

# 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





Black Eye, ou Evil Eye ou Sleeping Beauty Galaxy.  
Stay tuned for the next lab :)

<http://apod.nasa.gov/apod/ap150618.html>

# 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



# Detetores em Astronomia

# CCDs

- O detetor mais comum em Astronomia hoje é o CCD, charge-coupled device

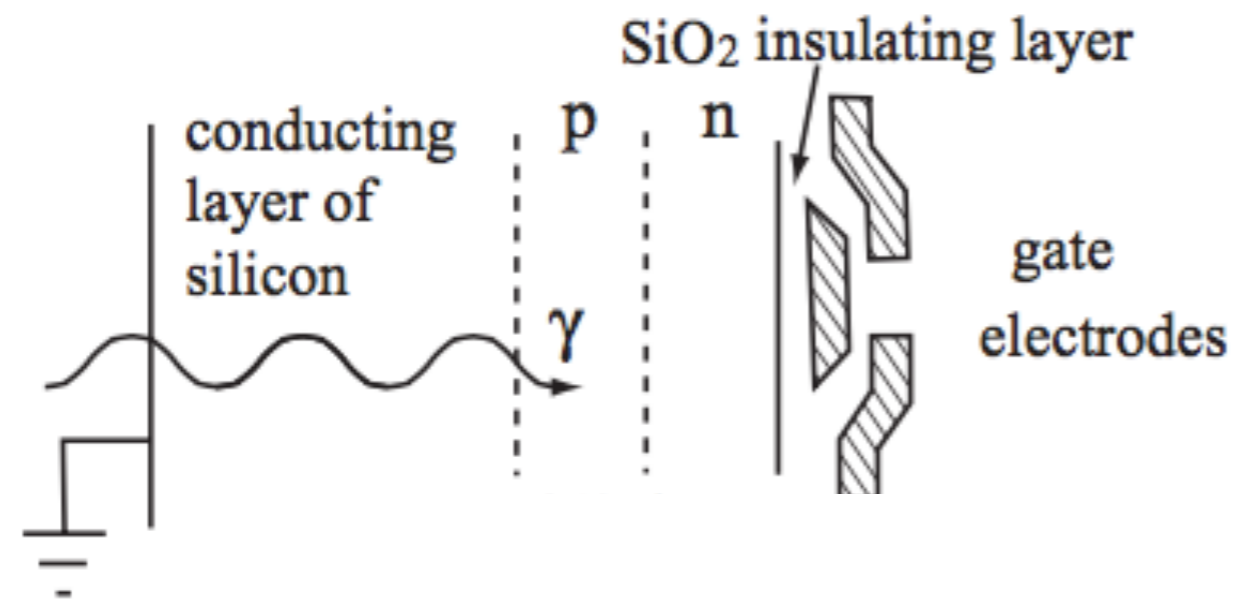
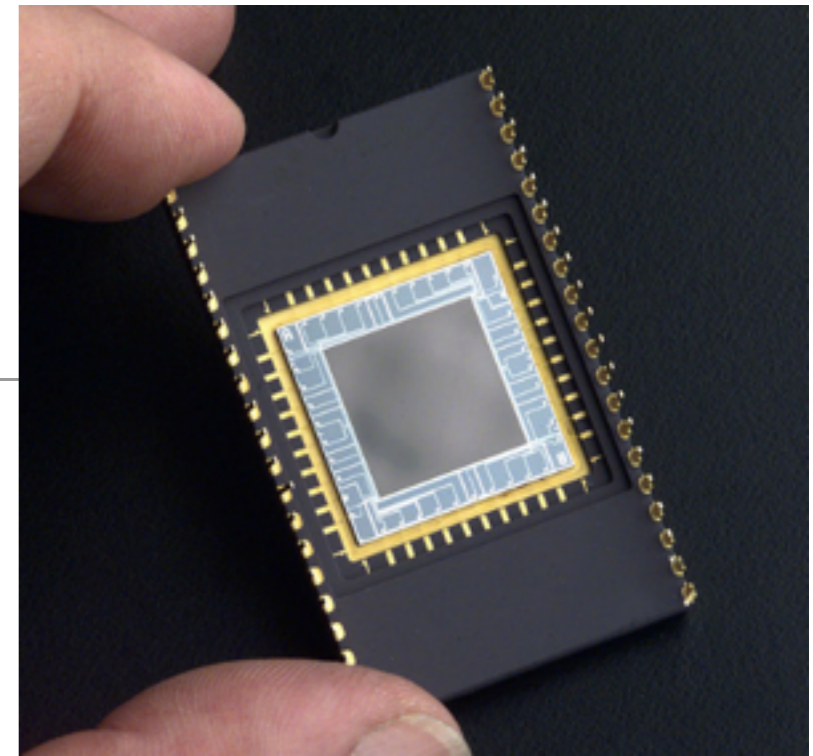


Fig.5.2. Ilustração dos elementos individuais, os pixels

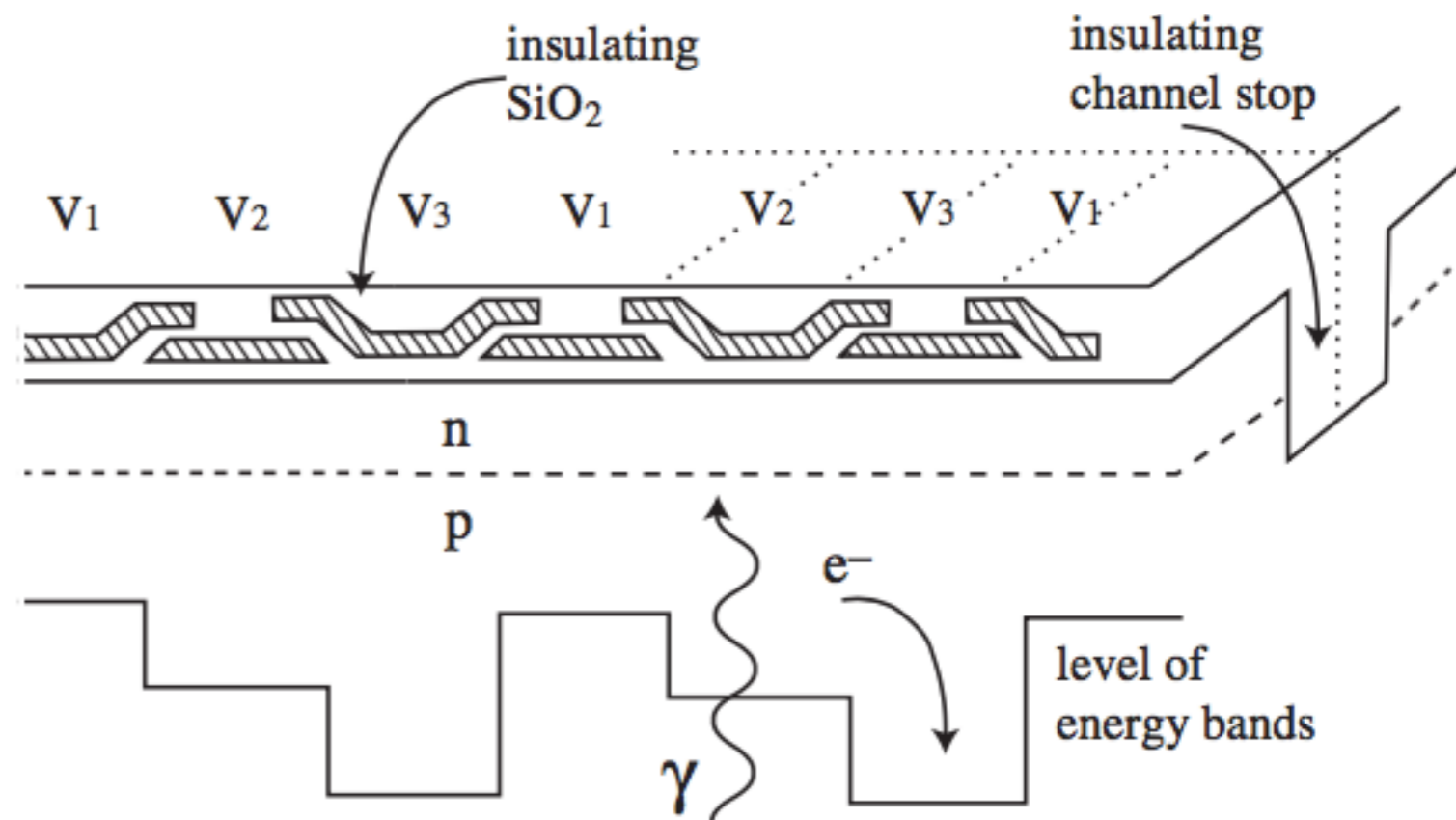
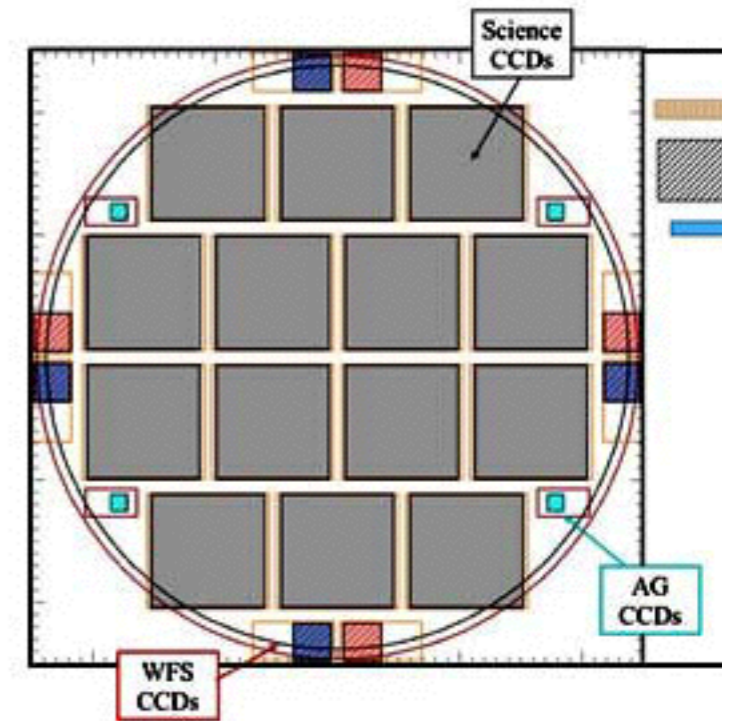


Fig.5.1. A section through a back-illuminated CCD chip turned on its side: photons (wavy line) enter through the conducting silicon layer, liberating electrons which are attracted toward the gate electrodes. Gate voltages are adjusted to trap electrons just beneath the surface.

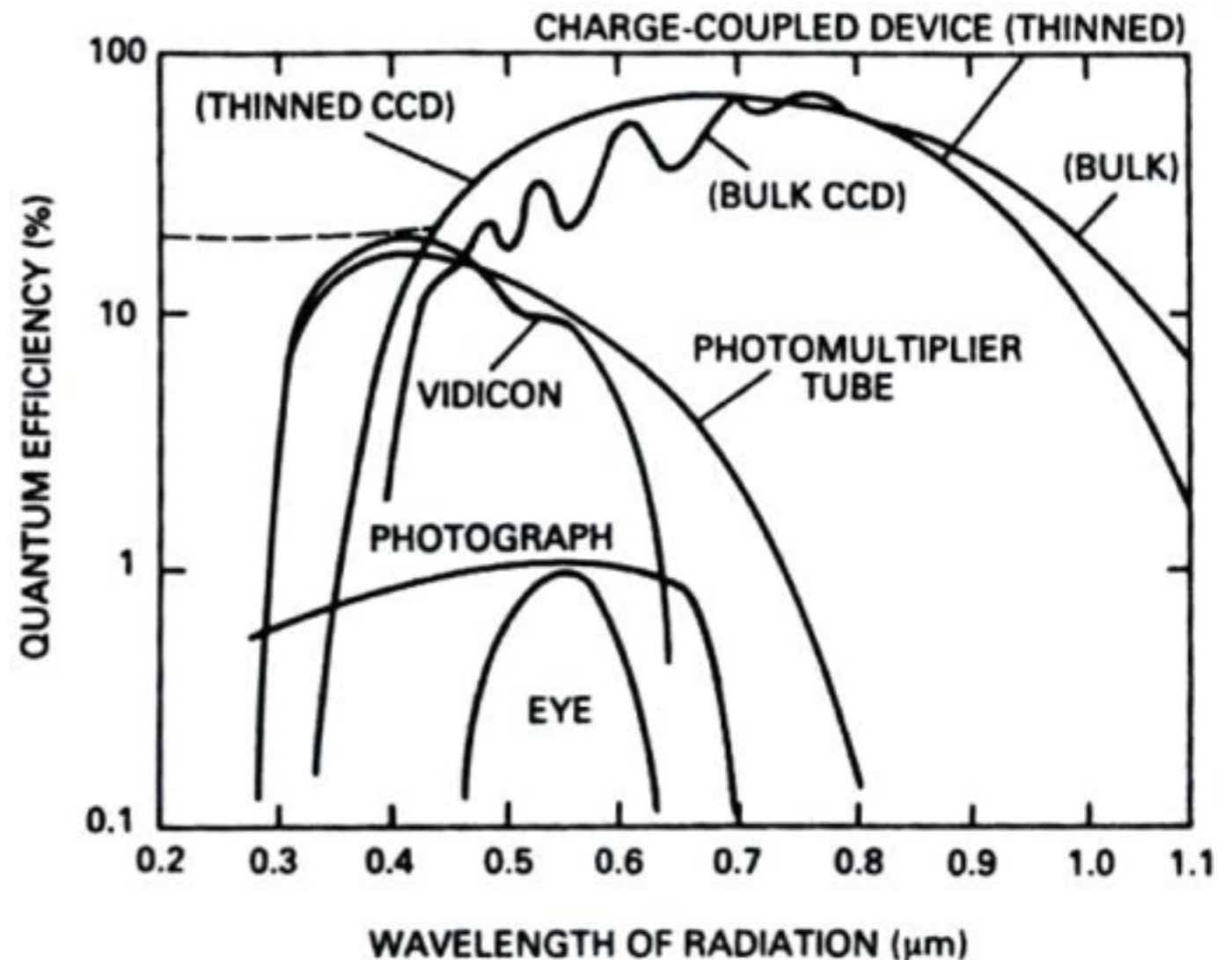
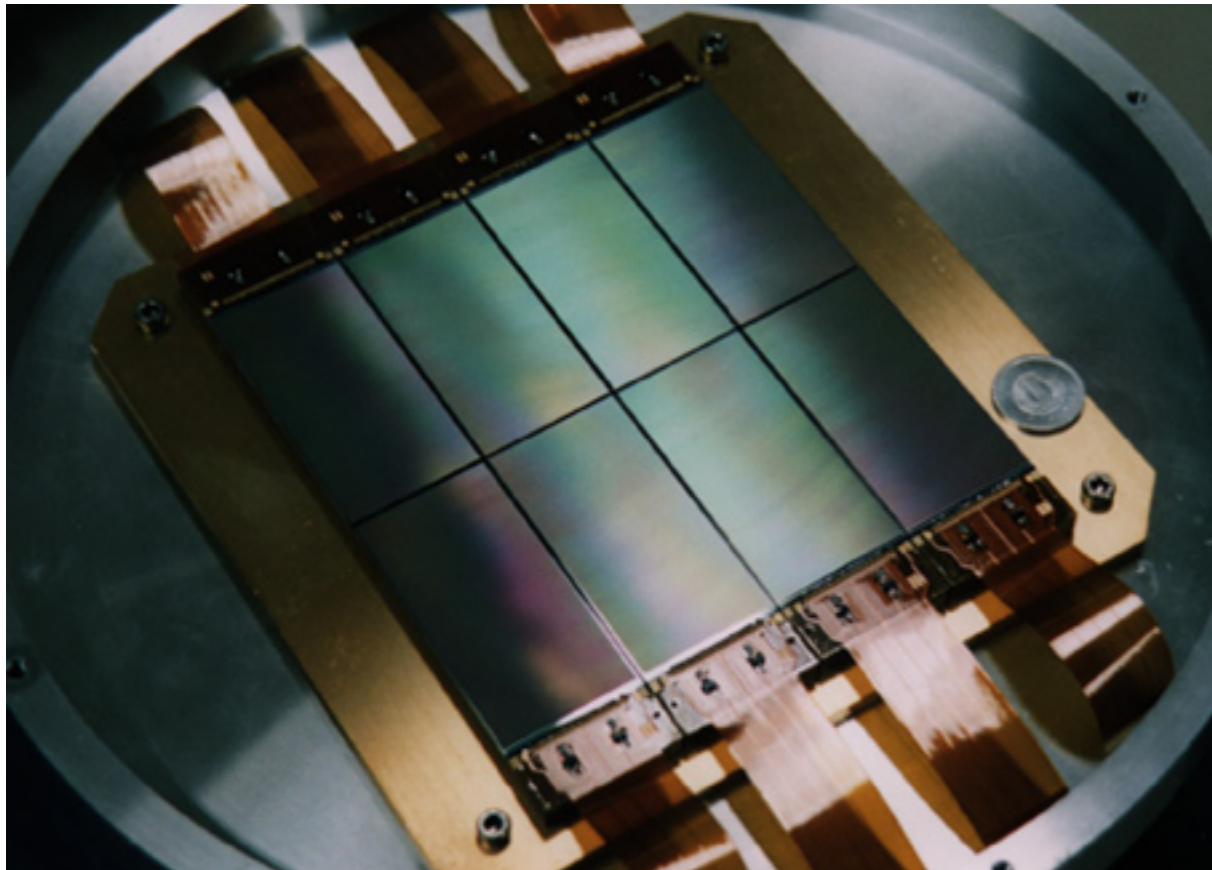
Trabalham a temperaturas baixas (100 - 200K), para reduzir read-out noise.

Eficientes para comprimentos de onda no visível até o infravermelho próximo, e em raios-X

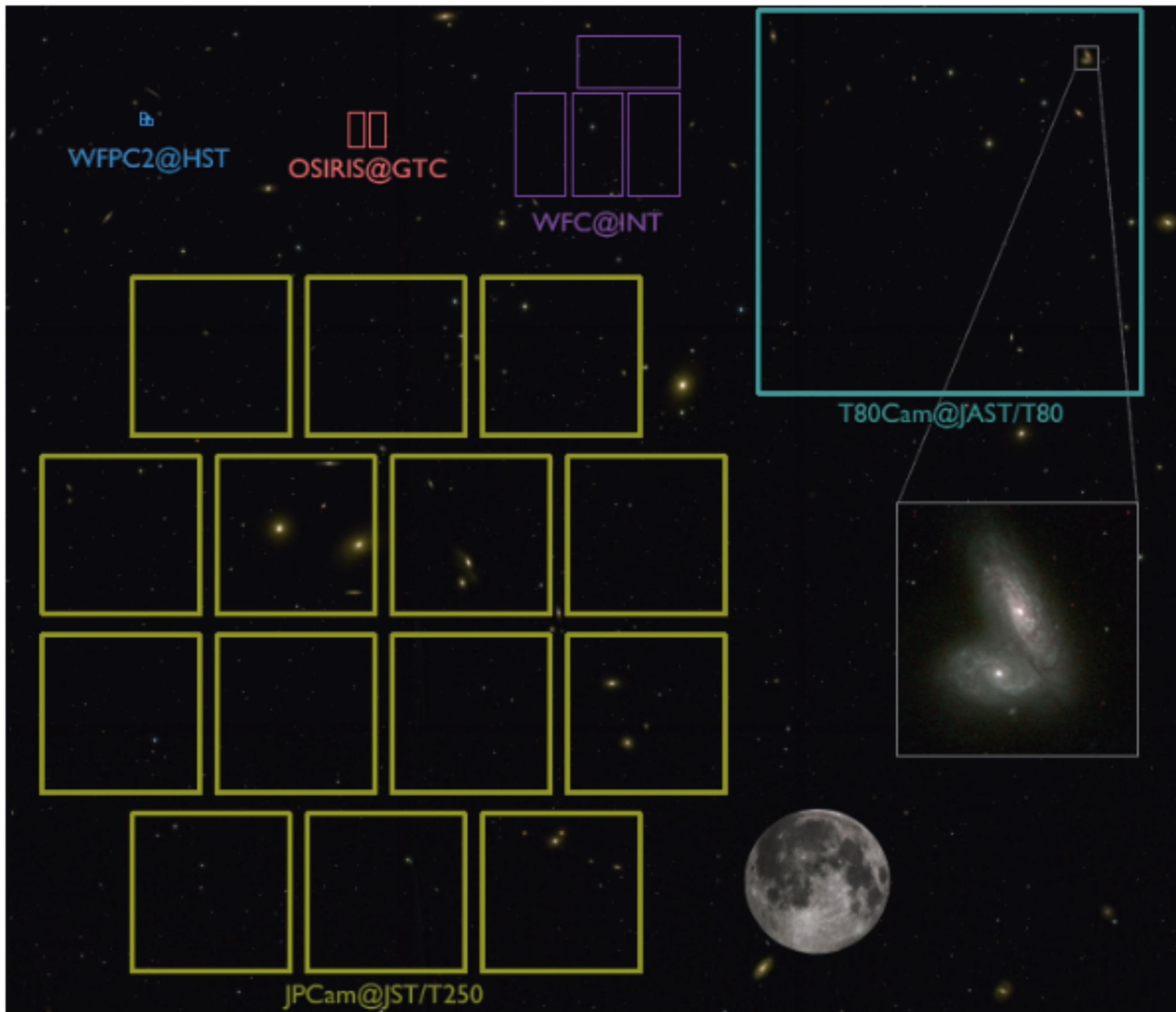
J-PAS, 14 CCDs,  
FOV 7 graus quadrados.



Mosaico do SUBARU.  
Até 1.5 graus quadrados.







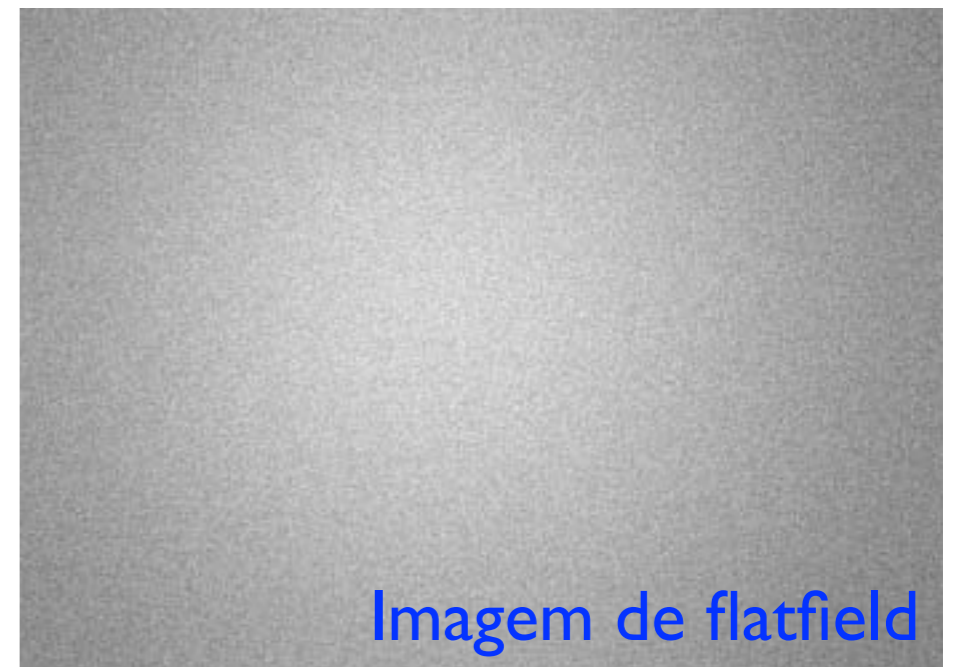
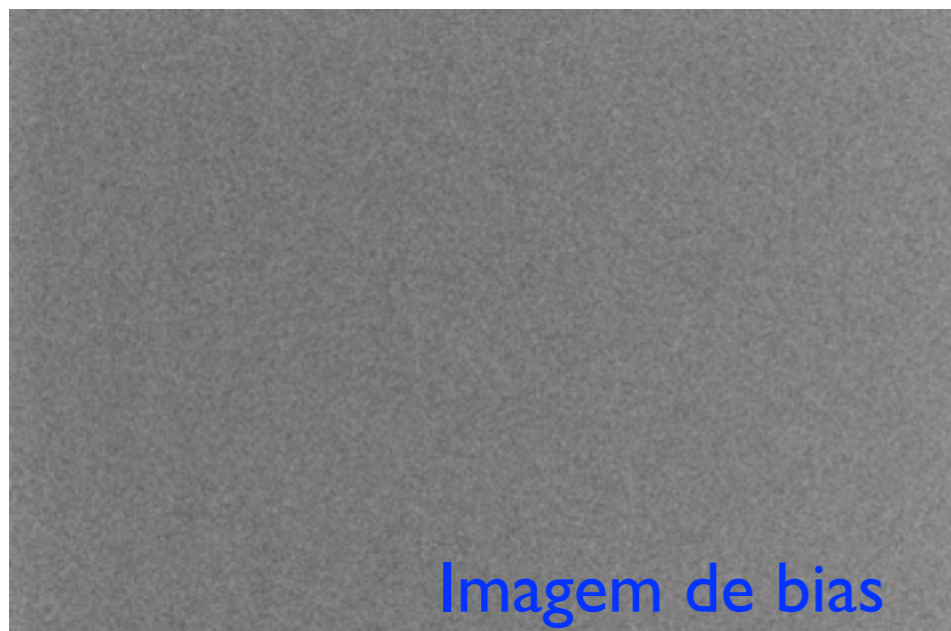
Crédito: Seminário de A. Ederoclite

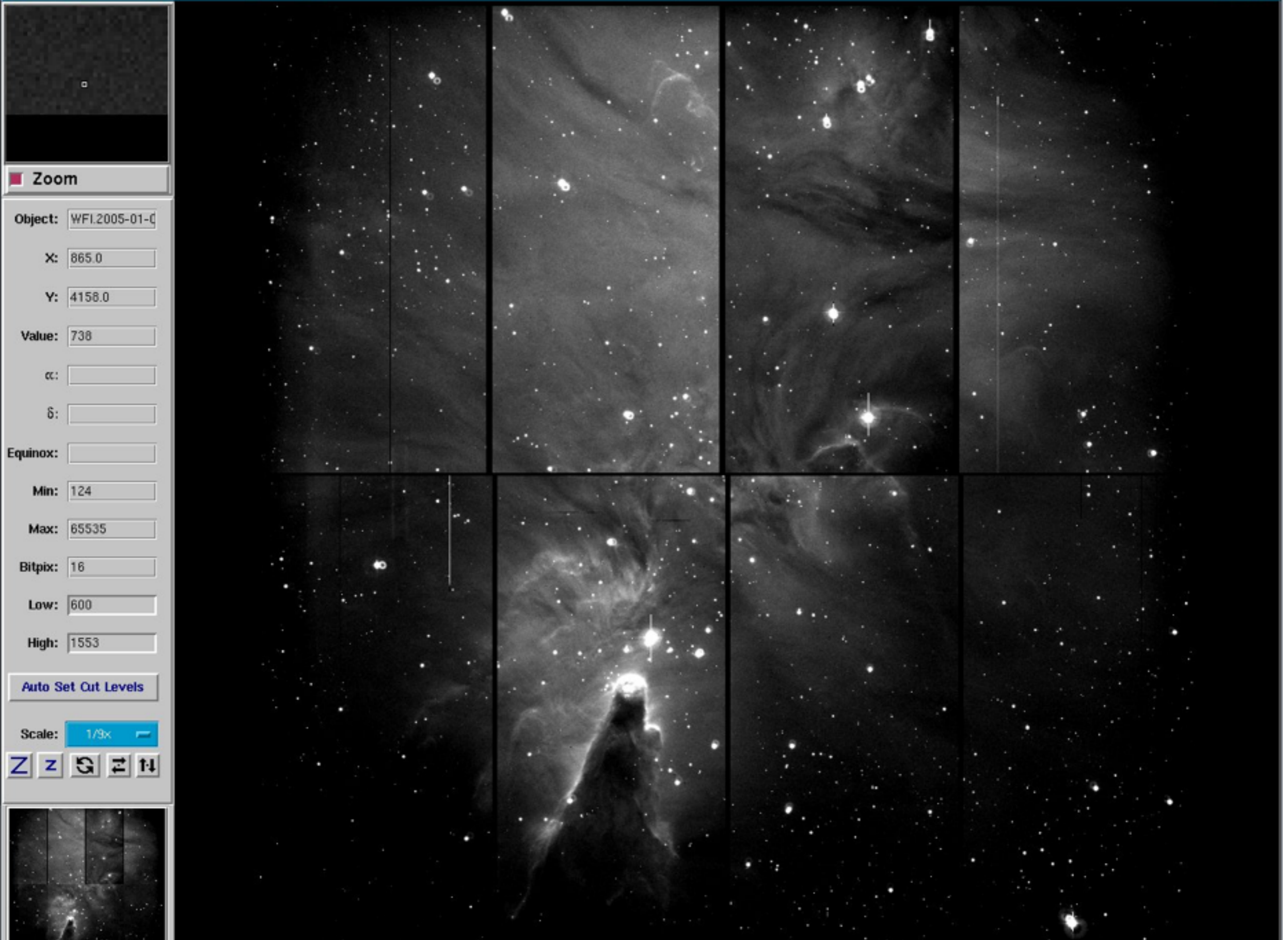


# Redução de dados

---

- Transformar as contagens de elétrons registradas pelo CCD em unidades astrofísicas (fluxo)
- Observações de calibração básicas
  - Dark: elétrons térmicos (não fotoelétricos) coletados durante a exposição.
  - Bias: um sinal adicionado durante o readout
  - Flat-field: diferentes pixels tem sensibilidades diferentes





**Zoom**

Object:

X:

Y:

Value:

$\alpha$ :

$\delta$ :

Equinox:

Min:

Max:

Bitpix:

Low:

High:

Scale:





<https://www.eso.org/~ohainaut/images/imageProc.html>



NGC2264 - WFI@2.2m - 17Sep2008

Halpha

R

V

B





# Razão Sinal-Ruído

---

- S/N : quantifica a qualidade da observação
- No caso mais simples, o ruído estatístico da contagem de fótons é a fonte dominante de erro (ruído)
- Sendo  $S$  o número de elétrons capturados,  $C$  a contagem do CCD, o CCD tem um “ganho”  $g$  tal que  $S = gC$

- nesse caso simples, *photon-noise-limited*, ruído é  $N = \sqrt{gC}$ .

