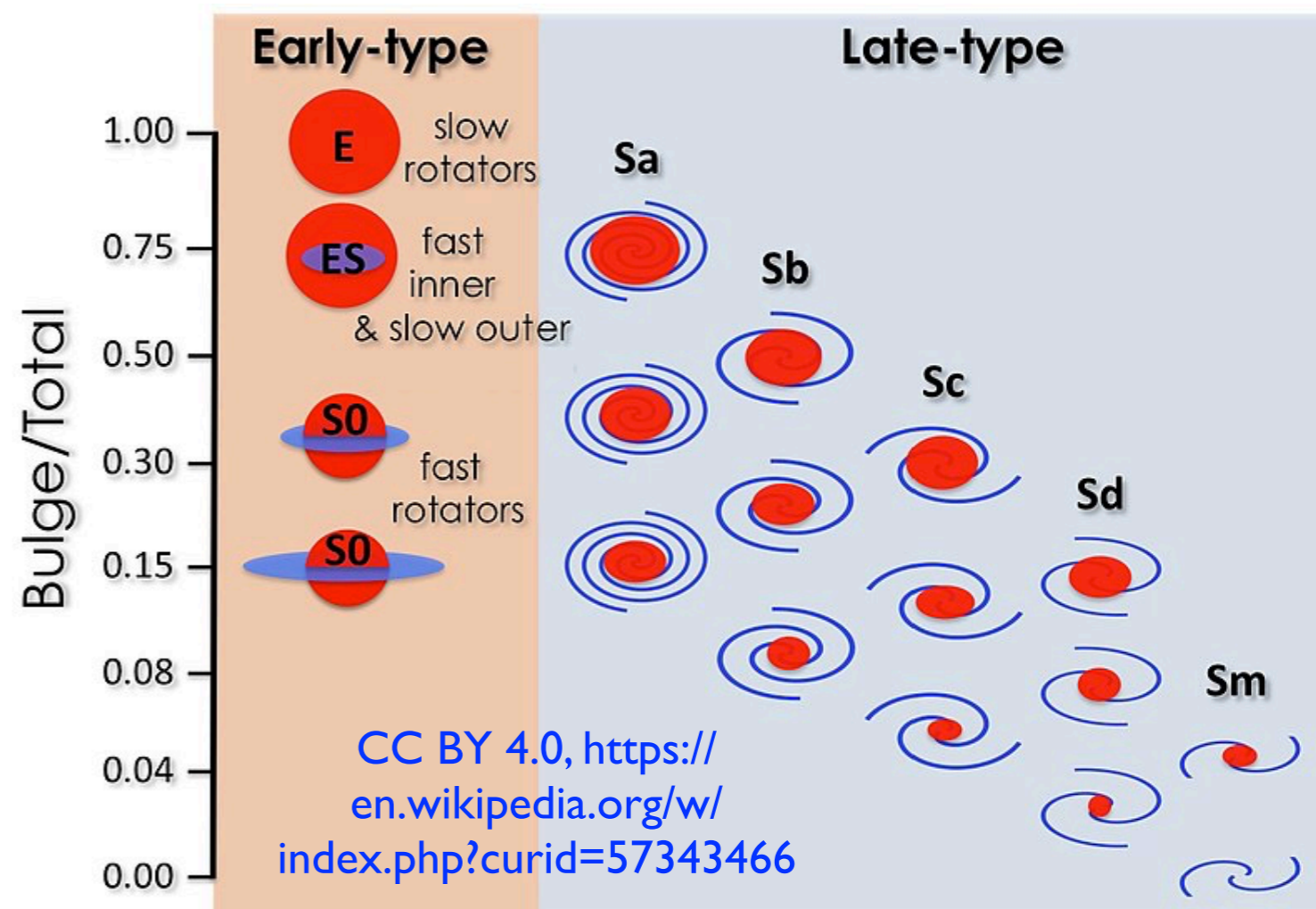
---

- 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

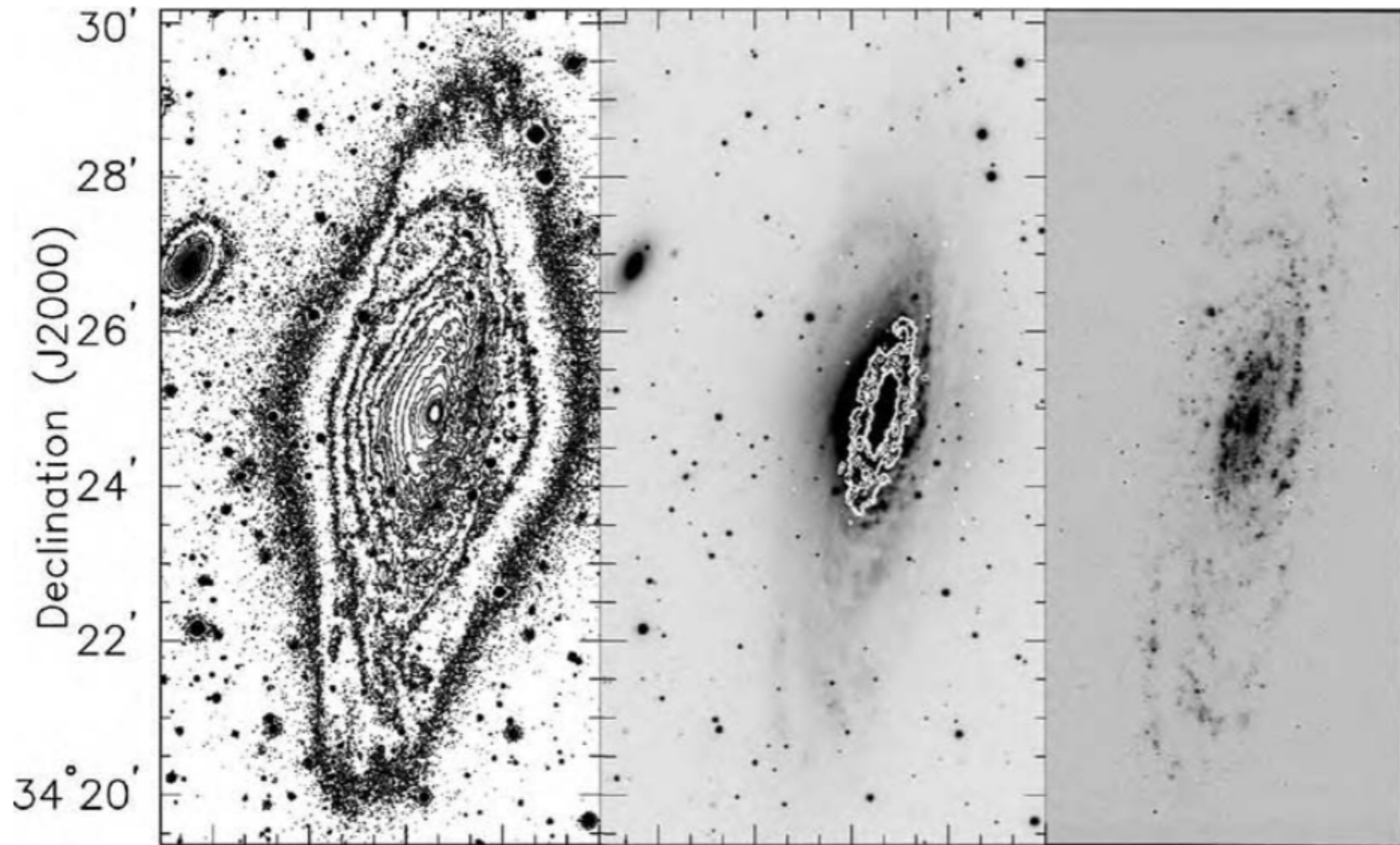


# Características gerais

- A maioria das galáxias luminosas tem um halo estelar (  $L_B \gtrsim 6 \times 10^9 L_\odot$  )
- 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
- S0 são únicas no sentido que contém tanto um disco proeminente quanto um bojo. Mas não tem a estrutura espiral característica de outras galáxias disco



