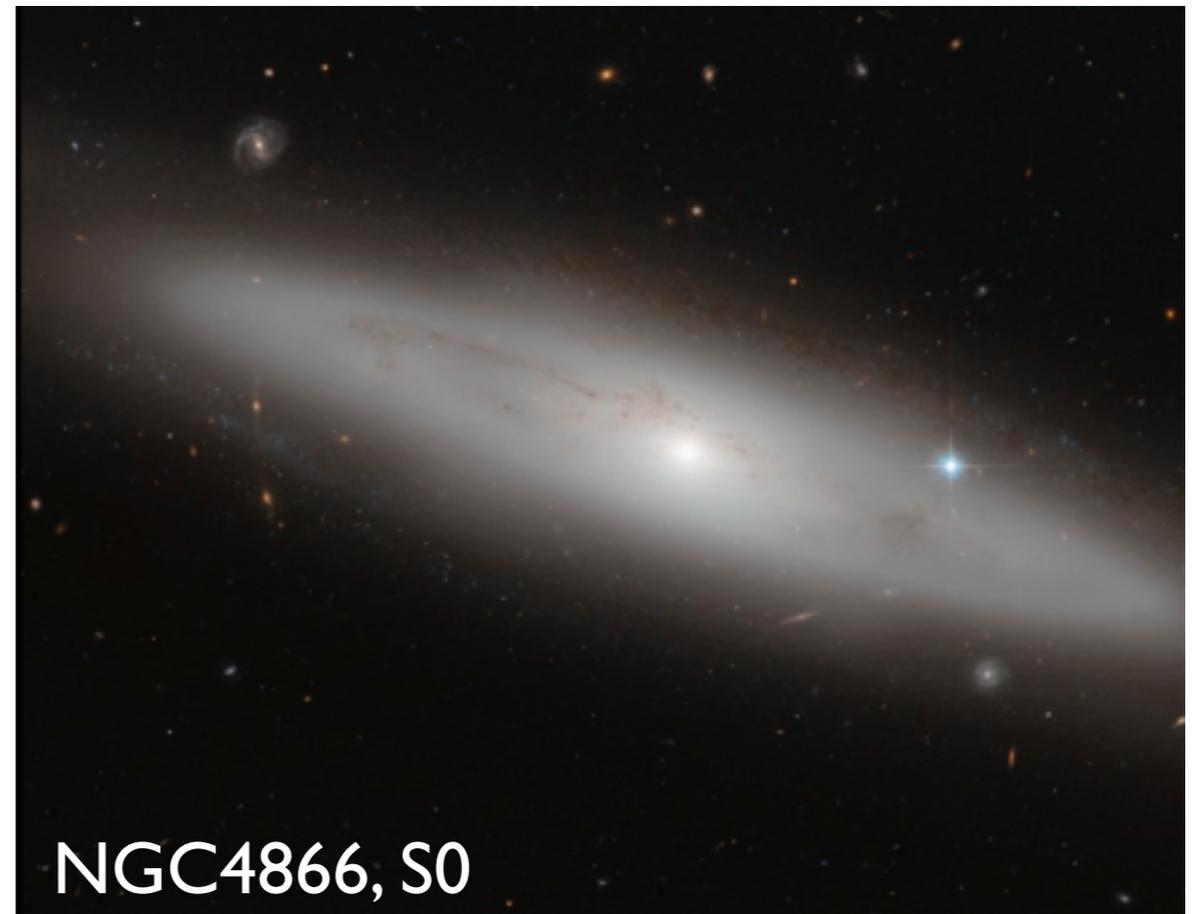
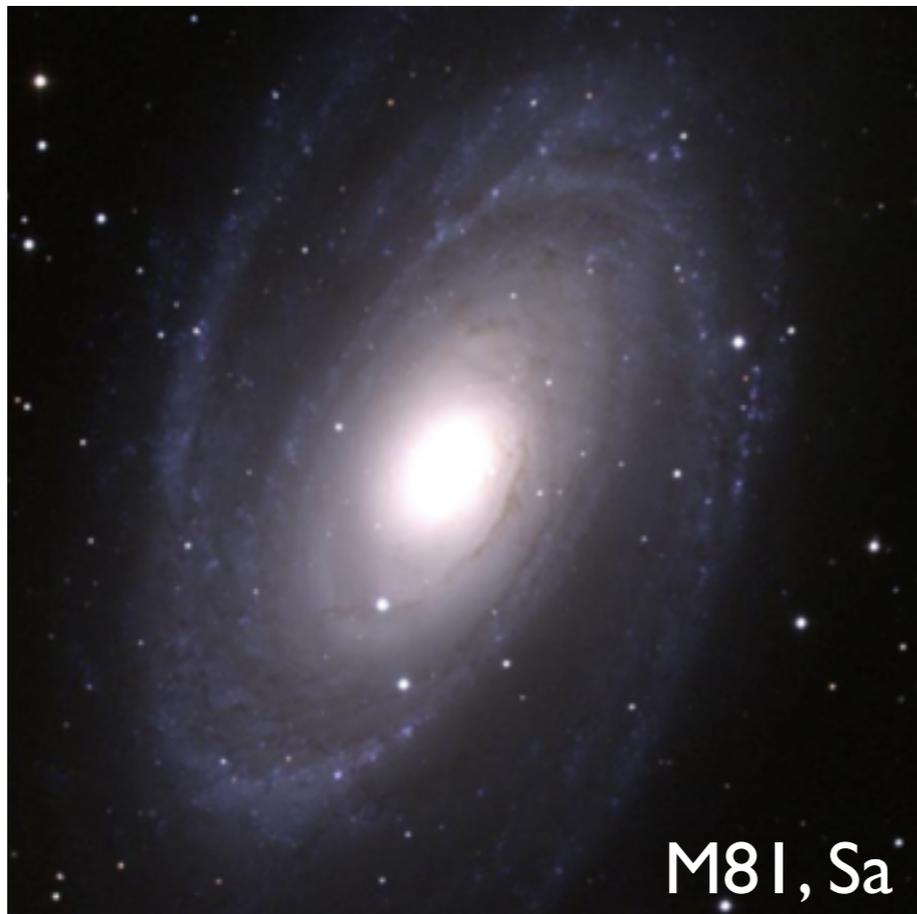


Galáxias Espirais e S0

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 mais numerosas do Universo

Detetores em Astronomia

CCDs

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

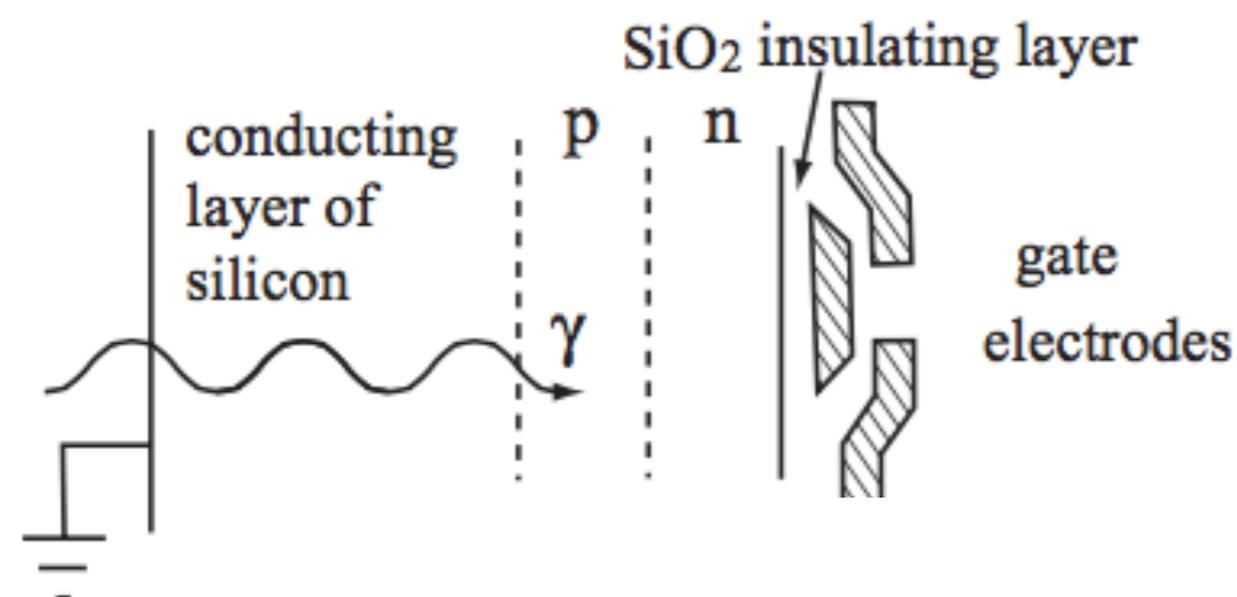
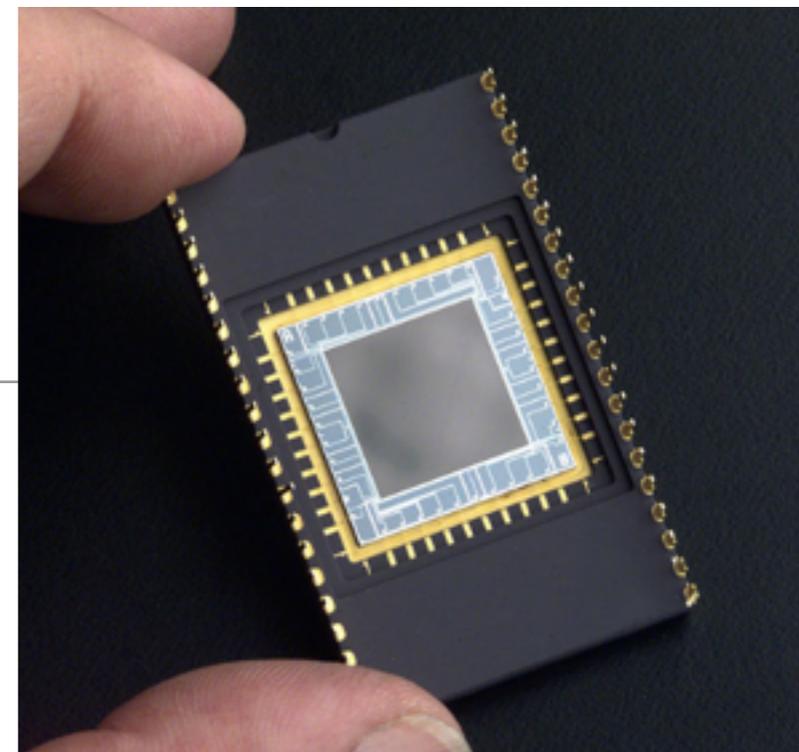


Fig.5.2. Ilustração dos elementos individuais, os pixels

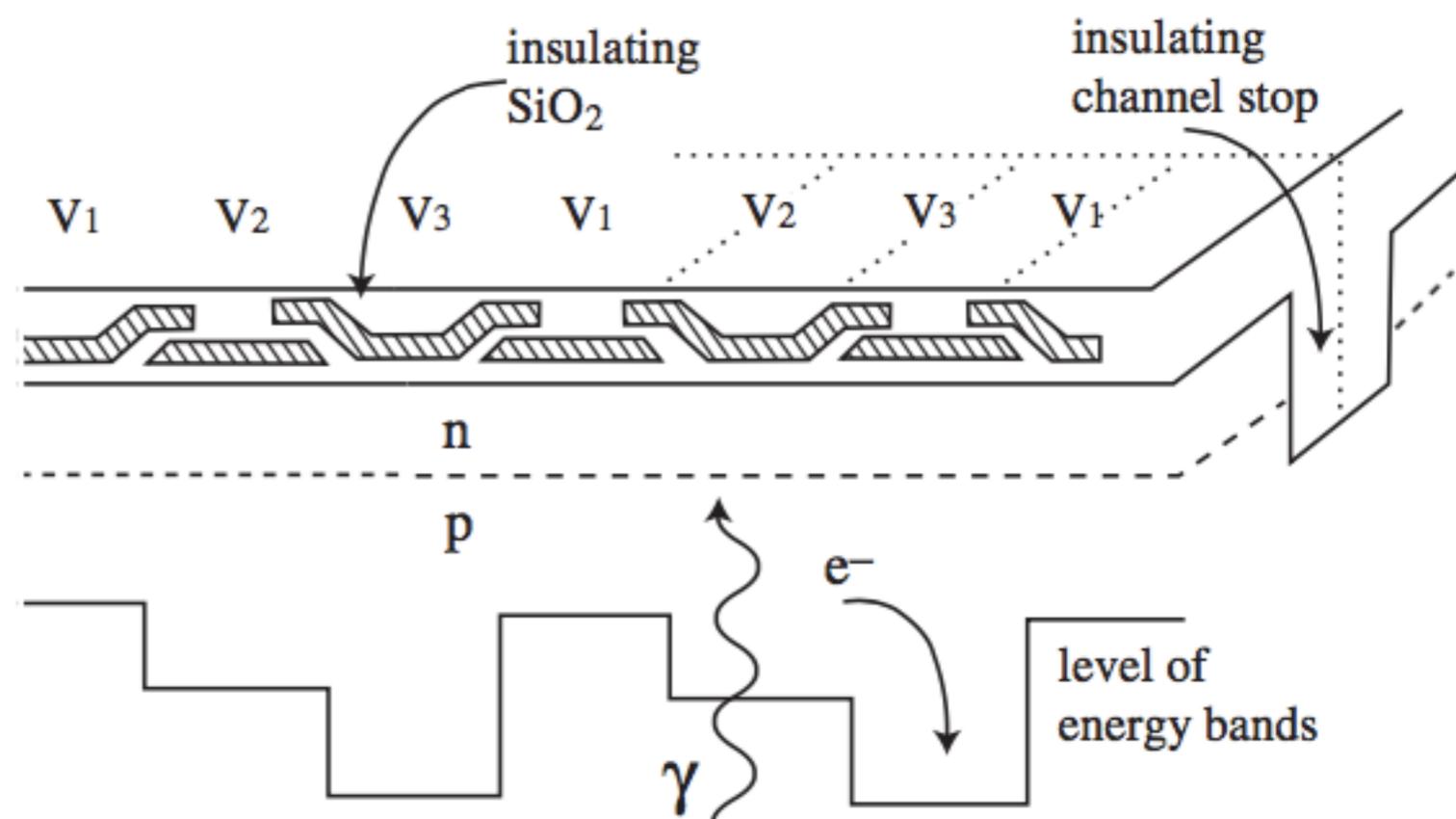
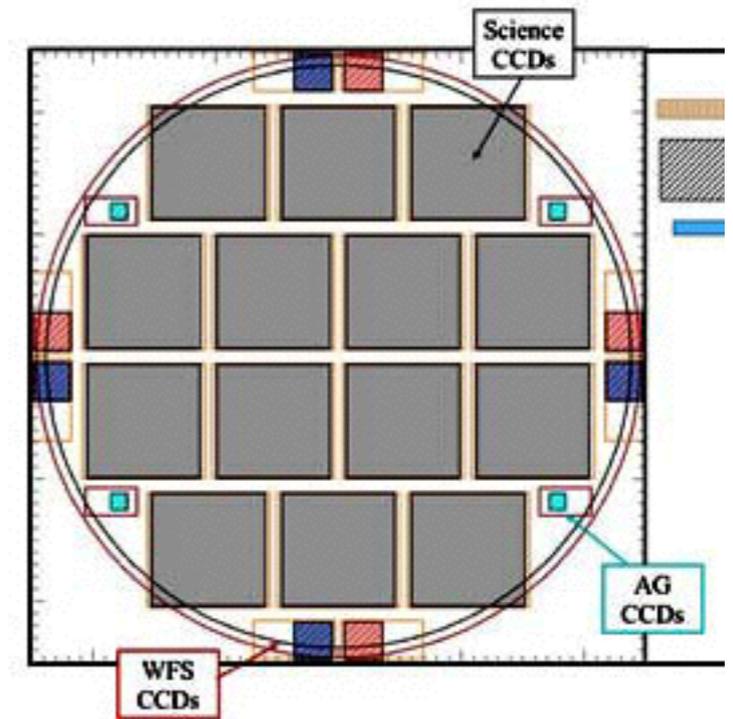


Fig.5.1. A section through a back-illuminated CCD chip turned on its side: photons (wavy line) enter through the conducting silicon layer, liberating electrons which are attracted toward the gate electrodes. Gate voltages are adjusted to trap electrons just beneath the surface.