- quando o ruído de leitura é importante, *read-noise-limited*,

$$S/N = gC / \sqrt{gC + R^2}$$

- e assim por diante com as outras fontes de ruído. Em geral pode-se considerar que a maioria das observações tem ruído dominado pela contagem de céu.

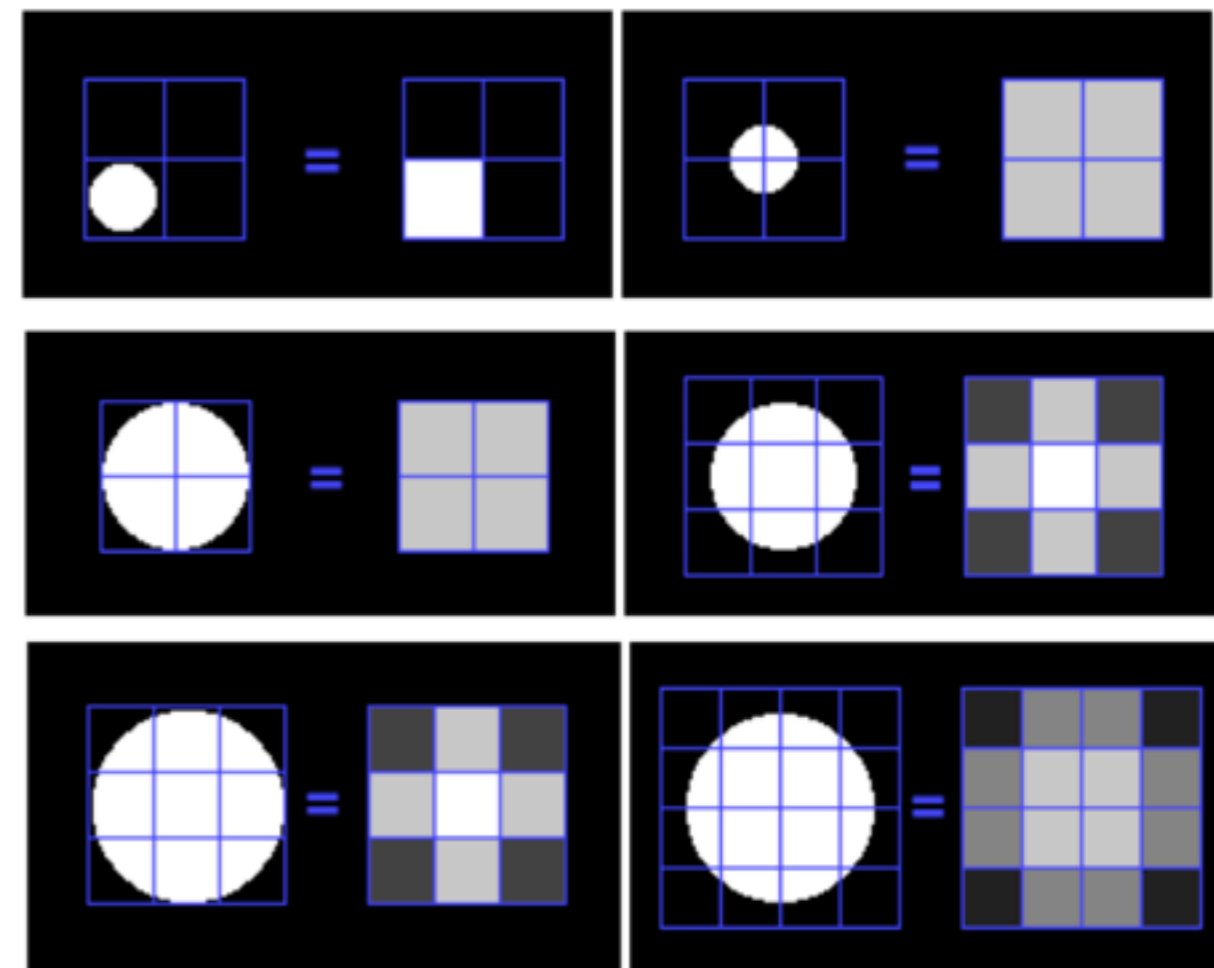
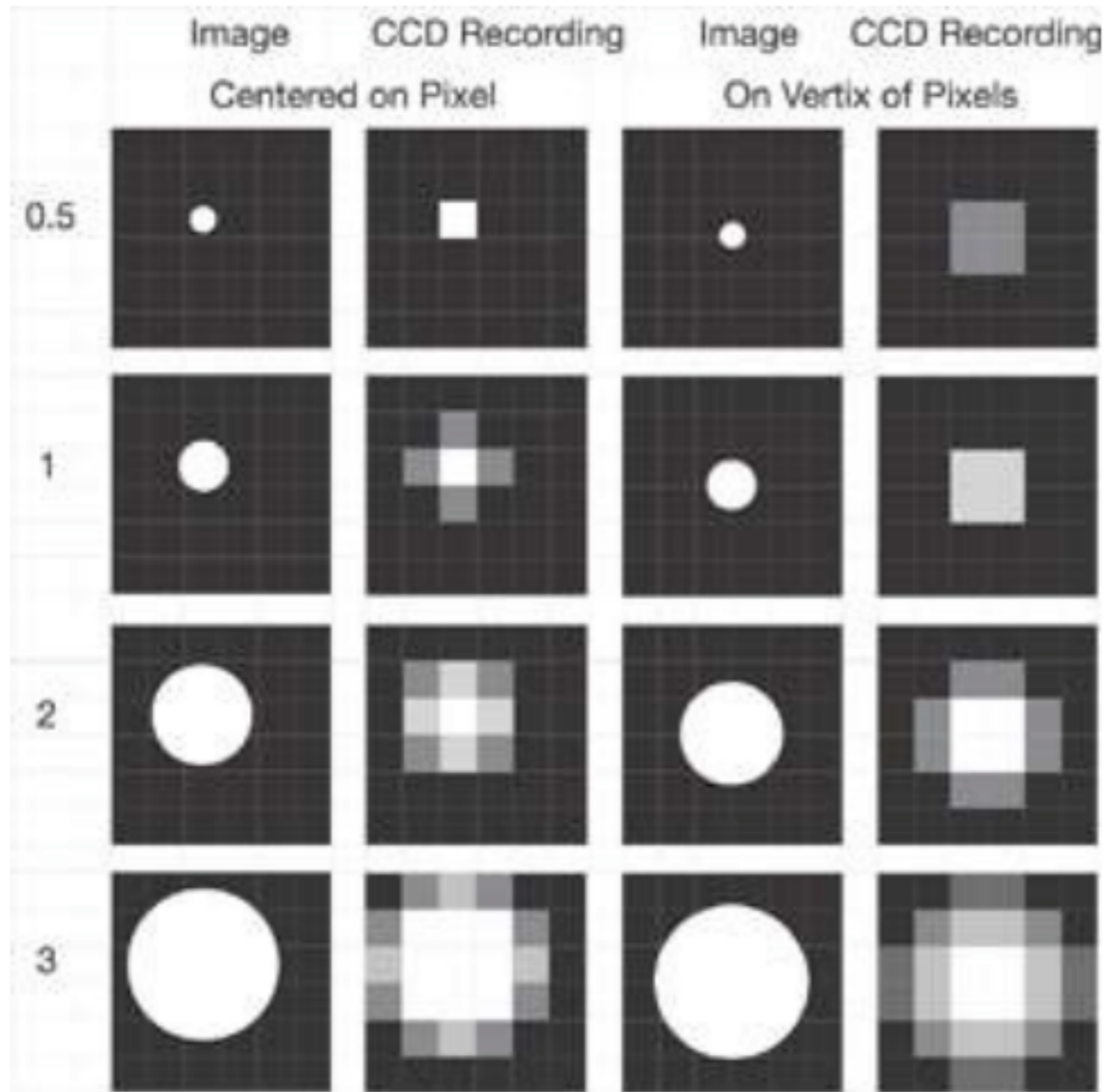
$$S/N = gC / \sqrt{gC + R^2 + S^2}$$

# Resolução Espacial

---

- Imagine que você quer medir o brilho superficial  $I(\mathbf{x})$  de uma galáxia, ou o fluxo  $F_\lambda$  em um espectro.
- um CCD mede quantos fótons no total caíram dentro de cada pixel, mas não onde dentro do pixel os fótons caíram.
  - para medir o tamanho angular de um objeto, é necessário que ele ocupe no mínimo dois pixels.
  - detalhes na imagem da galáxia que tenham 1" precisam de uma escala de placa  $\lesssim 0.5''$  por pixel
  - similarmente, para medir um espectro com resolução  $\Delta\lambda$ , o espectrógrafo precisa dispersar a luz por pelo menos 2 pixels

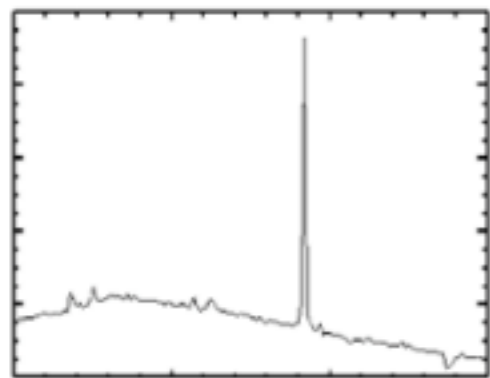
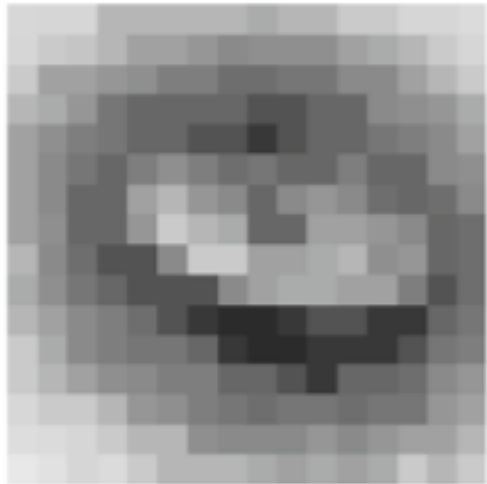
# Resolução Espacial



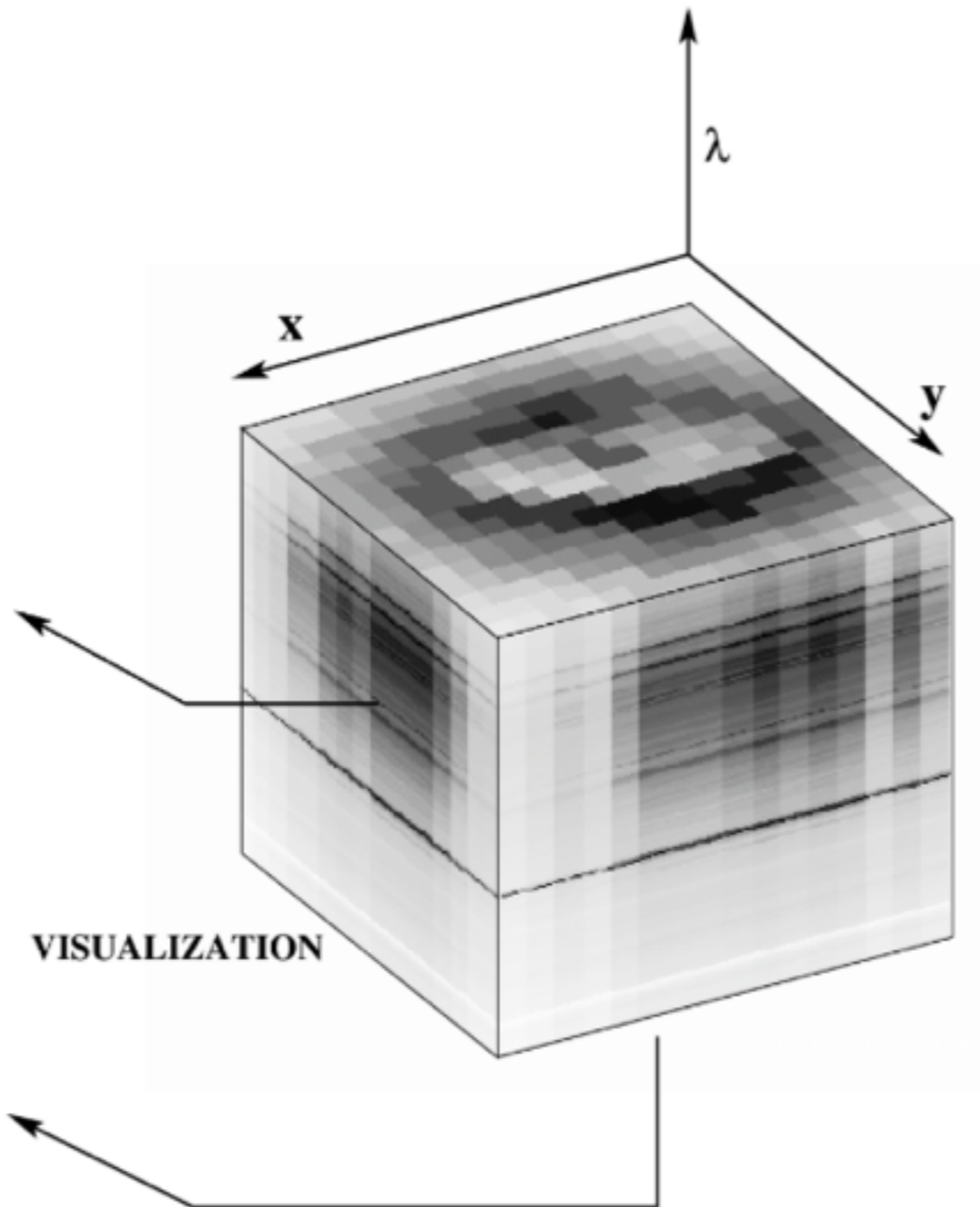
# Integral field units: ex. MUSE

---

monochromatic maps



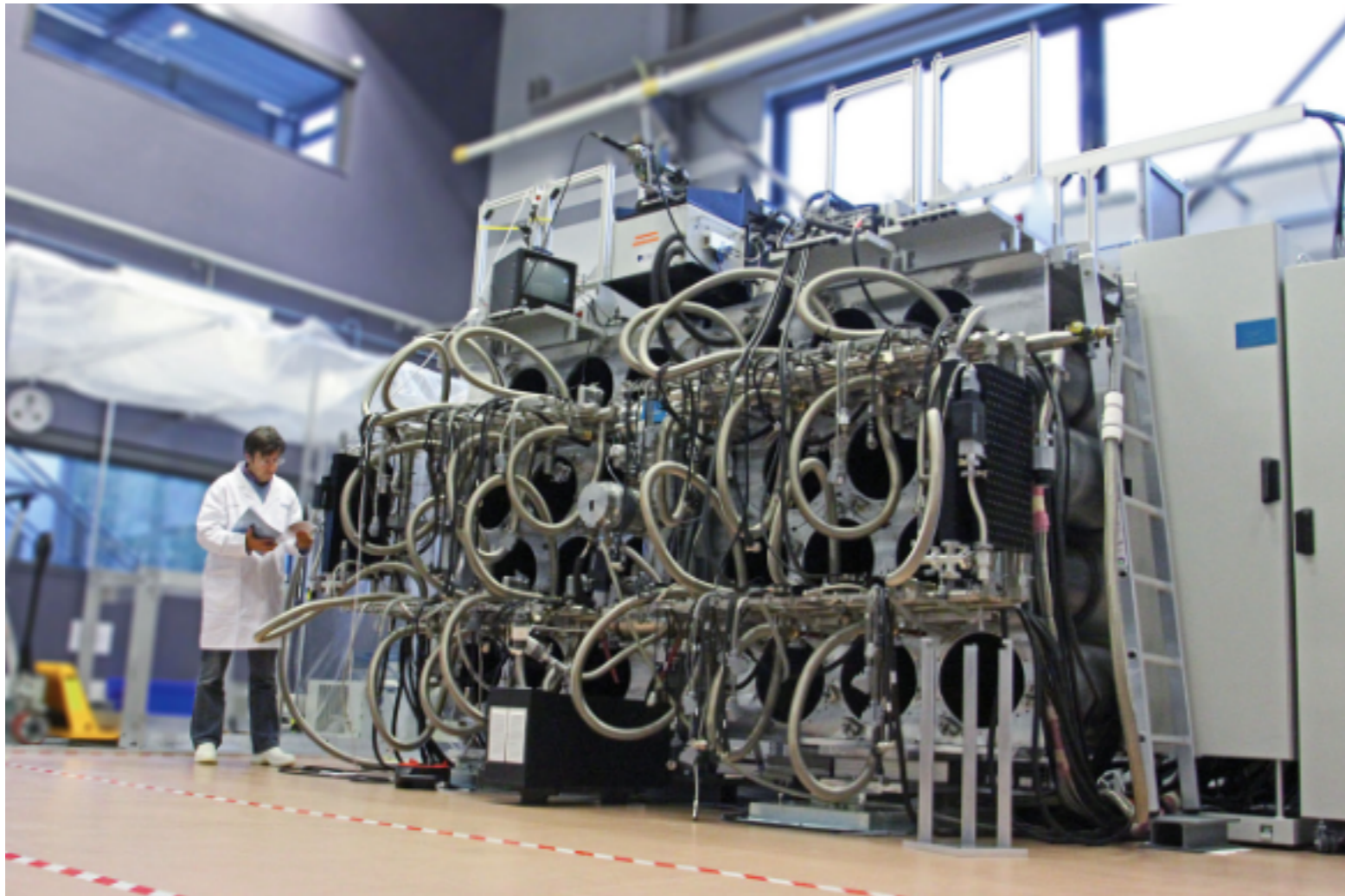
single or coadded spectra



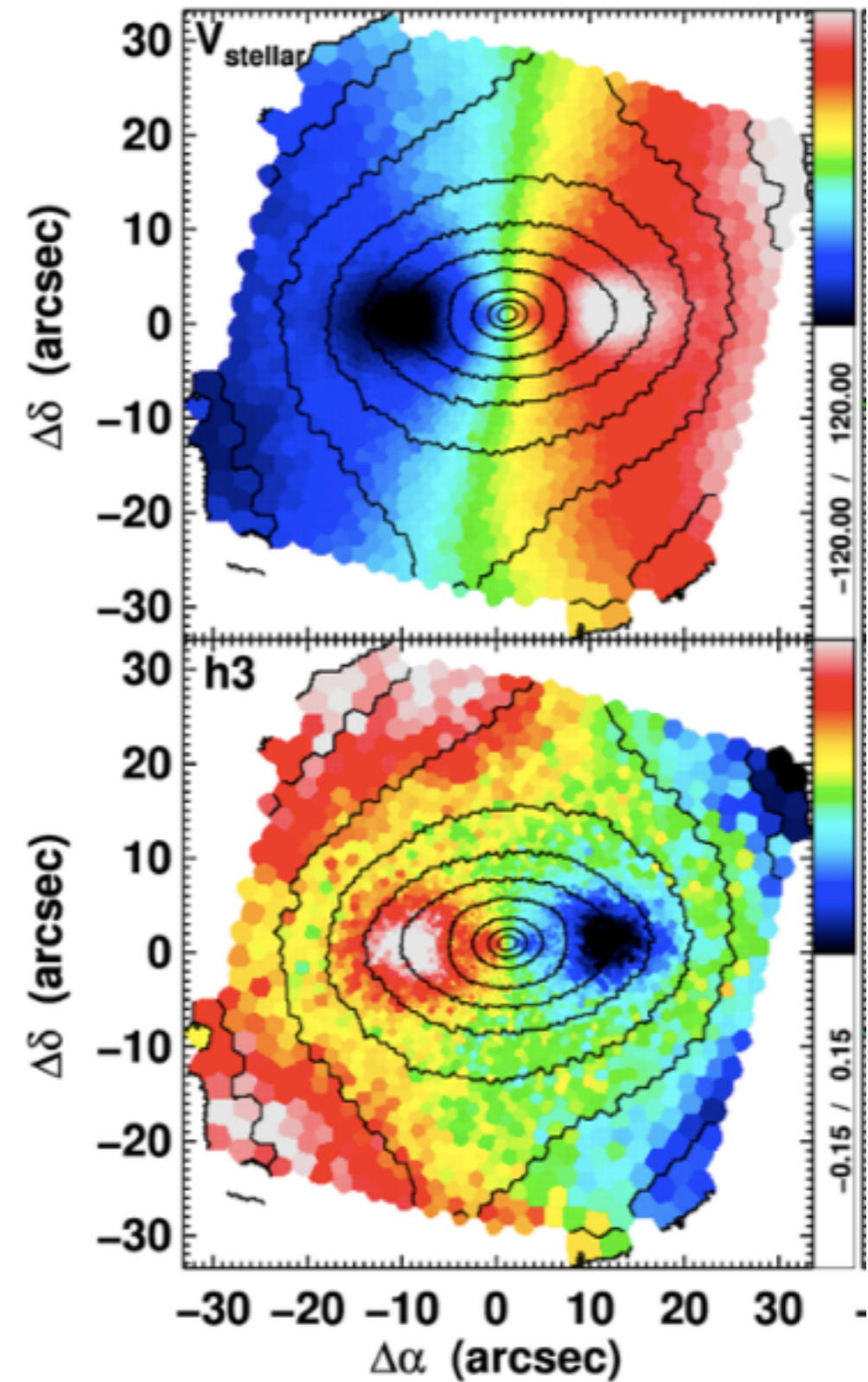
Three-dimensional dataset as the result from IFS (there are two spatial coordinates and one wavelength coordinate). The datacube can be visualized as a stack of quasi-monochromatic images, or, alternatively, as an assembly of  $n \times m$  spectra.



# MUSE - The Multi Unit Spectroscopic Explorer



NGC437I





# Hyperspectral imaging: ex. J-PAS

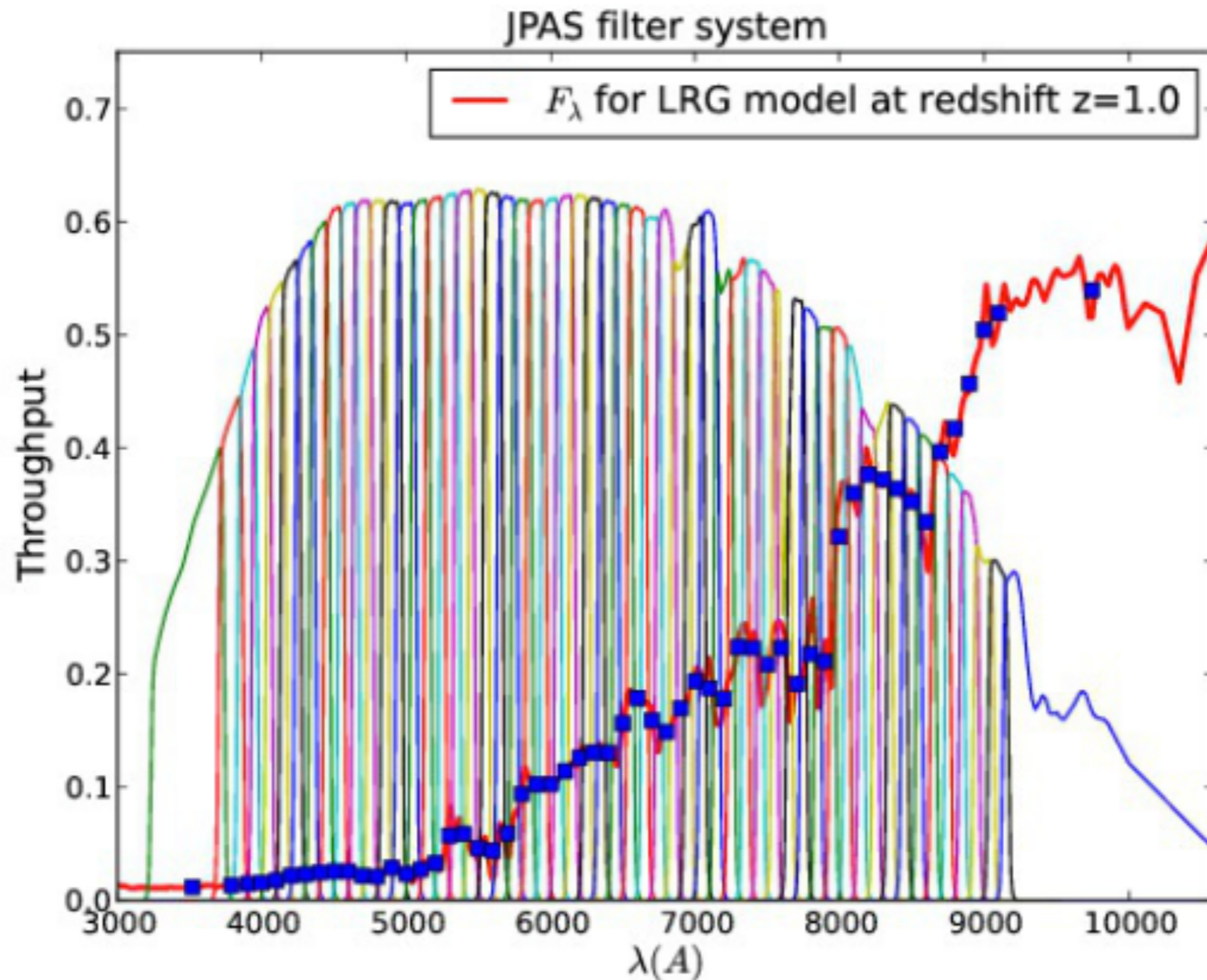
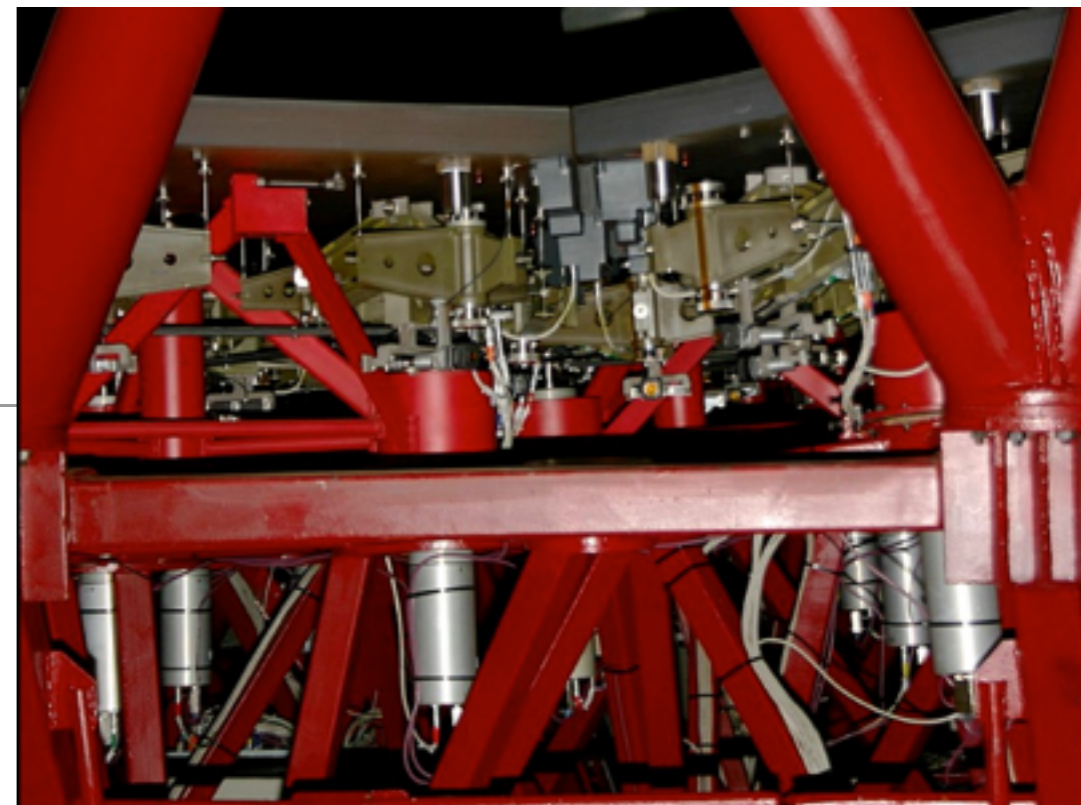