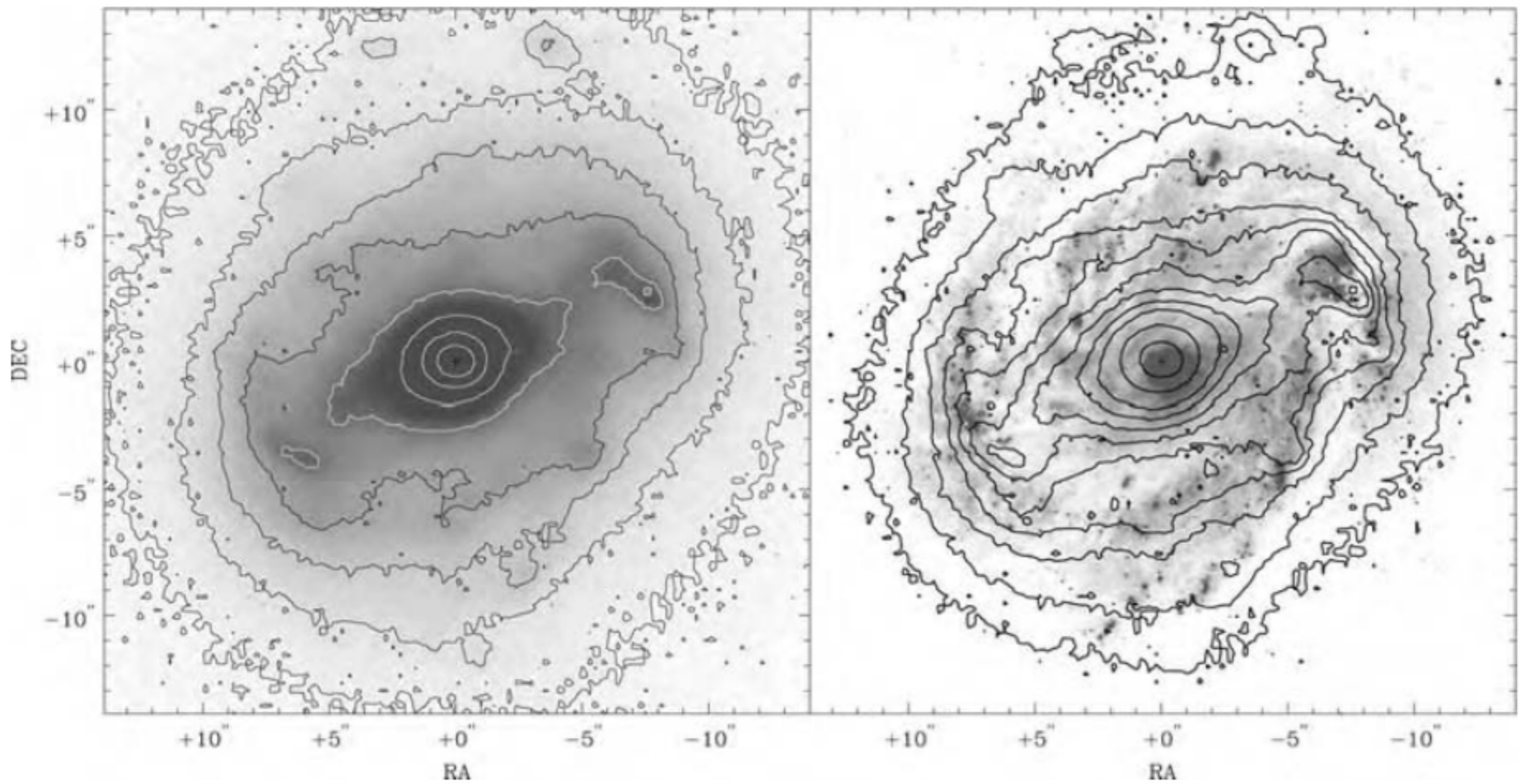
Fotometria de galáxias disco



**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

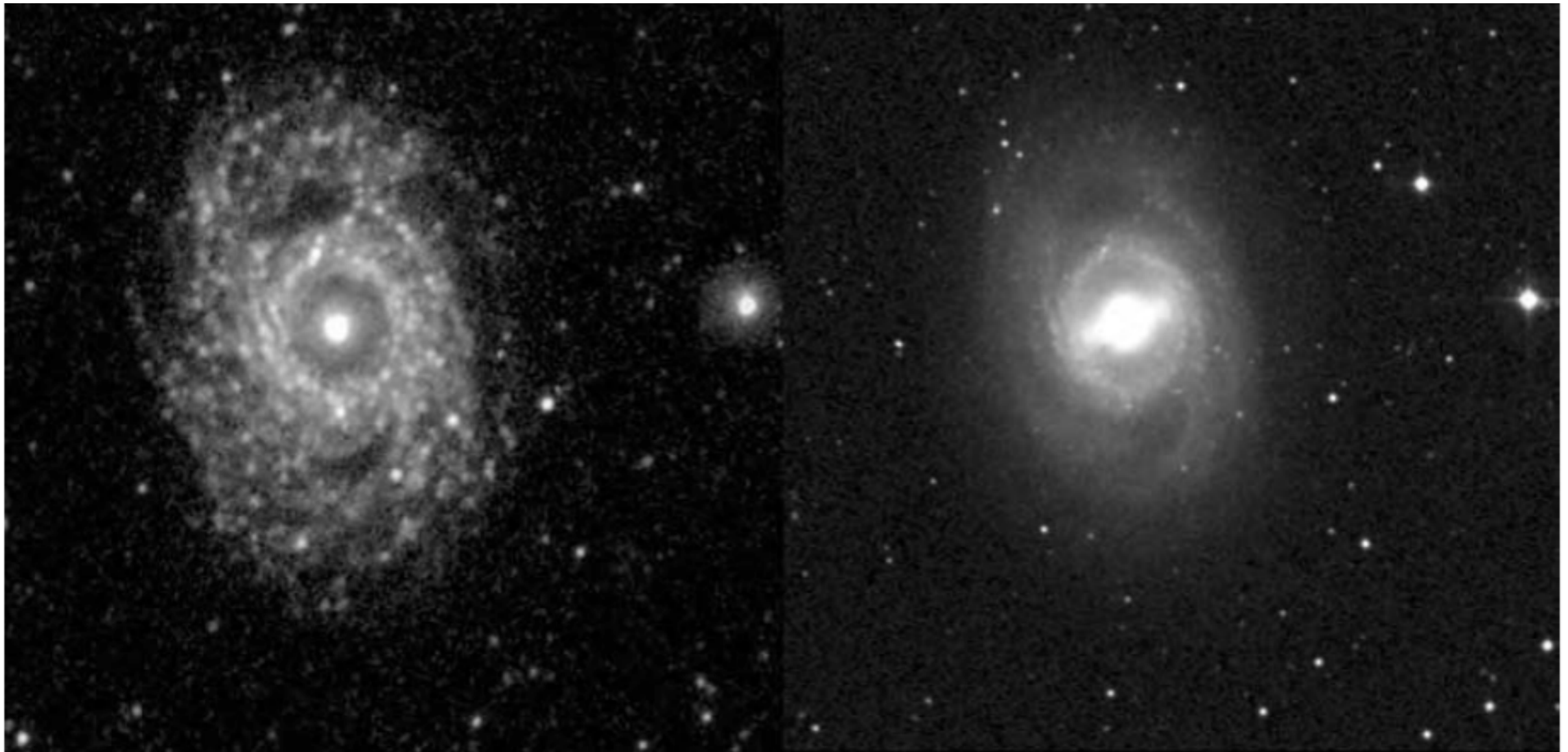
Linhas de brilho superficial constante



**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,  $H\alpha$  (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  $1530 \text{ \AA}$  and  $2300 \text{ \AA}$ . 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





# Fotometria de superfície em galáxias disco

---



NGC891

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

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

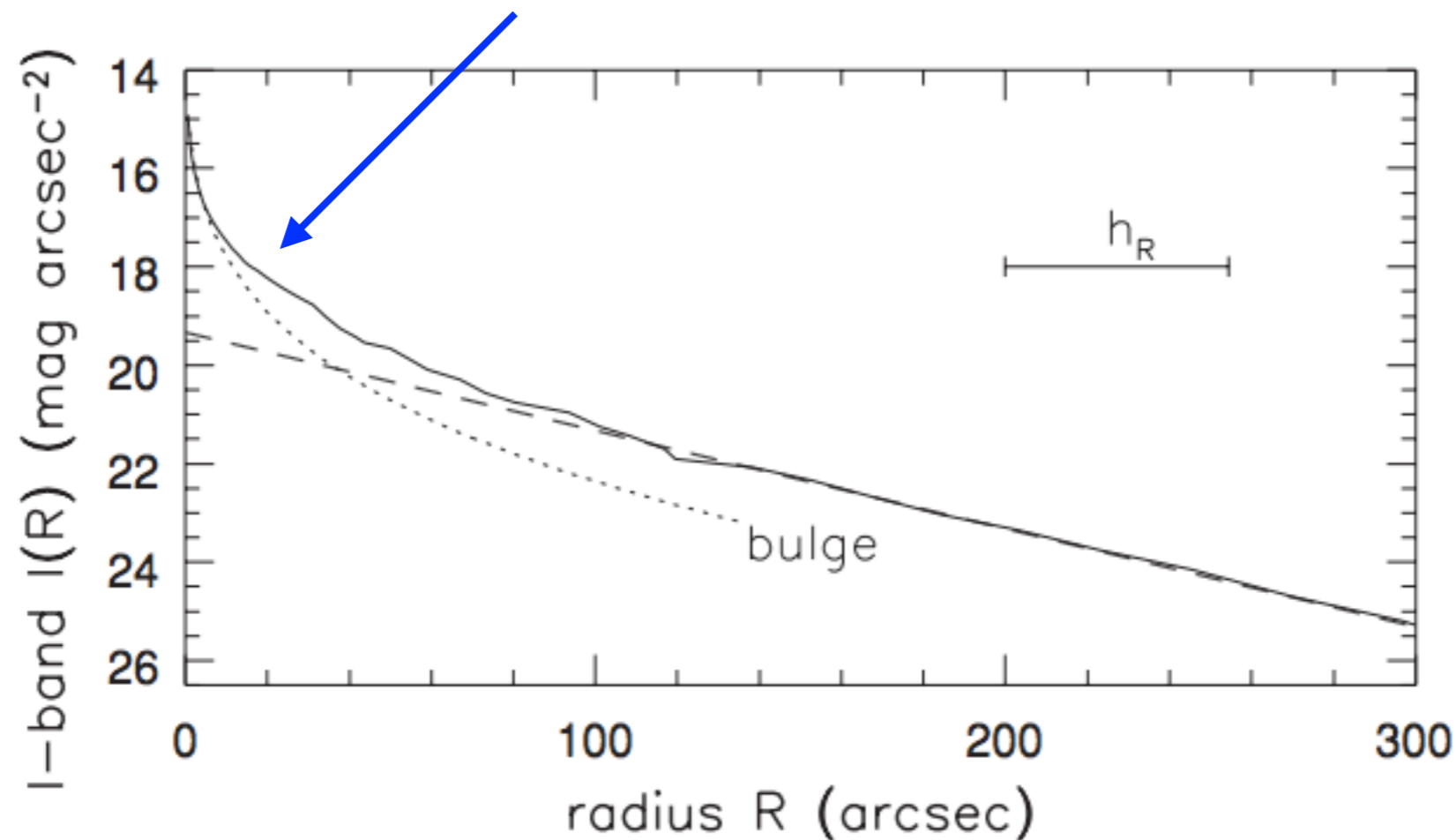
$$h_z \approx 0.1h_R$$

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.

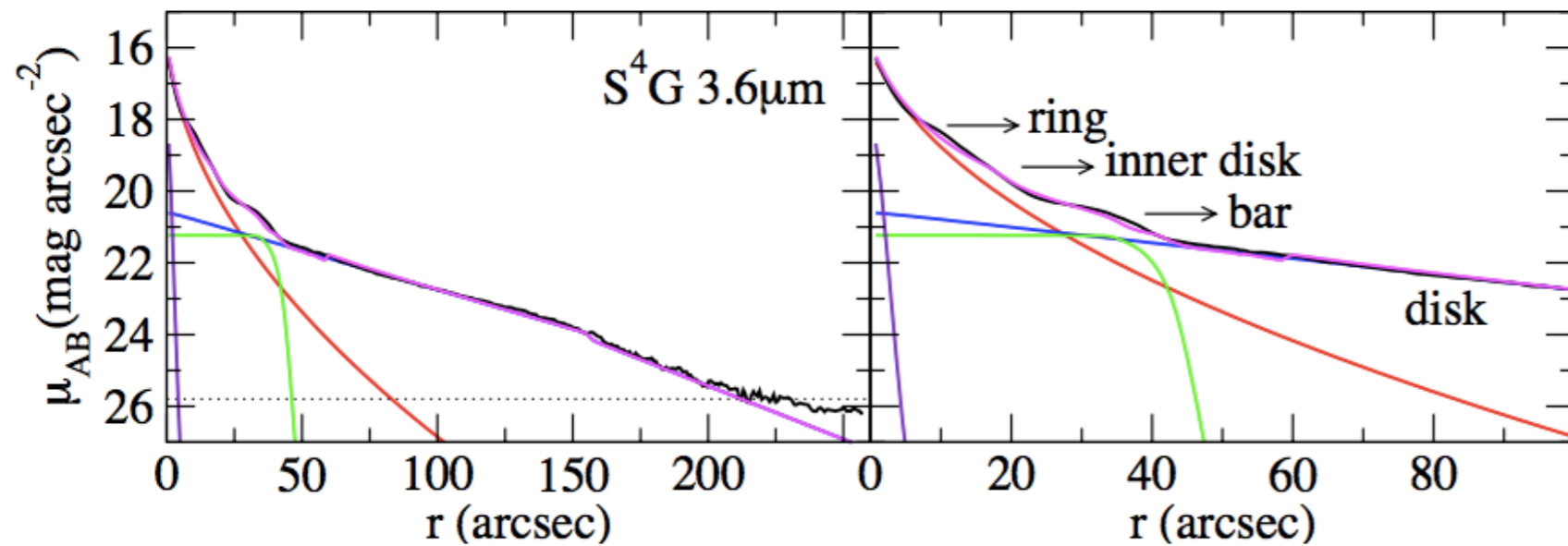
$$I(R) = I(0) \exp(-R/h_R)$$



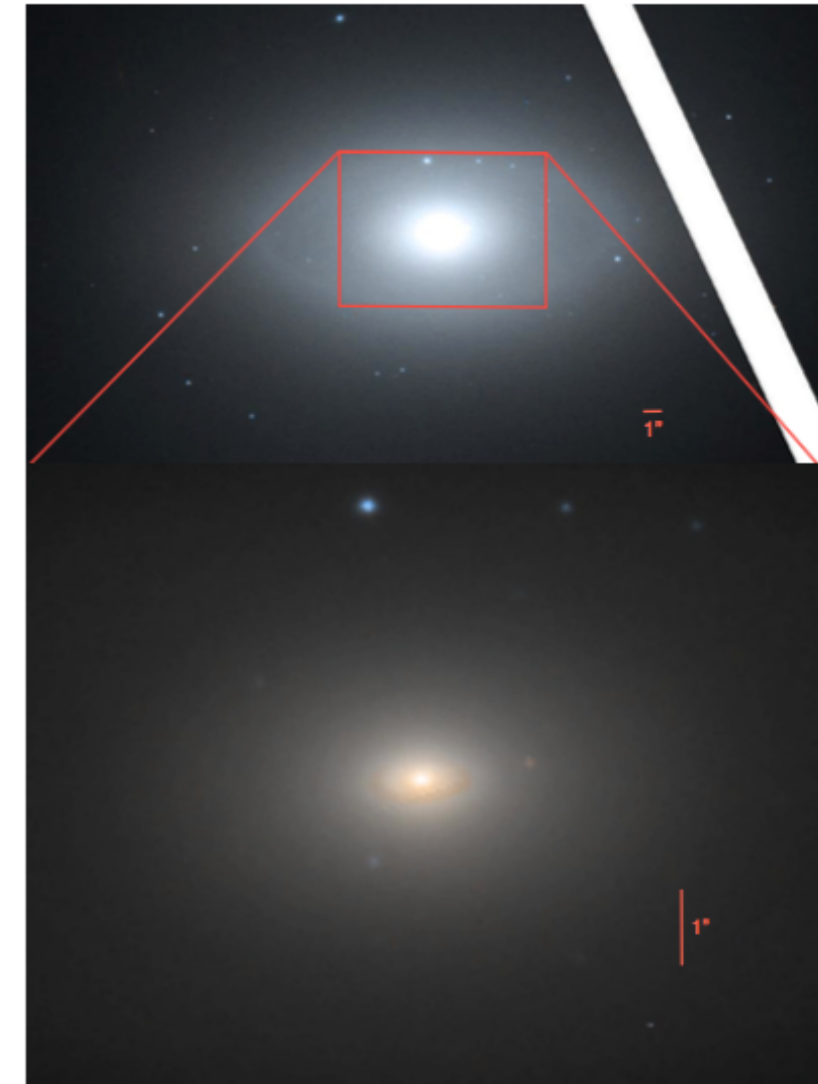
**Fig. 5.4.** NGC 7331: the solid line shows surface brightness in the  $I$  band, near 8000 Å. The dashed line is an exponential with  $h_R = 55''$ ; the dotted line represents additional light – R. Peletier.