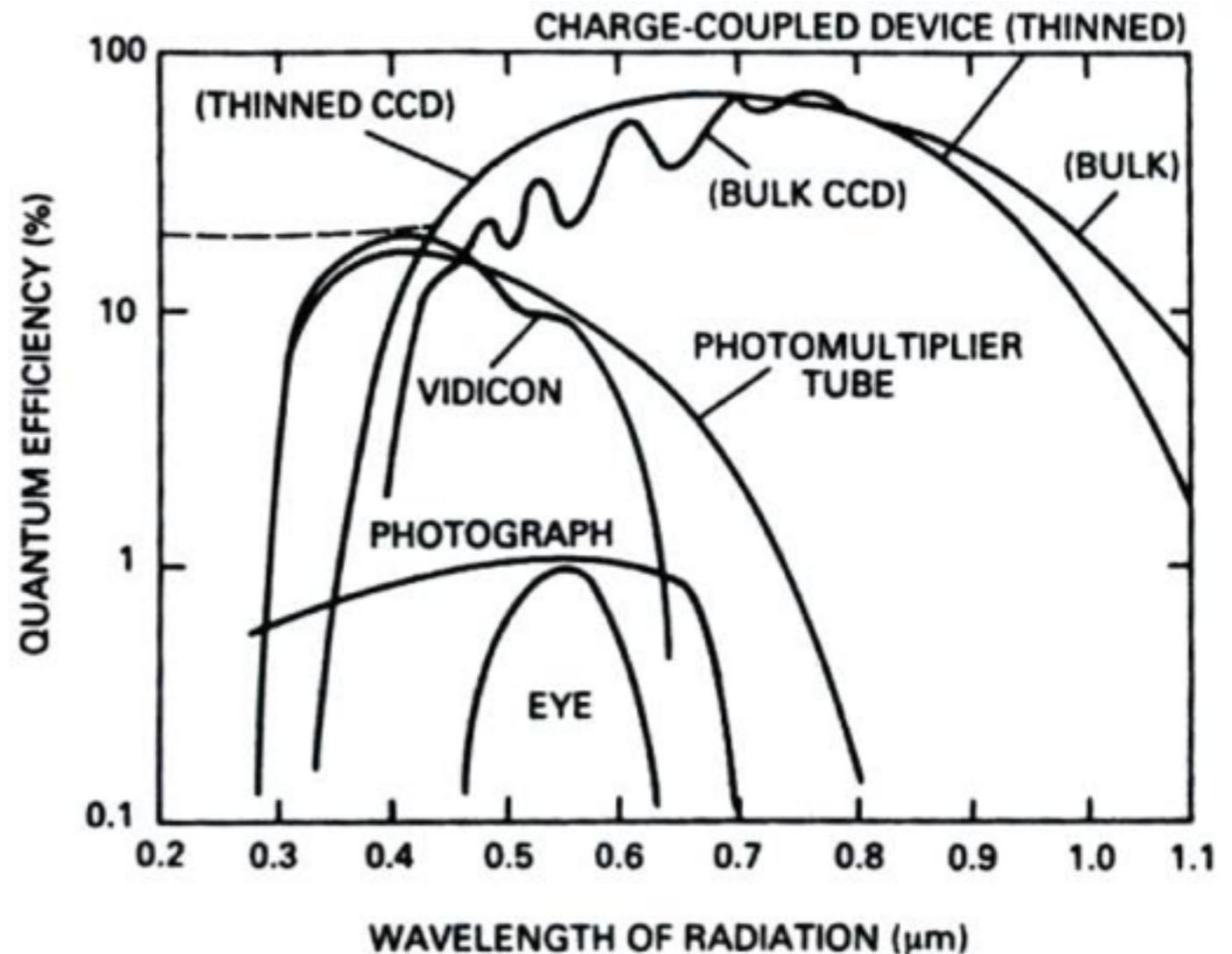
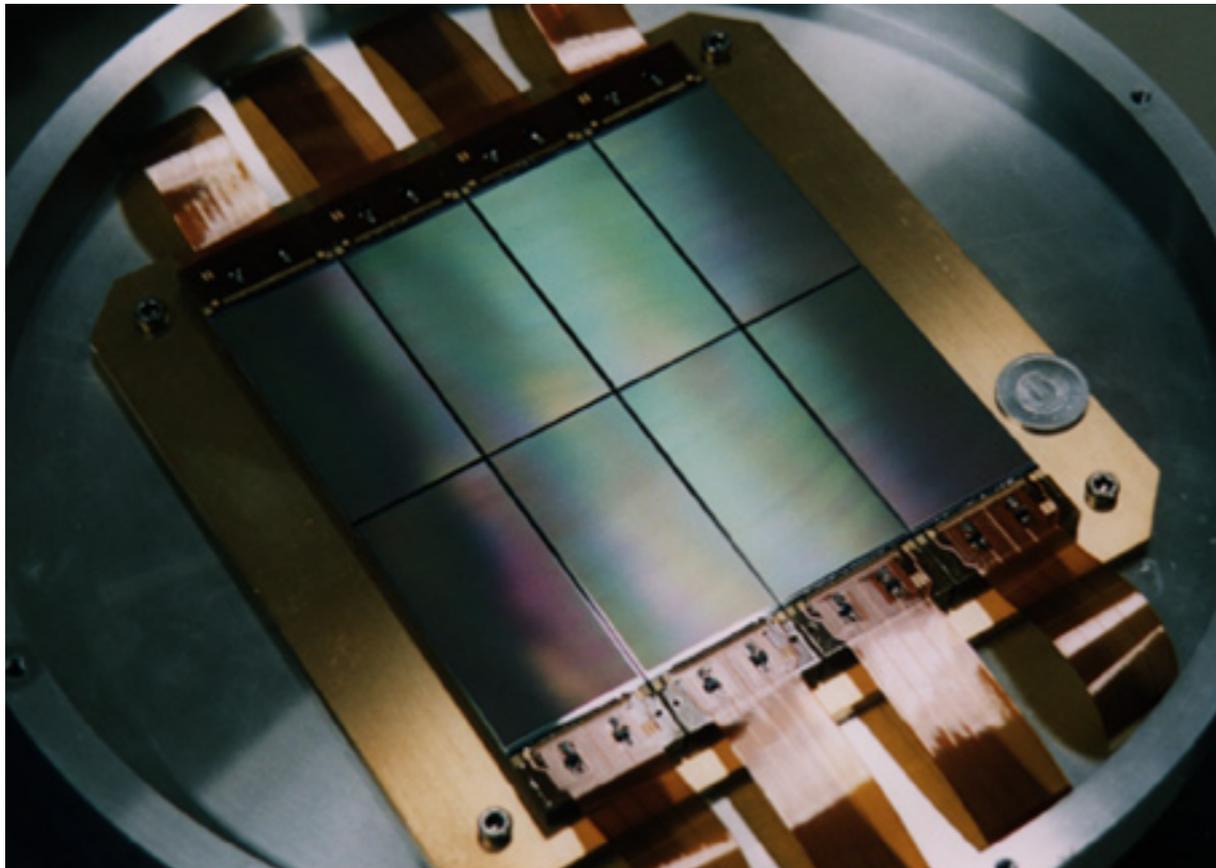
Trabalham a temperaturas baixas (100 - 200K), para reduzir read-out noise.

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

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

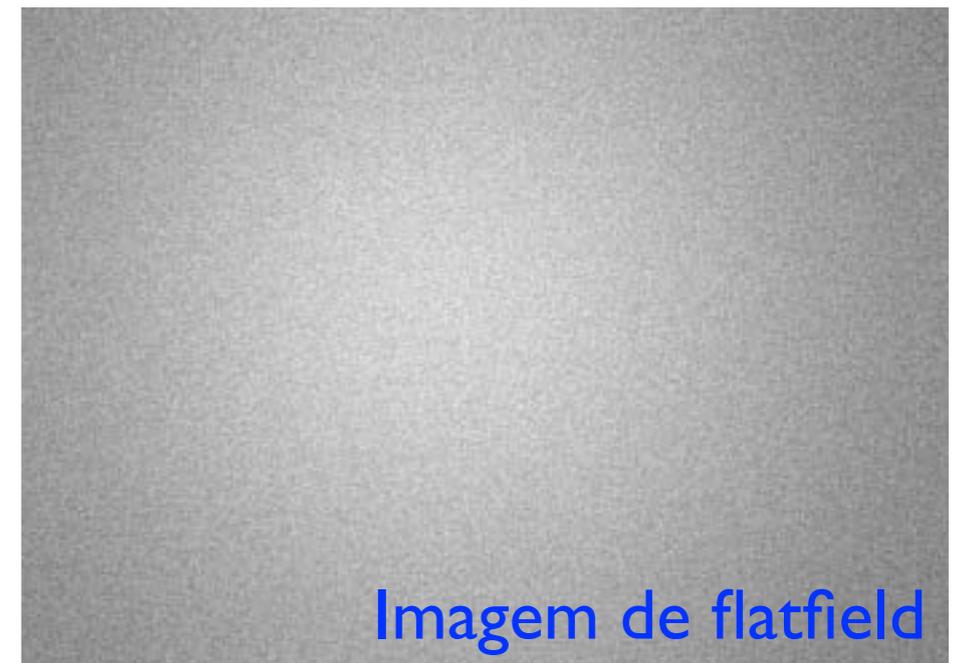
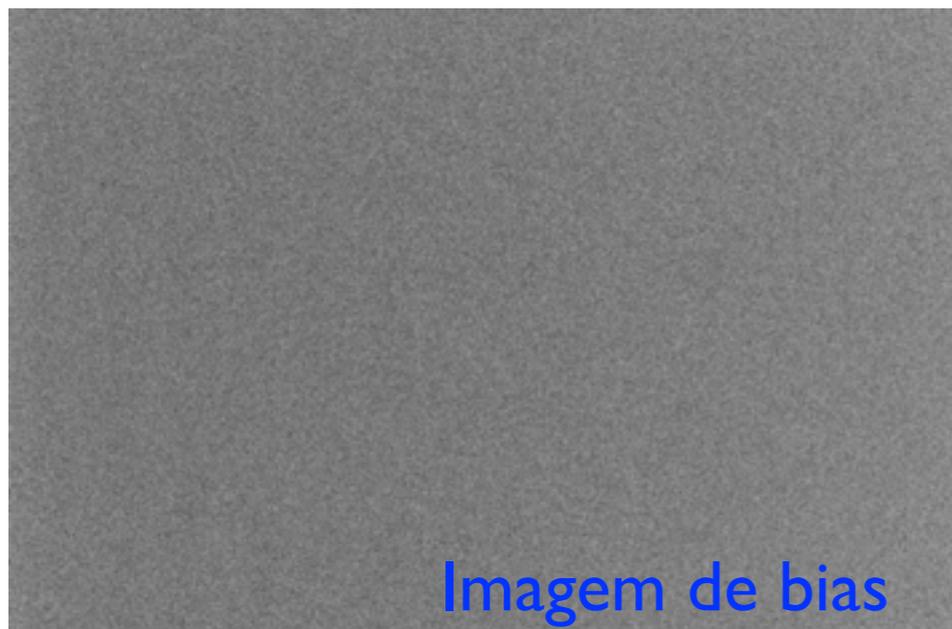


Mosaico do SUBARU. Até 1.5 graus quadrados.