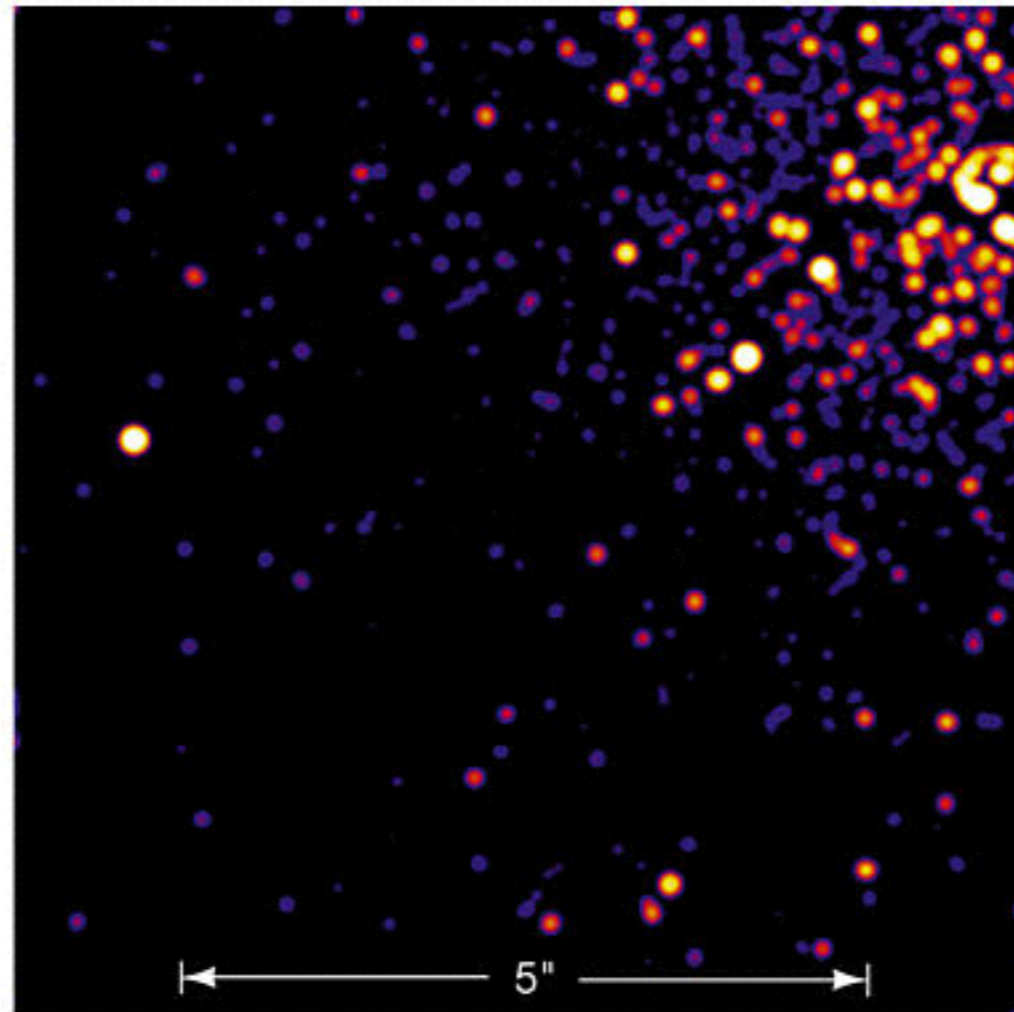
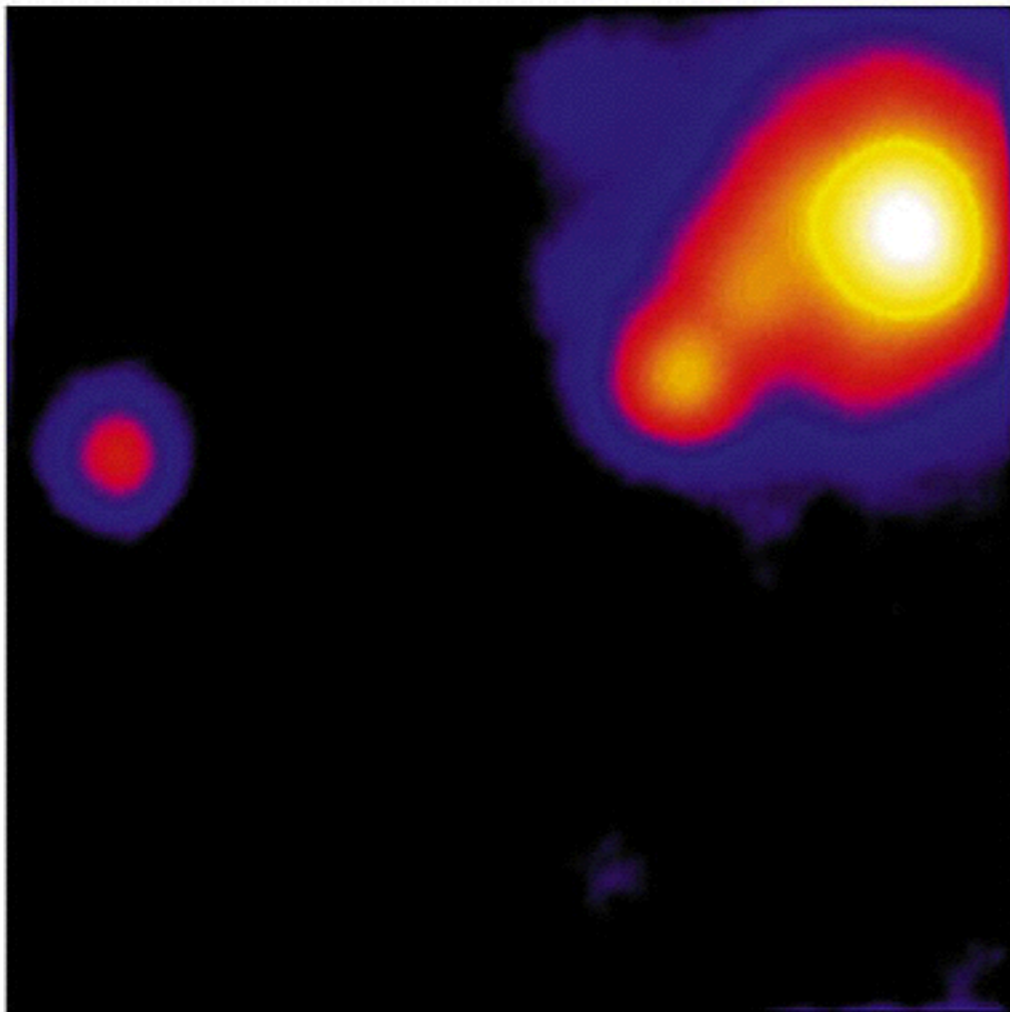
Figure 1: The J-PAS filter system. We have included the redshifted spectrum of an early type galaxy at  $z=1.0$  from Polleta et al. 2007. The filters are spaced by about  $100 \text{ \AA}$  but have FWHM of  $145 \text{ \AA}$ , what produces a significant overlap among them. The blue squares represent the flux which would be observed through the filters. Note that many spectral features apart from the  $4000 \text{ \AA}$  break are resolved, that is why the precision in redshift is much larger than that which would be produced by a single break,  $\Delta z/(1+z) \sim \Delta \lambda/\lambda \sim 0.02$

# Ótica Ativa

- Desenvolvida na década de 80, tecnologia para modelar o espelho do telescópio para compensar por efeitos de vento, temperatura e stress mecânico.



Atuadores no  
Gran Telescopio  
de Canárias

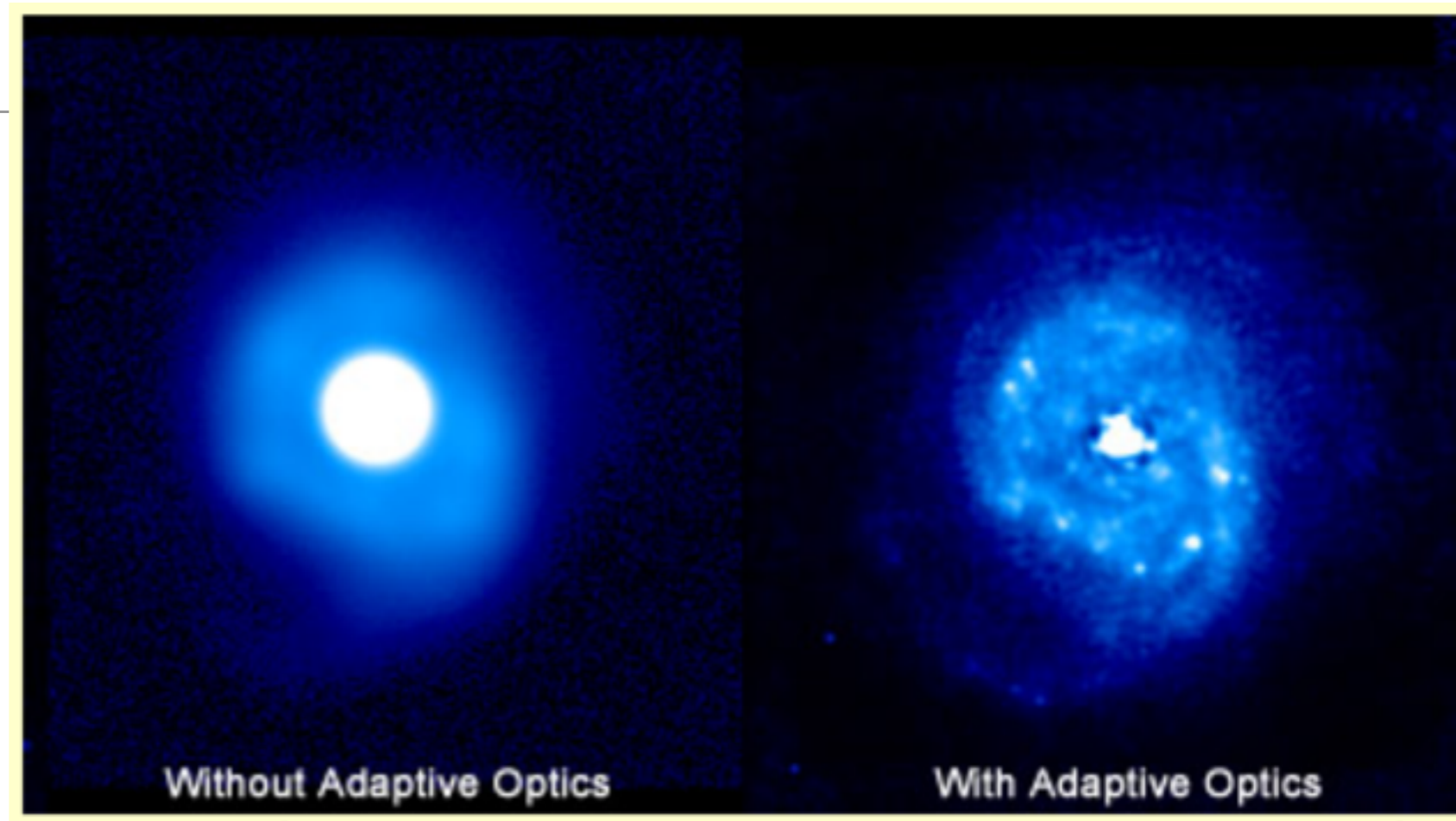


Aglomerado  
Estelar R136

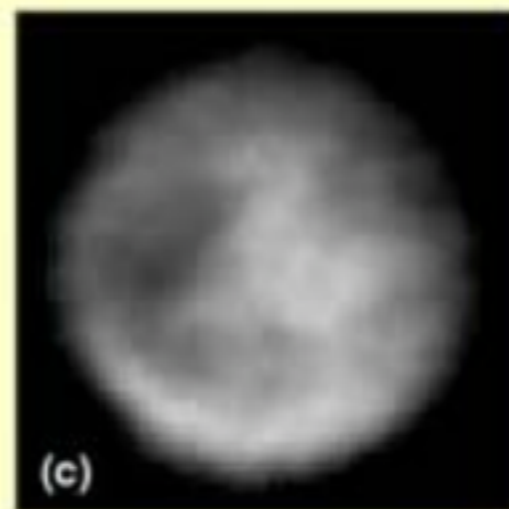
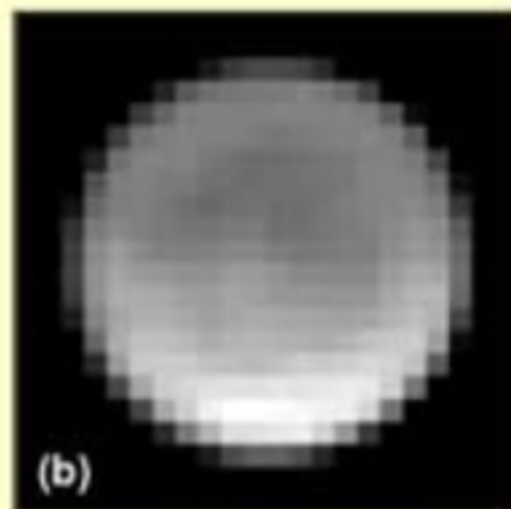
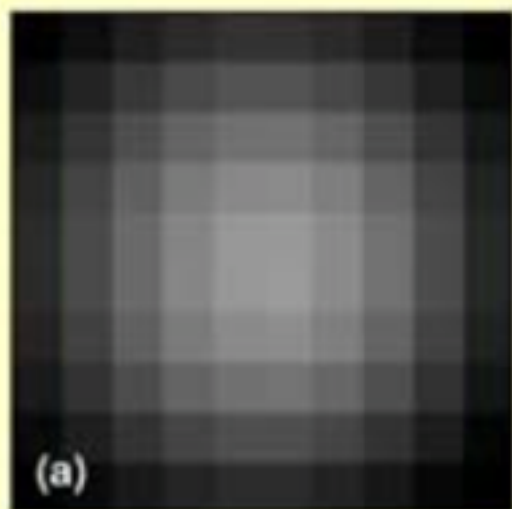


# Ótica adaptativa

- Tecnologia usada para melhorar a performance de sistemas ópticos pela redução de distorções nas frentes de onda (principalmente devidas à turbulência atmosférica)



## Titan (Saturn's Largest Moon)



Conventional Telescope

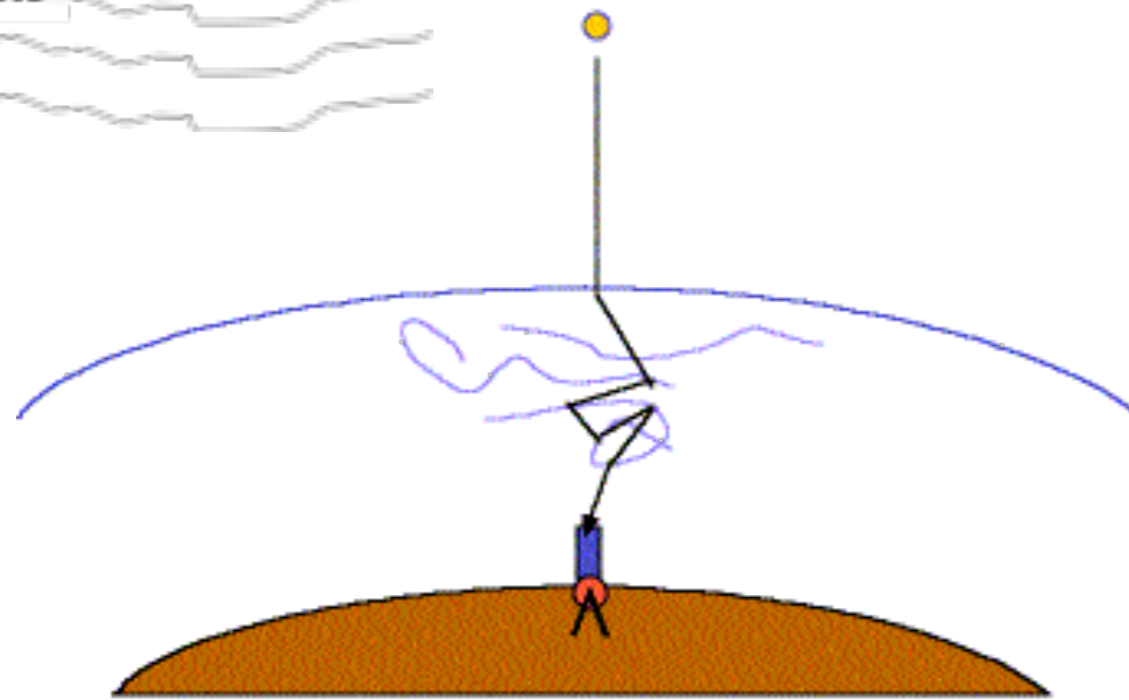
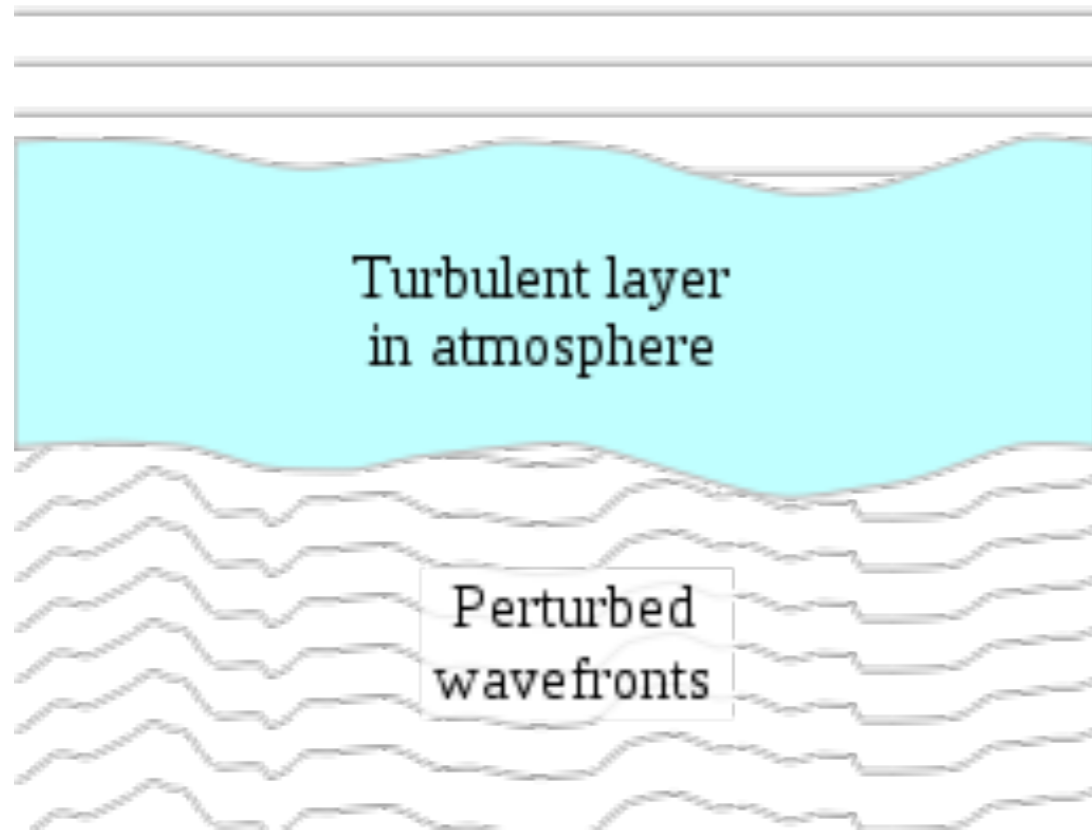
Hubble Space Telescope

Keck Telescope with AO

Região nuclear da galáxia  
NGC7469, CFHT

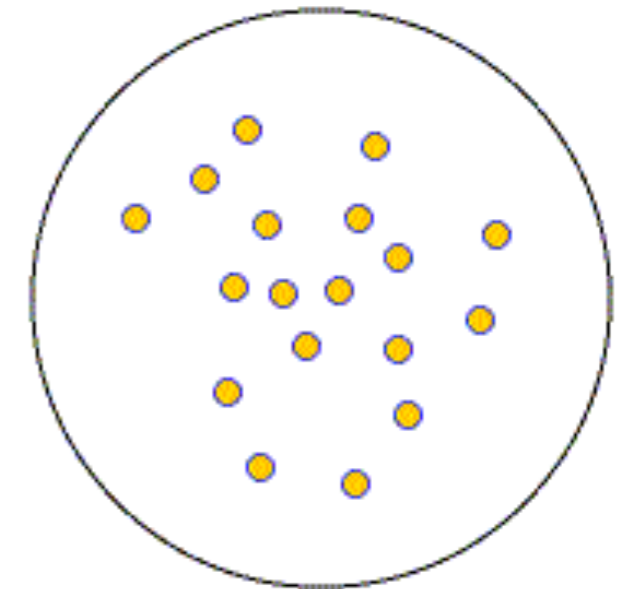


Plane waves from distant point source



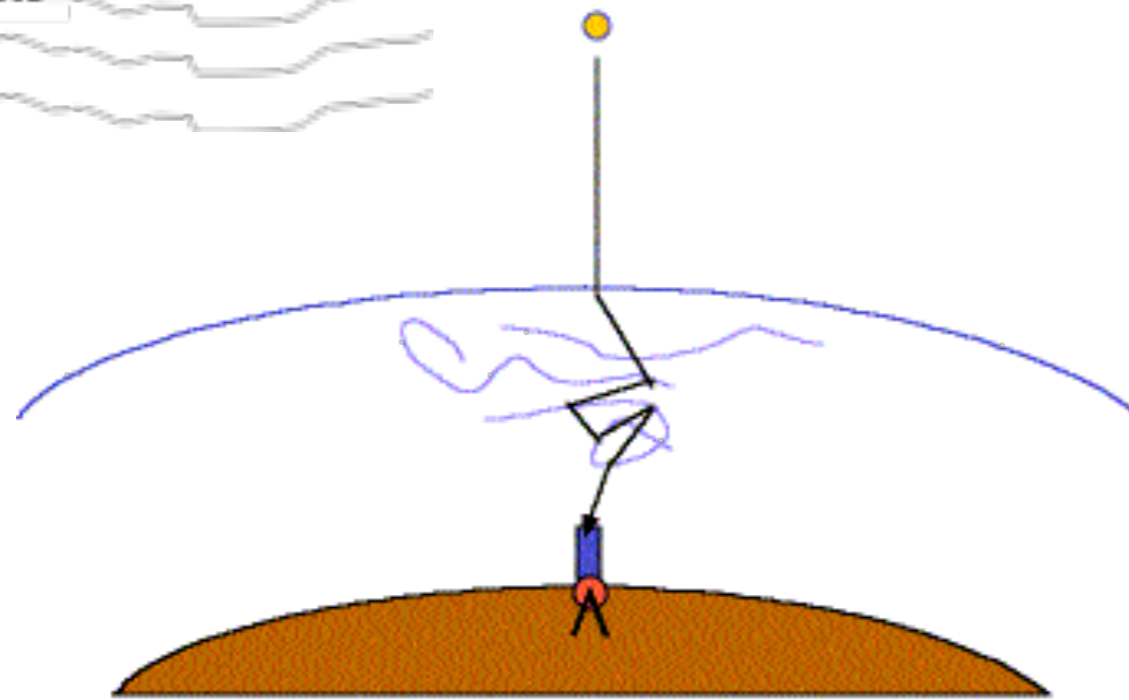
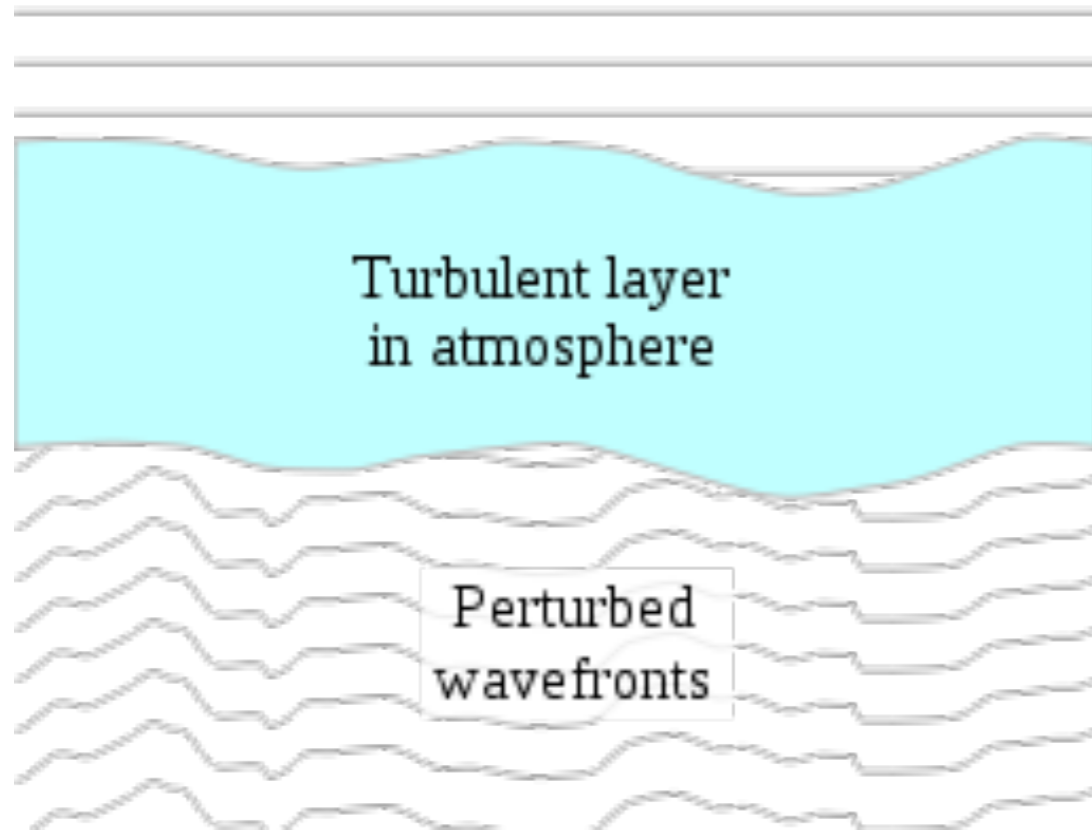
atmosphere refracts starlight  
in random directions very  
quickly—stars “twinkle”.

telescope view  
(high magnification)