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

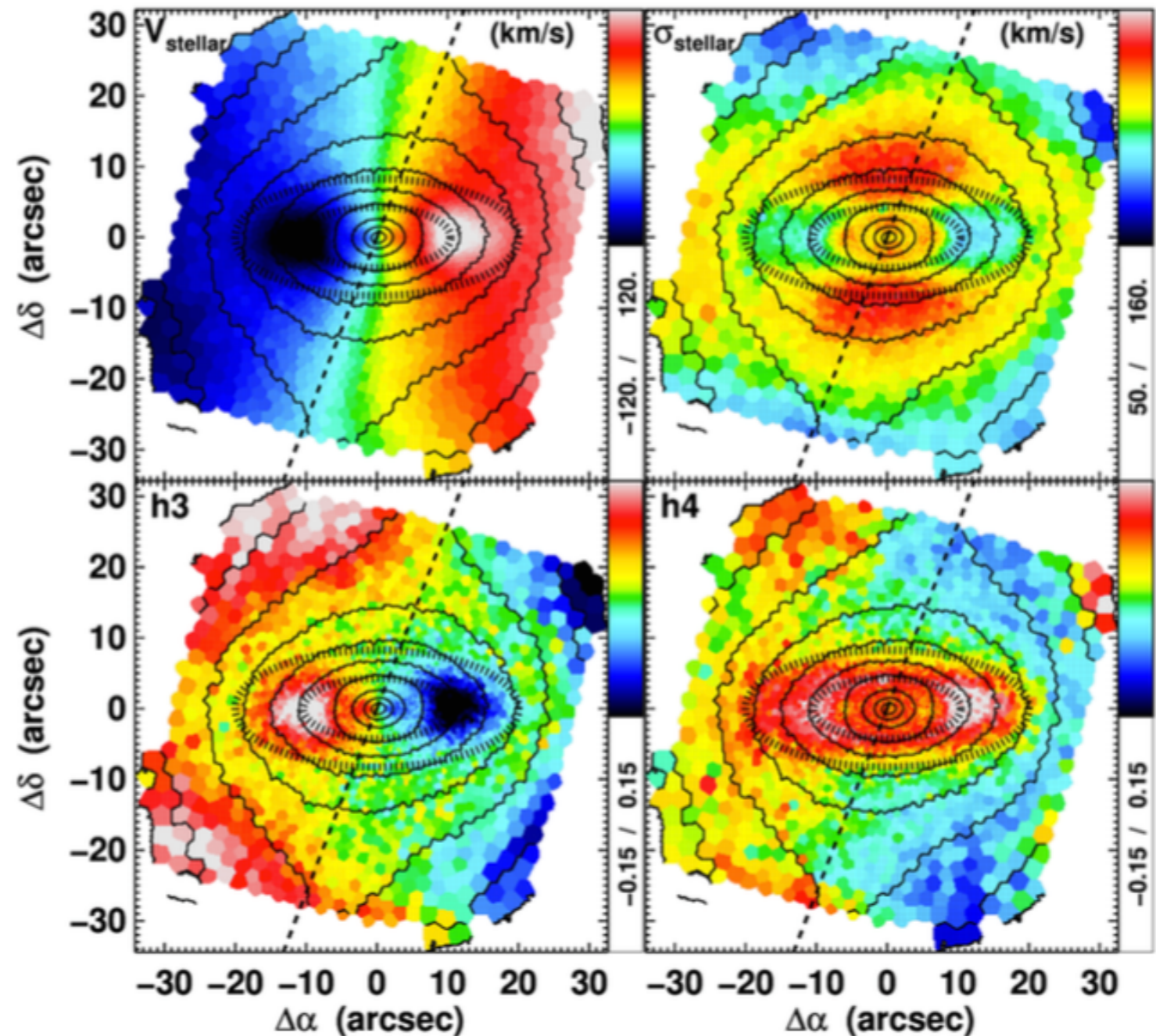


**Fig. 2.** Surface brightness radial profile of NCG 4371. The top panels show only the profile derived from ellipse fits to the S<sup>4</sup>G image. The bottom panels also show the profiles of the different model components obtained with BUDDA: bulge in red, disc in blue, bar in green, and central 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



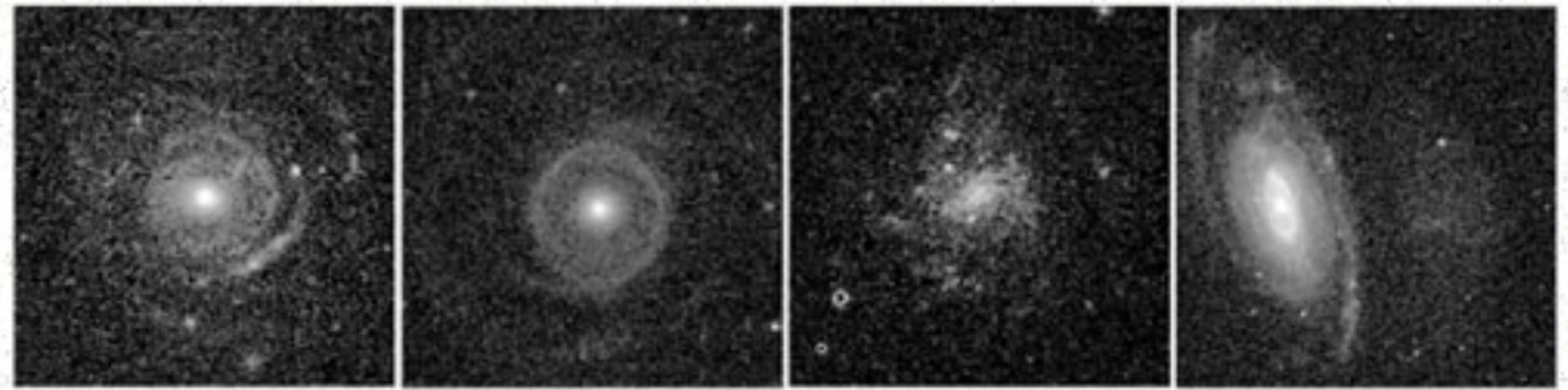
**Fig. 7.** Colour composites produced from HST images (*F850LP* and *F475W*) at the *Hubble Legacy Archive* website. *Top*: a clear view of the 10" ring. *Bottom*: the very inner region of NGC 4371. The blue point source in the north is  $\approx 4''$  from the centre. The *bottom panel* clearly shows 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



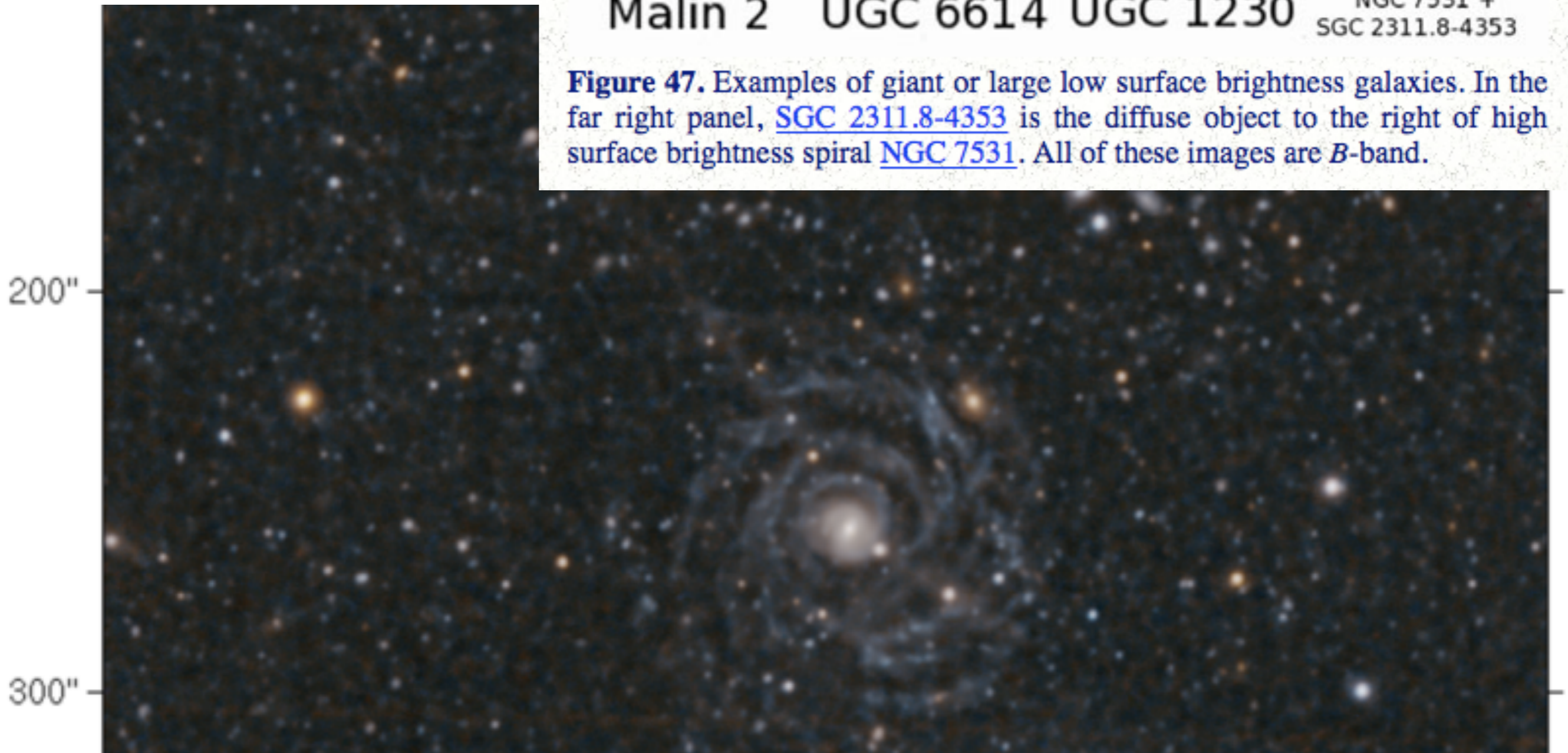
**Fig. 10.** Radial velocity, velocity dispersion, and  $h_3$  and  $h_4$  maps for the stellar component in NGC 4371, as indicated. The colour bars on the side of each panel indicate the plotted range of the parameter measured. For radial velocity and velocity dispersion these are given in  $\text{km s}^{-1}$ . 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.