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



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*,

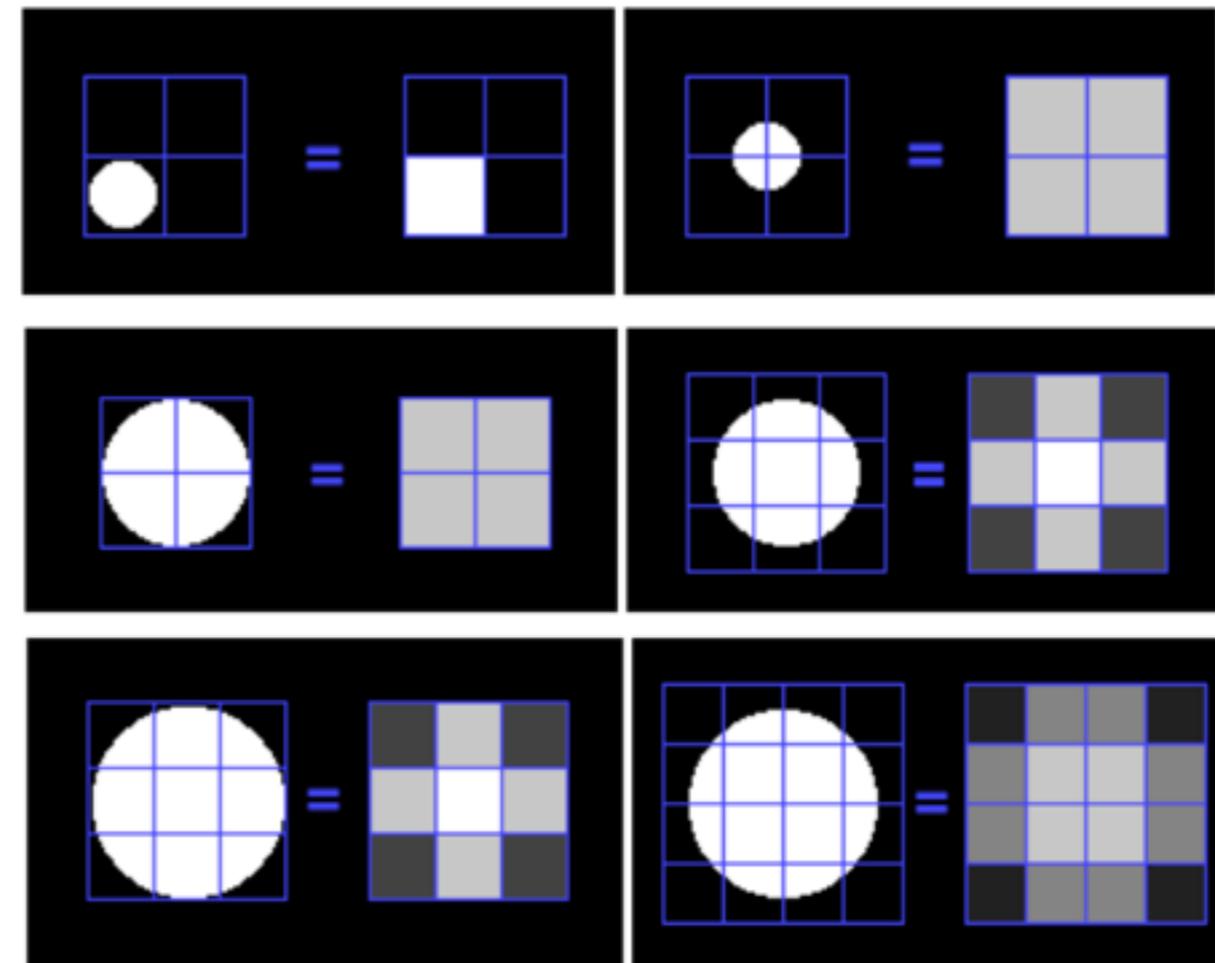
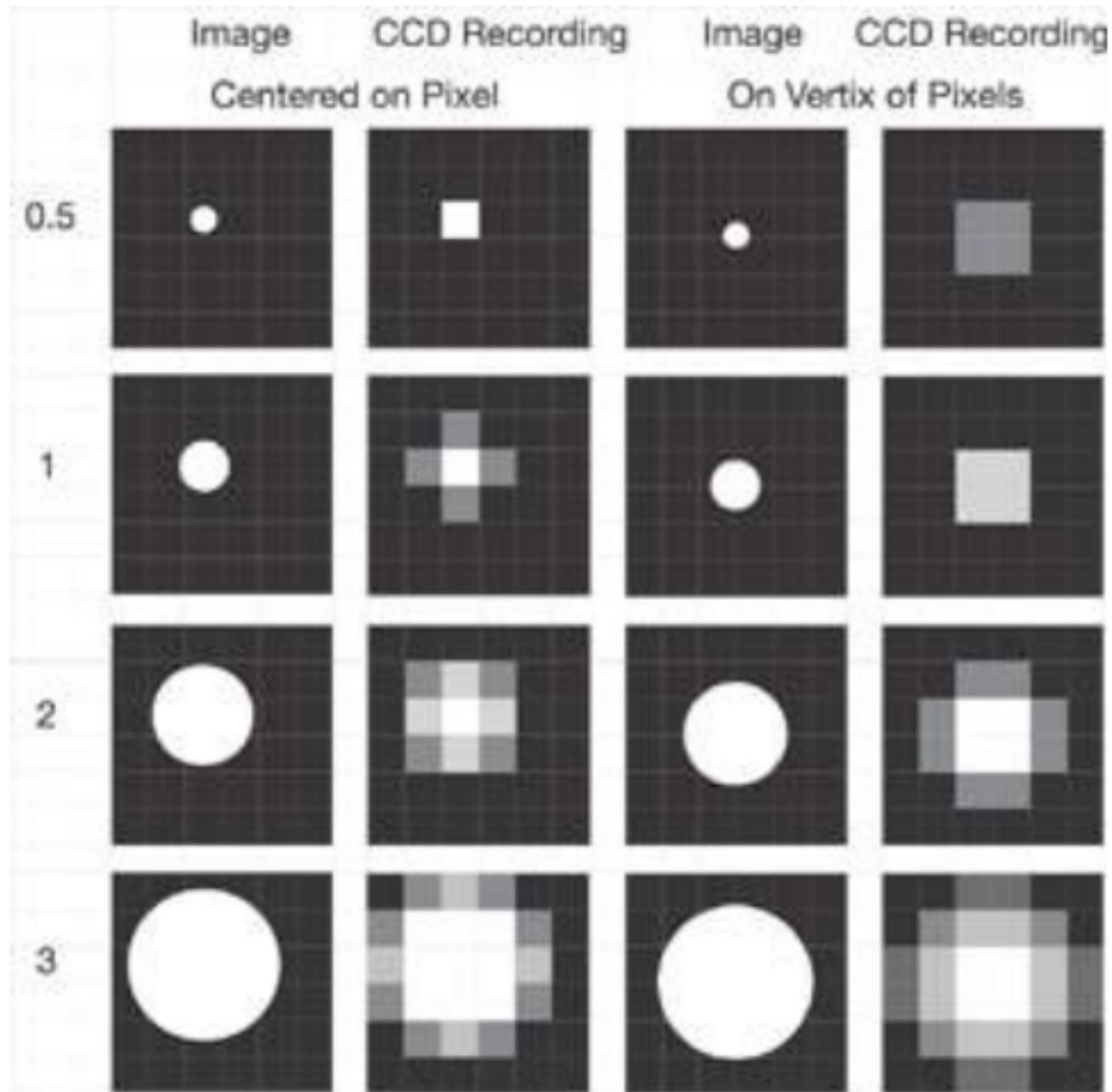
$$S/N = gC / \sqrt{gC + R^2}$$

- e assim por diante com as outras fontes de ruído.

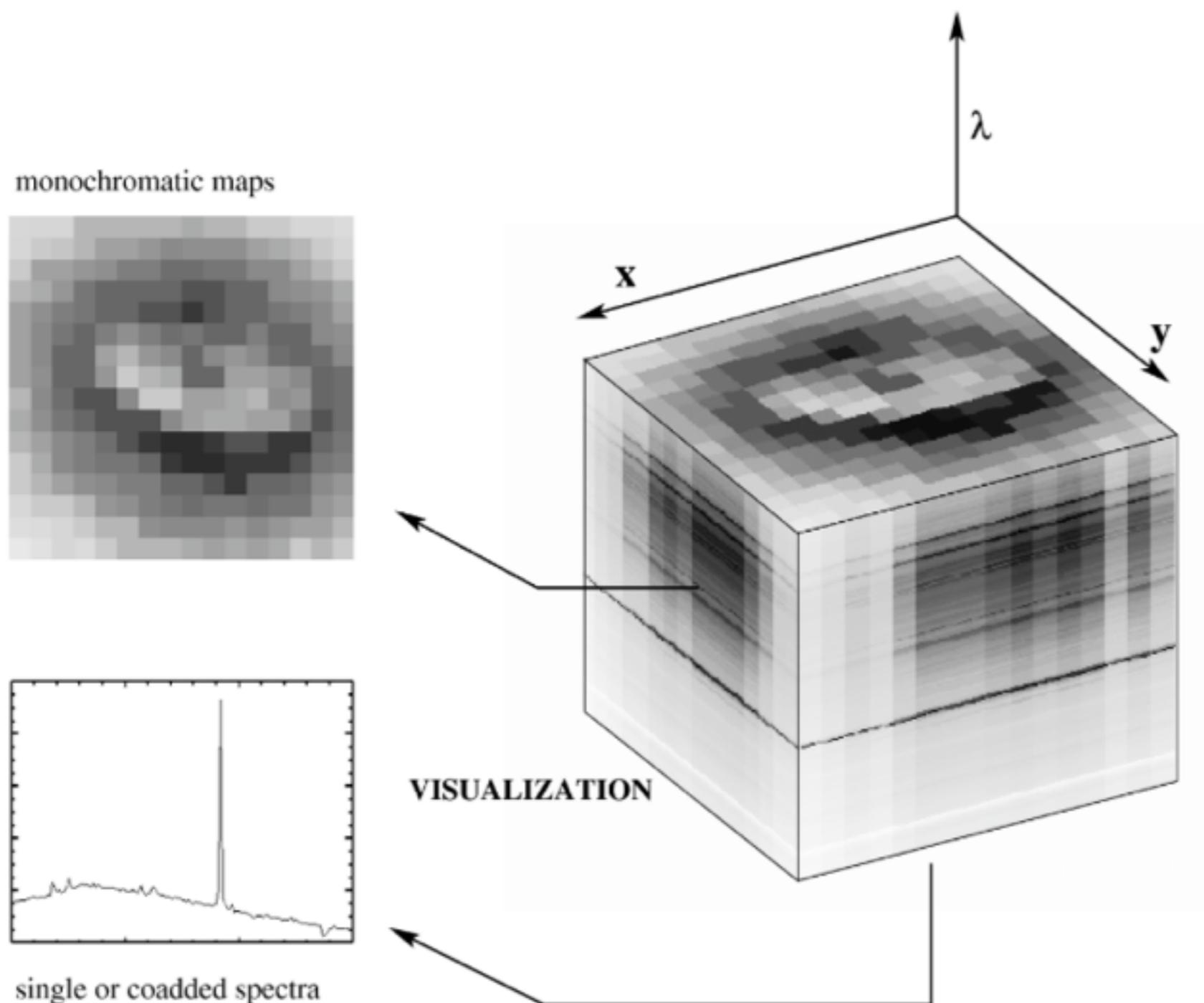
Resolução Espacial

- Imagine que você quer medir o brilho superficial $I(\mathbf{x})$ de uma galáxia, ou o fluxo F_λ 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

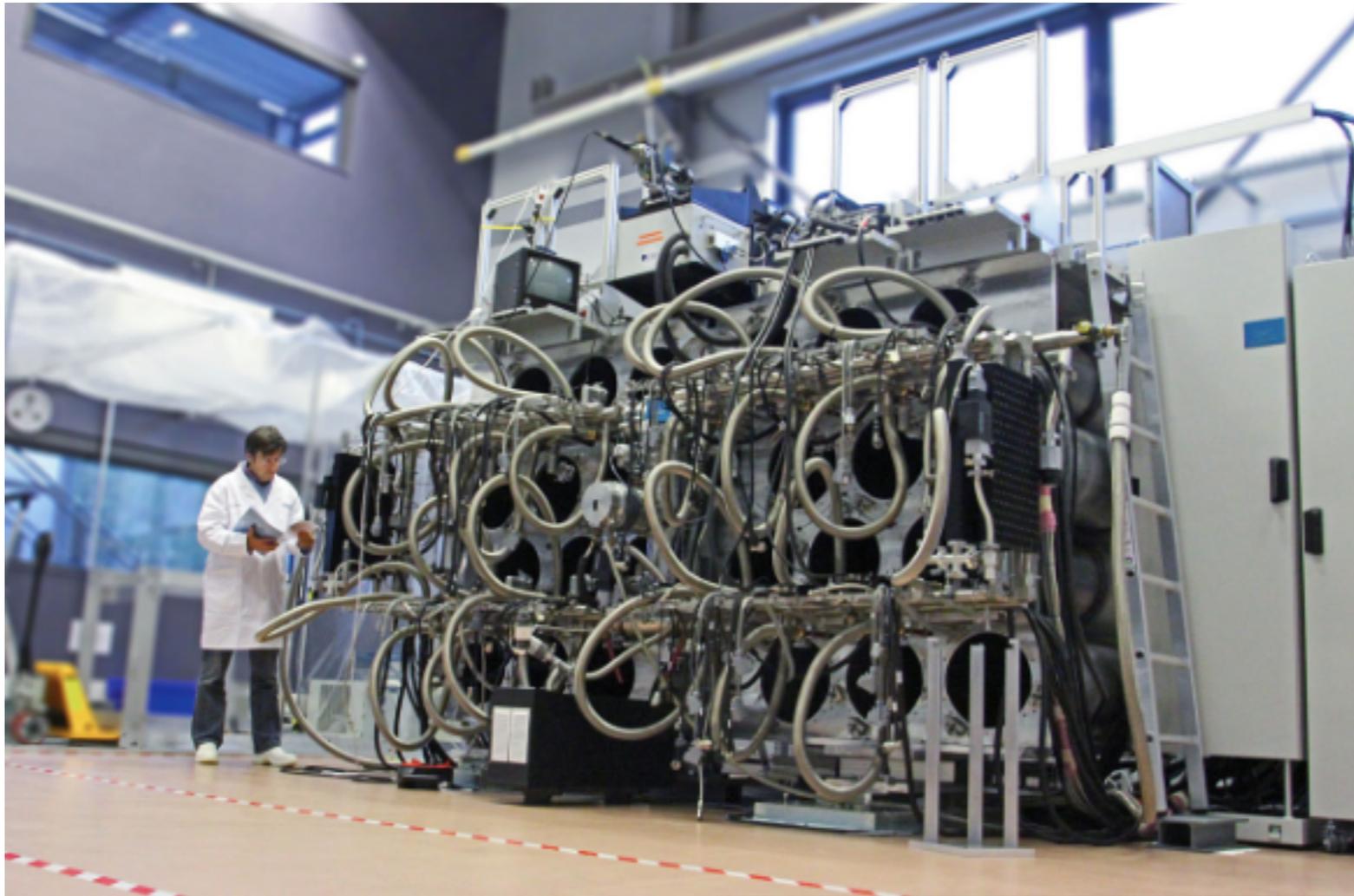


Integral field units

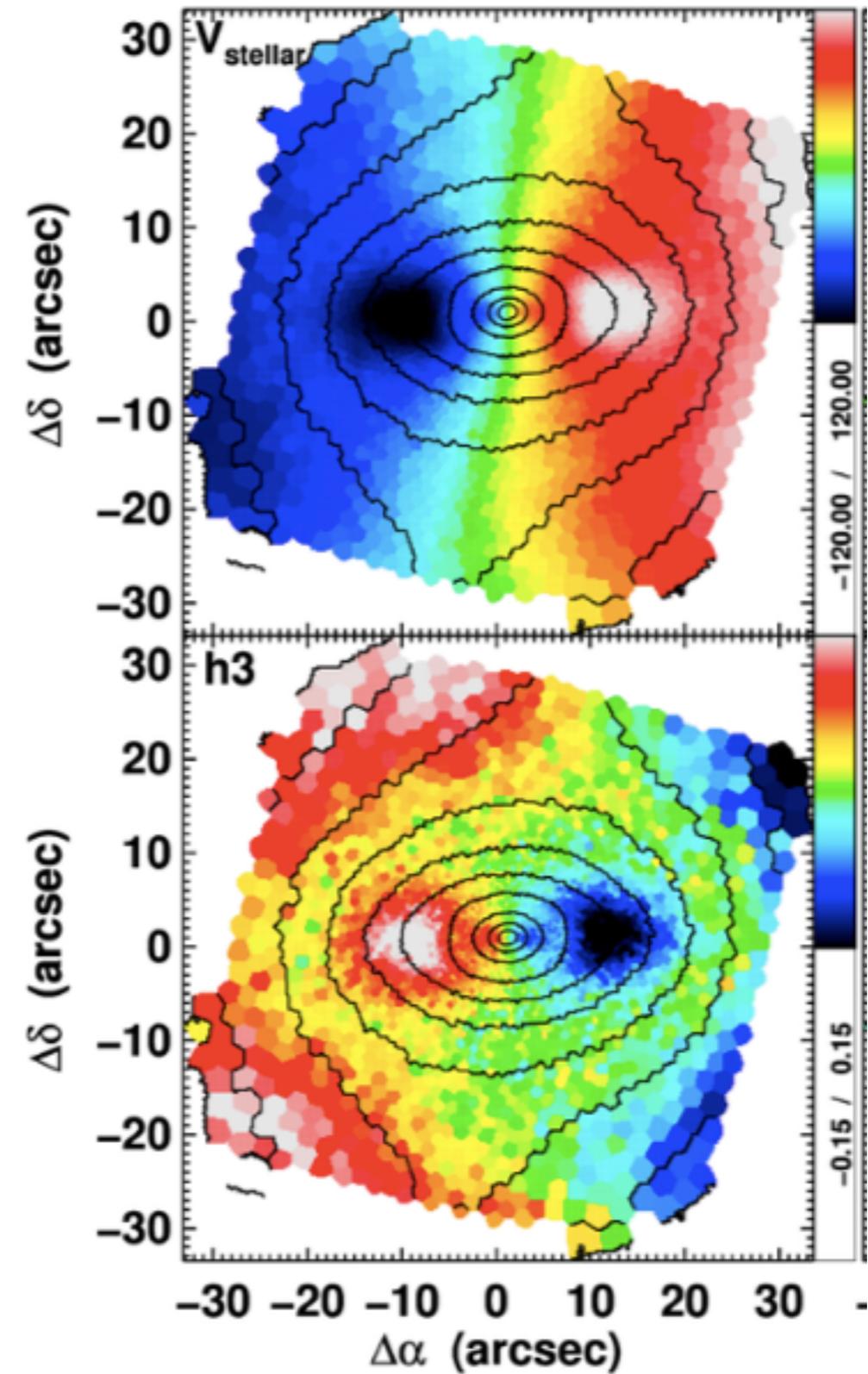


Three-dimensional dataset as the result from IFS (there are two spatial coordinates and one wavelength coordinate). The datacube can be visualized as a stack of quasi-monochromatic images, or, alternatively, as an assembly of $n \times m$ spectra.