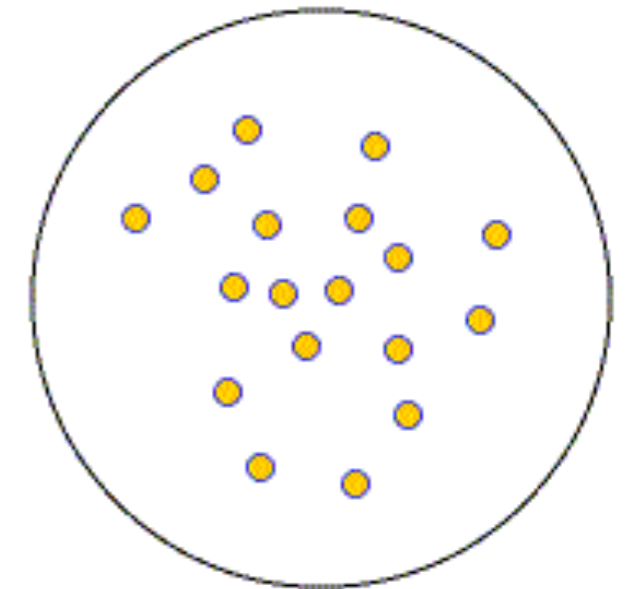
multiple images  
created

Plane waves from distant point source



atmosphere refracts starlight  
in random directions very  
quickly—stars “twinkle”.

telescope view  
(high magnification)



multiple images  
created

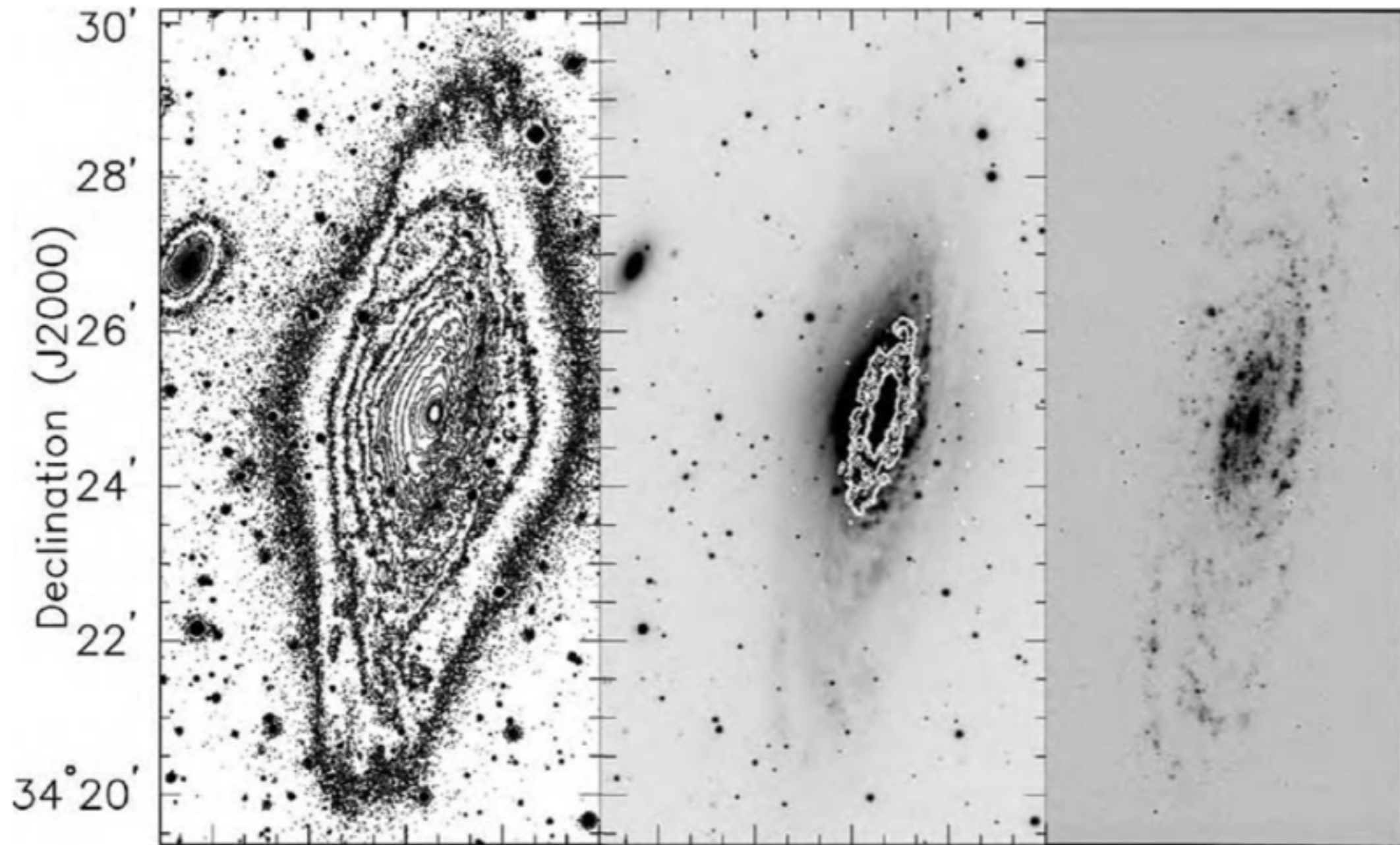
# Outros comprimentos de onda

---

- UV: photon counting device
- IV: princípio semelhante ao CCD (até ~5microns) mas com tecnologia própria (detectores HgCdTe, semicondutores *narrow gap*, bolômetros, detectores *photon-counting* *Superconducting Tunnel Junction*)



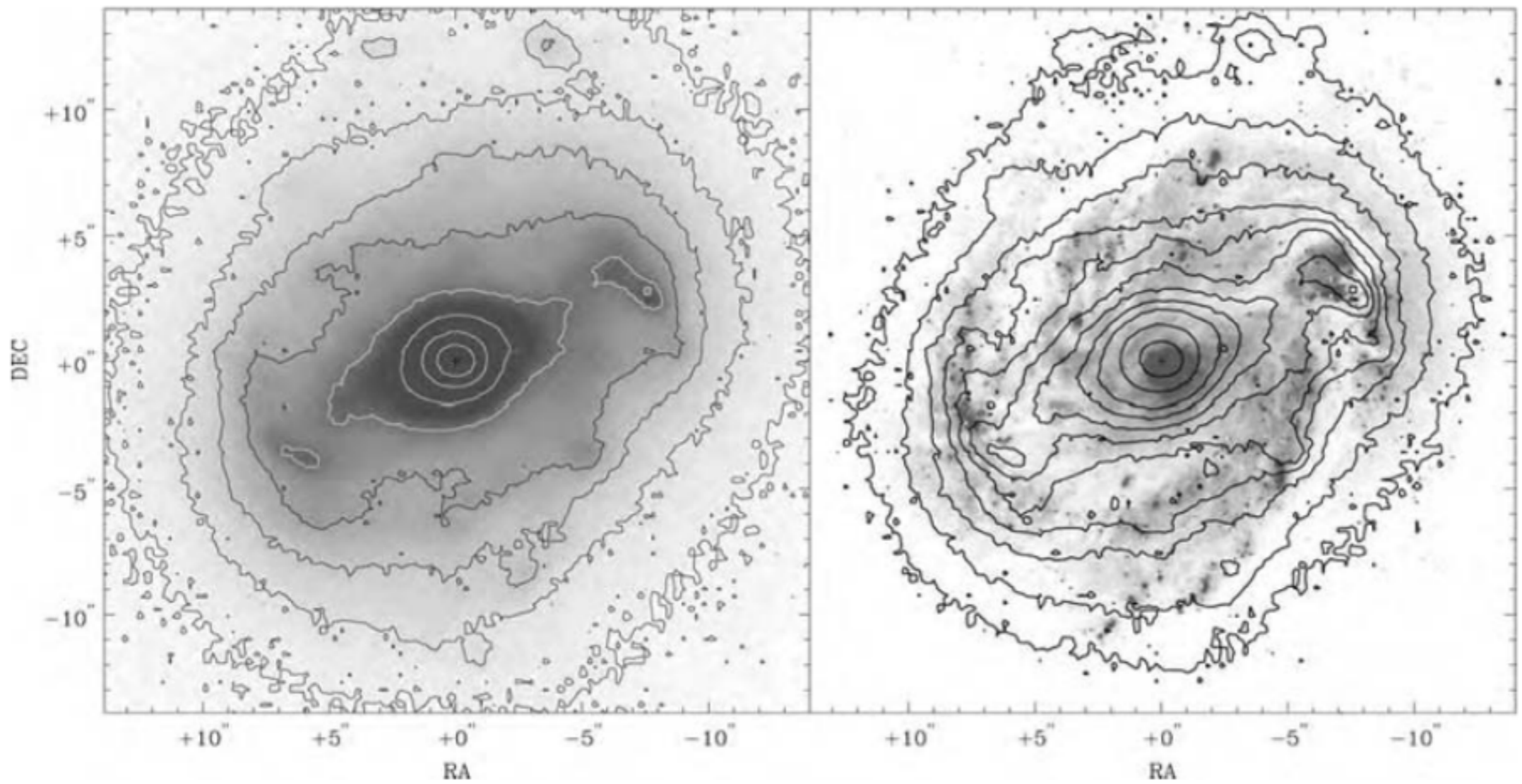
Fotometria de galáxias disco



**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

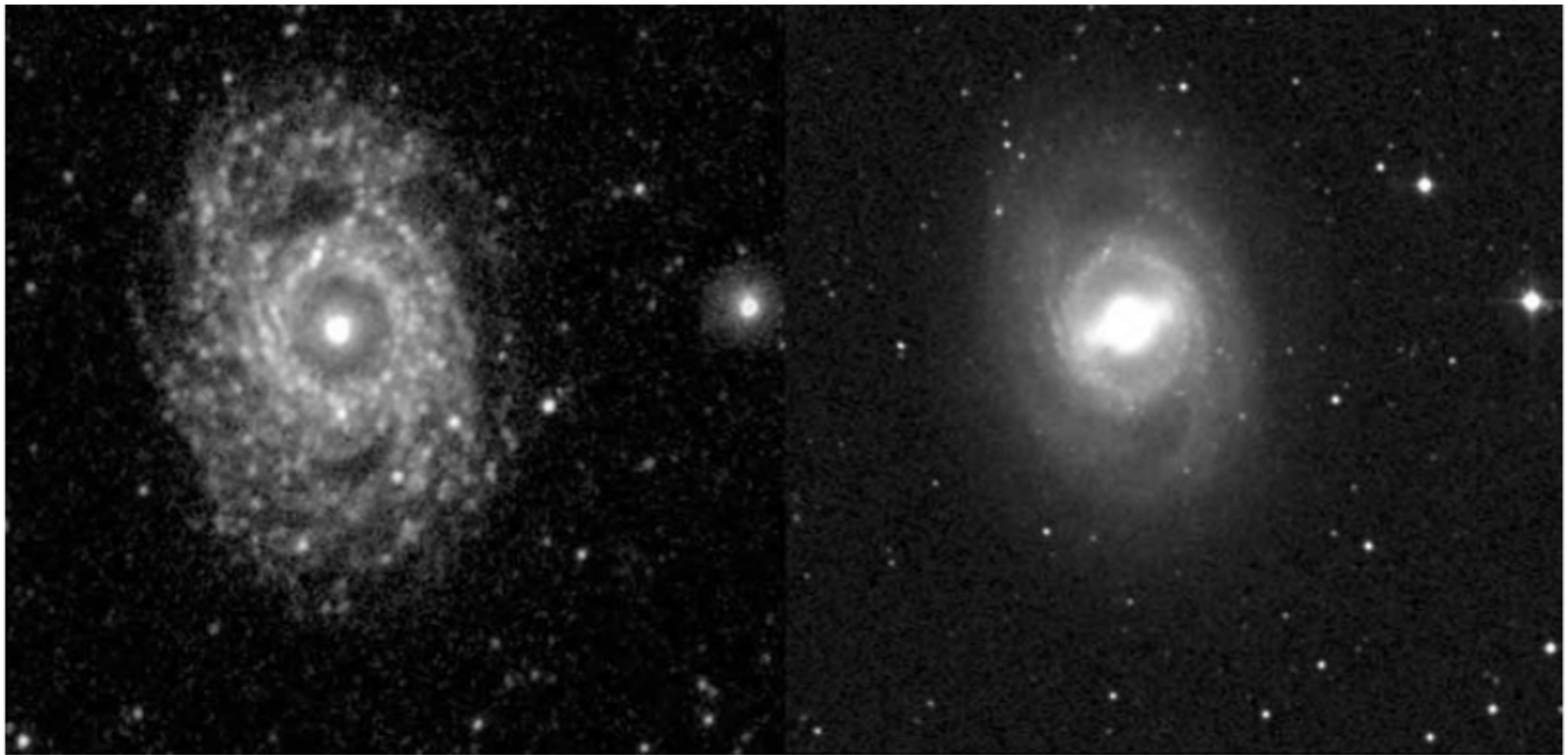


**Fig. 5.9.** A negative image of inner parts of Sbc galaxy M100 (NGC 4321):  $26'' = 2$  kpc. Left,  $K$ -band image and isophotes at  $2.2 \mu\text{m}$ , showing a central bar. Right,  $H\alpha$  (visible light) emission from gas around young massive stars, with  $K$ -band isophotes superposed; the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

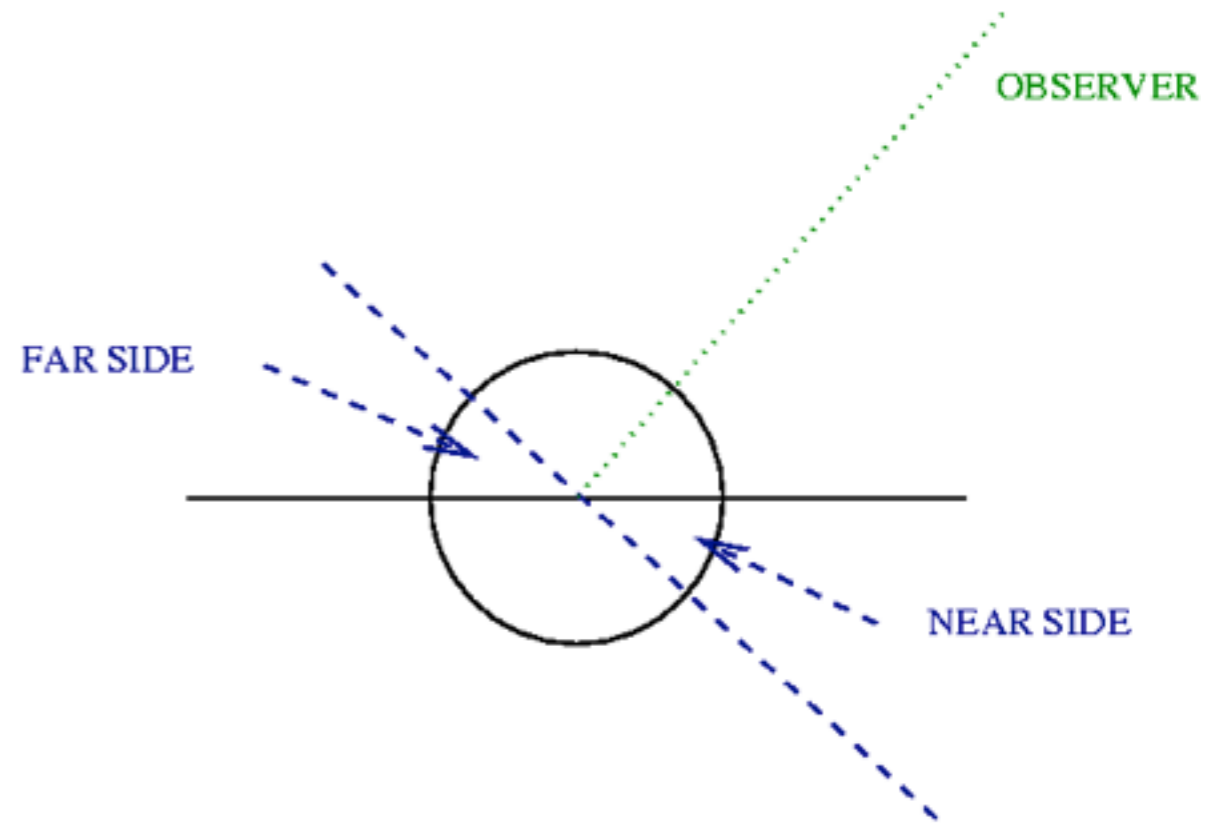
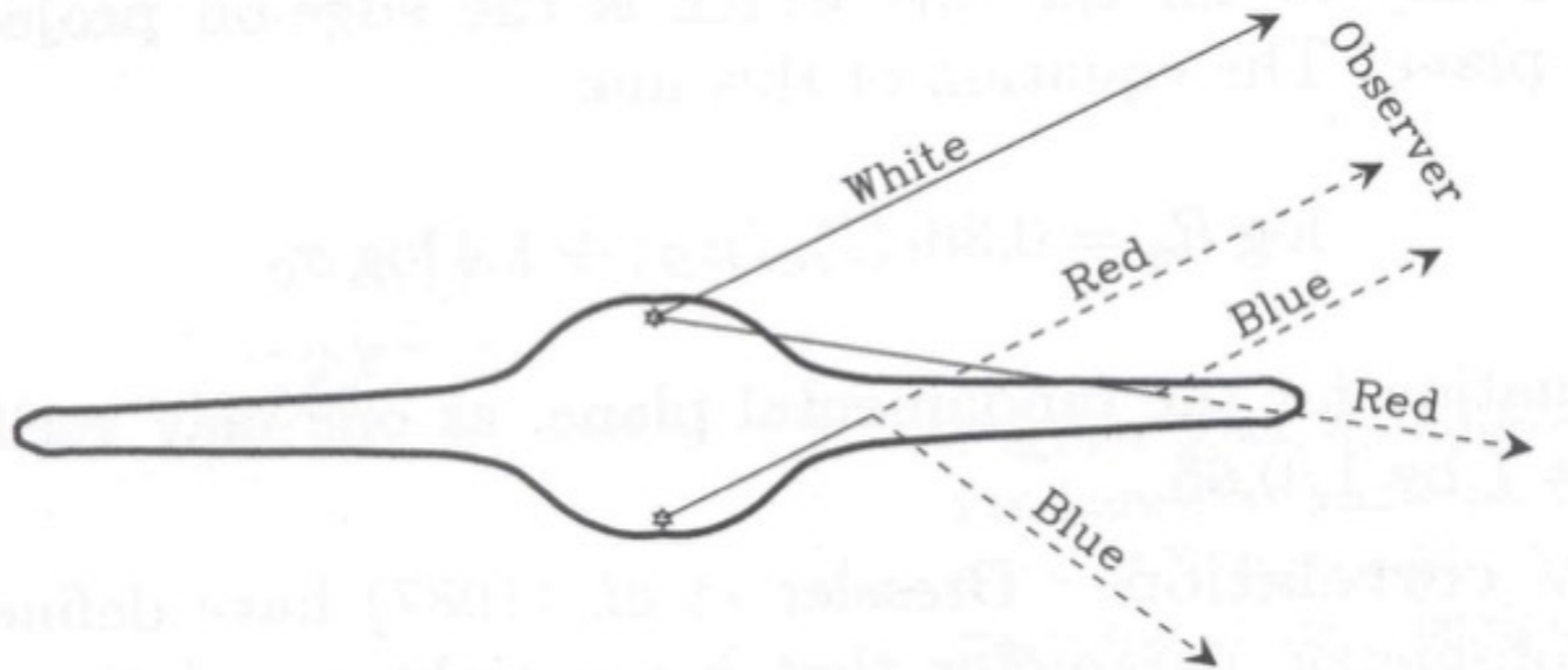


Face-on



Os perfis de brilho superficial de galáxias disco pode ser complicado porque pode haver mais de uma componente (bojo, disco, barra, braços espirais, anéis...) e também por causa da poeira.

Os perfis também dependem do ângulo de inclinação da galáxia.



Bojo no near-side é mais avermelhado pois a luz atravessa o disco.



# Fotometria de superfície em galáxias disco

---



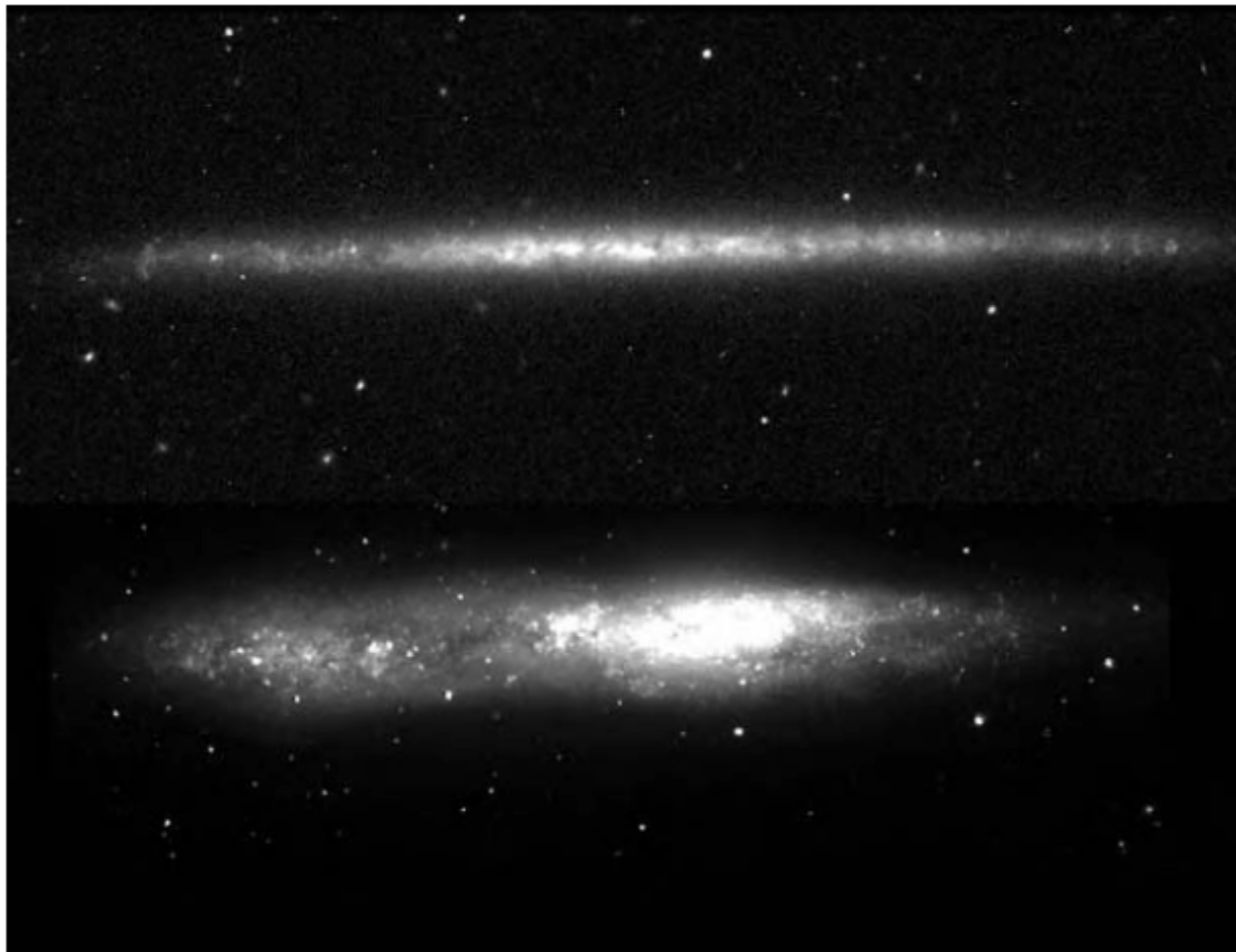
NGC891

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

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

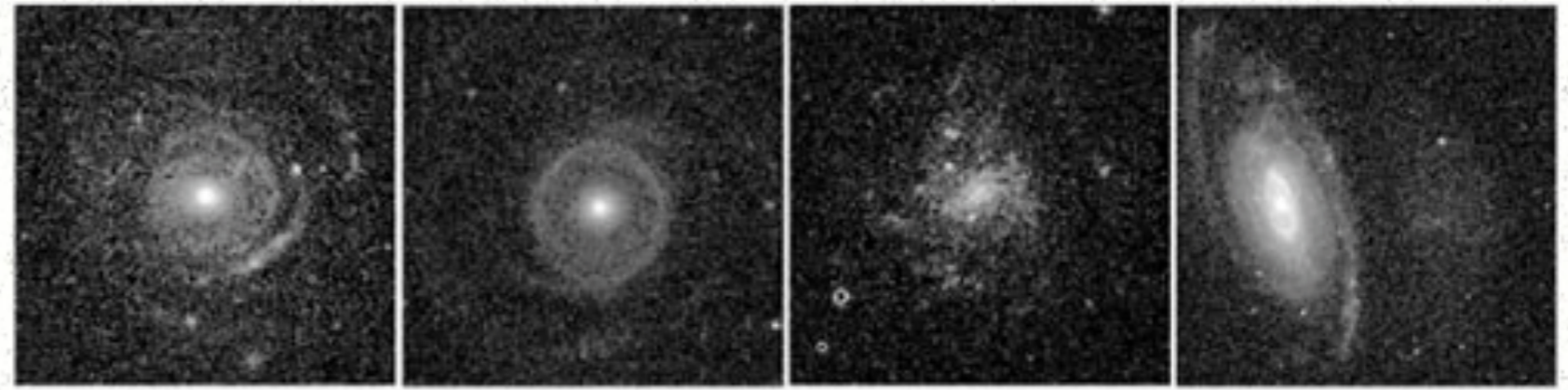
$$h_z \approx 0.1h_R$$

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  $R_{max}$ .



**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  $10^\circ$  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.





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

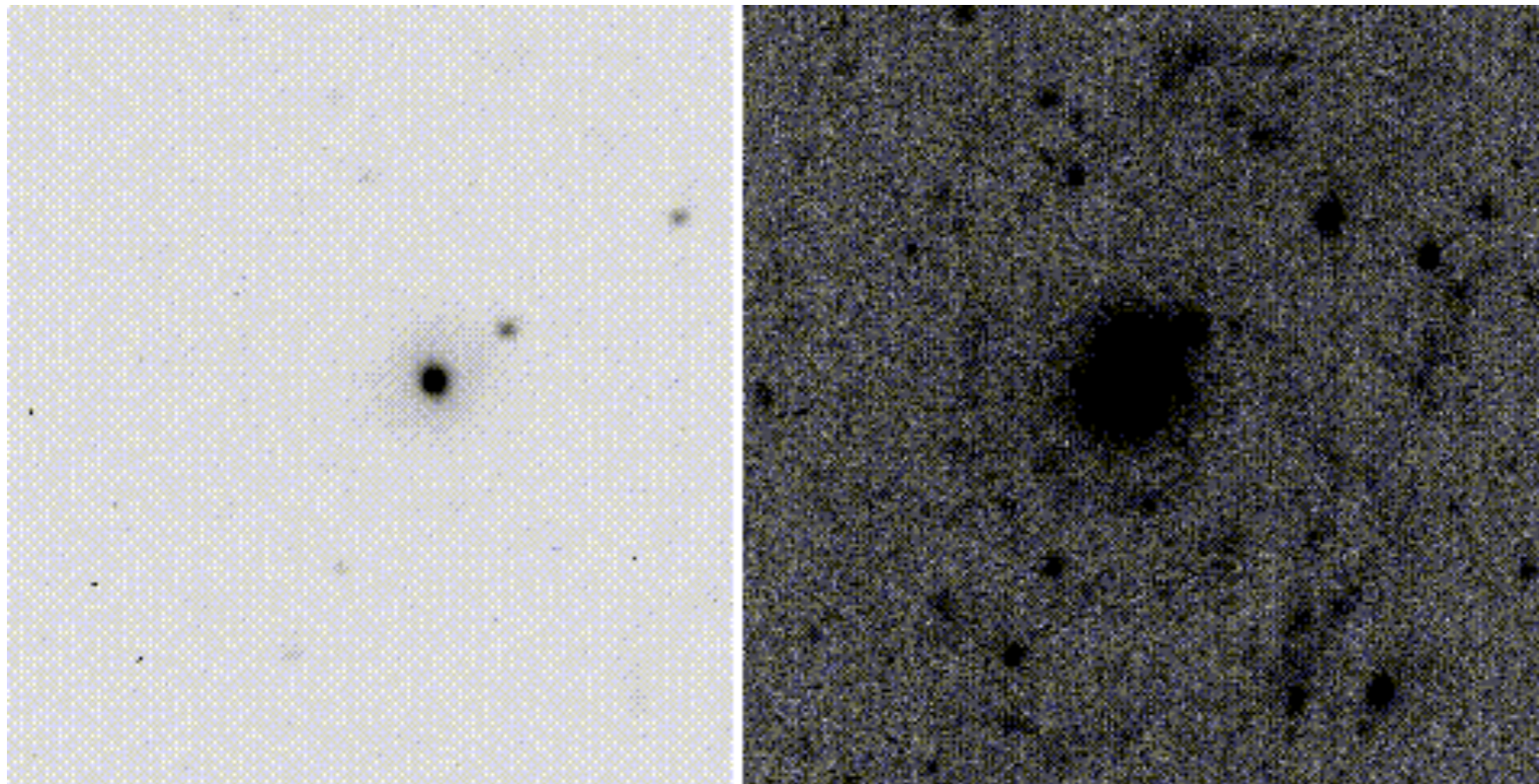
**Figure 47.** Examples of giant or large low surface brightness galaxies. In the far right panel, [SGC 2311.8-4353](#) is the diffuse object to the right of high surface brightness spiral [NGC 7531](#). All of these images are *B*-band.