low-surface-  
brightness (LSB)  
disk galaxies



Malin 2 UGC 6614 UGC 1230 NGC 7531 +  
SGC 2311.8-4353

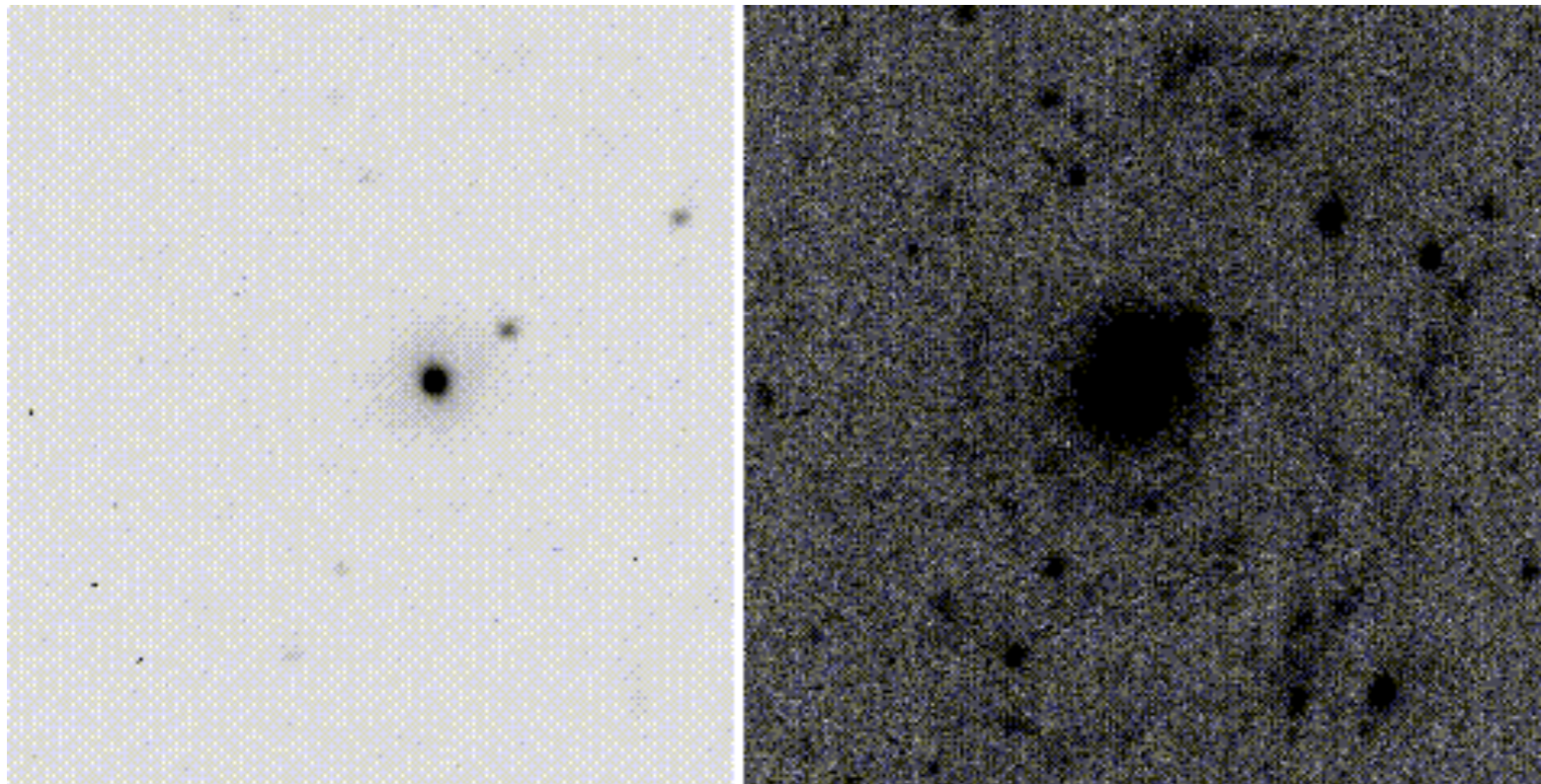
**Figure 47.** Examples of giant or large low surface brightness galaxies. In the far right panel, [SGC 2311.8-4353](#) is the diffuse object to the right of high surface brightness spiral [NGC 7531](#). All of these images are *B*-band.



# Galáxias LSB - Low Surface Brightness

---

- A maioria são galáxias anãs
- Maior parte da matéria bariônica em gás neutro de H
- 95% massa de matéria escura
- Quando são gigantes (GLSB) estão entre as maiores galáxias espirais do Universo
- Bojos tendem a ser brilhantes
- Em geral sistemas isolados (field galaxies)



$$I_B(0) \approx 25.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

Brilho central 25x mais baixo do que discos “normais”, e bem abaixo do brilho do céu (23.4 do espaço!?).

$$h_R = 55h^{-1} \text{ kpc,}$$

Malin I

[https://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic03/t3\\_selection1.html](https://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic03/t3_selection1.html)

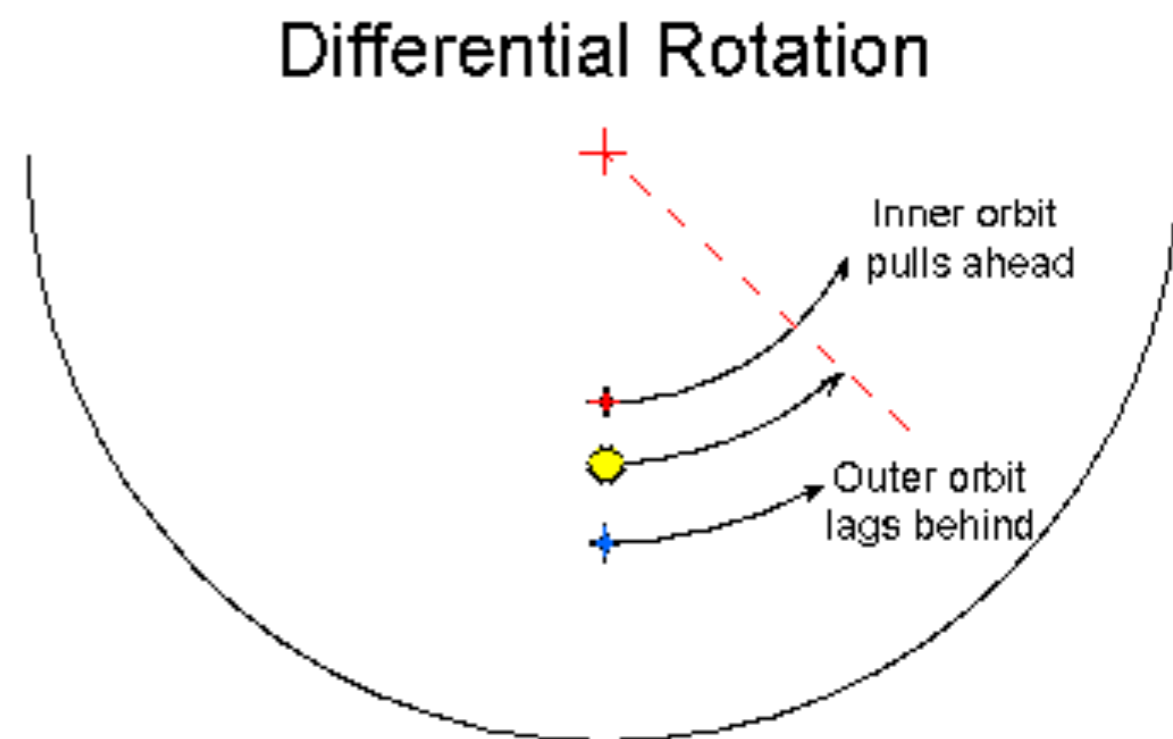
**Os braços espirais**



# Espirais & Barras

---

- Quase todas as galáxias luminosas que contém 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



<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit4/spirals.html>

- Gás não parece ser essencial para barras: galáxias S0 tem aproximadamente a mesma frequência de barras de espirais ricas em gás