MUSE - The Multi Unit Spectroscopic Explorer

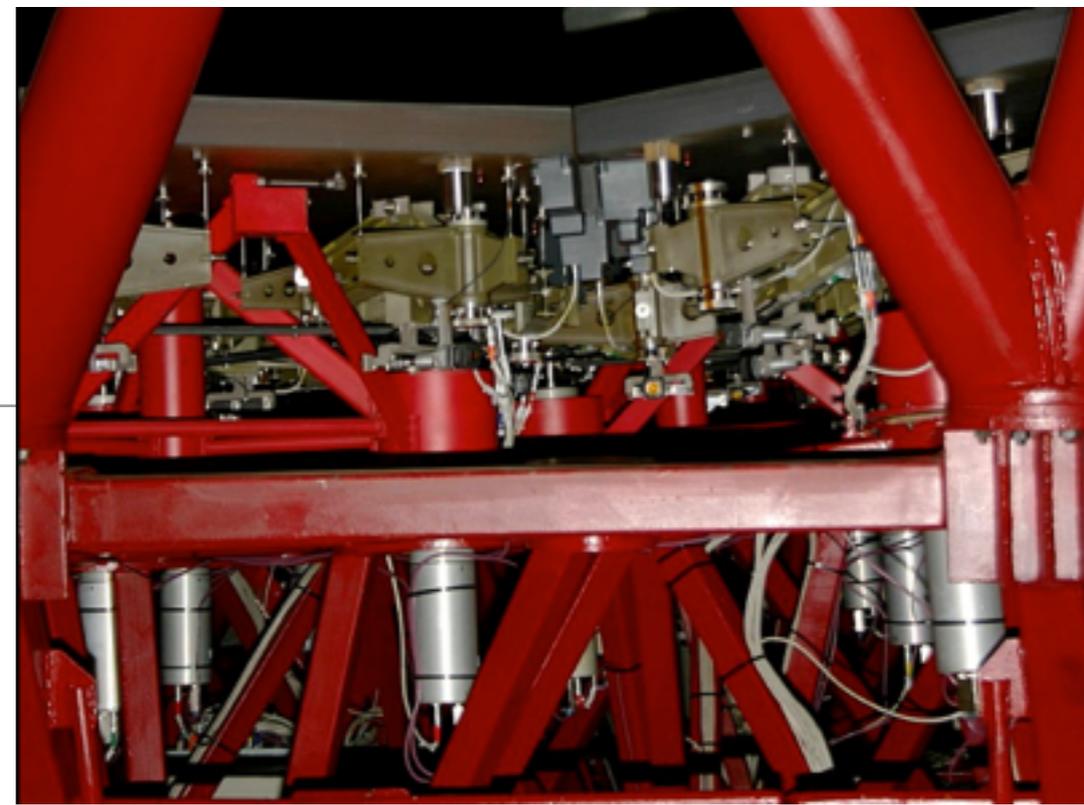


NGC4371

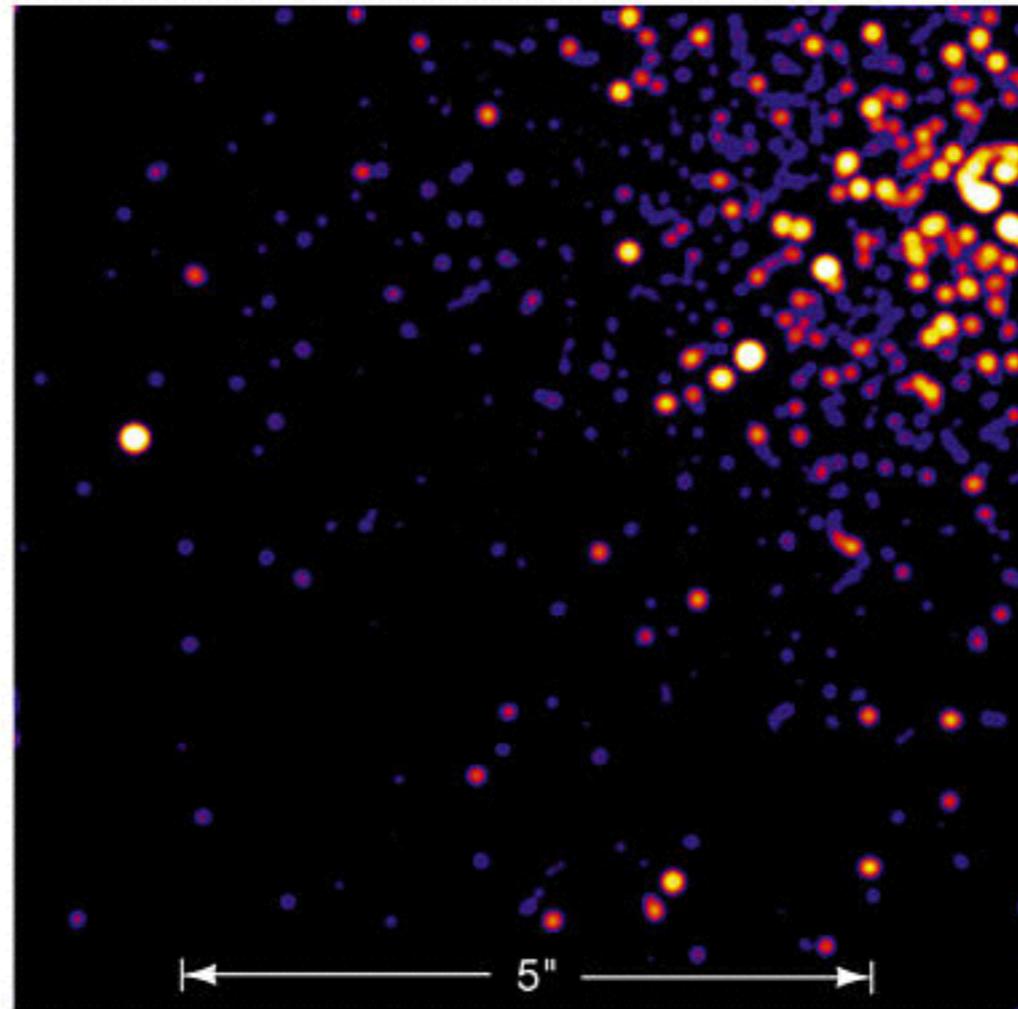
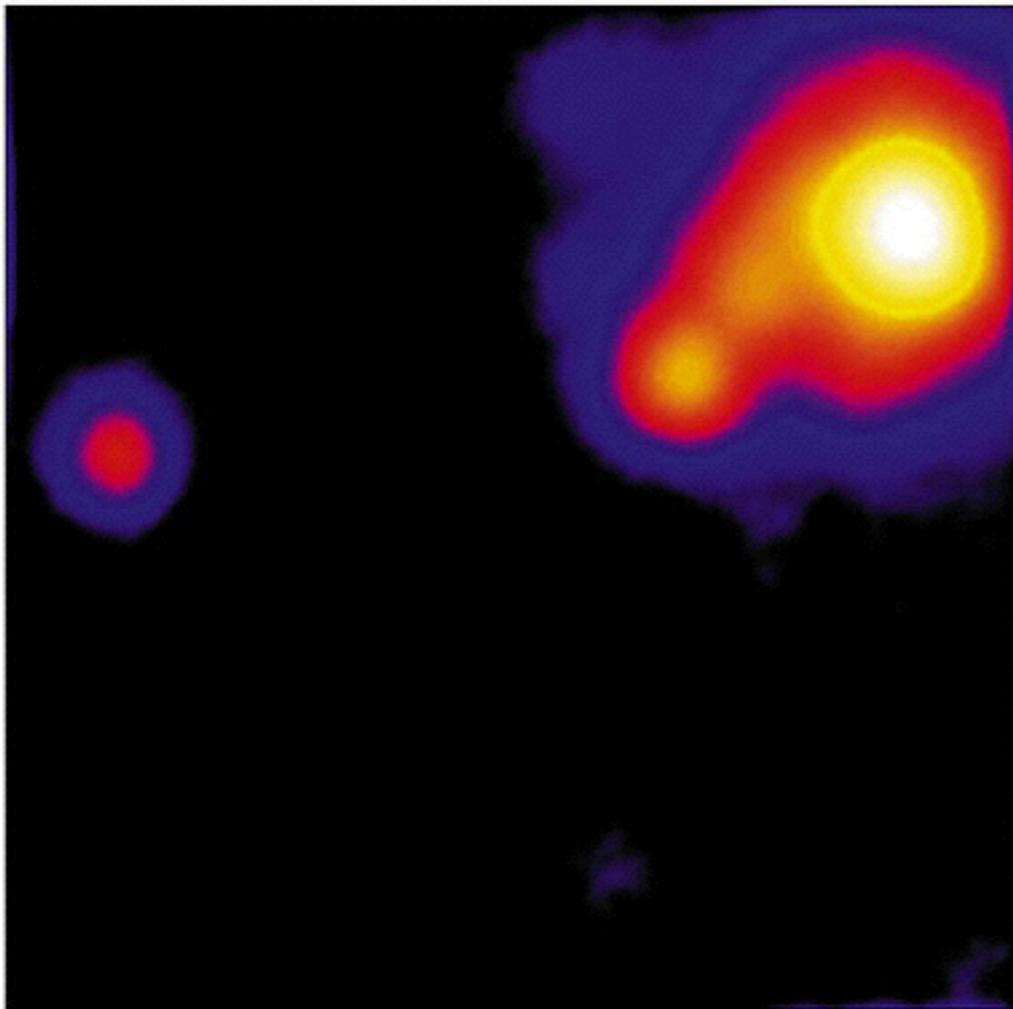


Ótica Ativa

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



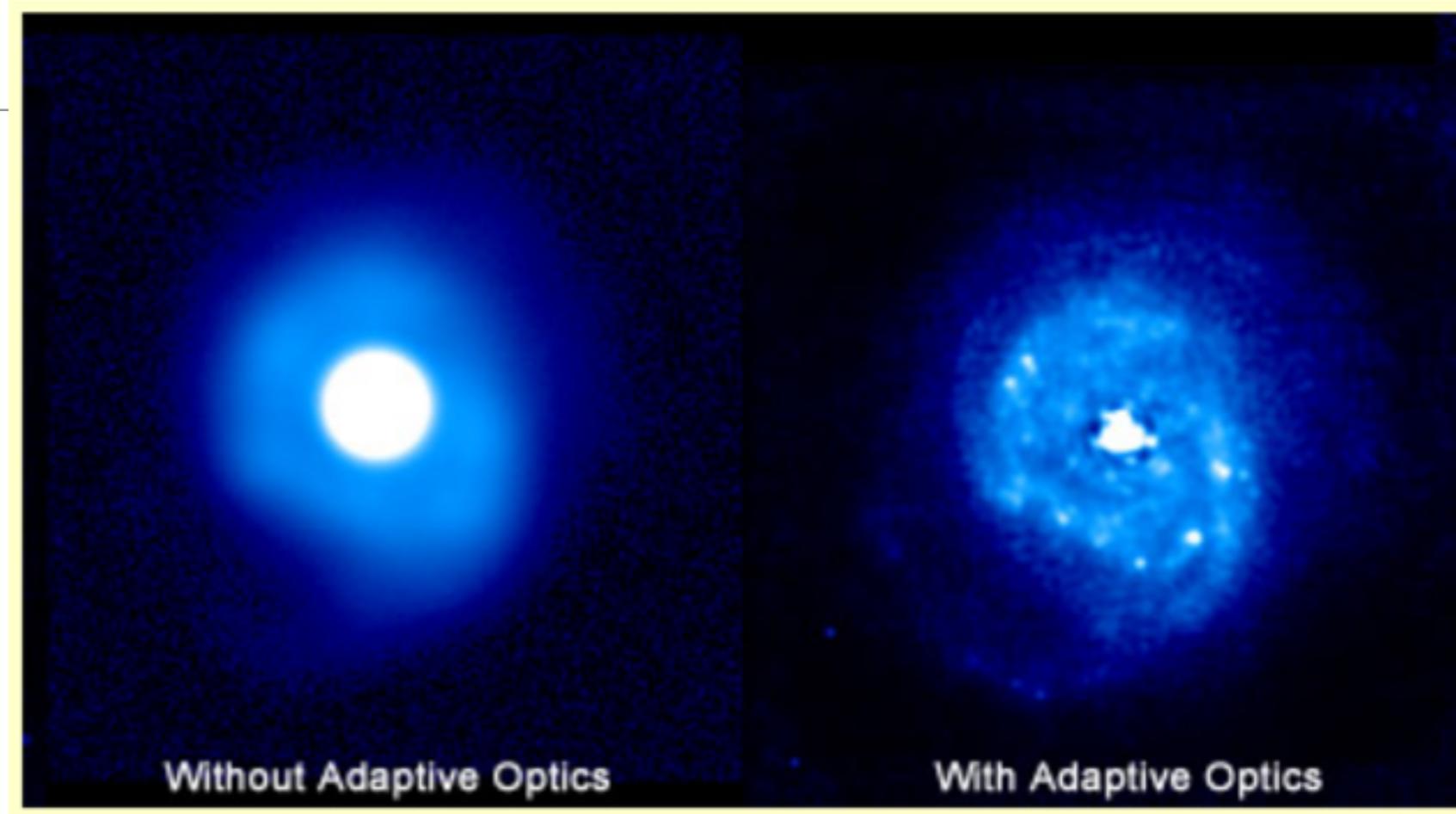
Atuadores no
Gran Telescopio
de Canárias