# Galáxias LSB - Low Surface Brightness

---



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

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

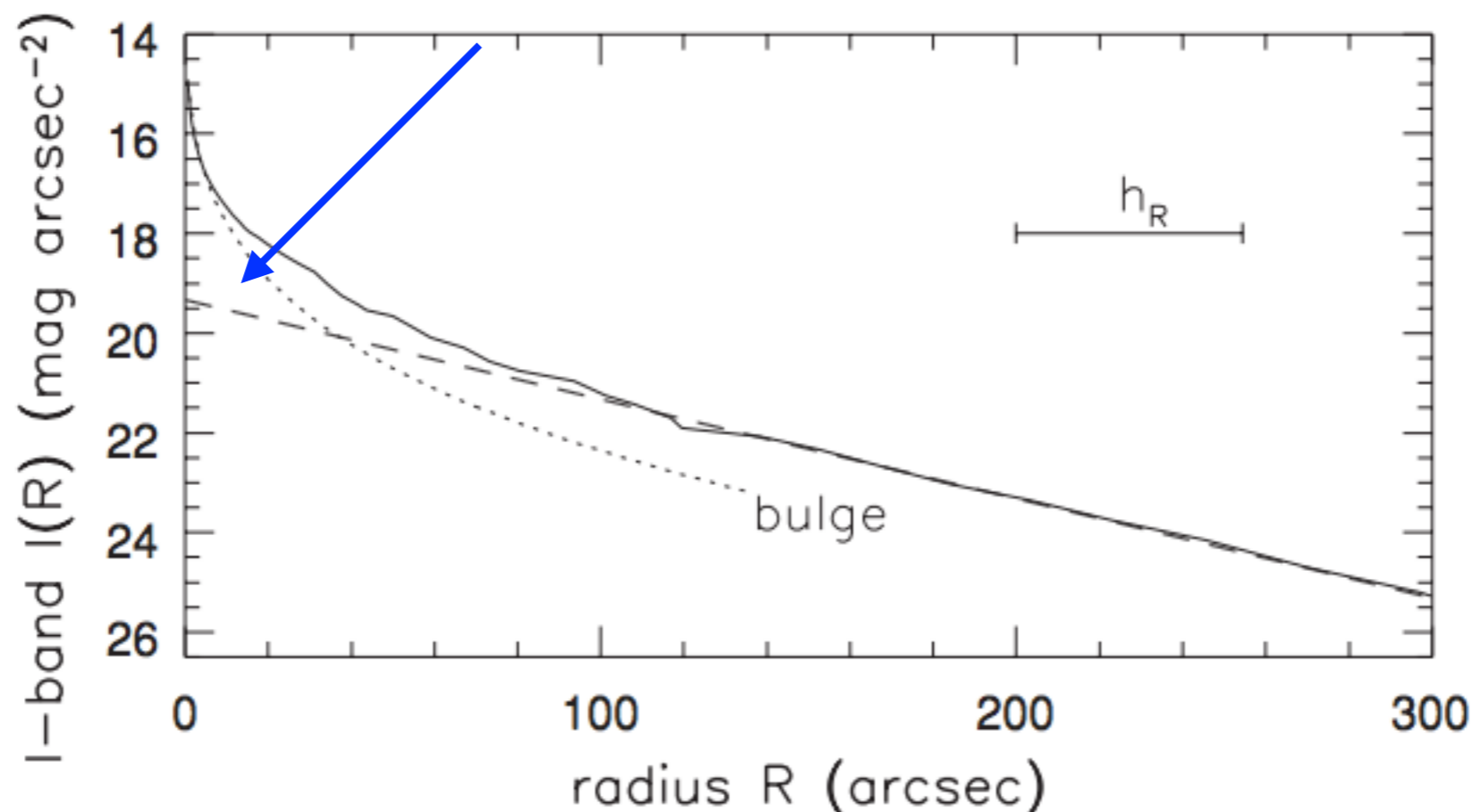
$$h_R = 55h^{-1} \text{ kpc}$$

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)

# Fotometria de superfície em galáxias disco

Excesso de luz, associado ao bojo.



**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.

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

**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

---

- Bojos e o centro de galáxias elípticas pequenas estão entre os sistemas estelares mais densos conhecidos
- o bojo é a ‘cidade grande’ da galáxia: local denso e central, onde populações estelares jovens e velhas coexistem

# 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

---

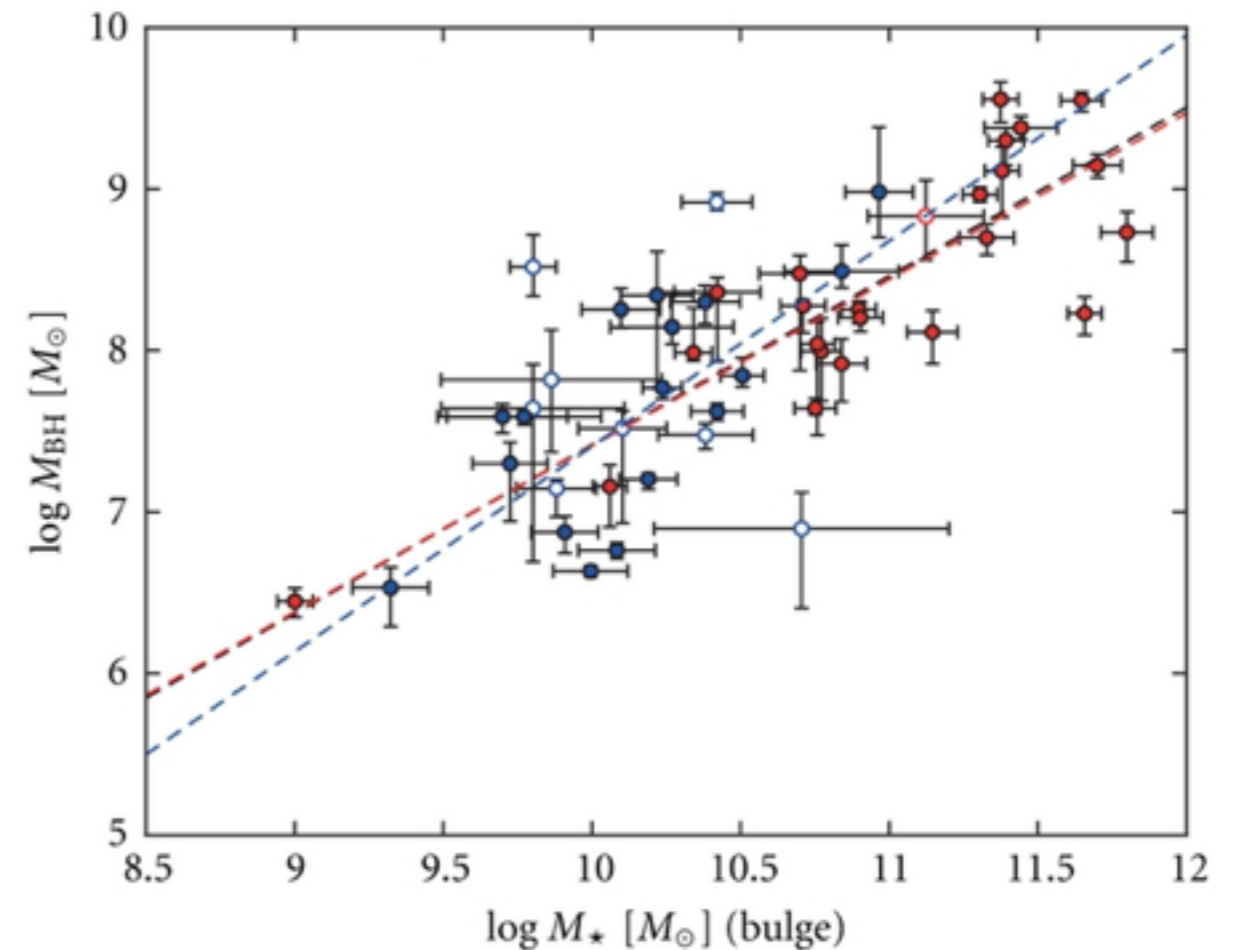
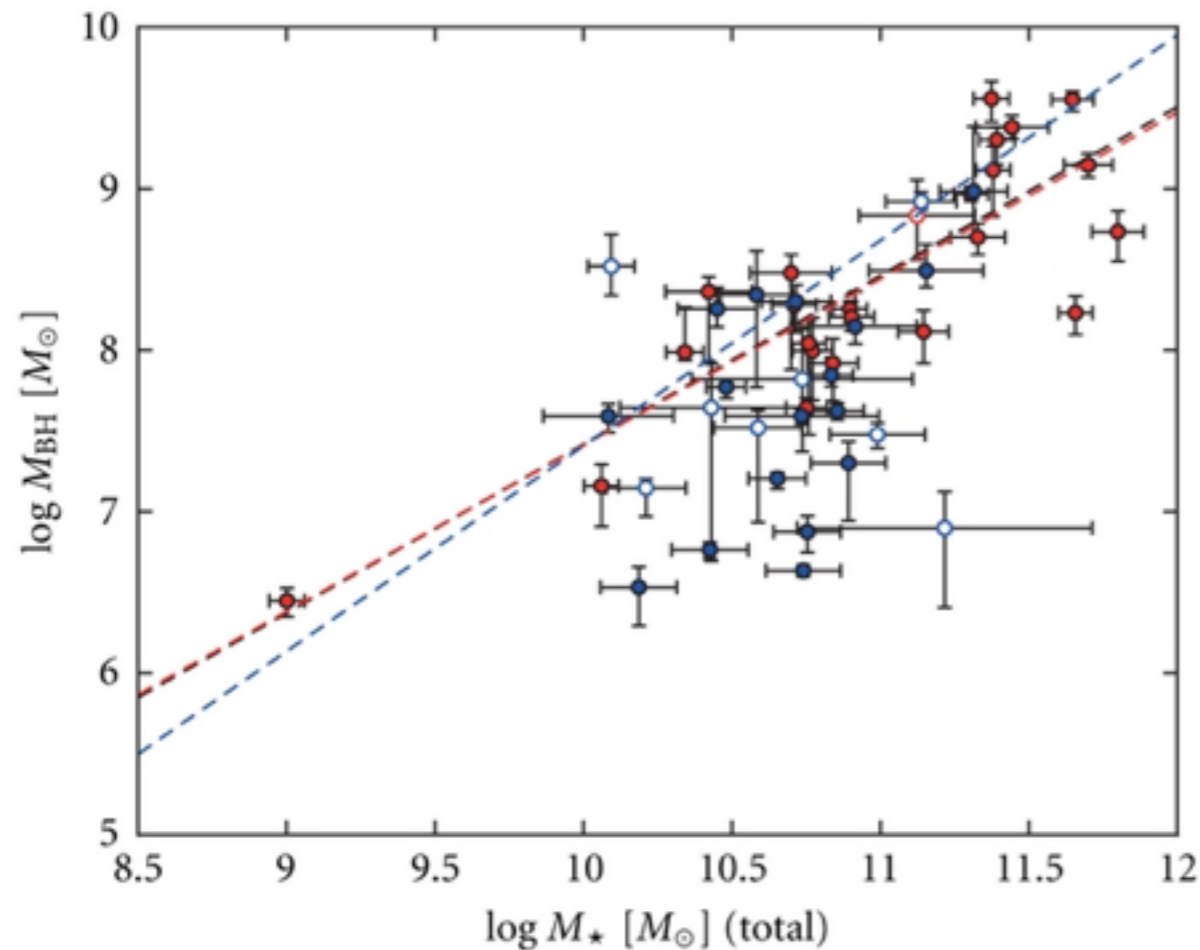
- Em Sombrero,  $R_e \approx 4 \text{ kpc}$
- Um estudo recente encontra que há uma relação entre o tamanho do bojo e do disco  $R_e/h_R \approx 0.1$



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



# Relação entre bojo e buraco negro central

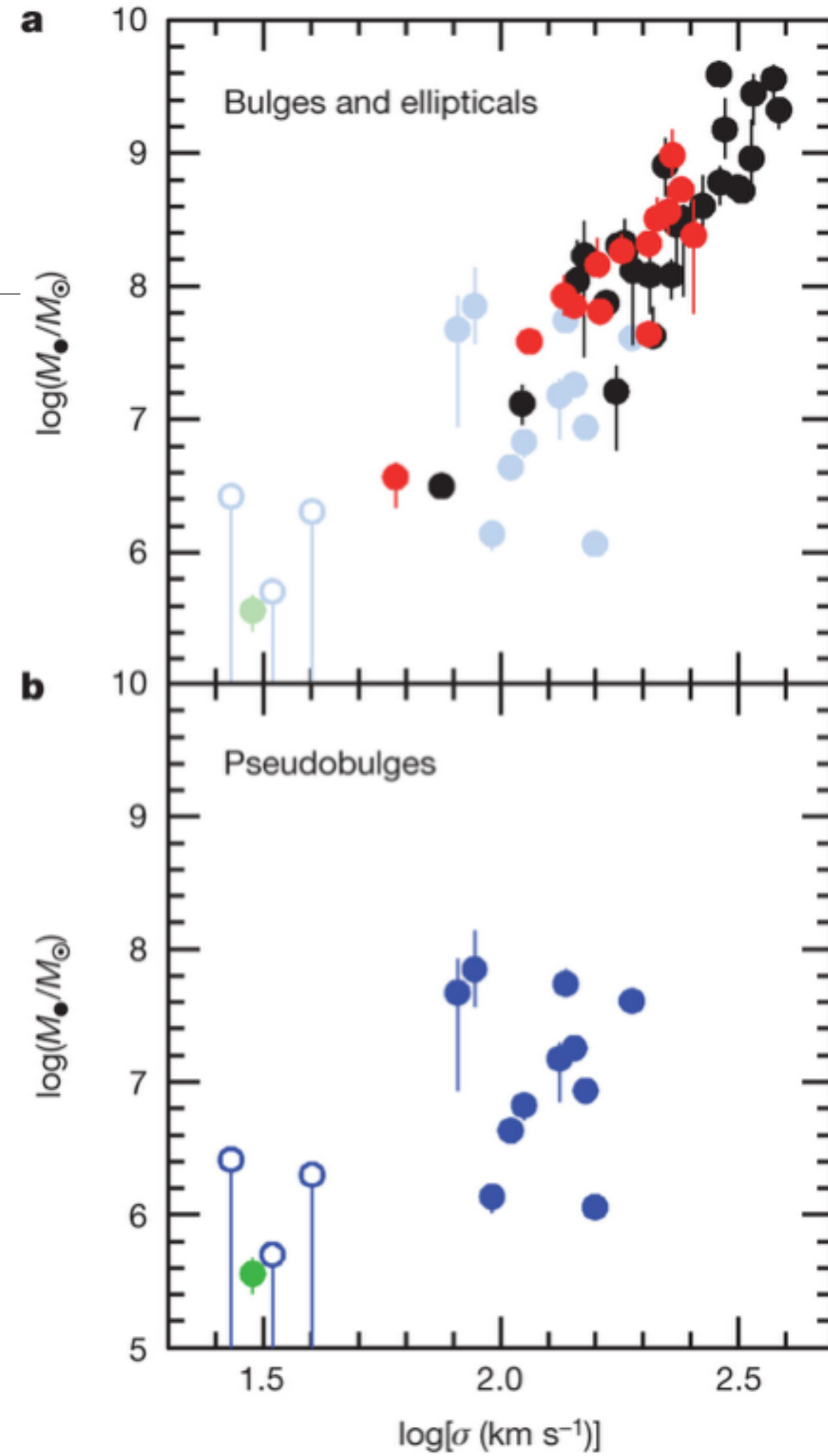


SMBH mass (red: elliptical galaxies, blue: disk galaxies) versus total galaxy stellar mass. (b): SMBH mass versus bulge stellar mass. The diagonal dashed lines are the best fits to the relation for the whole sample (black), for the elliptical galaxies (red), and for bulges of the disk galaxies (blue). 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

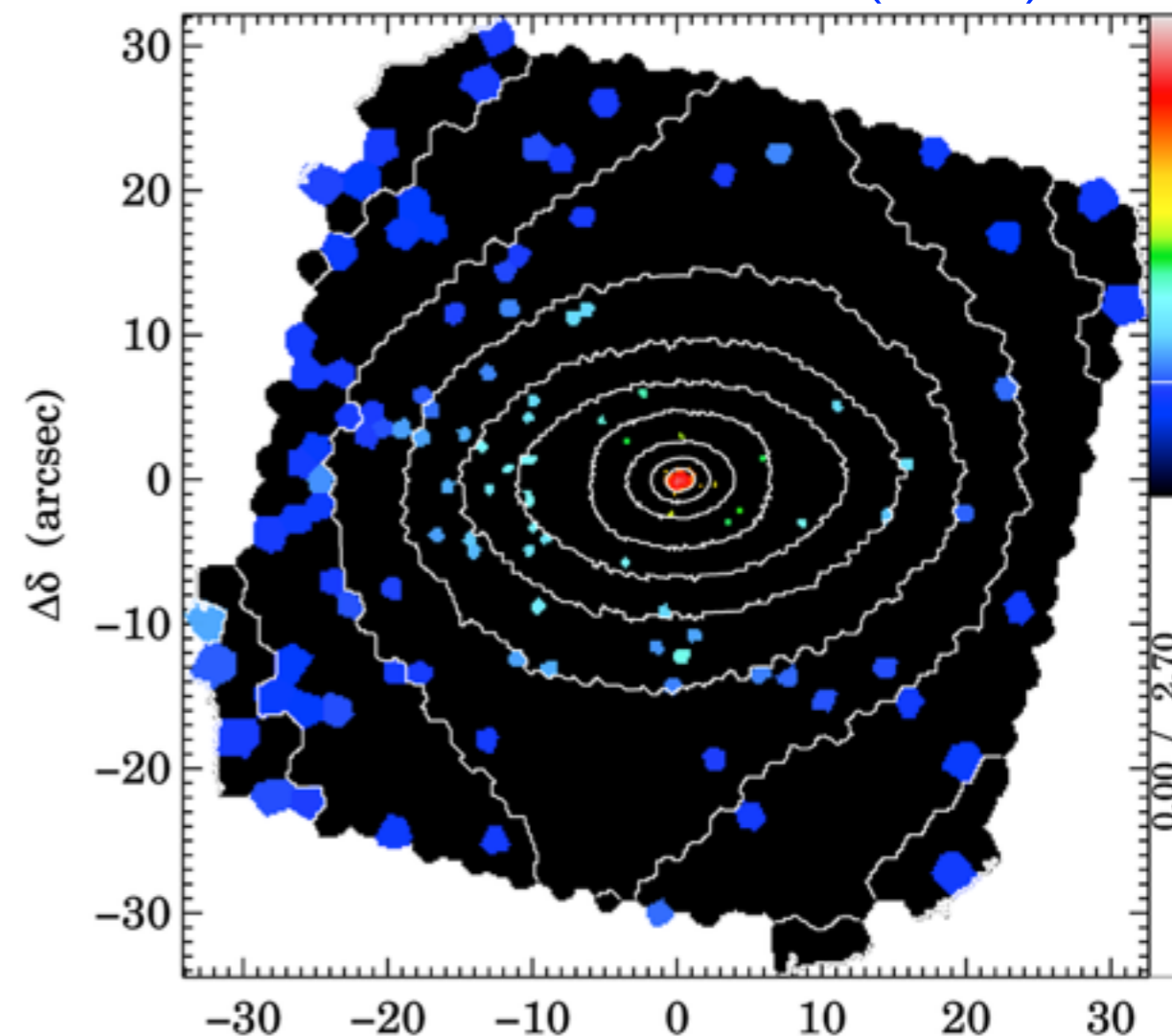
Importância cosmológica: não sofreram virtualmente nenhum merger. O mais próximo que podemos observar dos discos primordiais previstos em simulações.



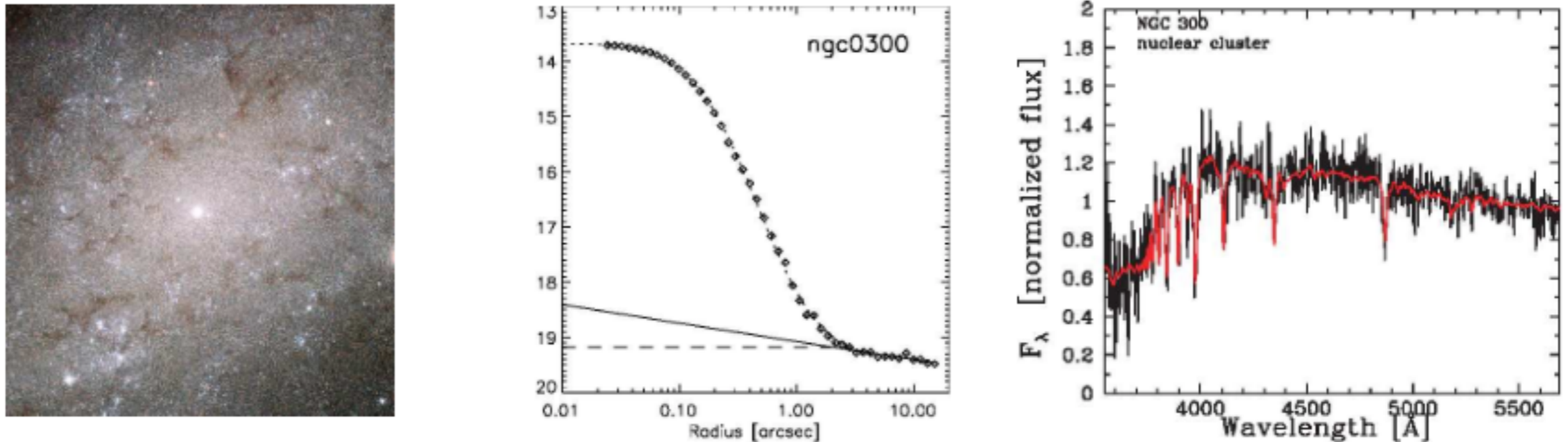
# Regiões nucleares

- 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  $\sim 100\text{Myr}$ ,

Gadotti et al. (2015)



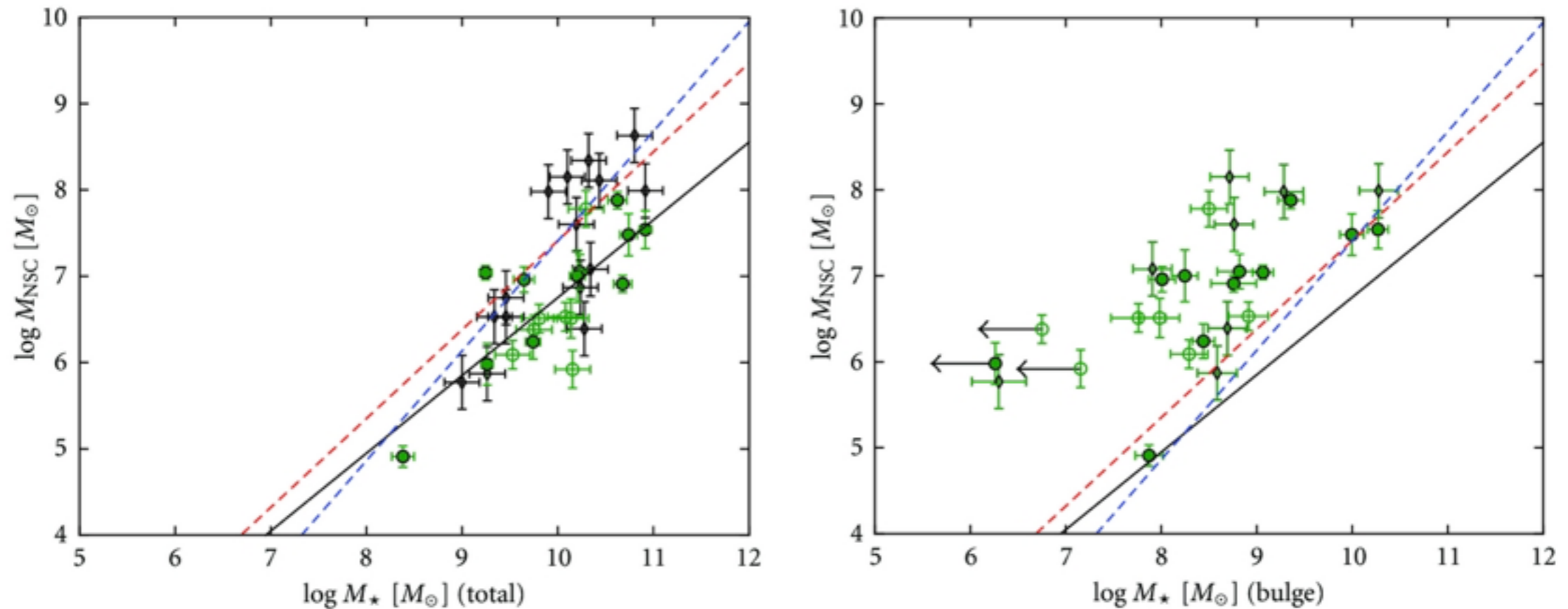
# Aglomerados Estelares Nucleares



**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 e buracos negros massivos?

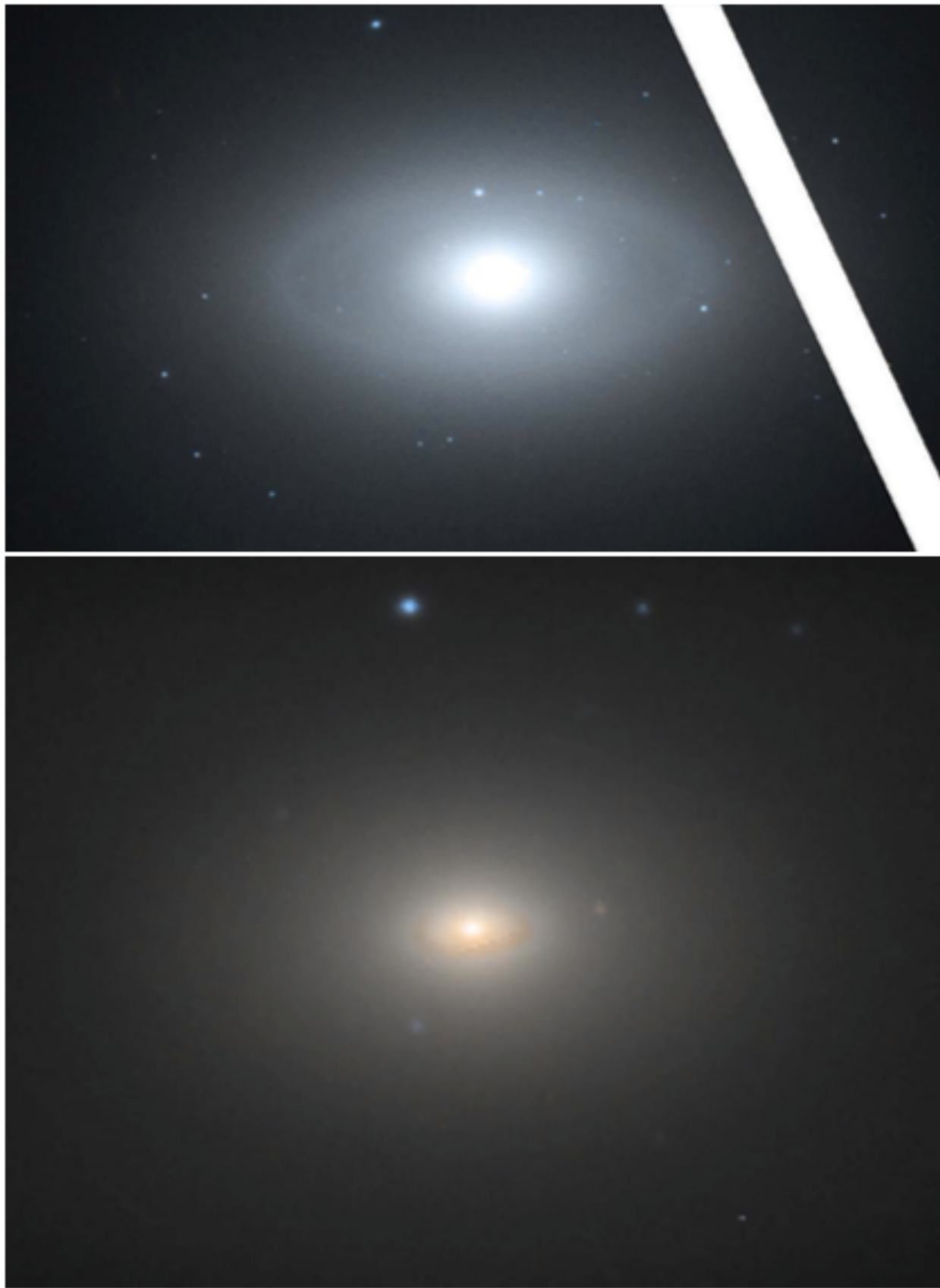
<http://www.stsci.edu/~marel/pdfdir/nucleiAU24I.pdf>



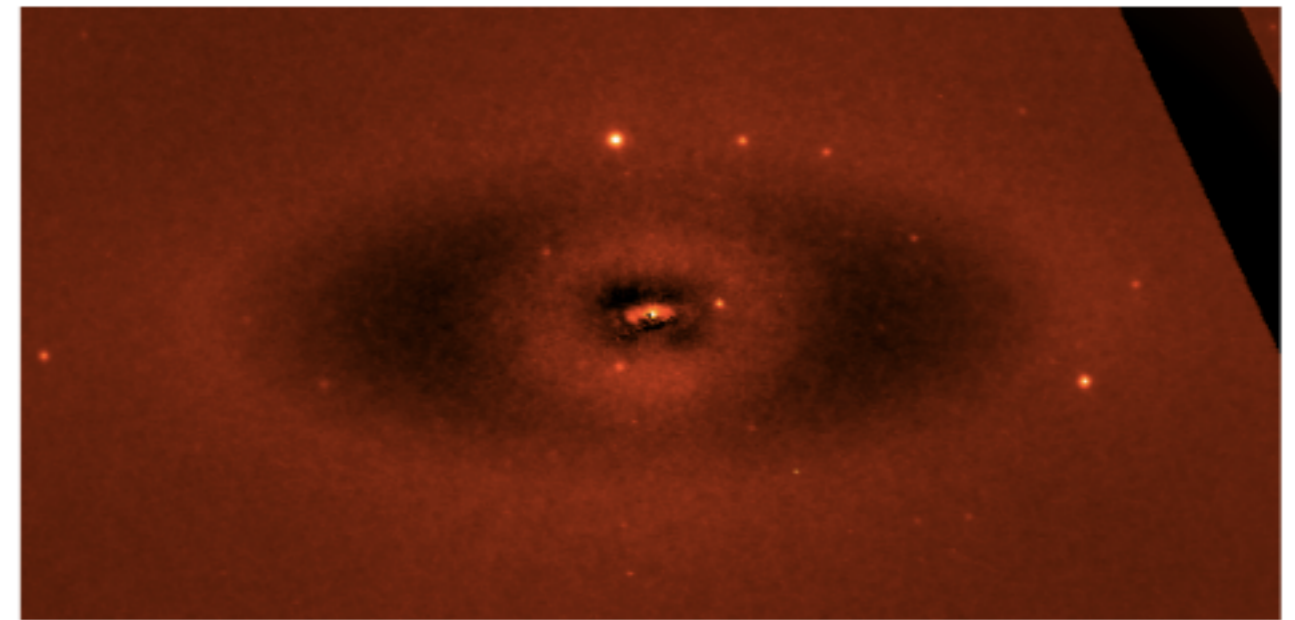
NSC mass versus total stellar mass (a) and bulge stellar mass (b). Green circles are galaxies with dynamical mass estimates for their NSCs; black diamonds are the spectroscopically estimated masses of Rossa et al. [11] (bulge mass estimates are not complete for these galaxies). Filled symbols indicate 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.