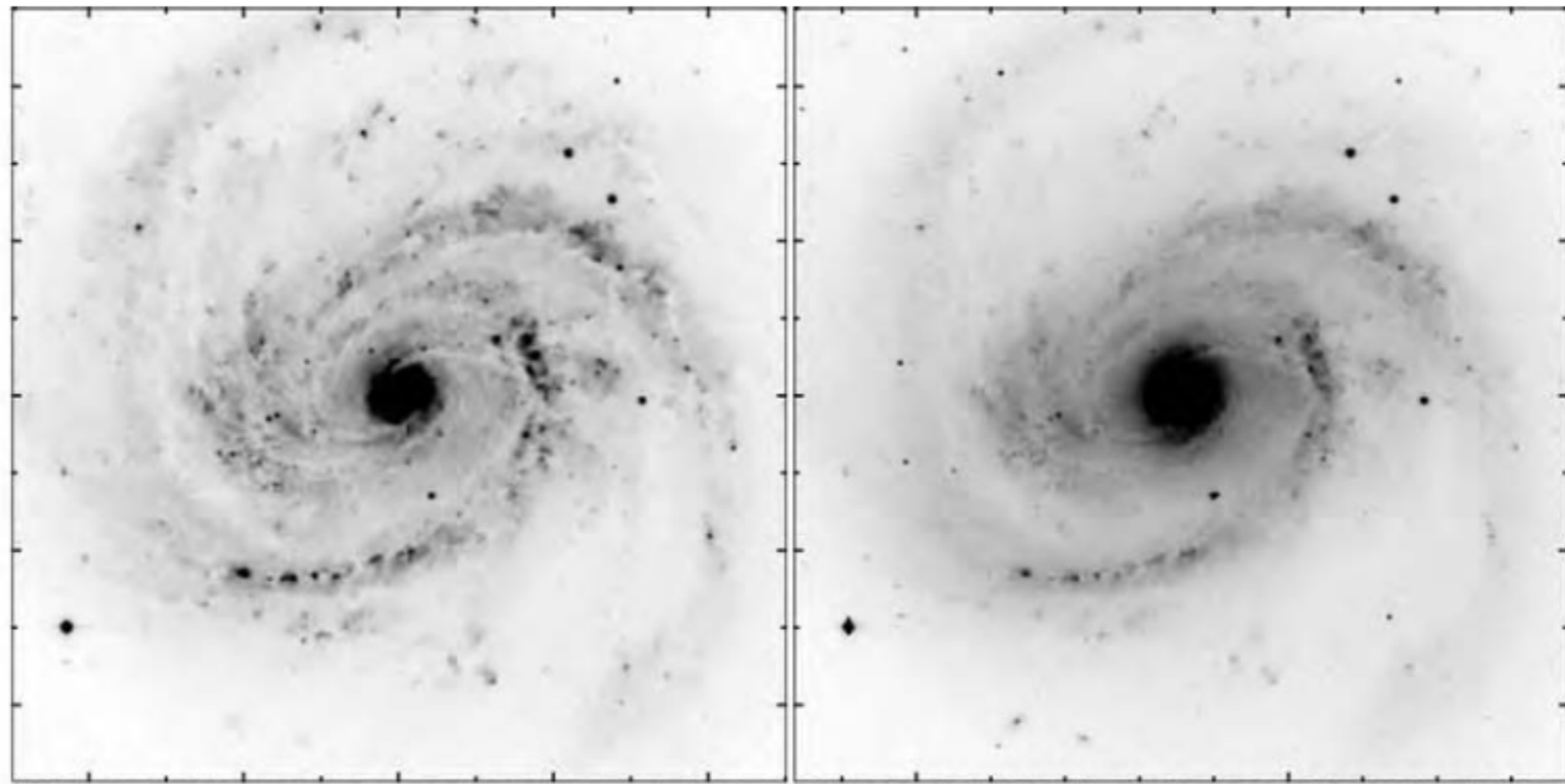


# Os padrões espirais

---

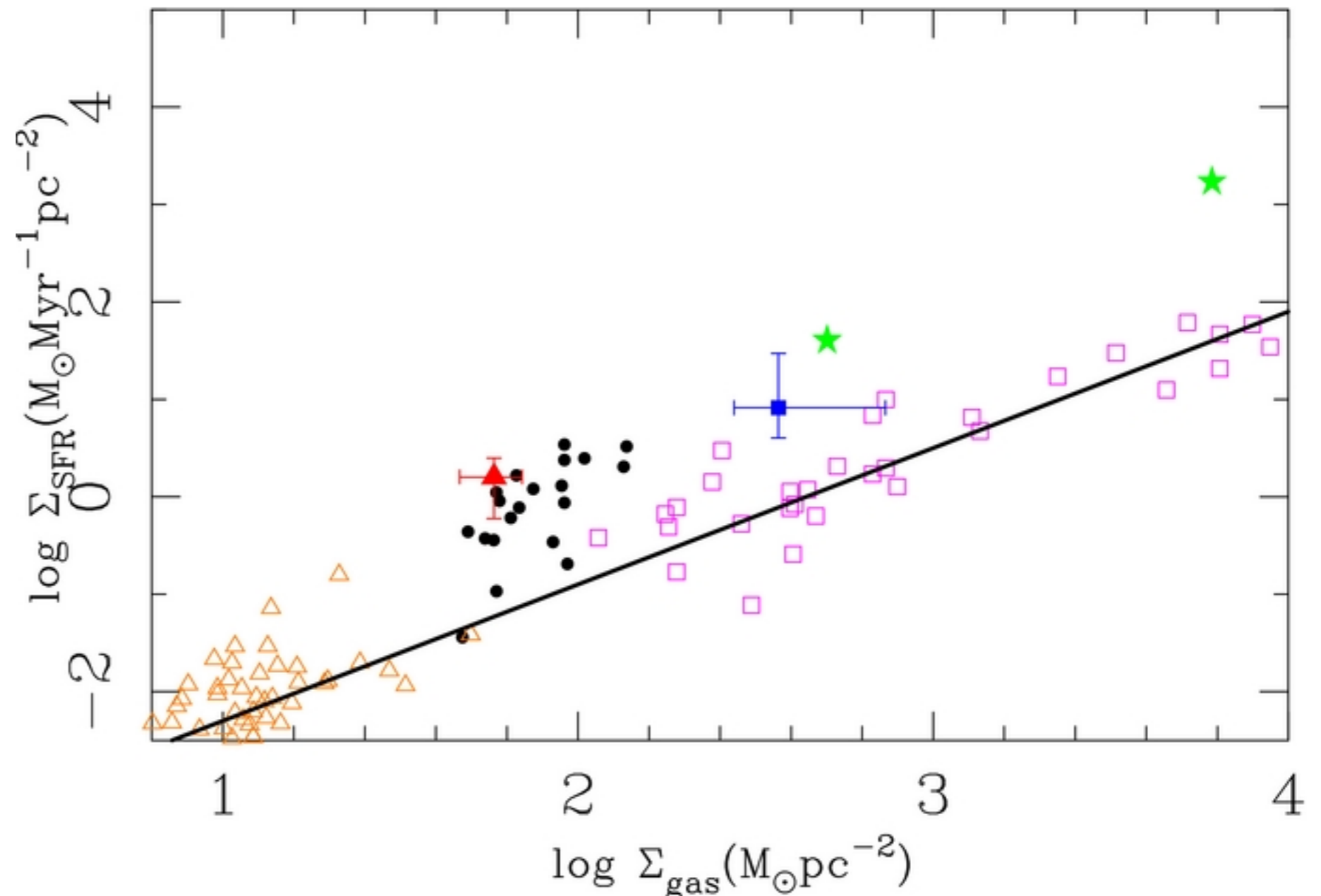
- Os braços são mais azuis do que o resto do disco, com emissão H $\alpha$
- Estrelas energéticas o suficiente para ionizar o gás vivem apenas 10 Myr
- Padrões *grand design* podem ser traçados por vários radianos
- O número de braços em geral varia de 2 a 4

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.

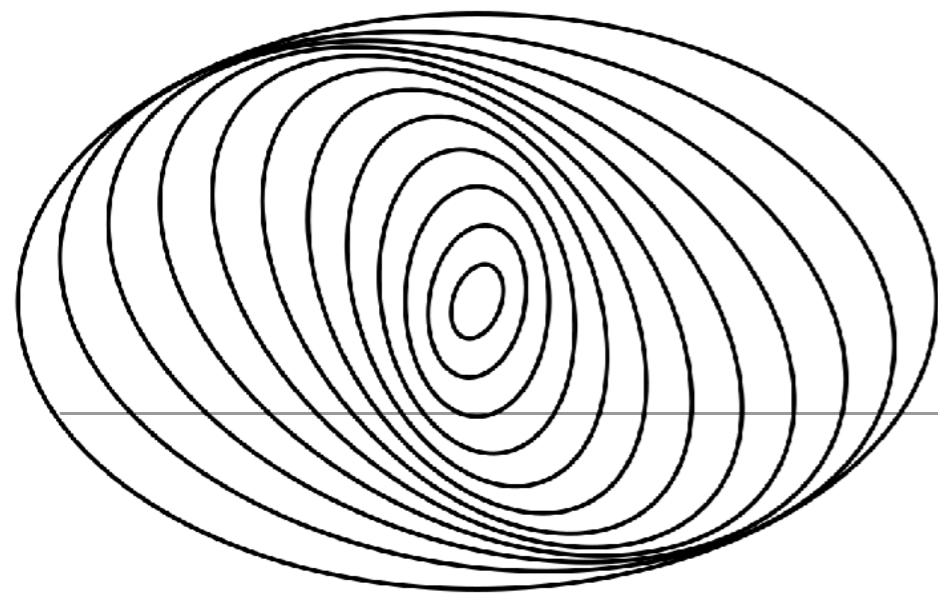


# Teorias para a Estrutura Espiral

---

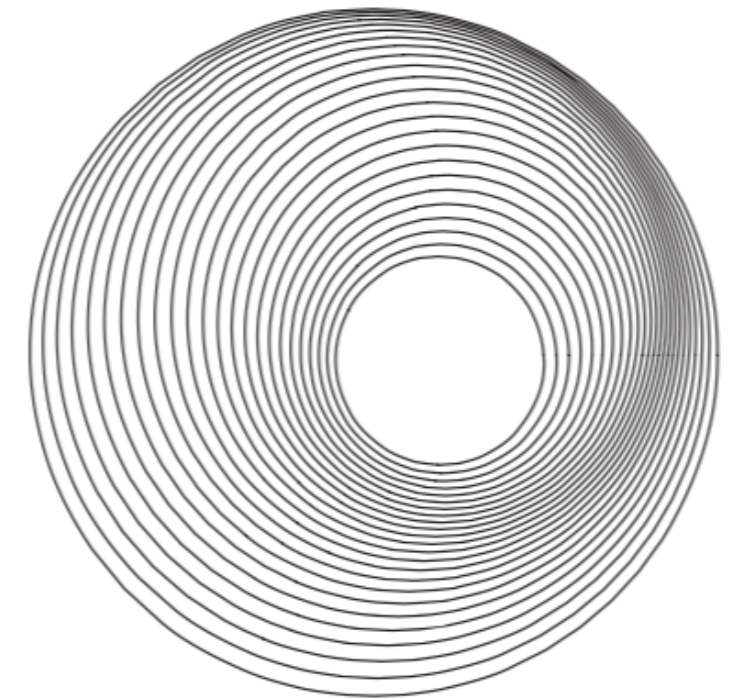
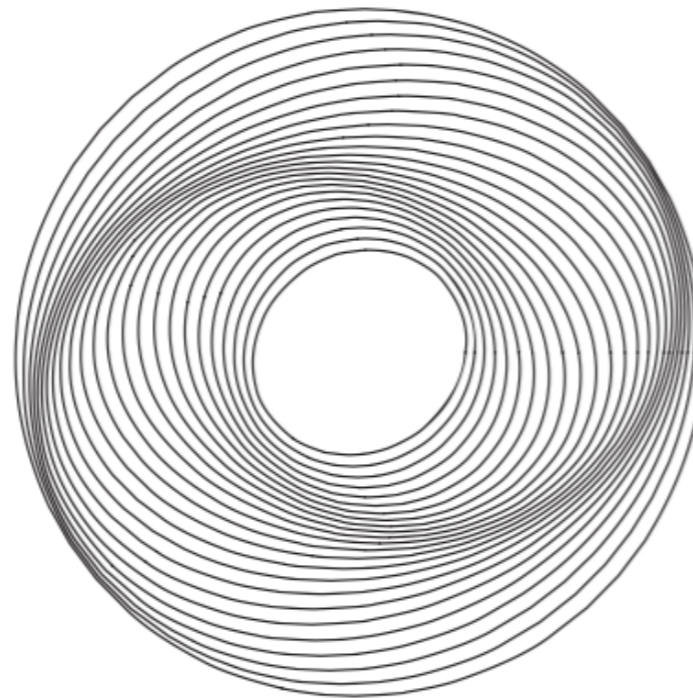
- A estrutura espiral é um fenômeno complexo e provavelmente não há apenas um processo responsável por todos os fenômenos espirais
- Os três modelos principais que co-existem são:
  - ***self-propagating star formation***, devido às regiões de formação estelar serem distorcidas pela rotação diferencial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



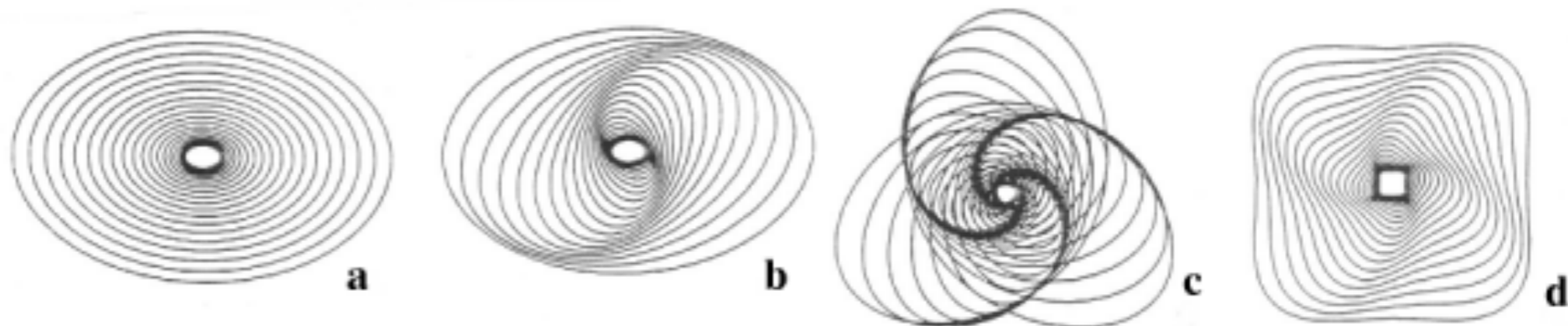


## Teorias para a Estrutura Espiral

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



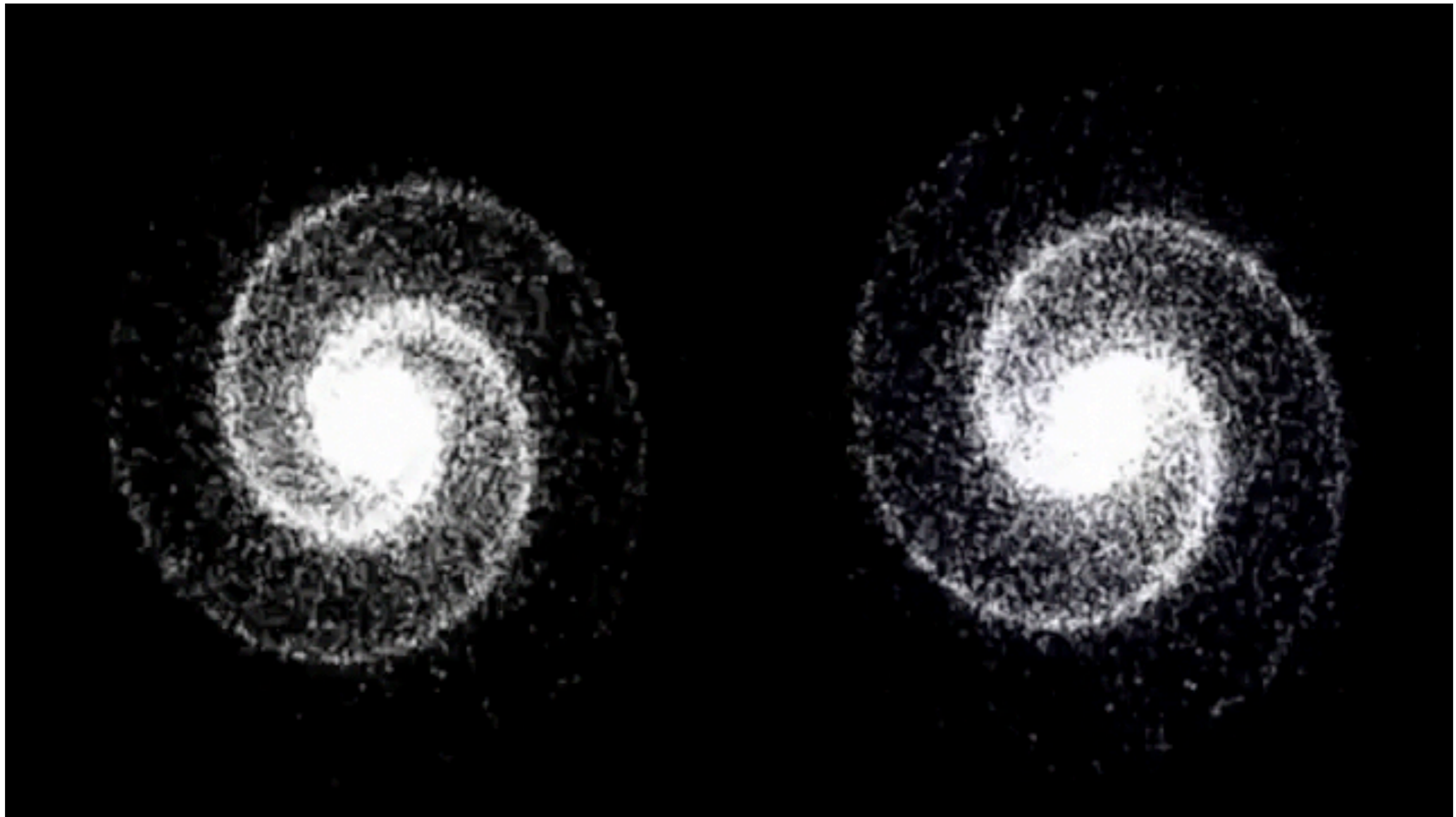
**Fig. 5.29.** Left, oval orbits nested to form a two-armed spiral; the equation of the pattern is  $R = R_g \{1 + 0.075 \cos[2(5 - 5R_g + \phi)]\}^{-1}$ , and  $0.3 < R_g < 1$ . Right, a one-armed spiral, with  $R = R_g [1 + 0.15 \cos(5 - 5R_g + \phi)]^{-1}$ .