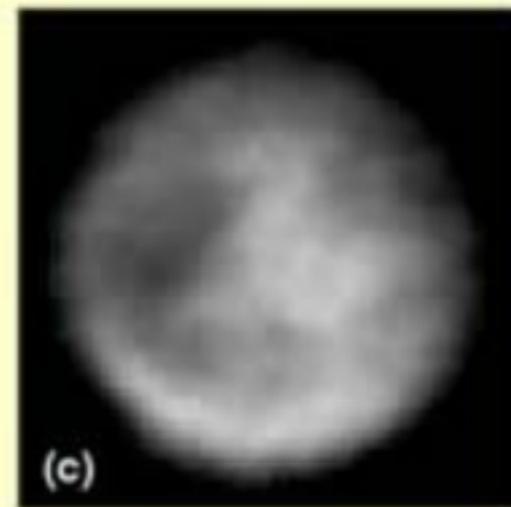
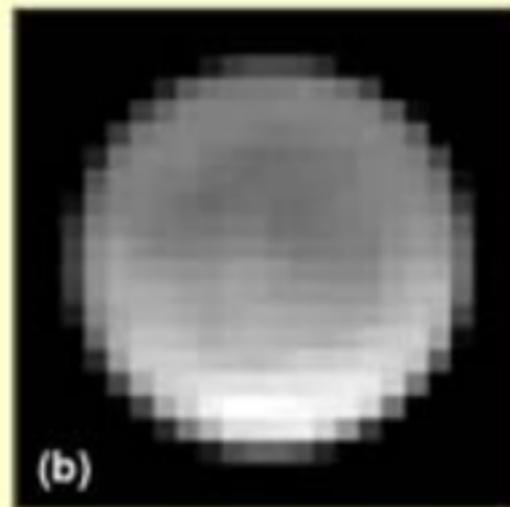
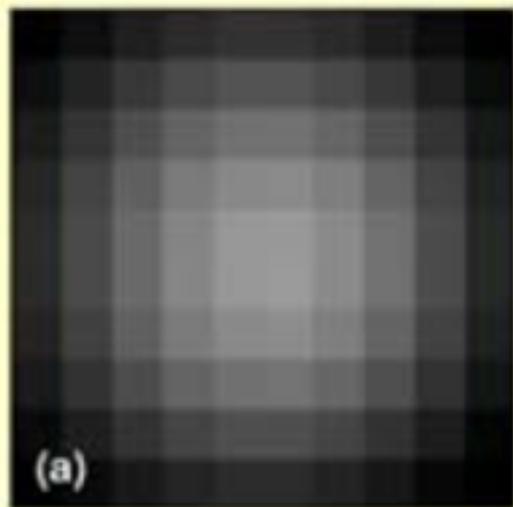
Aglomerado
Estelar R136

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

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

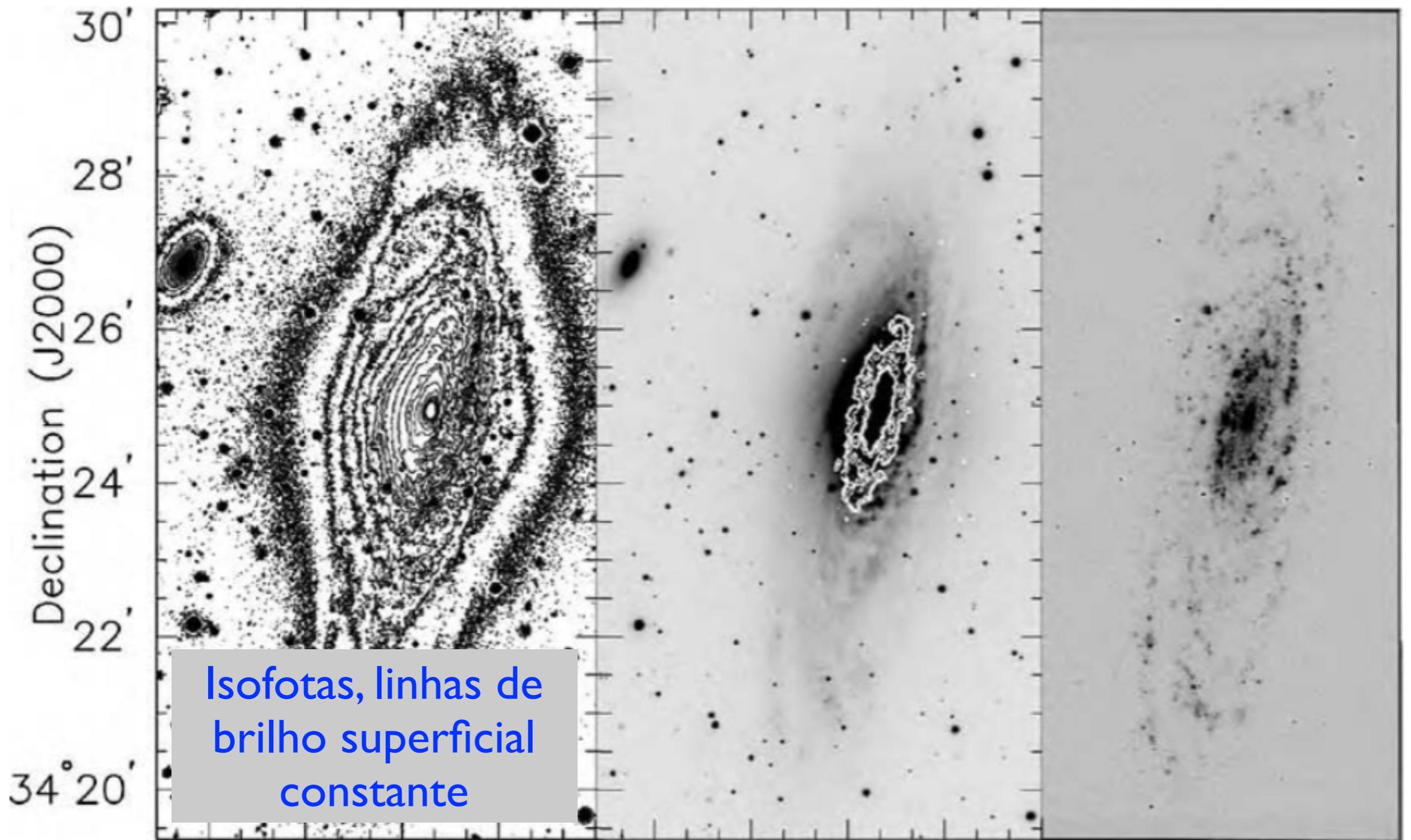


Fig. 5.3. Sb spiral galaxy NGC 7331. Left, isophotes in the R band; center, negative image in the R band, including a background galaxy, with contours of CO emission overlaid. Right, negative image in $H\alpha$, showing HII regions in the spiral arms – A. Ferguson, M. Thornley, and the BIMA survey of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

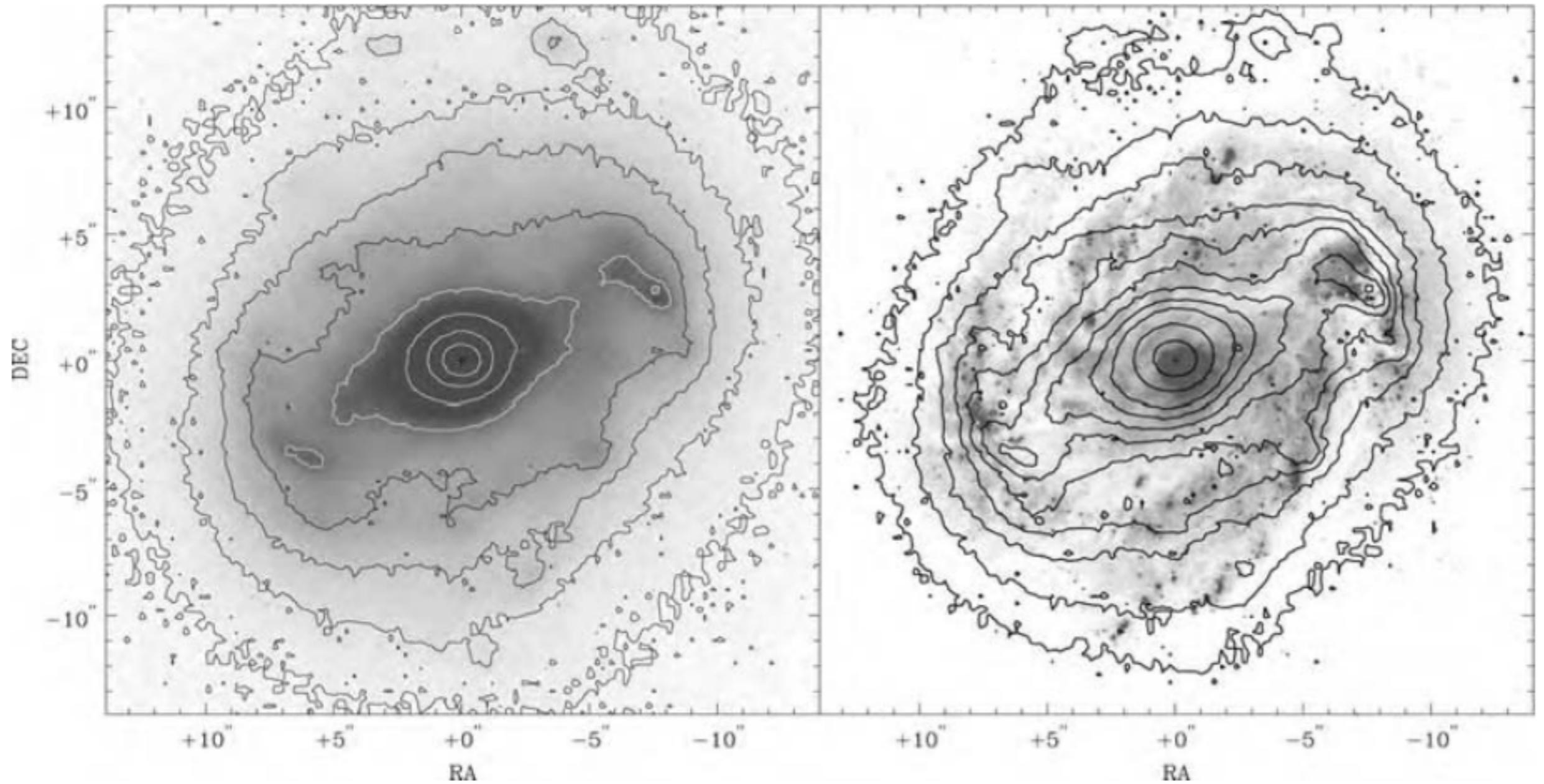


Fig. 5.9. A negative image of inner parts of Sbc galaxy M100 (NGC 4321): $26'' = 2$ kpc. Left, K -band image and isophotes at $2.2 \mu\text{m}$, showing a central bar. Right, $\text{H}\alpha$ (visible light) emission from gas around young massive stars, with K -band isophotes superposed; the bar is hidden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

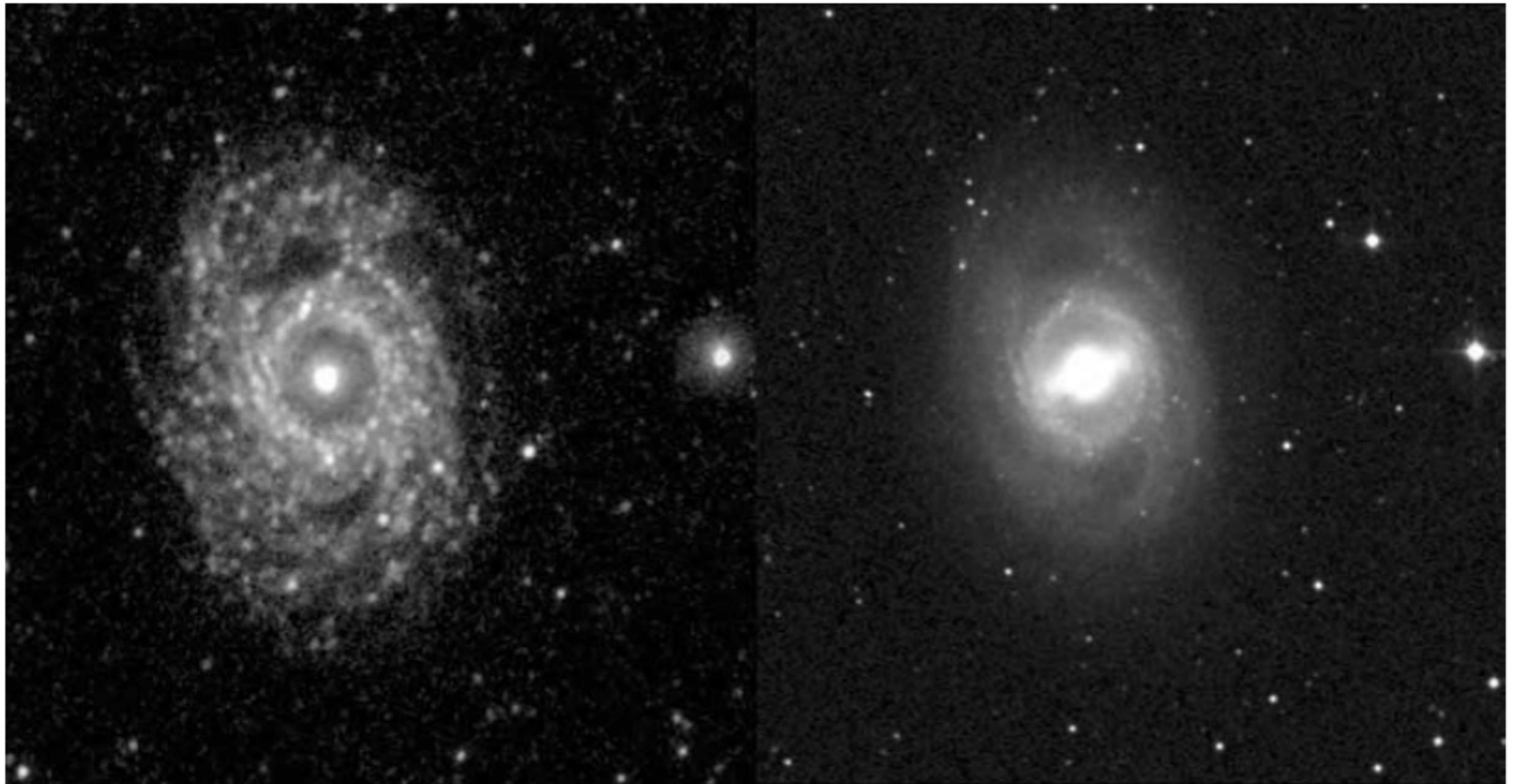


Fig. 5.10. SBb barred spiral galaxy NGC 3351 (M95). The left image combines ultraviolet light at 1530 \AA and 2300 \AA . We do not see the bar, since it lacks young blue stars; star-forming knots give the spiral arms a fragmented appearance. Right, in visible light we see a strong central bar, surrounded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