Decomposição de galáxias-disco em suas  
componentes

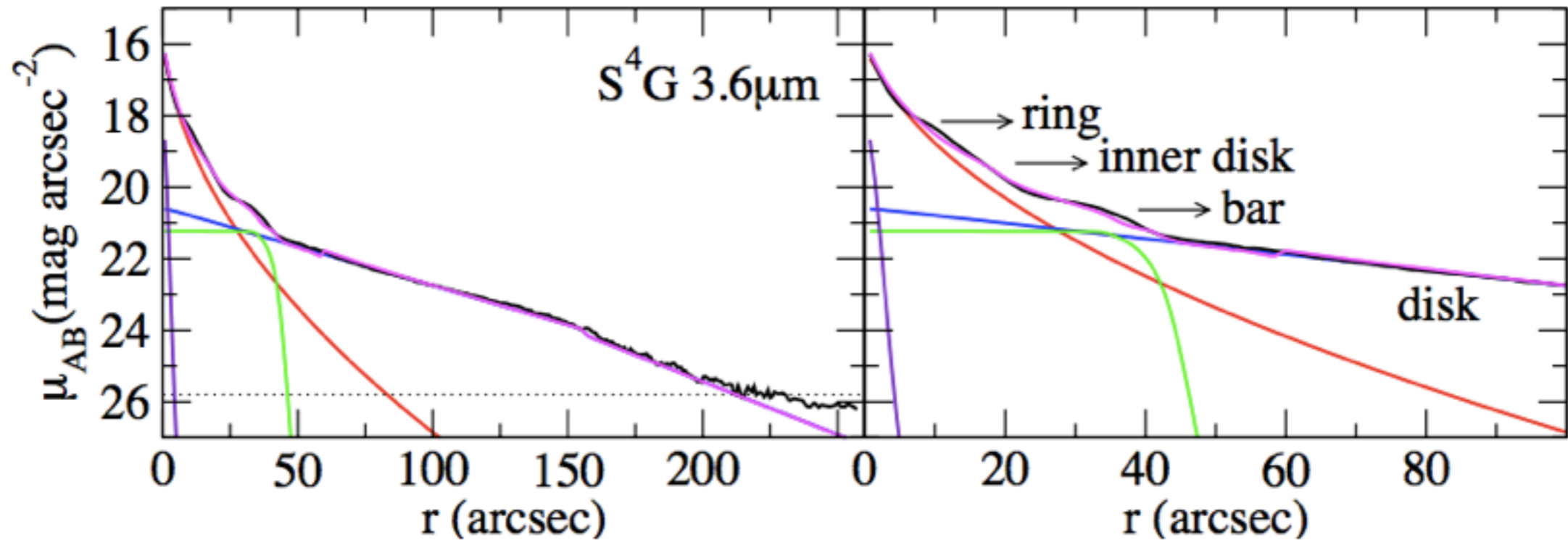


**Fig. 6.** Colour composites produced from HST images (F850LP and F475W) at the Hubble Legacy Archive website. Top: a clear view of the 10'' ring. Bottom: the very inner region of NGC 4371. The blue point source on the North is  $\approx 4''$  from the centre. The bottom panel



**Fig. 8.** Residual image after subtracting the GALFIT model from the F850LP image of NGC 4371. The display stretch is such that even small fluctuations appear conspicuously.

# Fotometria de galáxias disco

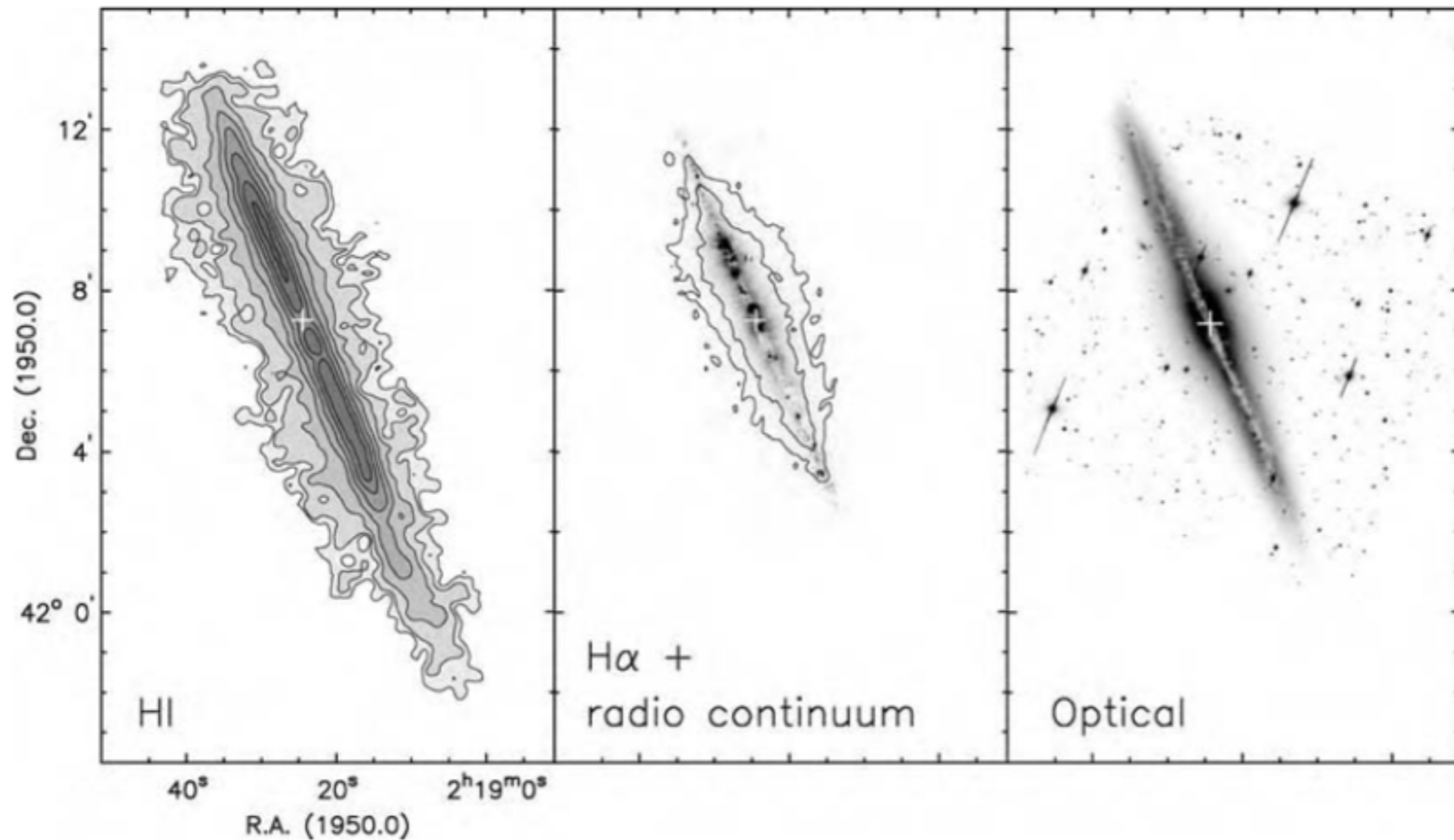


**Fig. 2.** Surface brightness radial profile of NCG 4371. The top panels show only the profile derived from ellipse fits to the S<sup>4</sup>G image. The bottom panels also show the profiles of the different model components obtained with BUDDA: bulge in red, disc in blue, bar in green, and central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



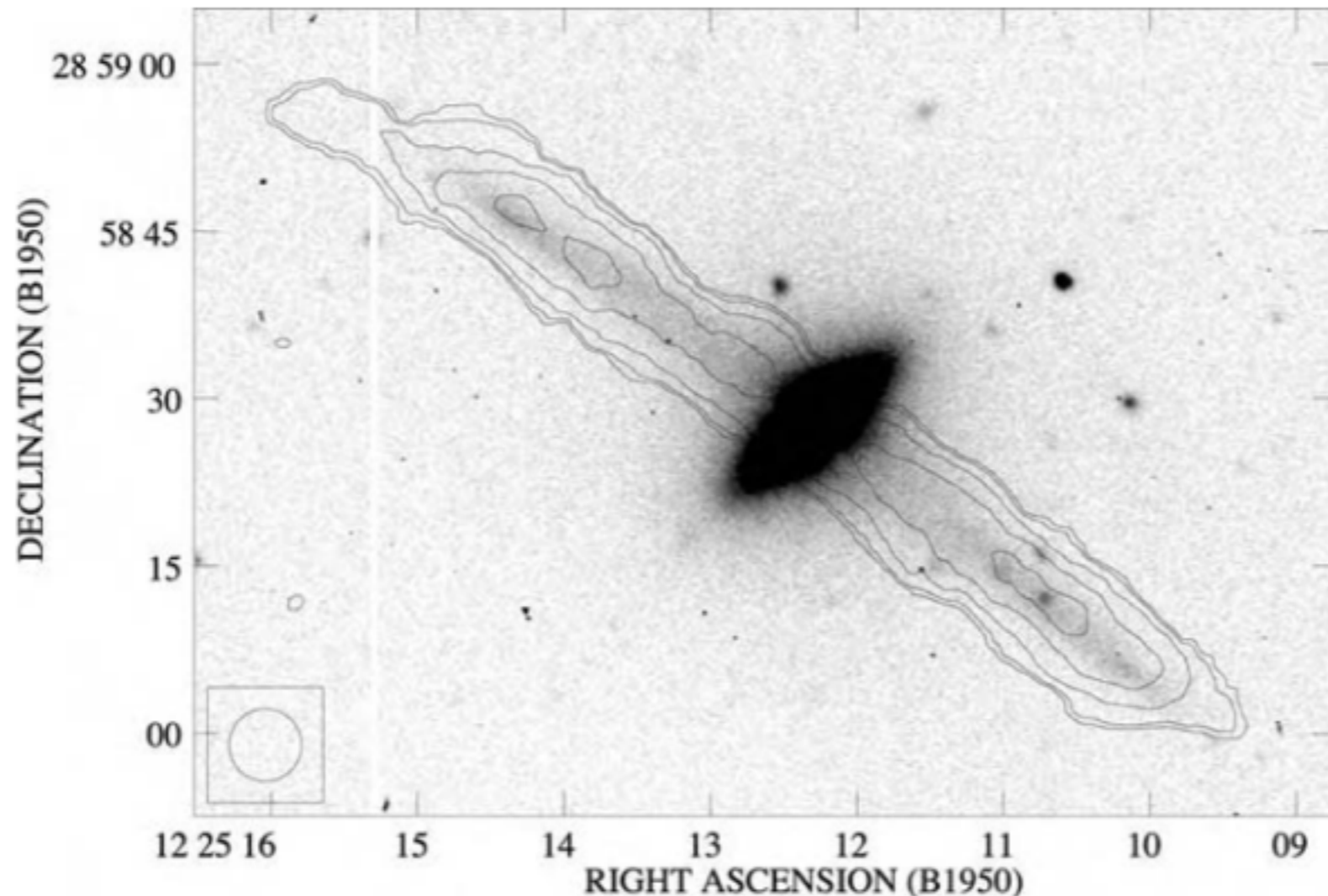
Gás e matéria escura em galáxias disco

# Distribuição de gás em uma espiral edge-on



**Fig. 5.16.** Stars and interstellar gas in the edge-on Sc galaxy NGC 891: the cross marks the galaxy center. Left, surface density of HI gas; center, an image in H $\alpha$ , with contours showing radio emission in the 20 cm continuum; right, R-band optical image; sloping lines through bright stars show where charge has overflowed into adjoining pixels of the CCD column – R. Swaters and R. Rand.

# Distribuição de gás em uma S0



**Fig. 5.17.** A negative image of the S0 galaxy UGC 7576 in the V band: a thin ring of dust, gas, and stars orbits over the galaxy's pole. Contours show  $5 \times 10^9 M_{\odot}$  of HI gas in the polar ring; the disk of the S0 galaxy has hardly any cool gas. The circle on the left shows the radio telescope's beam – A. Cox.

Algumas poucas S0 e elípticas tem tanto gás quanto espirais,  $\approx 10^{10} M_{\odot}$

Frequentemente esse gás não está em um disco, mas forma um anel inclinado, as vezes com movimento retrogrado. Em alguns casos, o anel é polar.



# Massa de gás em galáxias

---

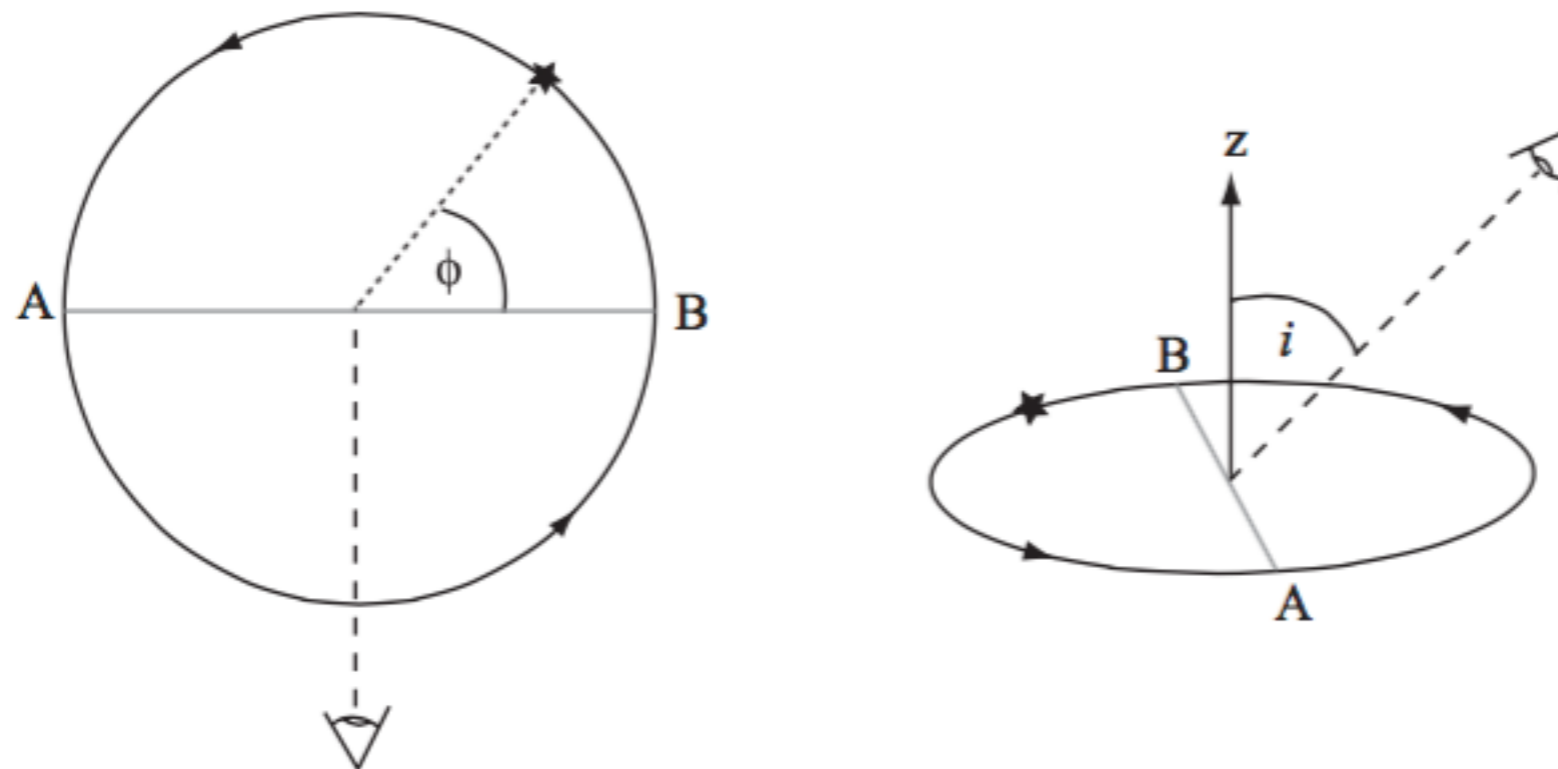
$$\mathcal{M}(\text{HI}) = 2.36 \times 10^5 \mathcal{M}_{\odot} \times d^2 \int F_{\nu} \left[ 1421 \text{ MHz} \times \left( 1 - \frac{V_r}{c} \right) \right] dV_r. \quad (5.4)$$

$d$  in Mpc,  $F_{\nu}$  in janskys, and  $V_r$  in  $\text{km s}^{-1}$

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hz}} \text{ (SI)} = 10^{-23} \frac{\text{erg}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Hz}} \text{ (cgs)}$$

# Movimentos do gás

---



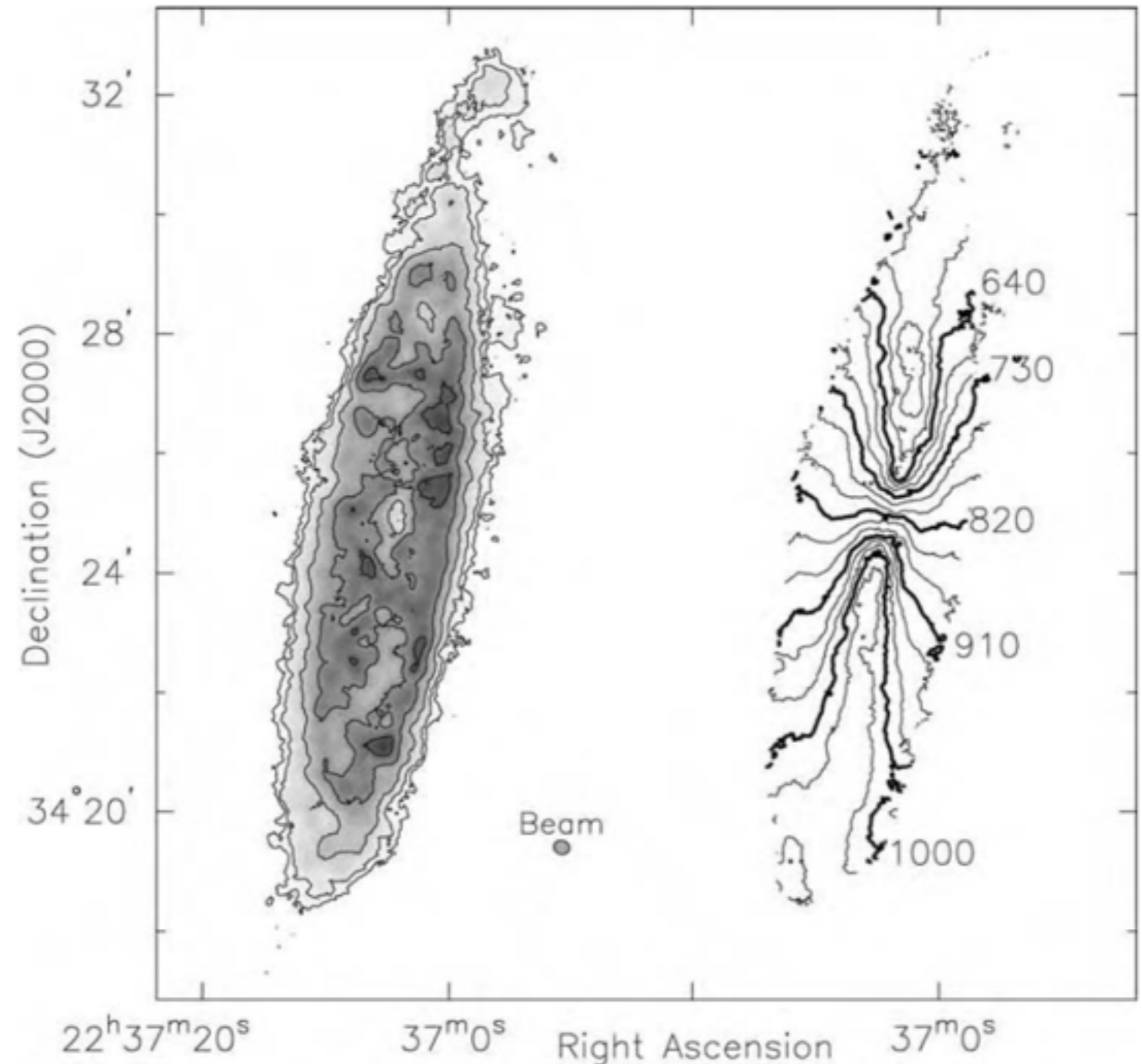
**Fig. 5.18.** Left, a rotating disk viewed from above. Azimuth  $\phi$ , measured in the disk plane, gives a star's position in its orbit; an observer looks from above the disk, perpendicular to diameter AB. Right, the observer's line of sight makes angle  $i$  with the disk's rotation axis  $z$ .

$$V_r(R, i) = V_{\text{sys}} + V(R)\sin i \cos \phi$$

Velocidade sistêmica,  $V_r$  no centro da galáxia

# Movimentos do gás

- A partir dos diagramas de aranha (spider diagram), determina-se  $V(R)$  e  $i$ .
- As linhas conectam regiões de mesmo  $V(R) \cos \phi$ .