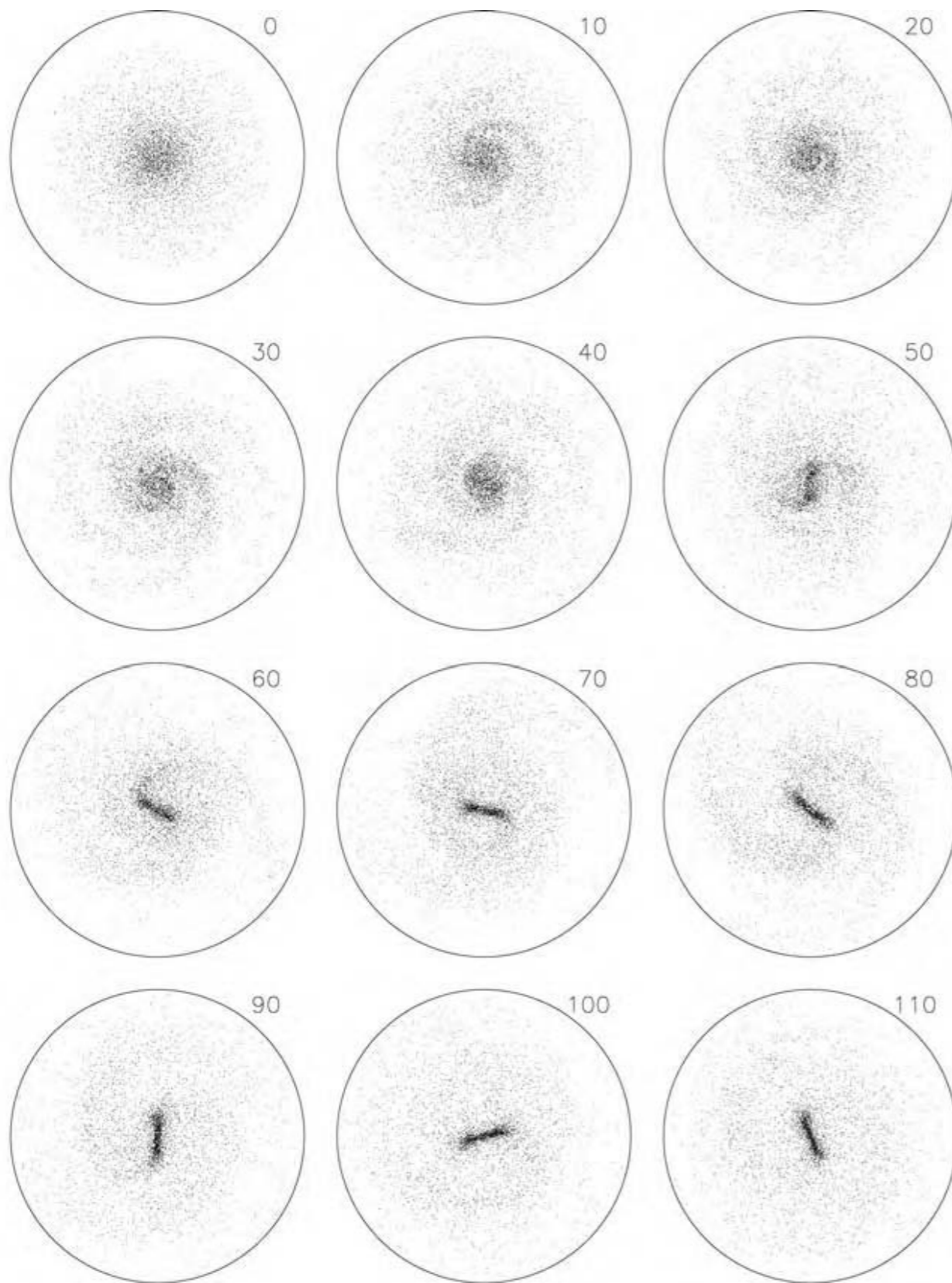
# Teorias para a Estrutura Espiral

---

- 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](https://www.youtube.com/watch?v=_GNPvYdvZAQ)

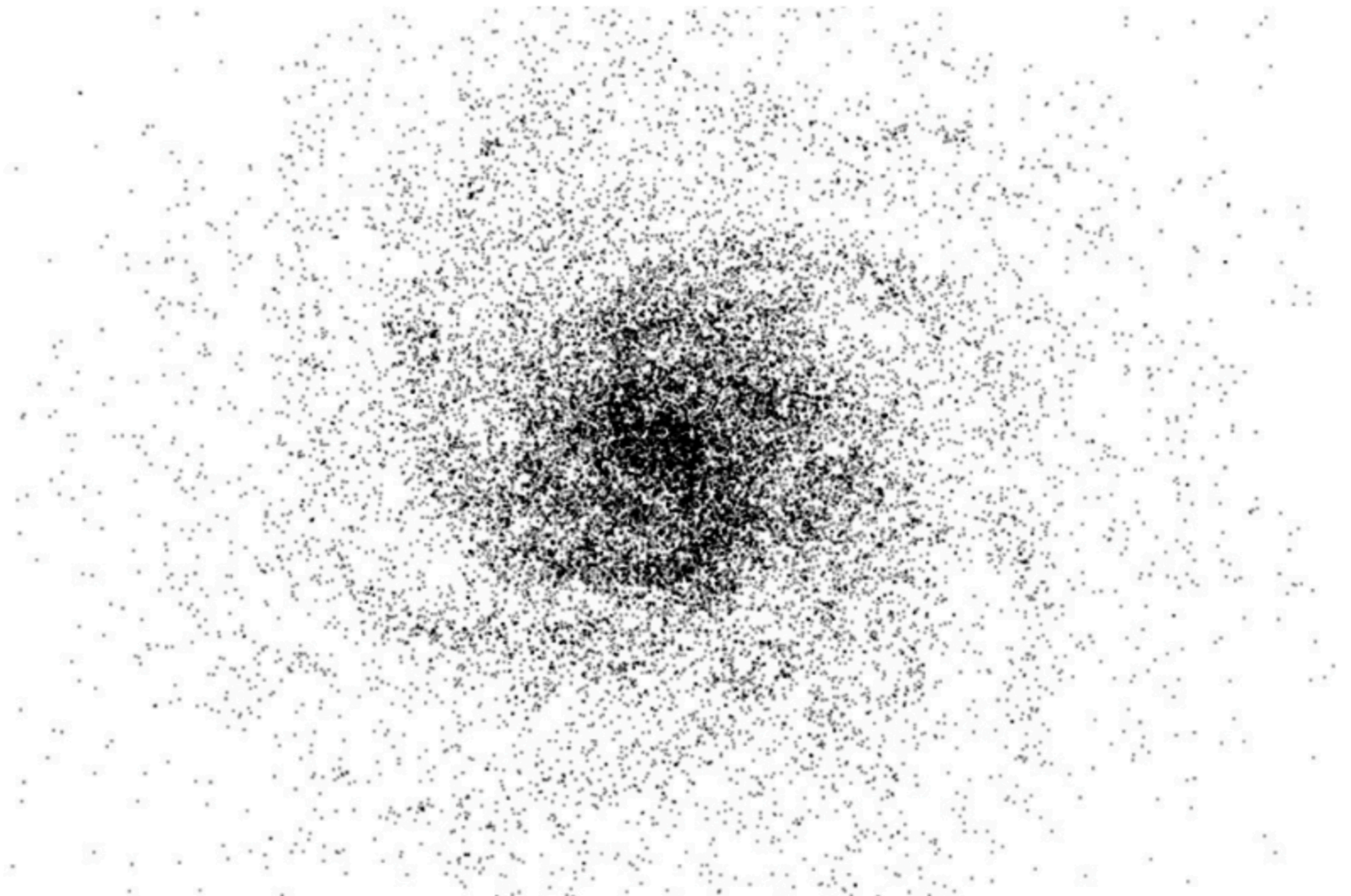


Simulação N-corpos com 50000 partículas. Ilustra primeiro a formação o padrão espiral e depois de uma barra.

**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.

# Lab Nemo: simulação de N-corpos de uma galáxia disco

---



**As barras**





# 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  $\Omega_p$
- 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  $\Omega_p$  diferente dos braços espirais (ou mais de um padrão espiral com velocidades diferentes!)

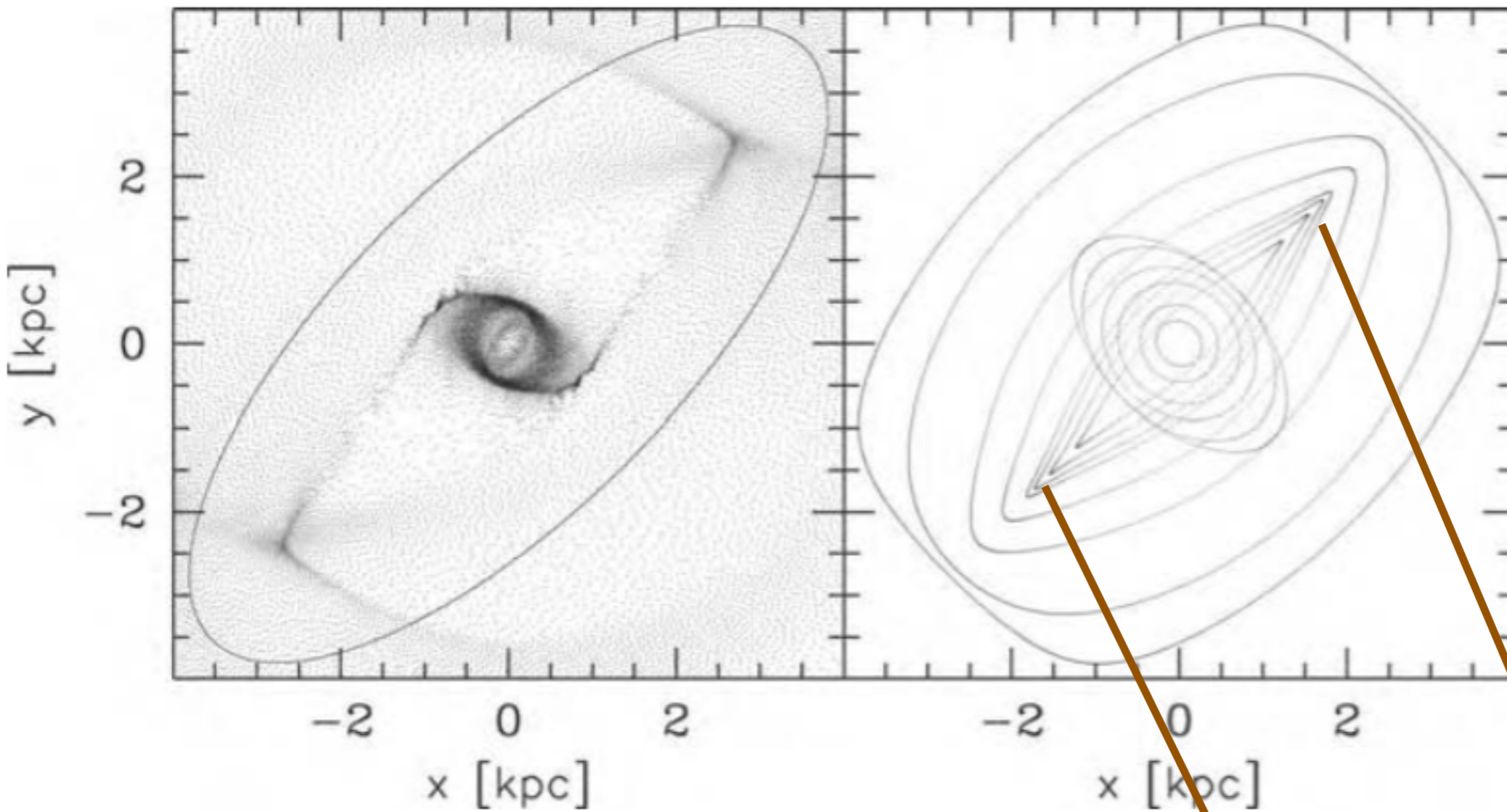


Fig. 5.33. Left, gas density from a computer simulation of flow within a bar; the solid curve outlines the bar, rotating clockwise. Right, particle orbits that close on themselves in a frame rotating with the bar. The gas flow is compressed in shocks along the leading edge of the bar, where the aligned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