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

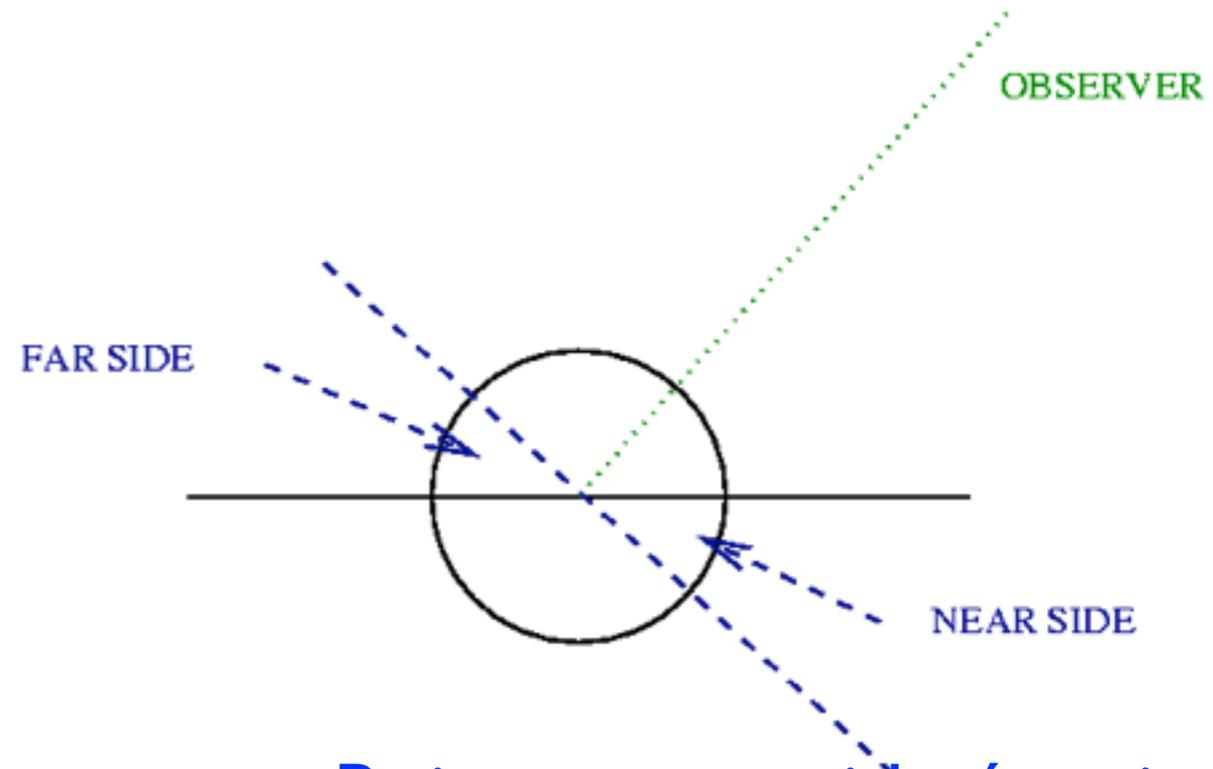


Face-on

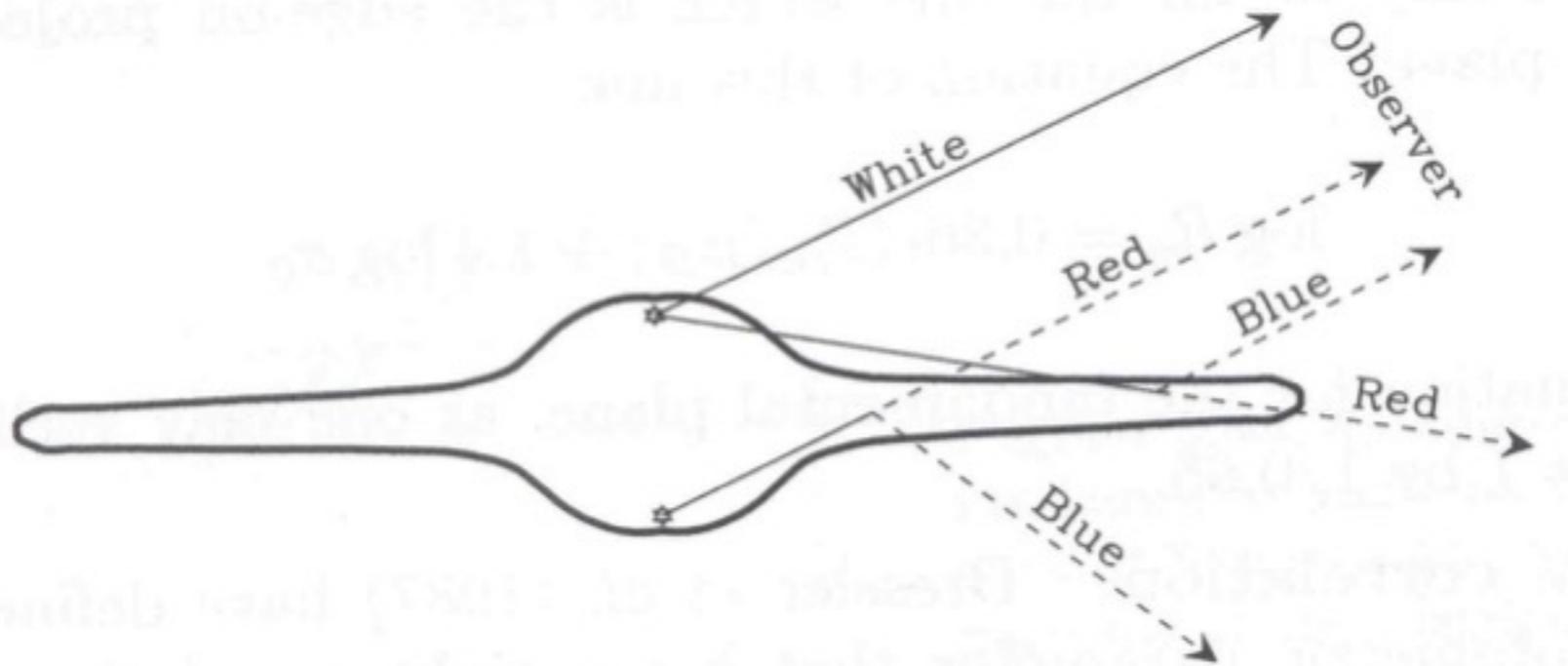


Os perfis de brilho superficial de galáxias disco pode ser complicado porque pode haver mais de uma componente (bojo, disco, barra, braços espirais, anéis...) e também por causa da poeira.

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} .

Fotometria de superfície em galáxias disco

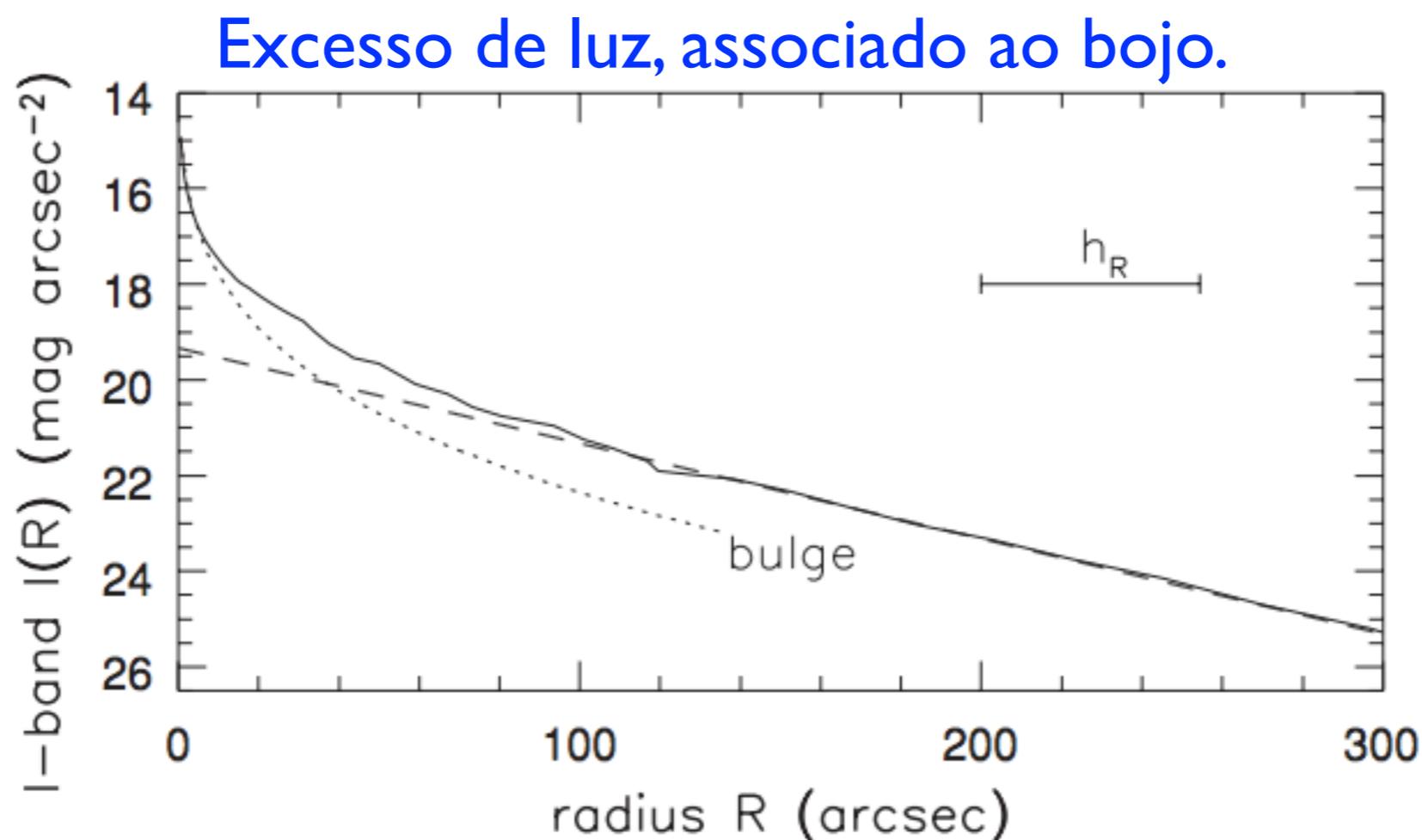


Fig. 5.4. NGC 7331: the solid line shows surface brightness in the I band, near 8000 Å. The dashed line is an exponential with $h_R = 55''$; the dotted line represents additional light – R. Peletier.

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 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.

Fotometria de galáxias disco

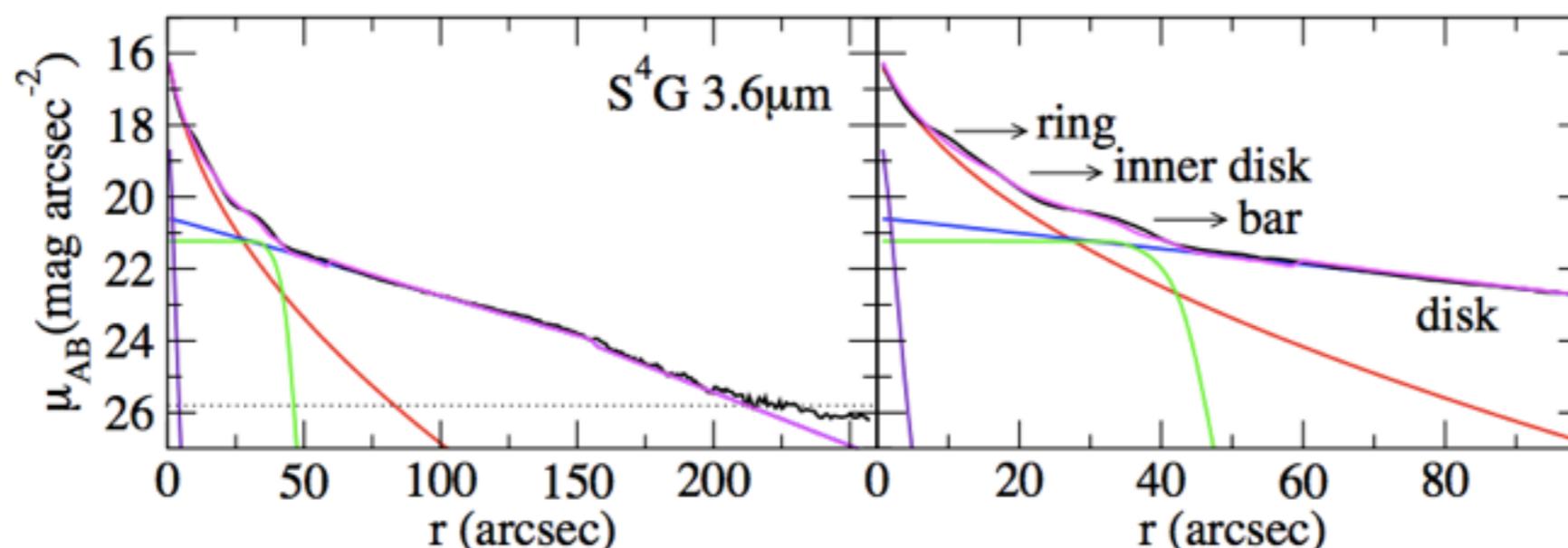


Fig. 2. Surface brightness radial profile of NCG 4371. The top panels show only the profile derived from ellipse fits to the S⁴G image. The bottom panels also show the profiles of the different model components obtained with BUDDA: bulge in red, disc in blue, bar in green, and central point source in 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