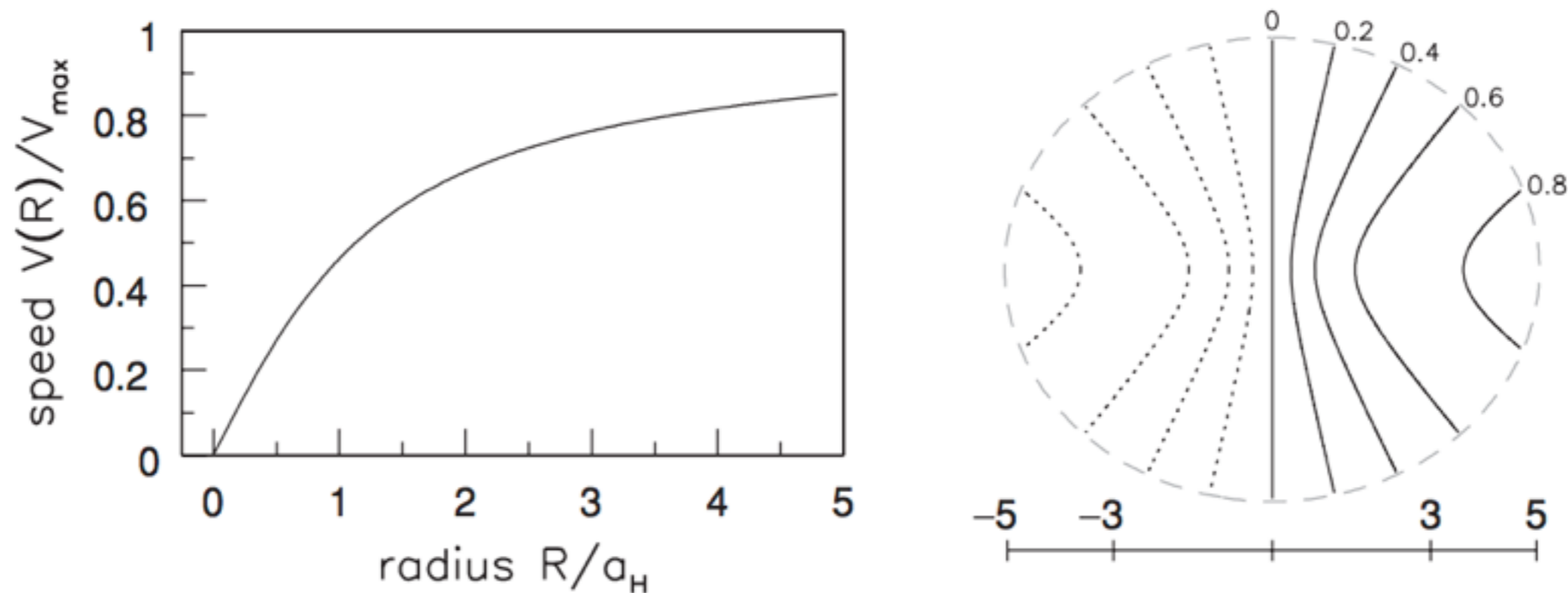


**Fig. 5.13.** HI gas in NGC 7331, observed with the VLA. Left, gas surface density; at  $d = 14$  Mpc, we see  $11.3 \times 10^9 M_{\odot}$  of HI, and  $1' = 4$  kpc. The outer contour shows diffuse gas, at  $N_{\text{H}} = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ; higher levels are at 1.2, 3.3, 6.4, and  $9.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ . The small oval  $15.7'' \times 13.7''$  shows the half-power width of the telescope *beam*: a pointlike source would appear with roughly this size and shape. Right, contours of gas velocity  $V_r$ , spaced  $30 \text{ km s}^{-1}$  apart – M. Thornley and D. Bambic.

$$V_r(R, i) = V_{\text{sys}} + V(R) \sin i \cos \phi$$



# Movimentos do Gás

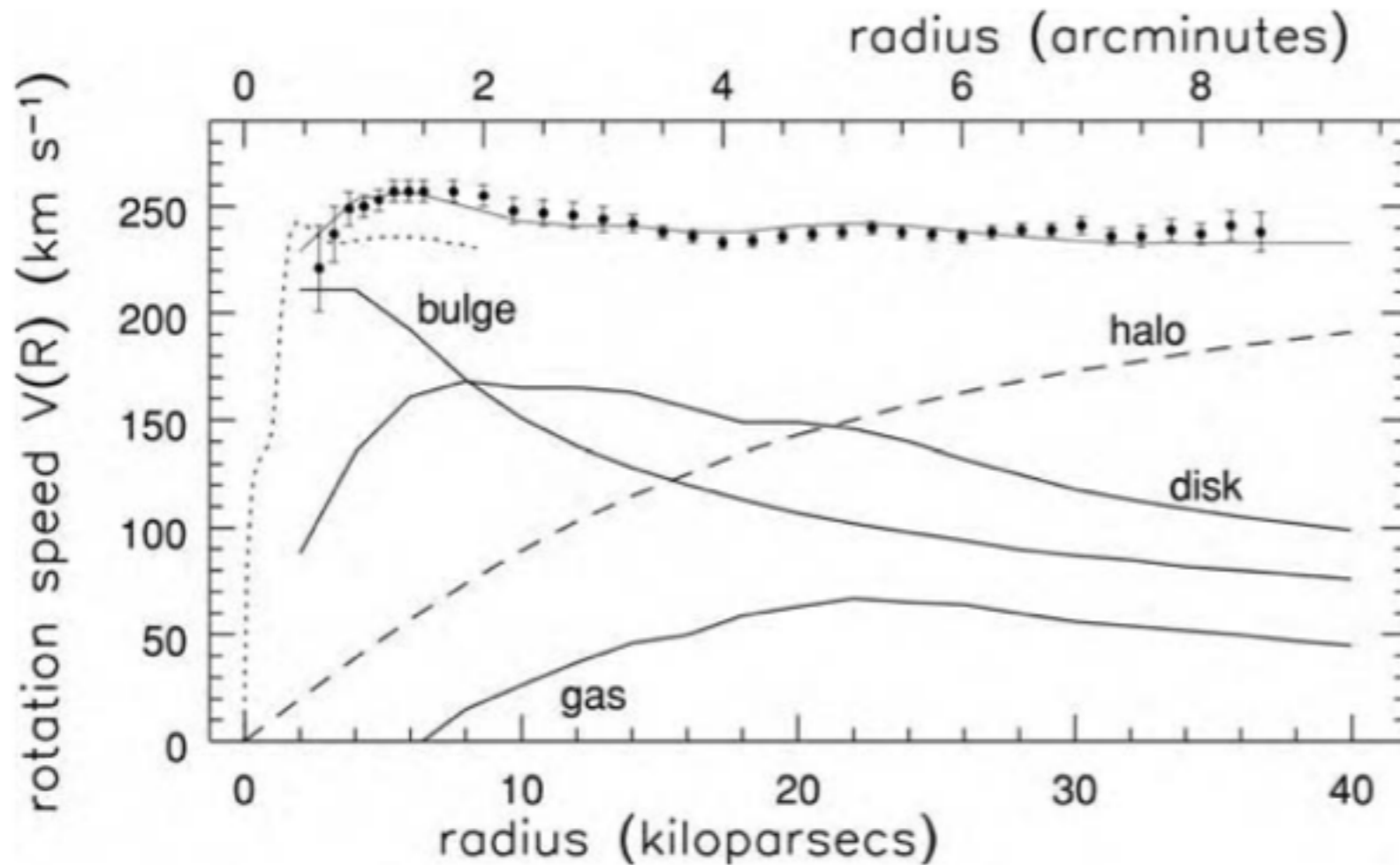


**Fig. 5.19.** Left, the rotation curve  $V(R)$  in the ‘dark-halo’ potential of Equation 2.19, in units of  $V_H = V_{\max}$ . Right, the spider diagram of  $V_r - V_{\text{sys}}$  for a disk observed  $30^\circ$  from face-on; contours are marked in units of  $V_H \sin 30^\circ$ , with negative velocities shown dotted.

$$V_r(R, i) = V_{\text{sys}} + V(R) \sin i \cos \phi$$

$$\frac{V^2(R)}{R} = \frac{GM(<R)}{R^2}$$

# 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)

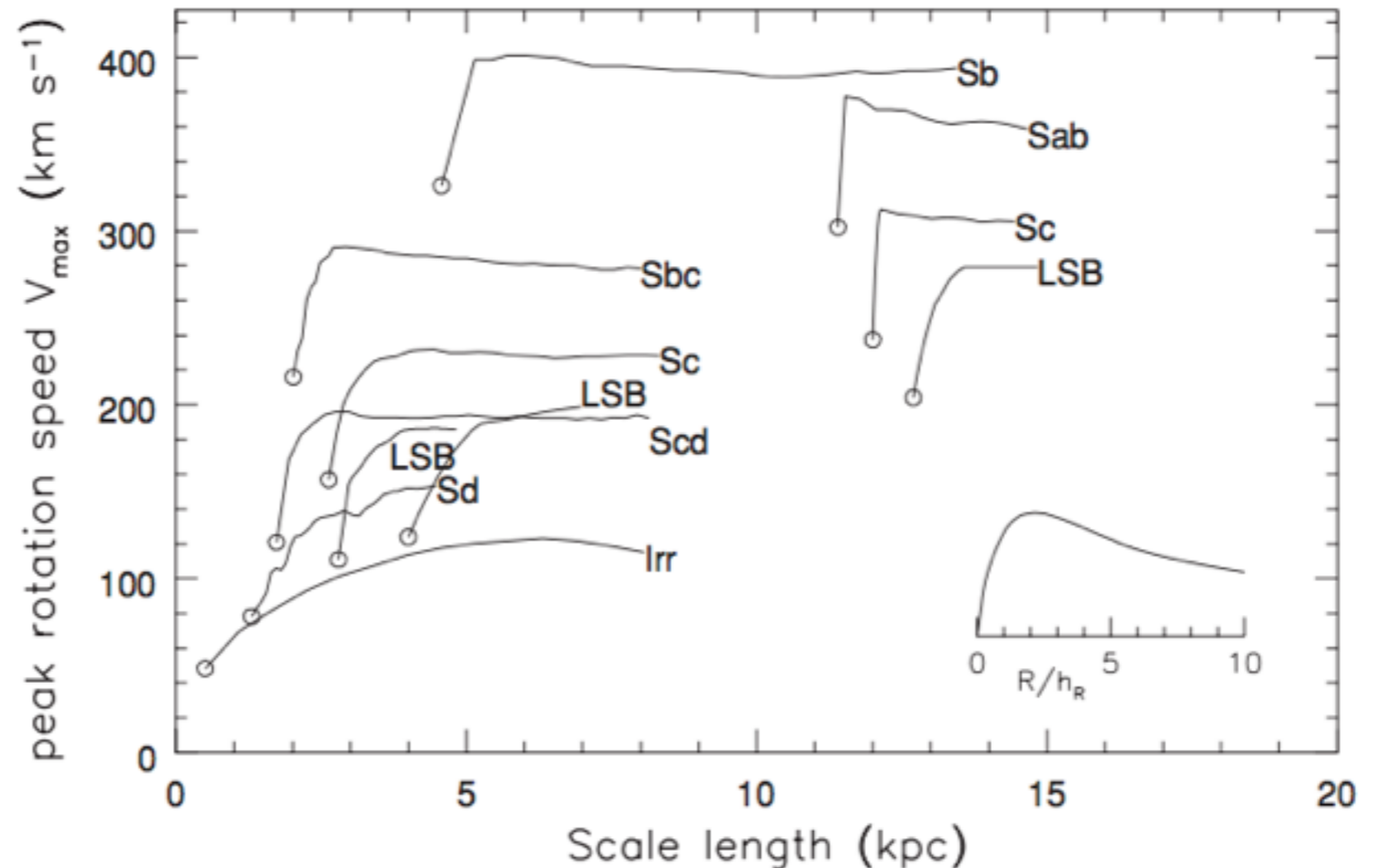
# Curvas de rotação

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

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 $\alpha$ .



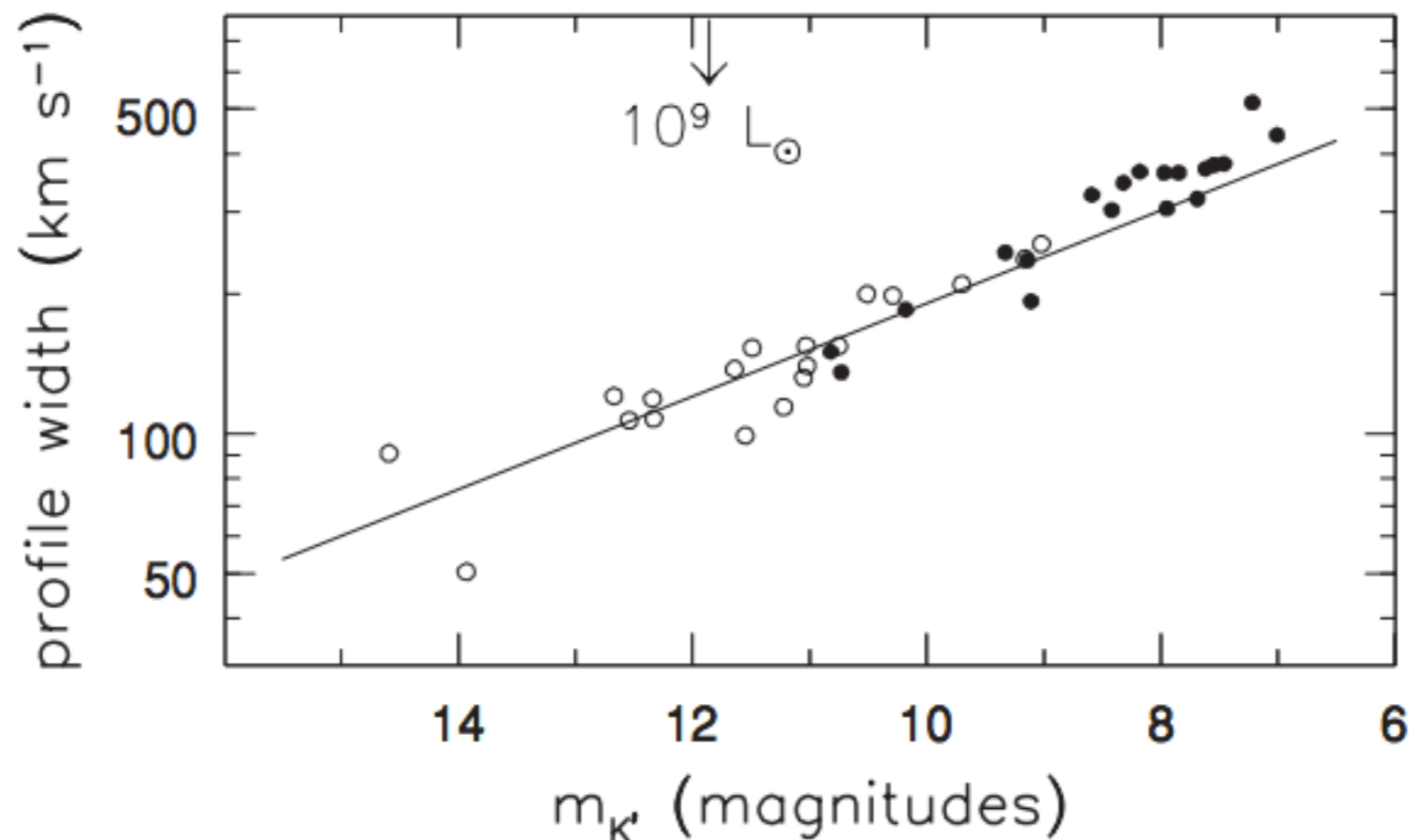
**Fig. 5.21.** Rotation curves for disk galaxies of various types. Open circles show the scale length  $h_R$  of the stellar disk and the peak rotation speed  $V_{max}$  for each galaxy. Curves are plotted in units of  $R/h_R$ , to the same horizontal scale as for the inset, showing  $V(R)$  for the 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.

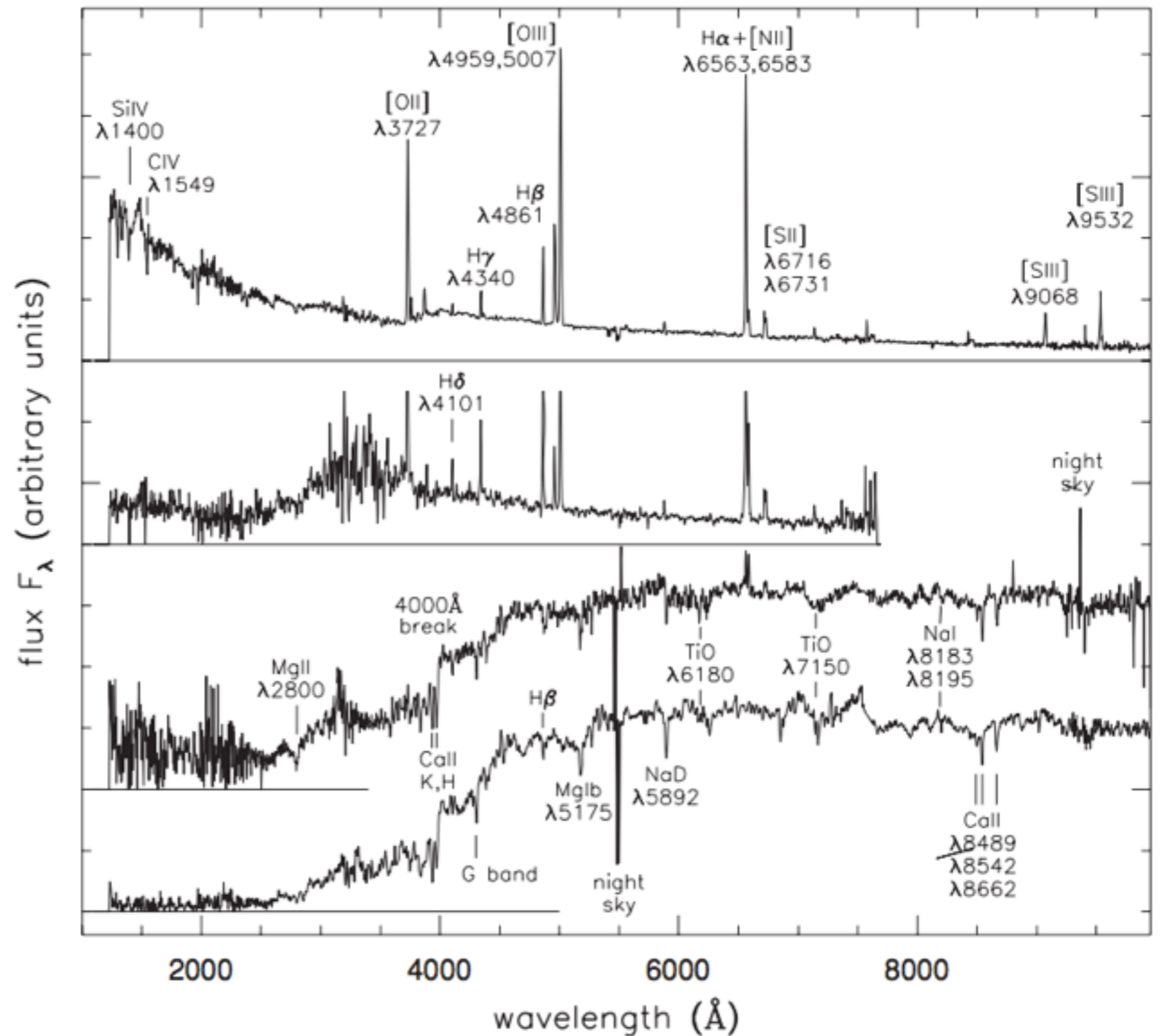
# A relação Tully-Fisher

---

- 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

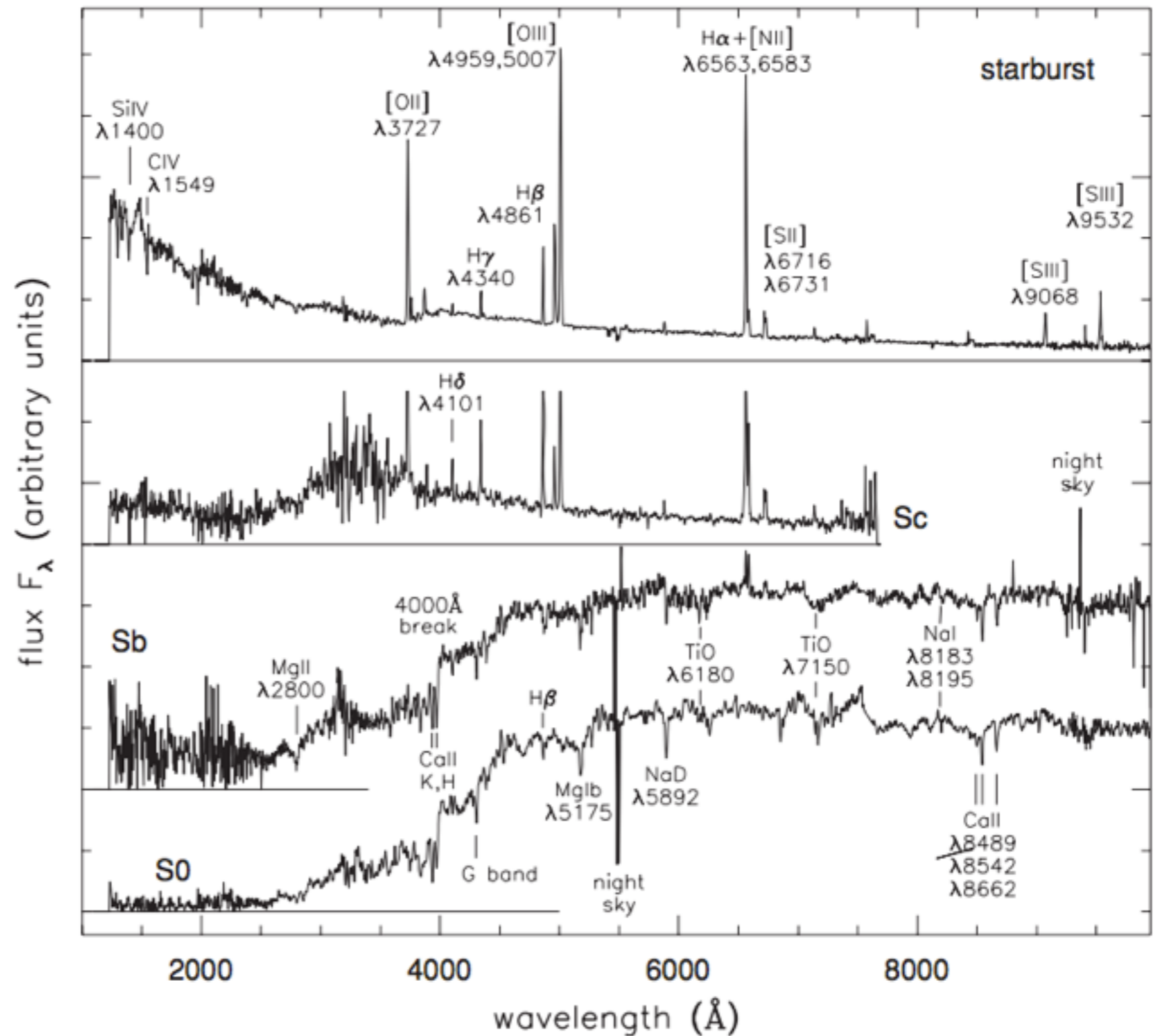
- Há no gráfico ao lado uma S0, Sc, Starburst e Sb. Quem é quem?





# Interlúdio

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



Sobre espirais e barras

# Espirais & Barras

---

- Quase todas as galáxias luminosas que contêm gás 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

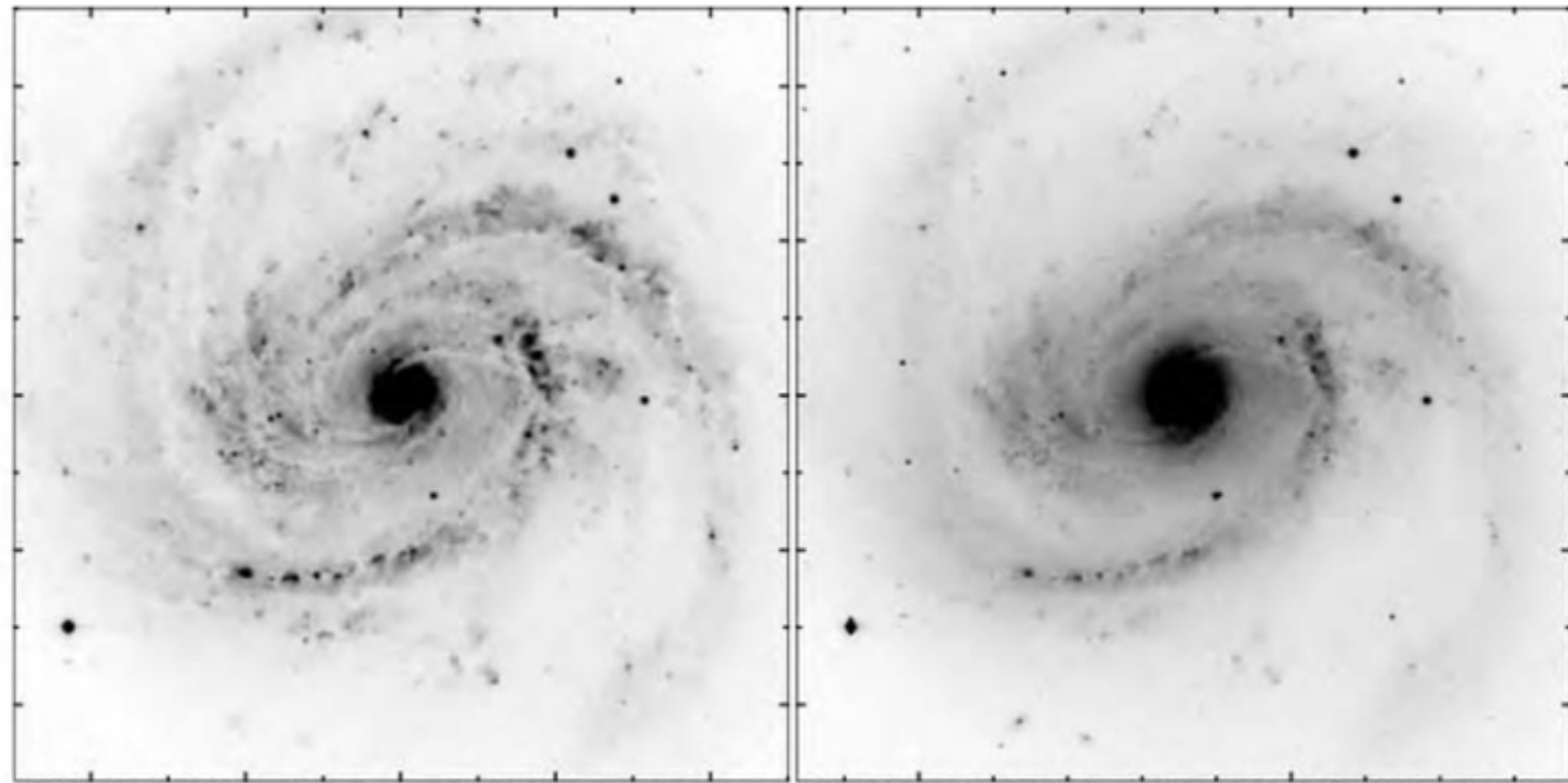


# Os padrões espirais

---

- Os braços são mais azuis do que o resto do disco, com emissão H $\alpha$
- Estrelas energéticas o suficiente para ionizar o gás vivem apenas 10Myr
- Padrões grand design podem ser traçados por vários raios
- 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.



# Os padrões espirais

---

- Em coordenadas polares,

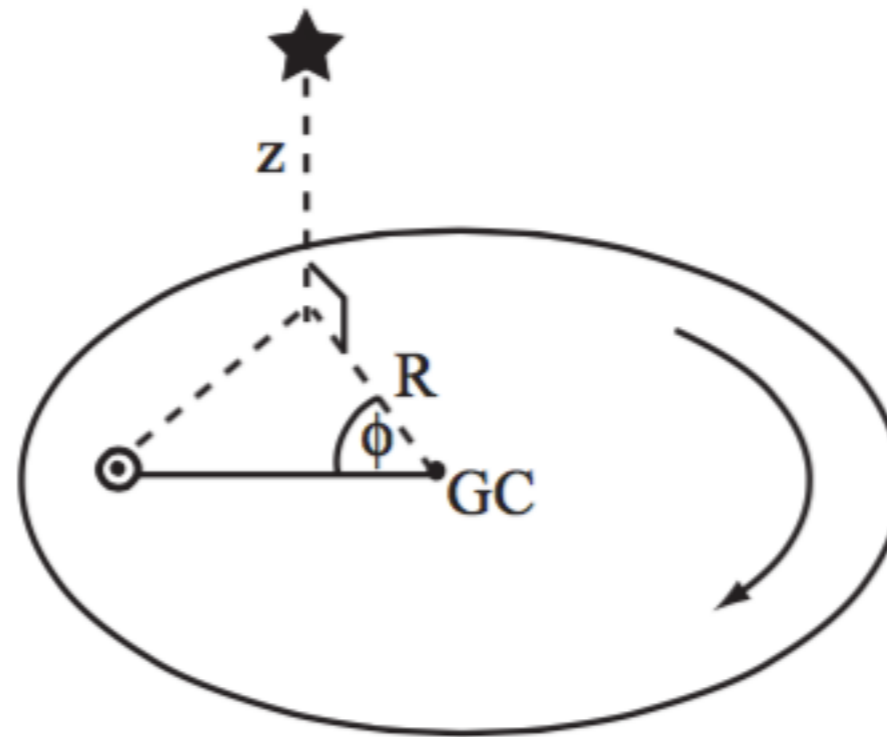


Fig. 1.10:  
cylindrical polar  
coordinates  $R$ ,  
 $\phi$ ,  $z$  with the  
origin at the  
Galactic center.