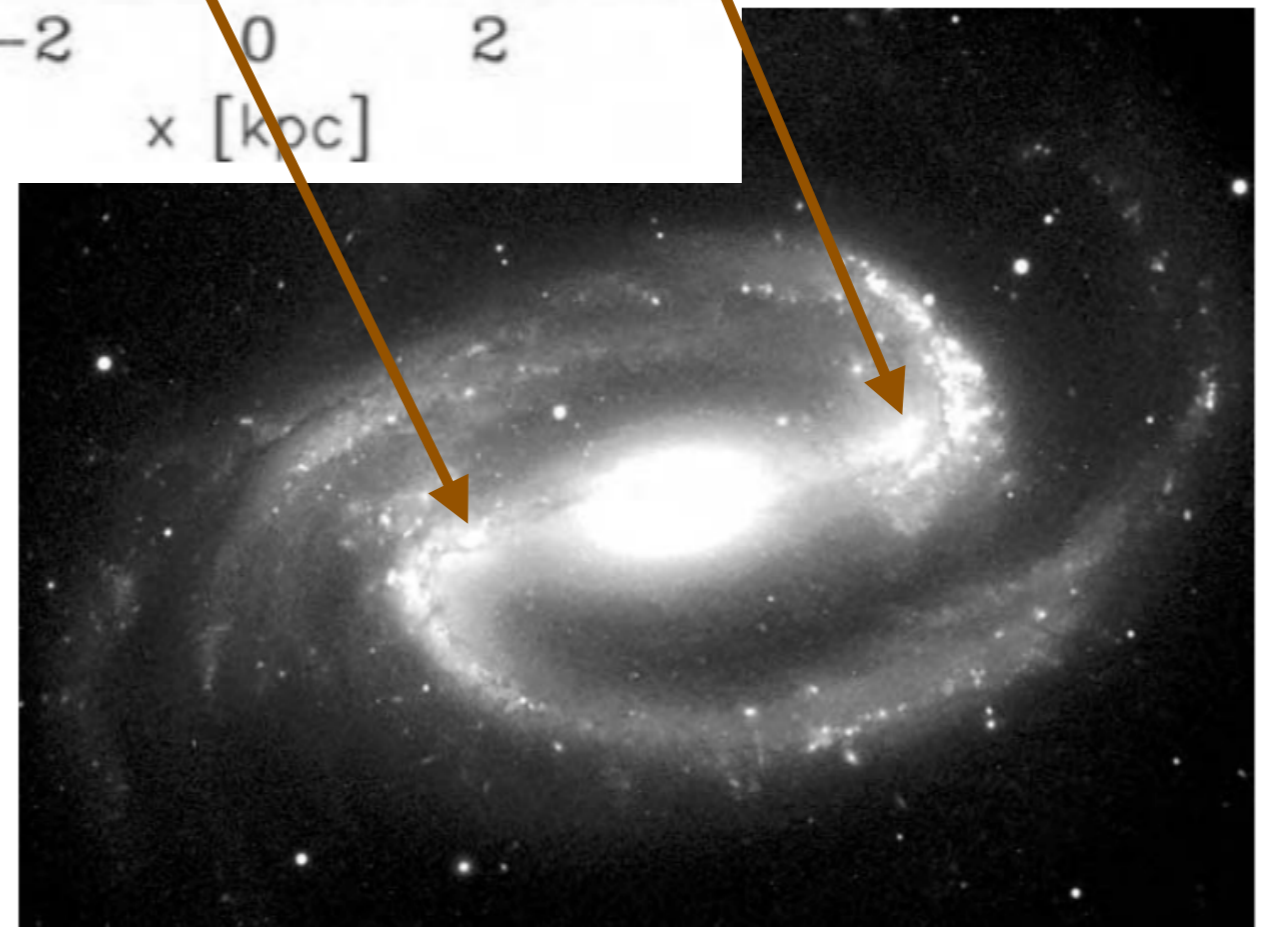


Fig. 5.32. The barred galaxy NGC 1300, classified as SBb or SBbc. The spiral arms trail; note the dust lanes on the leading edge of the bar – WIYN telescope.

Anéis

---

Galáxia Cartwheel



NGC4650A

Polar ring lenticular galaxy



NGC660



NGC437I



Bojos e as regiões centrais de 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

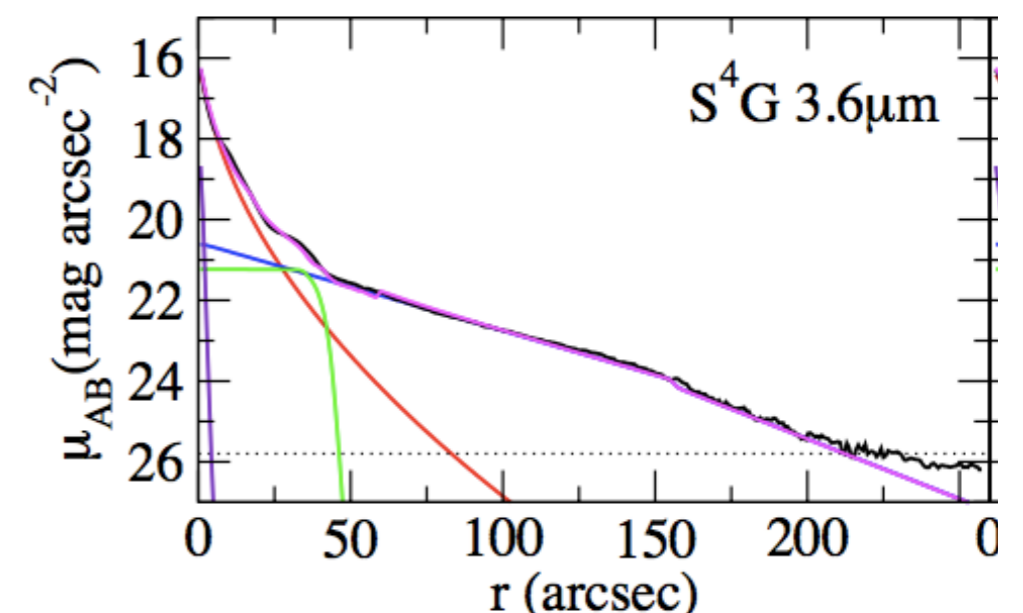
**Fig. 5.5.** A  $V$ -band image of Sa galaxy M104, the ‘Sombrero’ (NGC 4594): this is a luminous galaxy with  $L_V \approx 8 \times 10^{10} L_\odot$ , about 10 Mpc away. Note the large bulge and numerous globular clusters – A. Cole, WIYN telescope.

# 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

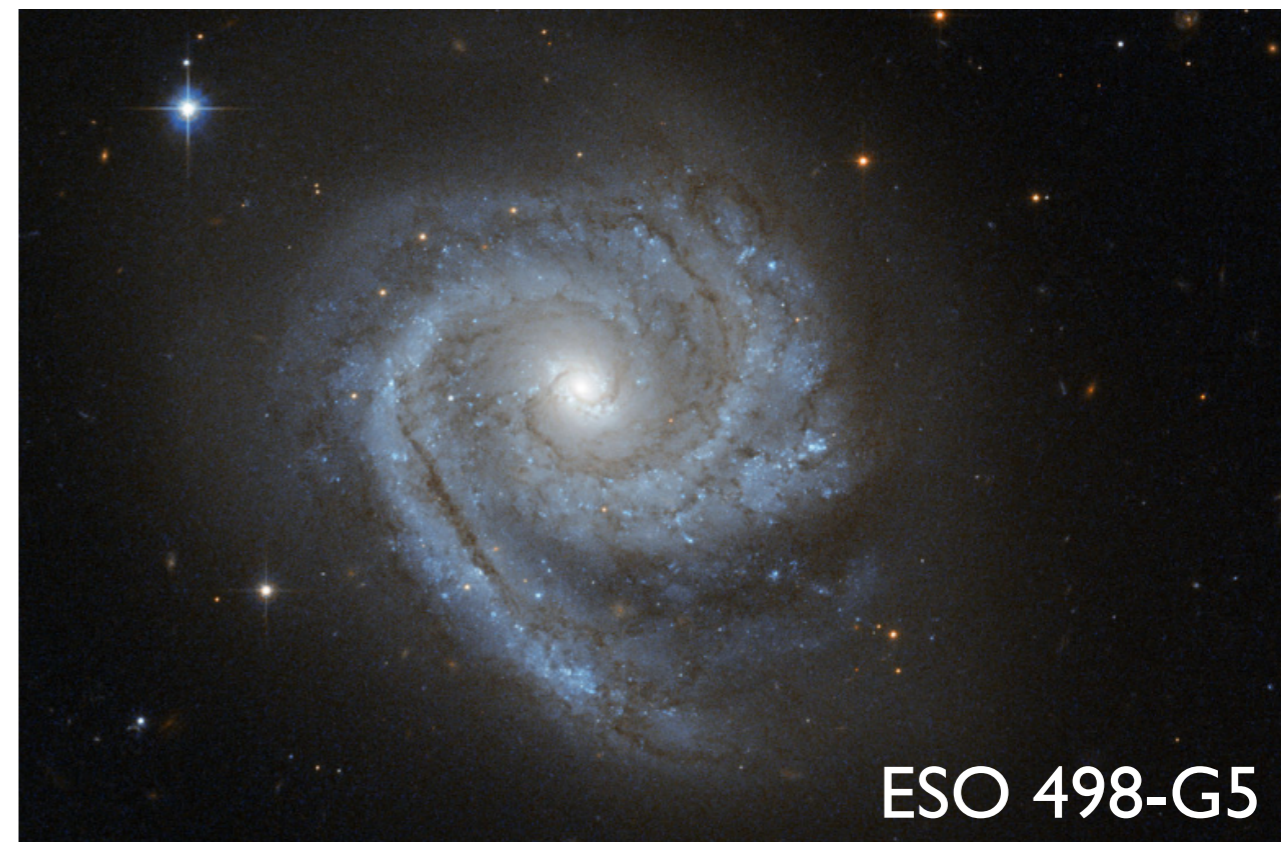




# Bojos

---

- 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

---

- 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).