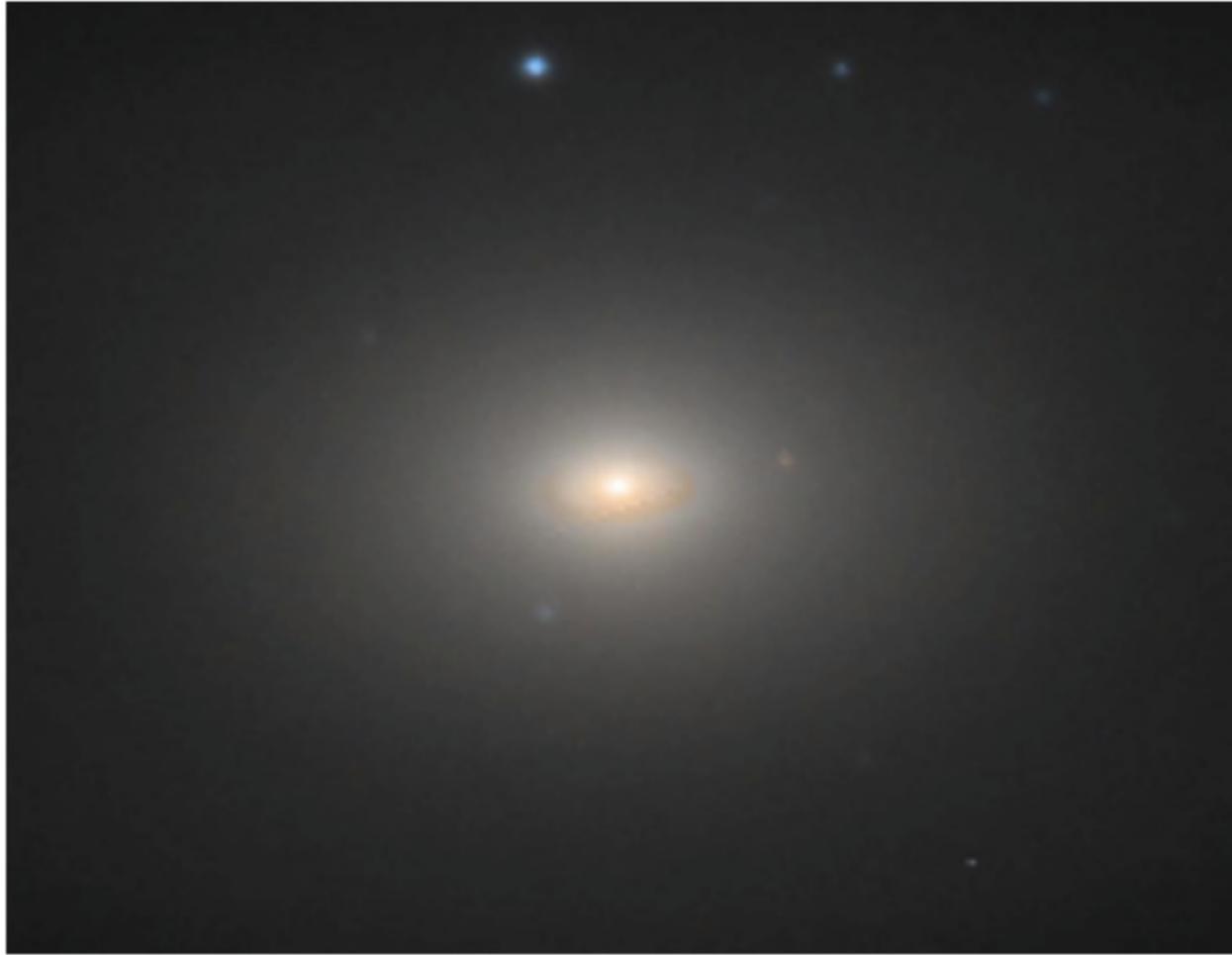
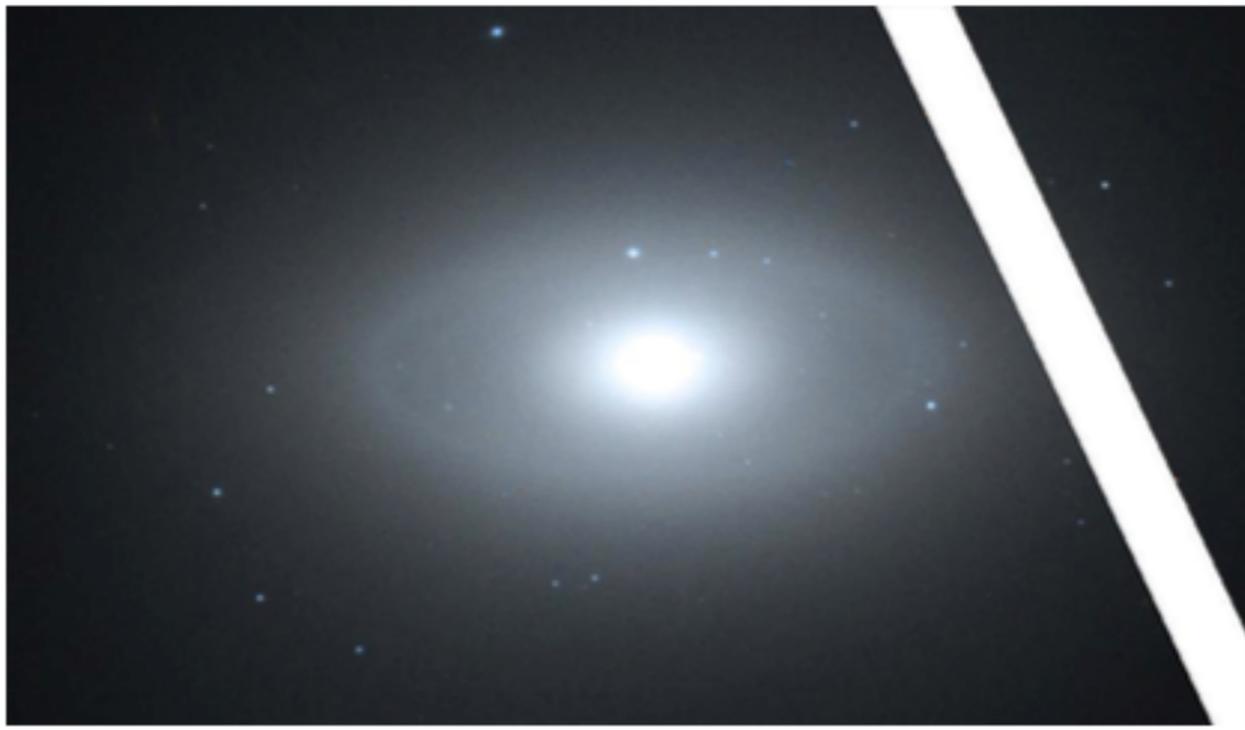


Fig. 6. Colour composites produced from HST images (F850LP and F475W) at the Hubble Legacy Archive website. Top: a clear view of the 10'' ring. Bottom: the very inner region of NGC 4371. The blue point source on the North is $\approx 4''$ from the centre. The bottom panel

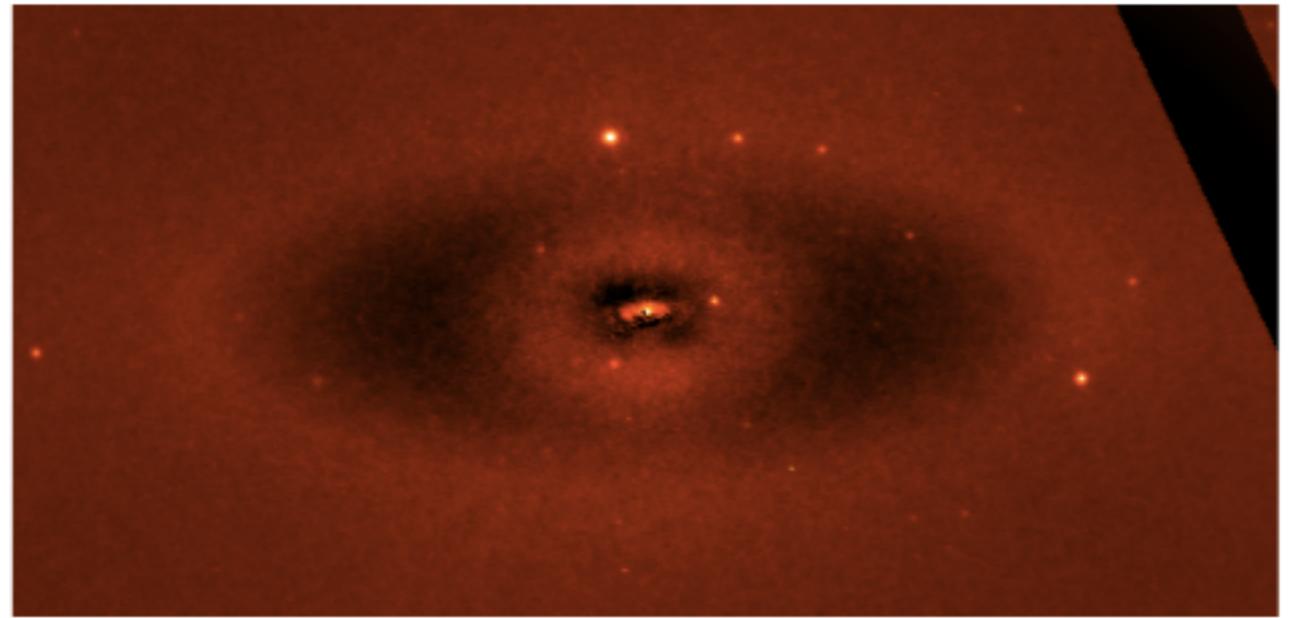
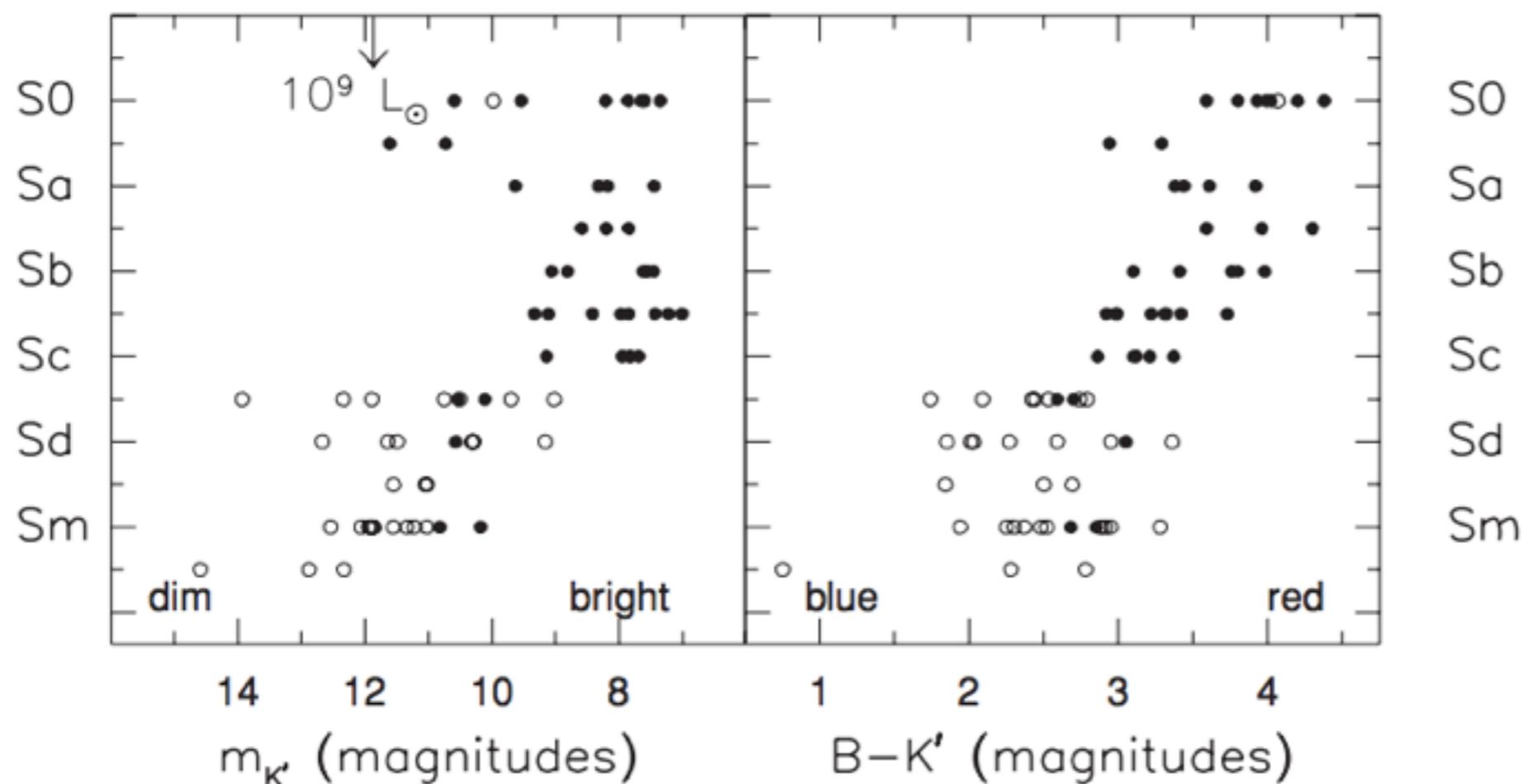


Fig. 8. Residual image after subtracting the GALFIT model from the F850LP image of NGC 4371. The display stretch is such that even small fluctuations appear conspicuously.

Relação entre magnitude, cor e morfologia

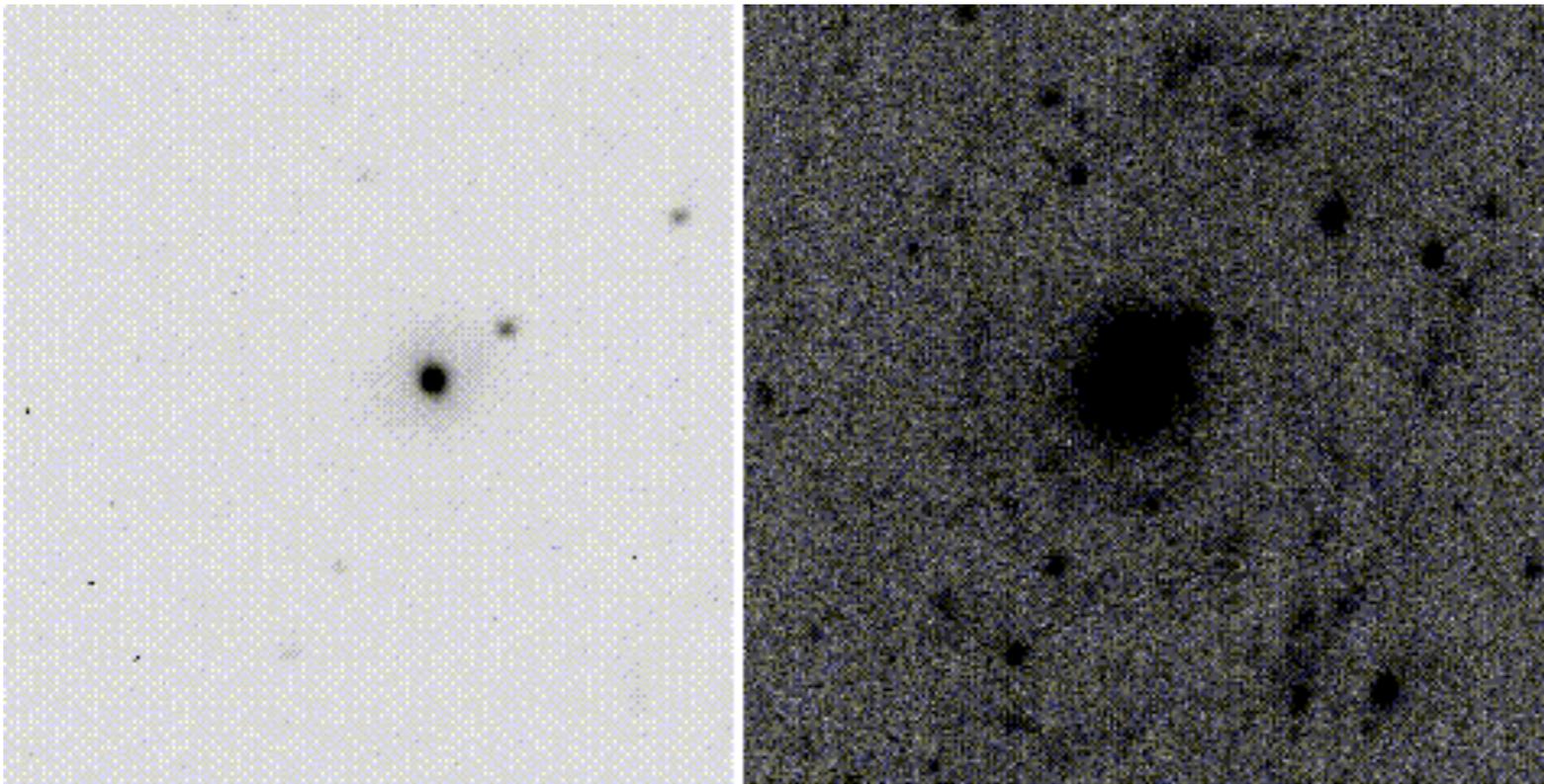


Em geral, as galáxias são mais azuis e mais fracas conforme a sequência S0 para Sd e Sm

Obs. de galáxias no grupo Ursa Maior, a cerca de 15Mpc de nós

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.