- podemos descrever a forma de um padrão espiral com  $m$  braços por

$$\cos\{m[\phi + f(R, t)]\} = 1.$$

- onde a função  $f(R, t)$  descreve quão “apertados” são os braços

# Os padrões espirais

---

- O *pitch angle*  $i$  é dado por

$$\frac{1}{\tan i} = \left| R \frac{\partial \phi}{\partial R} \right| = \left| R \frac{\partial f}{\partial R} \right|.$$

- Em espirais Sa,  $i$  é tipicamente 5 graus, enquanto que em galáxias Sc  $i$  varia entre  $10^\circ < i < 30^\circ$

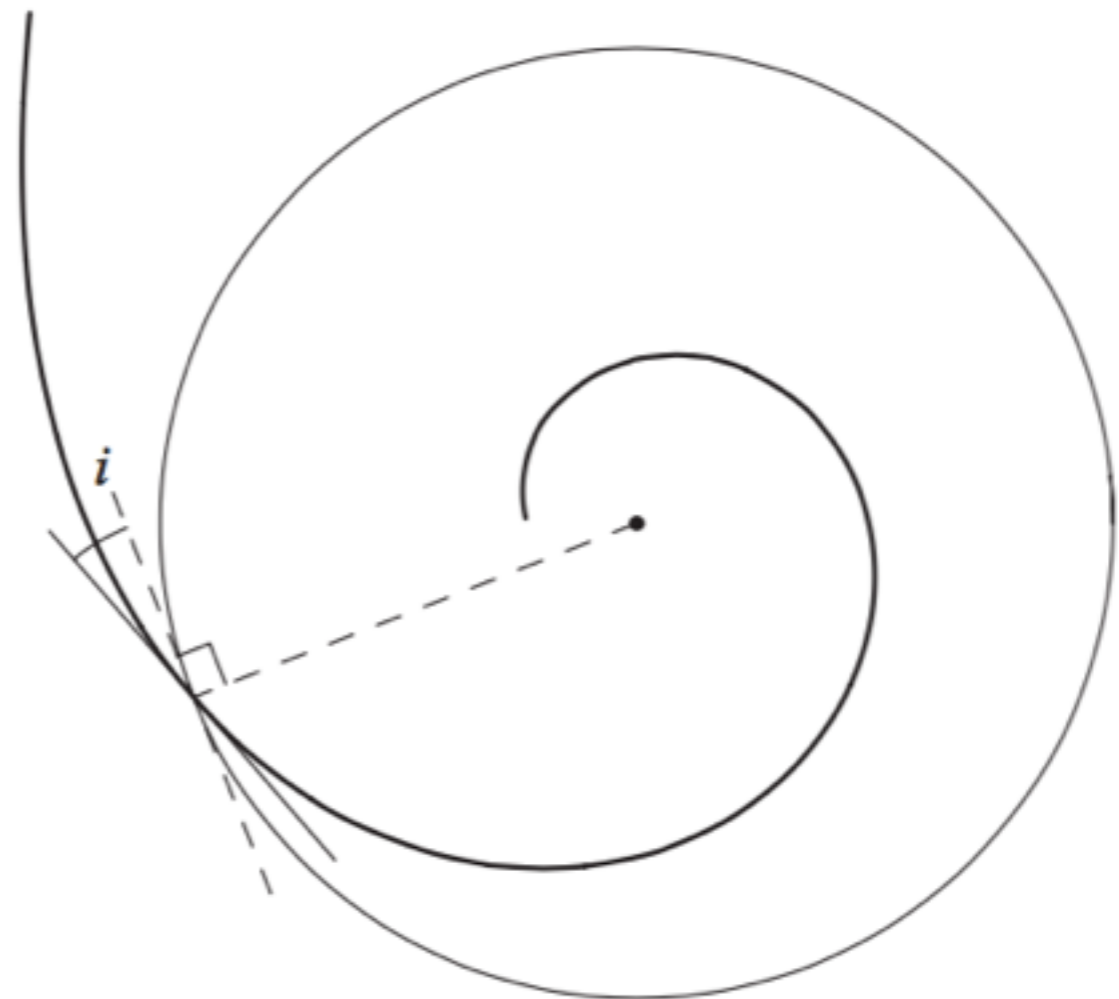


Fig. 5.28. In a disk rotating anticlockwise, where the rotation rate falls with radius  $R$ , stars that initially lie along a radial line are wound into a trailing spiral; the angle  $i$  is the *pitch angle* of the spiral.

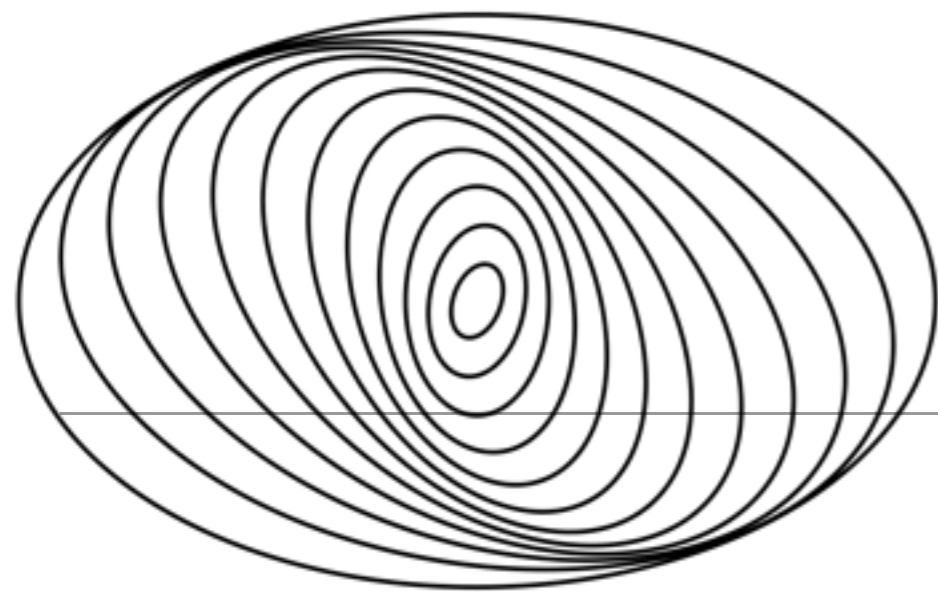


# Teorias para a Estrutura Espiral

---

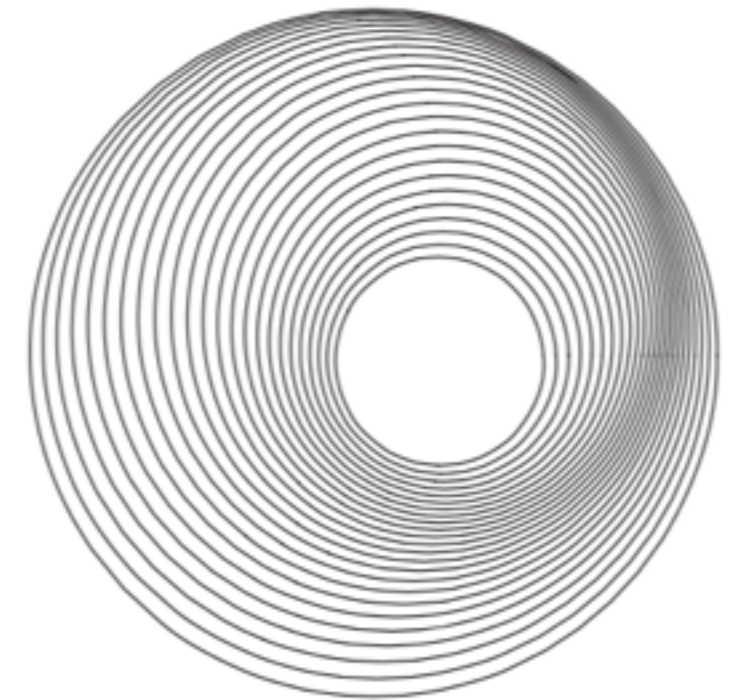
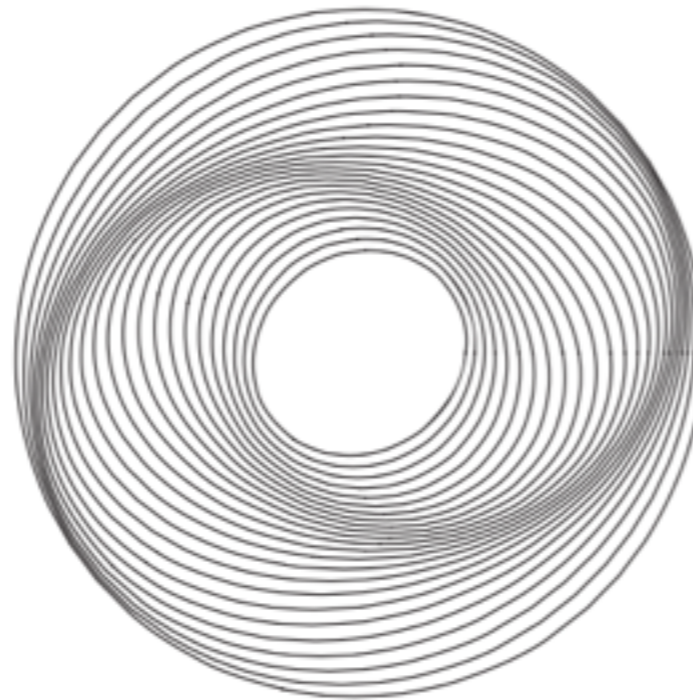
- A estrutura espiral é um fenômeno complexo e provavelmente não há apenas um processo responsável por todos os fenômenos espirais
- Os três modelos principais que co-existem são:
  - ***self-propagating star formation***, devido às regiões de formação estelar serem distorcidas pela rotação diferencial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



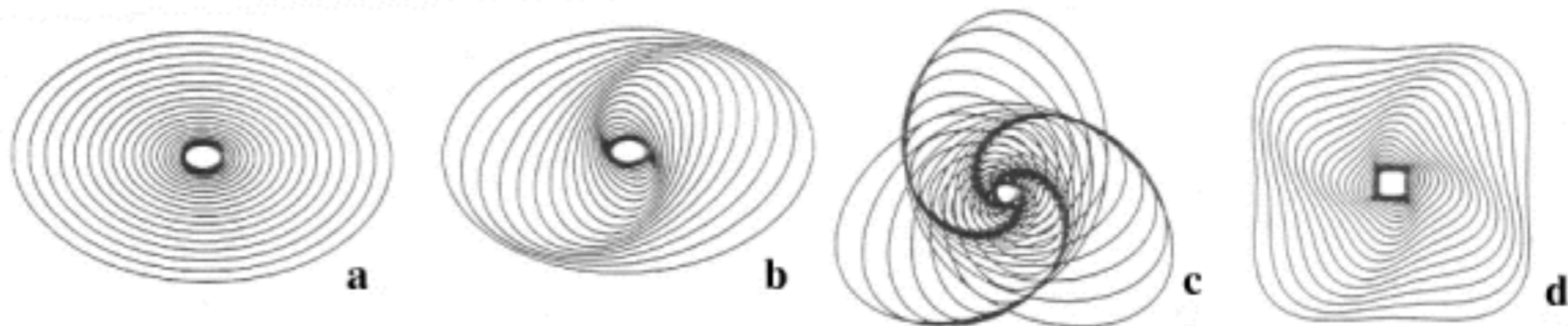


## Teorias para a Estrutura Espiral

- **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  $R = R_g [1 + 0.15 \cos(5 - 5R_g + \phi)]^{-1}$ .

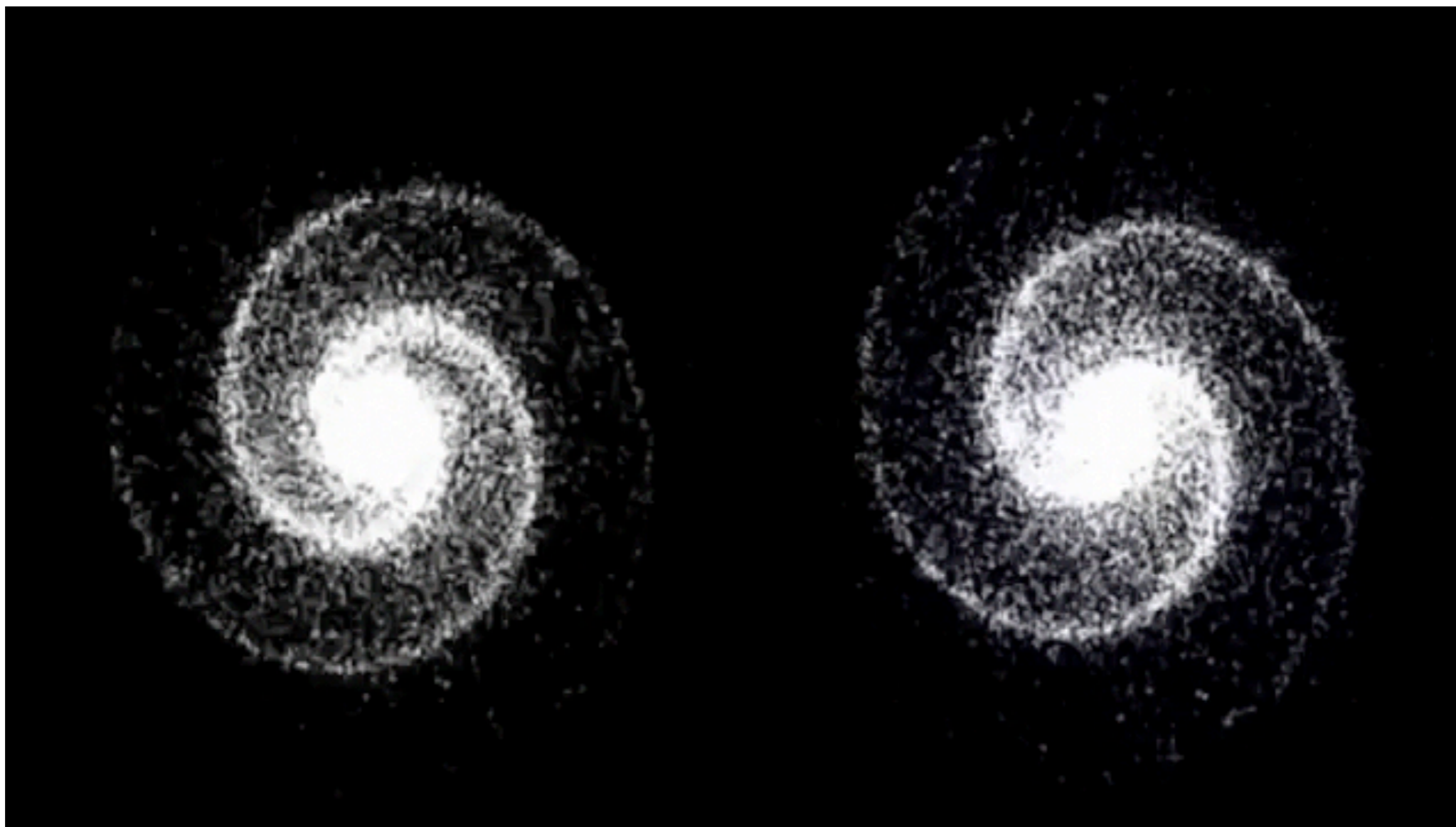




# Teorias para a Estrutura Espiral

---

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



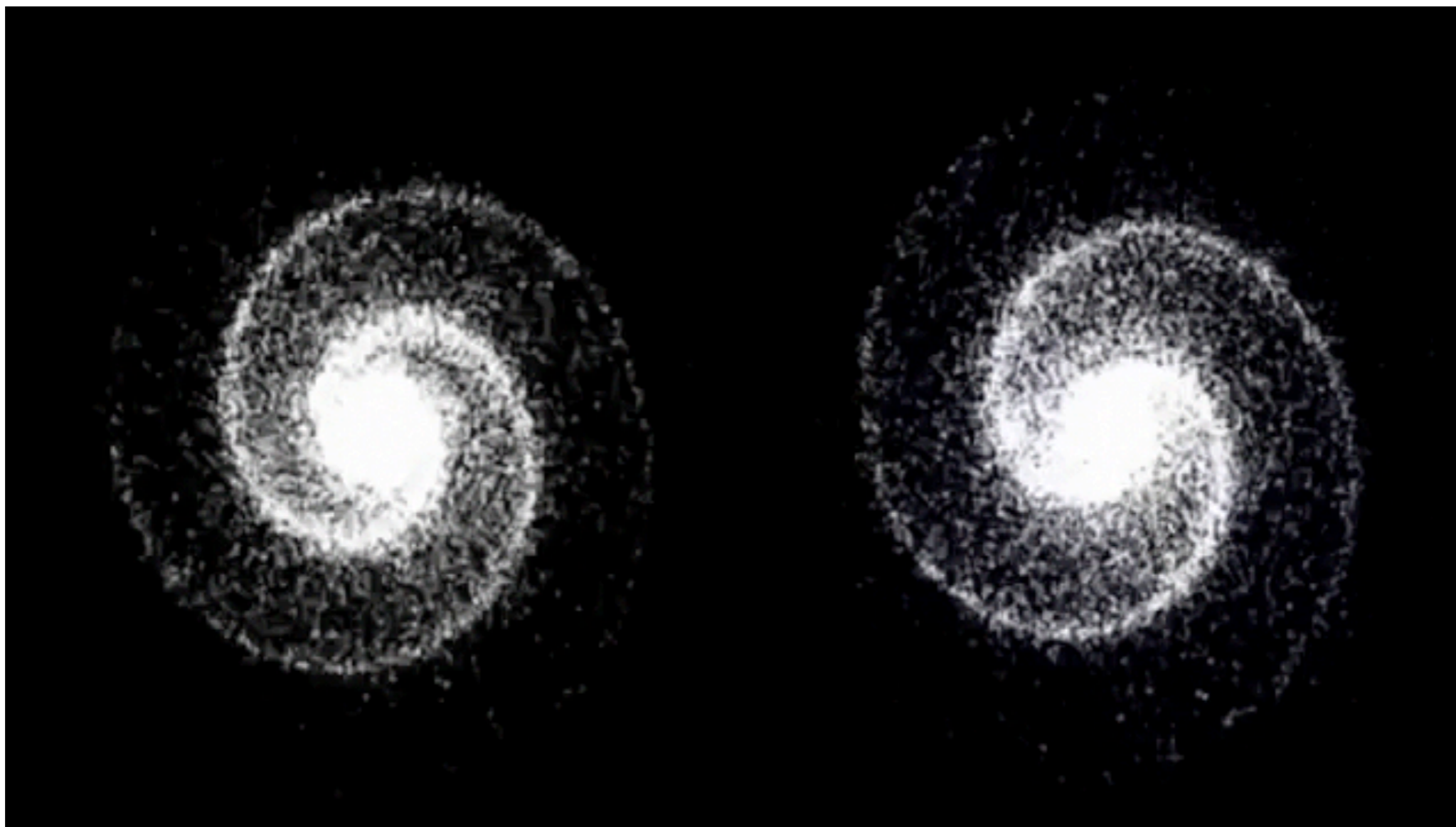
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_GNPvYdvZAAQ](https://www.youtube.com/watch?v=_GNPvYdvZAAQ)



# Teorias para a Estrutura Espiral

---

- Ondas de Densidade de Lin-Shu: 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)

# 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!)



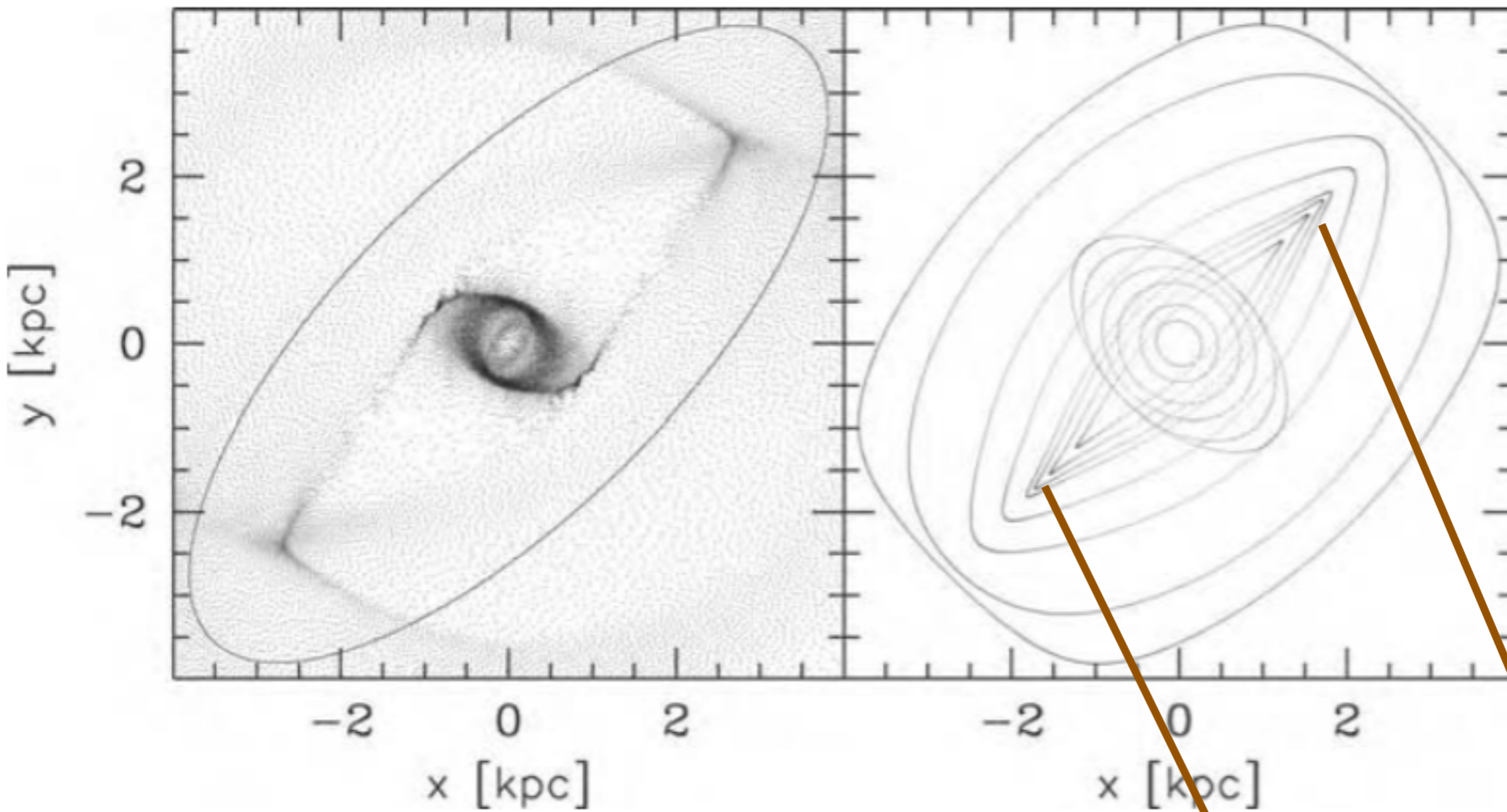


Fig. 5.33. Left, gas density from a computer simulation of flow within a bar; the solid curve outlines the bar, rotating clockwise. Right, particle orbits that close on themselves in a frame rotating with the bar. The gas flow is compressed in shocks along the leading edge of the bar, where the aligned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

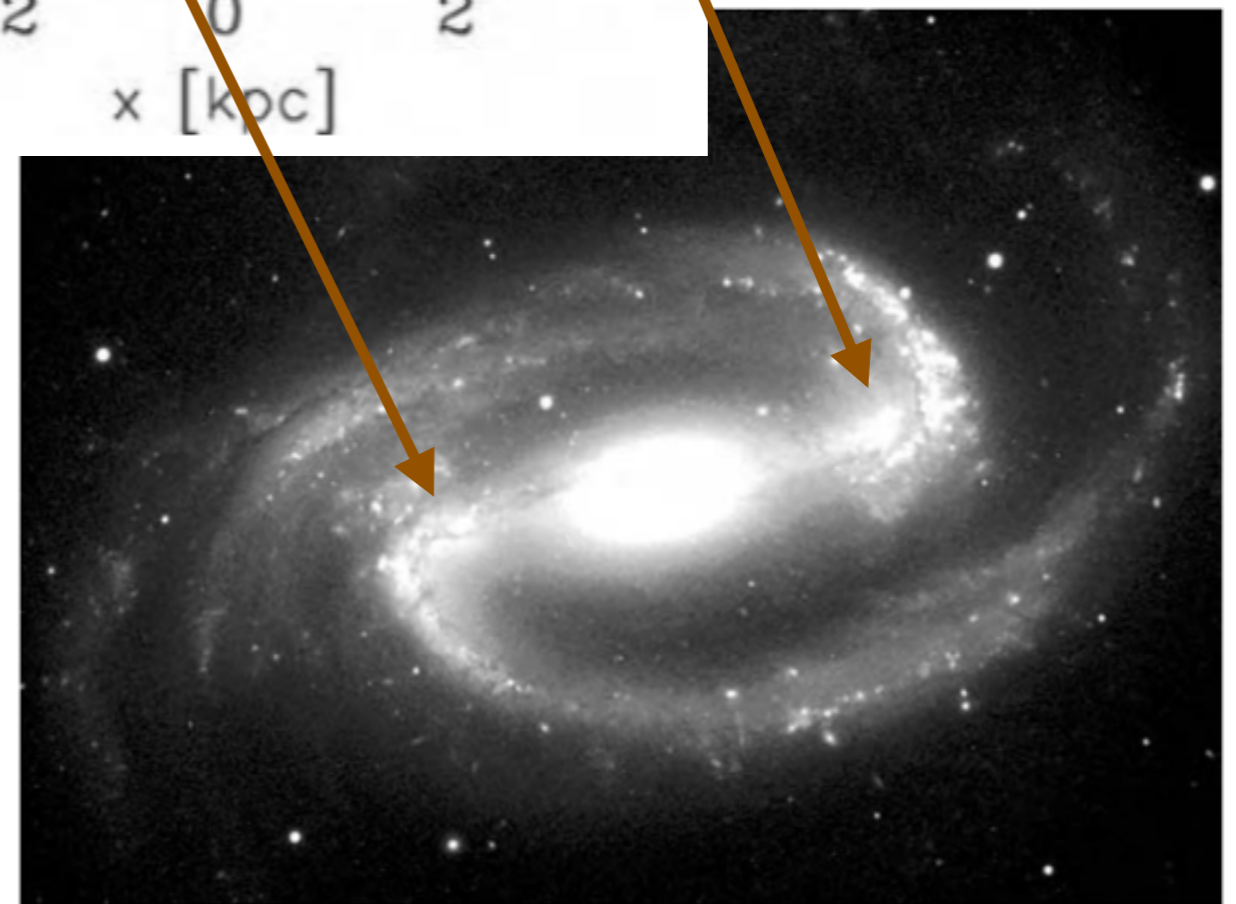


Fig. 5.32. The barred galaxy NGC 1300, classified as SBb or SBbc. The spiral arms trail; note the dust lanes on the leading edge of the bar – WIYN telescope.



Anéis

Galáxia Cartwheel



NGC4650A  
Polar ring lenticular  
galaxy



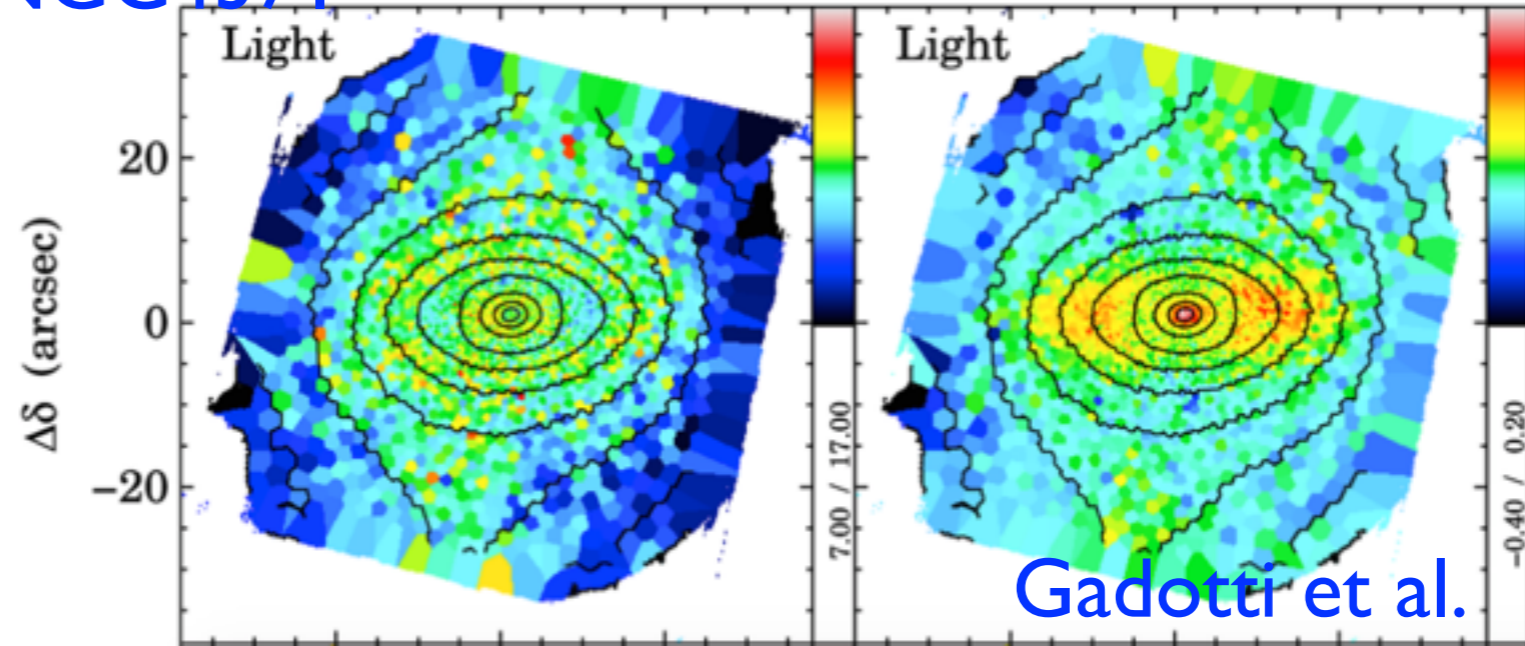
NGC660



NGC437I

Age

Metallicity



Gadotti et al.