# Curiosidades sobre bojos

---

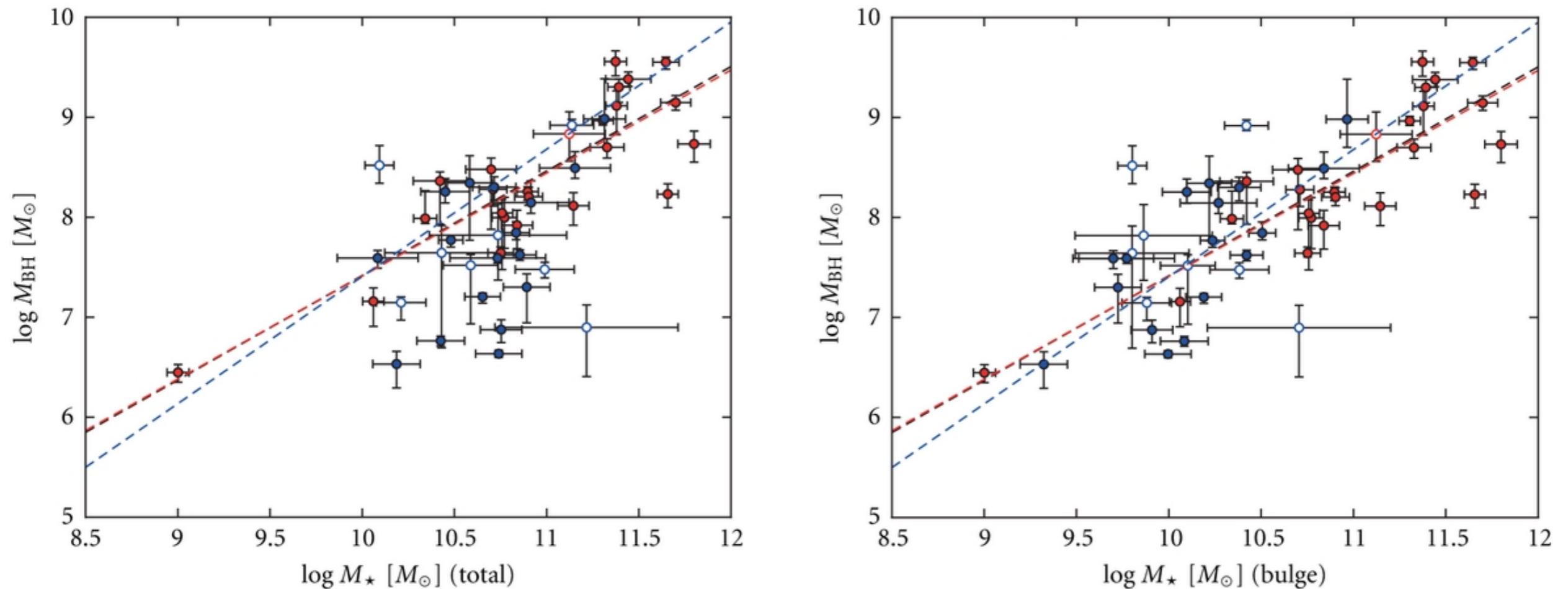
- Em Sombrero,  $R_e \approx 4 \text{ kpc}$
- Estudos indicam que há uma relação entre o tamanho do bojo e do disco

$$R_e/h_R \approx 0.1$$



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

# Relação entre bojo e buraco negro central

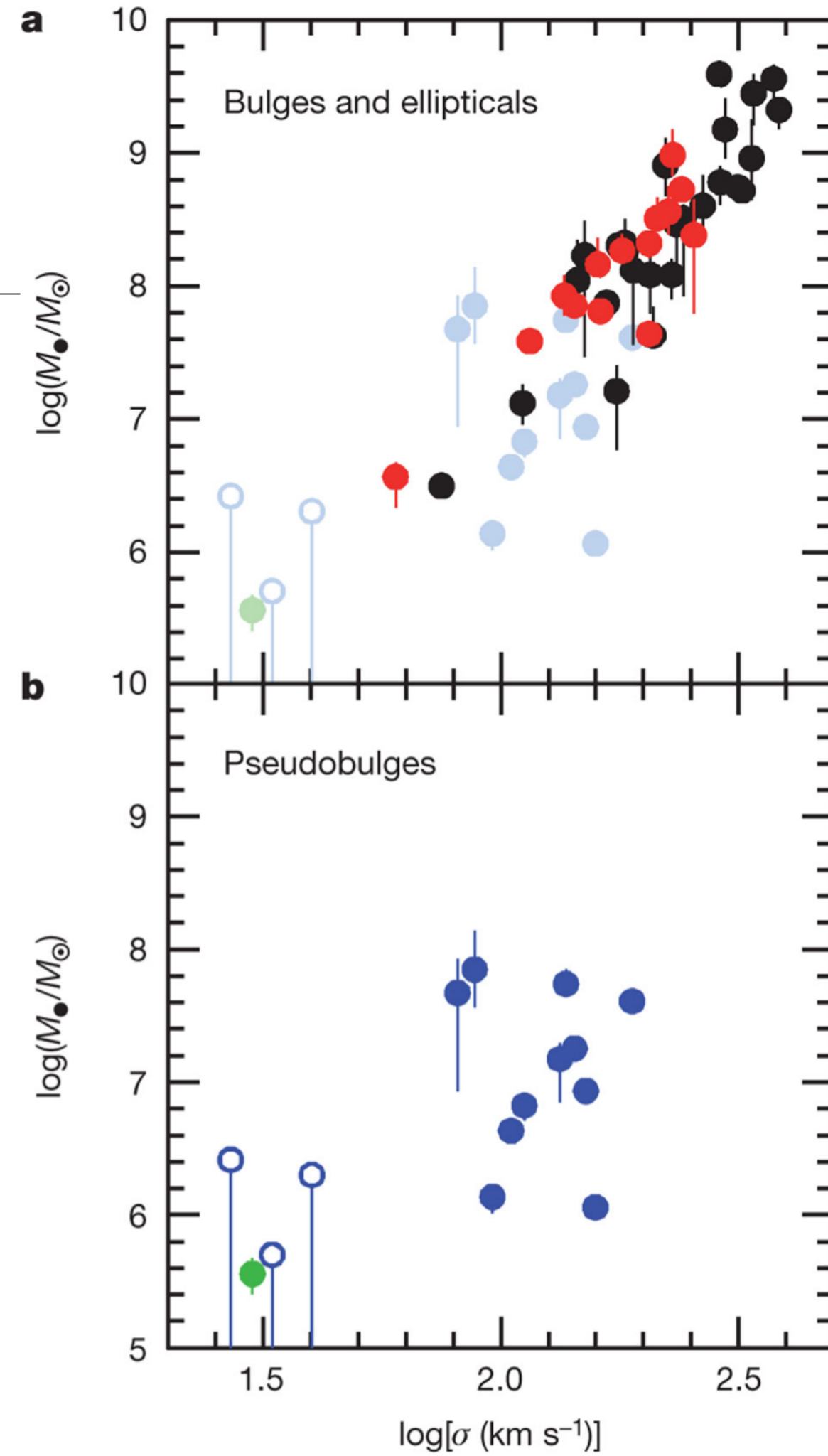


SMBH mass (red: elliptical galaxies, blue: disk galaxies) versus total galaxy stellar mass. (b): SMBH mass versus bulge stellar mass. The diagonal dashed lines are the best fits to the relation for the whole sample (black), for the elliptical galaxies (red), and for bulges of the disk galaxies (blue). 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](http://www.nature.com/nature/journal/v469/n7330/fig_tab/nature09694_F2.html)





NGC6503



## Galáxias sem bojo

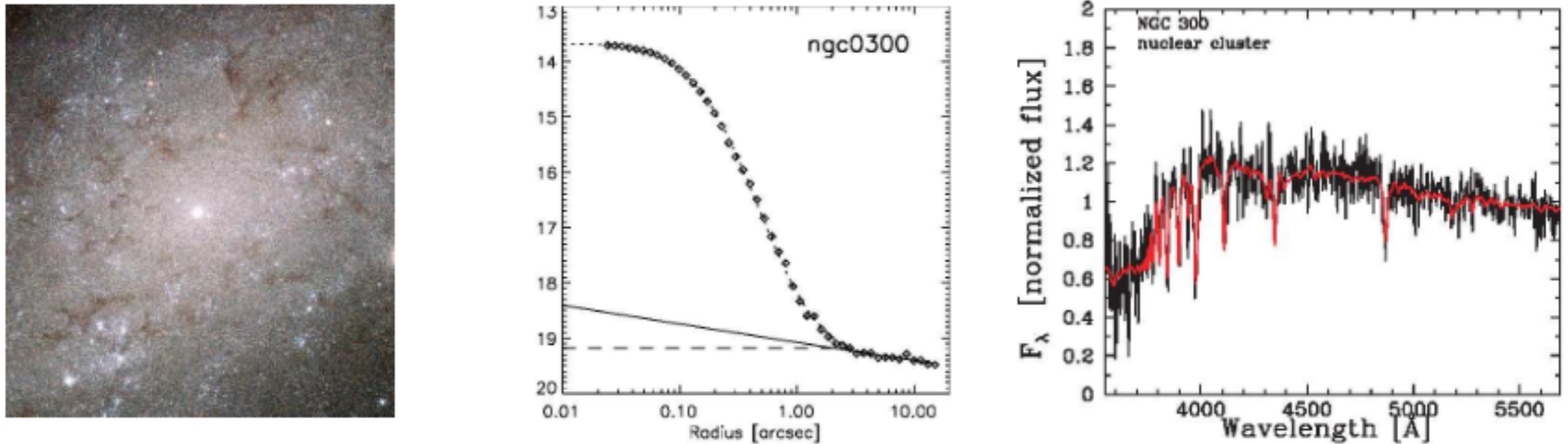
Tem importância cosmológica: não sofreram virtualmente nenhum merger. O mais próximo que podemos observar dos discos primordiais previstos em simulações.

# 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  $\sim 100$  Myr,

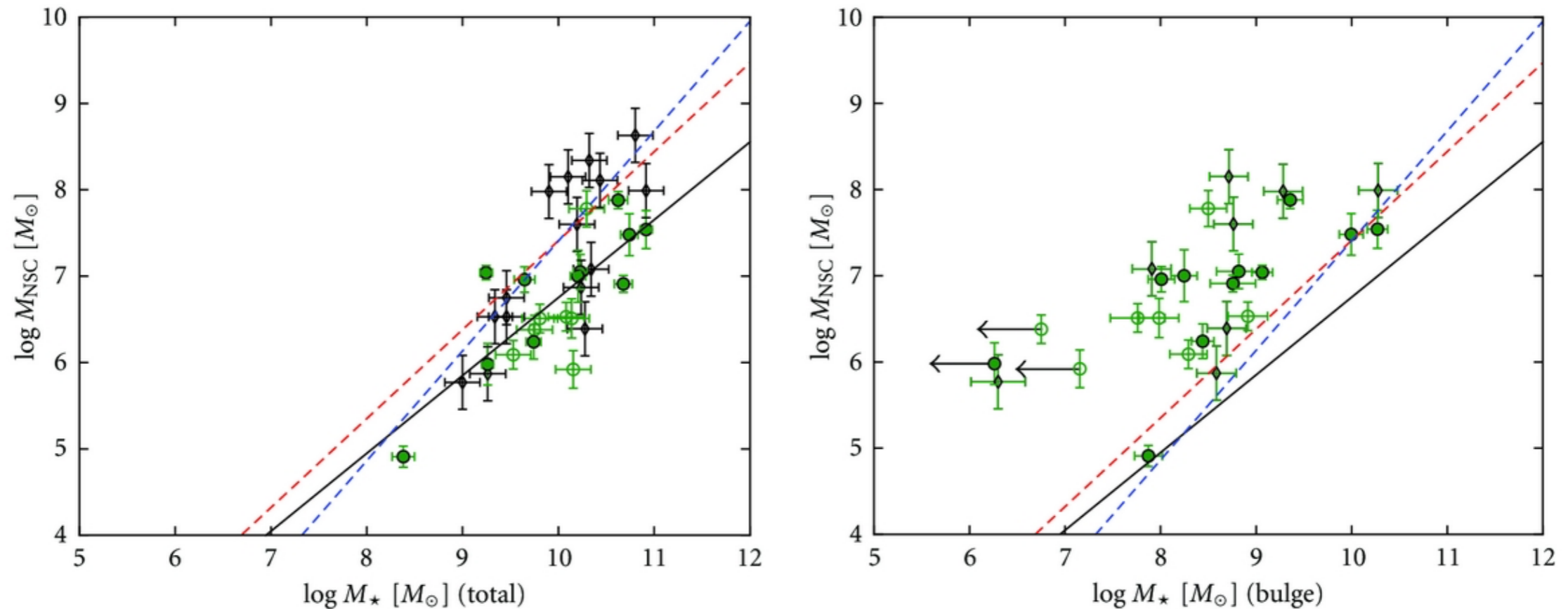
# Aglomerados Estelares Nucleares



**Figure 1.** (a) HST/ACS color composite image of the central  $1.2 \times 1.2$  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

<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.

# Interlúdio

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