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

Observando o gás

Gás

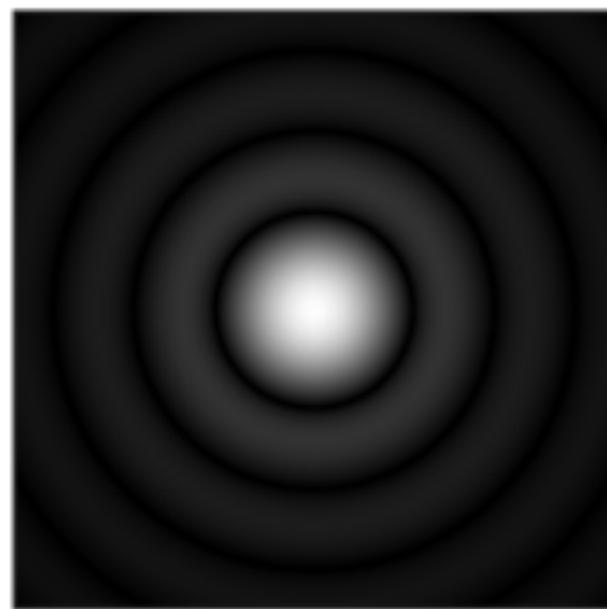
- A maior parte do gás é encontrada no disco (gás atômico neutro HI e gás molecular H₂)
- Podemos “ver” indiretamente o gás no visível procurando pelas nuvens escuras
- Gás frio pode ser visto diretamente pela emissão de linhas em rádio, que propagam livremente sem ser afetado pelo gás e poeira do disco.
- Se o gás estiver ionizado, por estrelas quentes ou ondas de choque, pode ser visto como linhas de emissão no UV
- Como podemos observar o gás pelas linhas espectrais, podemos também medir sua velocidade e usar essa medida em diversas posições da galáxia



Observações em Rádio

- Tipicamente $\lambda > 1\text{mm}$, imagens mais difusas do que em telescópios ópticos
- Observando em λ com um telescópio de diâmetro D , fontes que estão dentro de um ângulo λ/D serão observadas como se fossem apenas uma => limite de difração

Disco de Airy: luz atravessando um obturador circular produz uma imagem com o padrão de difração da luz.



Simulação em computador

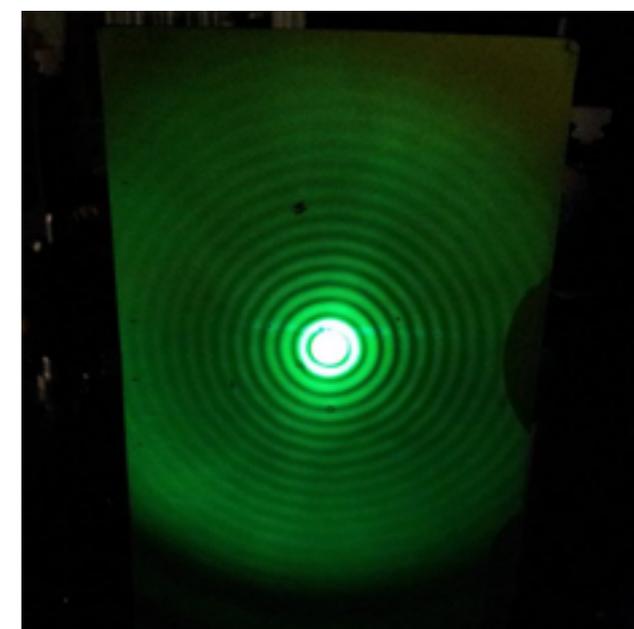
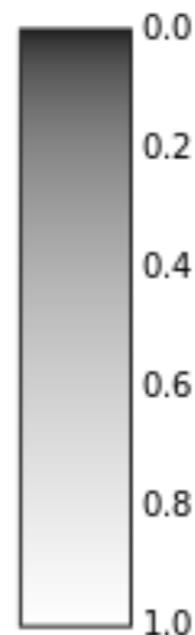


Imagem real produzida por um feixe de laser

Limite de difração λ/D

- images com 1" de resolução podem ser obtidas com um telescópio pequeno de $D = 10\text{cm}$
- em $\lambda = 1\text{mm}$, seria necessário um telescópio de 200m pra atingir a mesma resolução
- $\lambda = 20\text{cm}$, precisaria de um telescópio de 40 km :)



Rádio-telescópio de Arecibo, Puerto Rico. $D = 305\text{m}$
Como o prato não pode se mover, o telescópio "aponta" para diferentes pontos no céu movendo a antena (domo) ao longo dos cabos metálicos.

Síntese de abertura

- Um tipo de interferometria em que medidas de diferentes telescópios são combinadas para produzir imagens com mesma resolução angular do que um instrumento único que tem o tamanho da coleção inteira de detetores (mas sem ter a mesma área coletora).

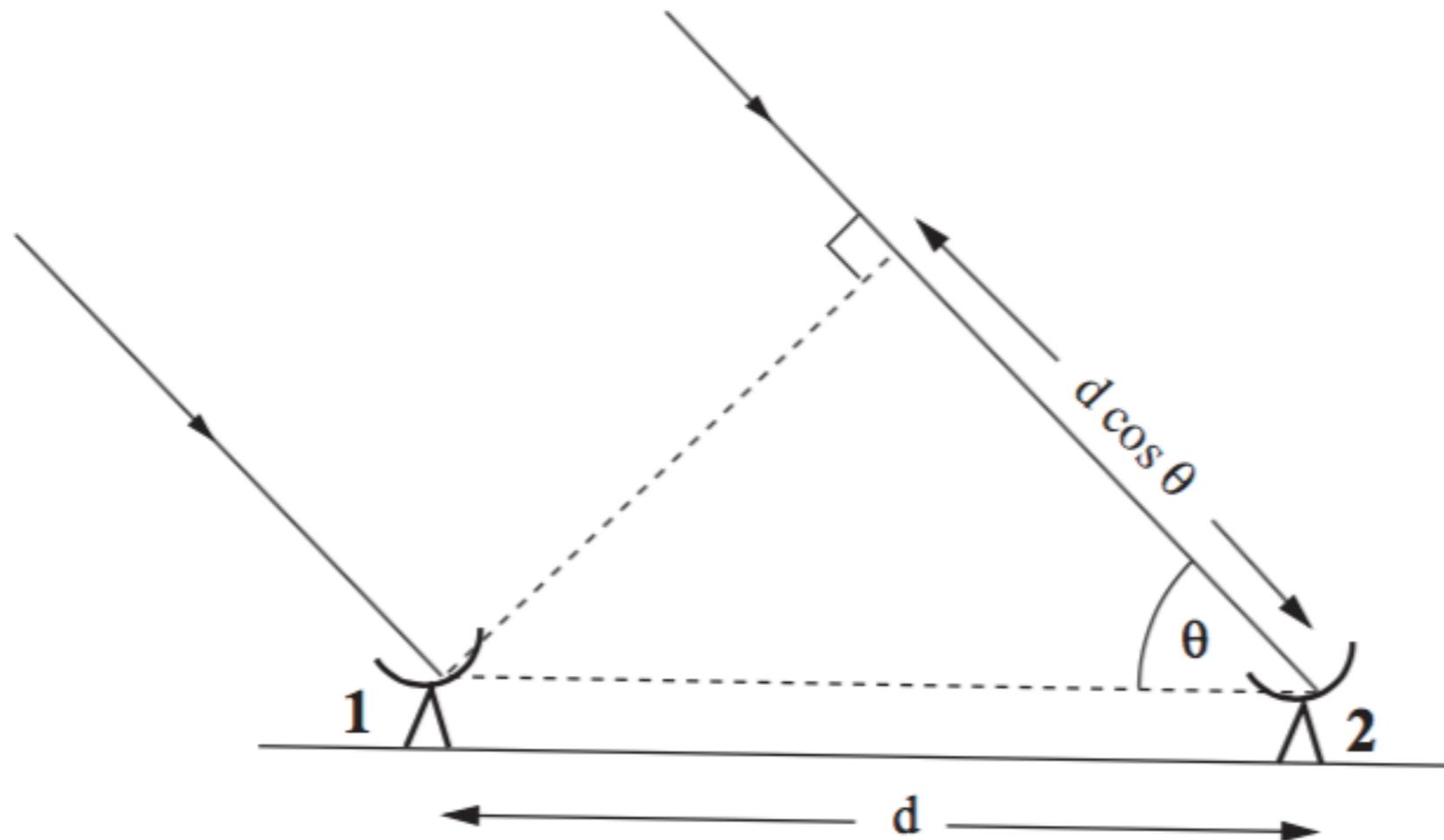


Fig. 5.11. A two-element interferometer.

A voltagem medida por cada telescópio é proporcional ao campo elétrico:

$$E \propto \cos(2\pi ct/\lambda)$$

Ondas vindas de uma elevação θ percorrem uma distância extra $d \cos \theta$ pra chegar ao telescópio 2, e as cristas de onda chegam com um atraso de $d \cos \theta / c$

As duas voltagens medidas são:

$$V_1 \propto \cos\left(\frac{2\pi ct}{\lambda}\right)$$

$$V_2 \propto \cos\left(\frac{2\pi(ct - d \cos \theta)}{\lambda}\right)$$

Os sinais são tratados e correlacionados e resultam em um padrão de interferência

$$S \propto \cos(2\pi d \cos \theta / \lambda)$$

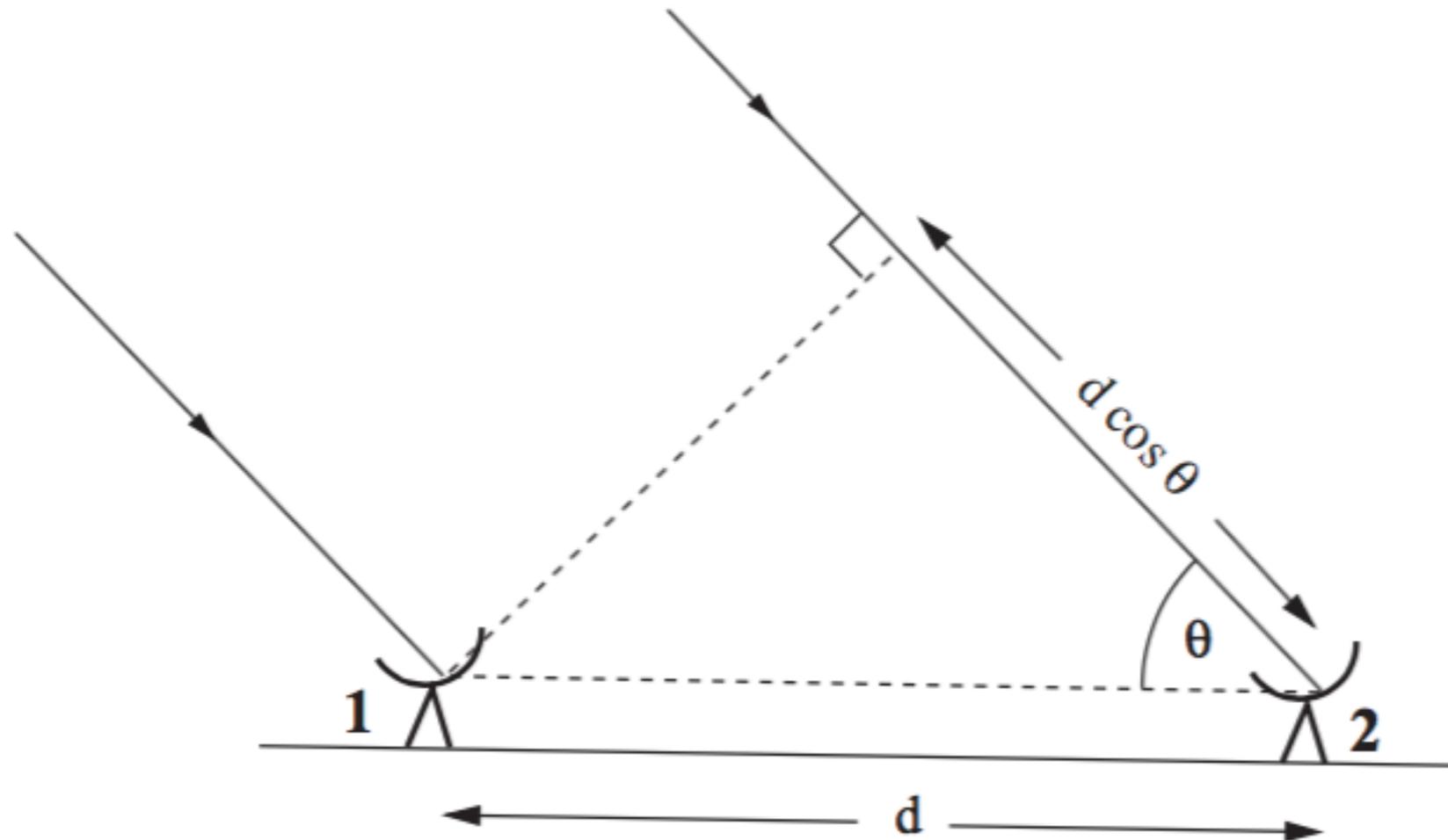


Fig. 5.11. A two-element interferometer.

Duas fontes no céu produzirão imagens de interferência totalmente diferentes se a elevação $\cos \theta$ diferem por $\lambda/(2d)$

Este interferômetro simples pode distinguir fontes separadas por um angulo

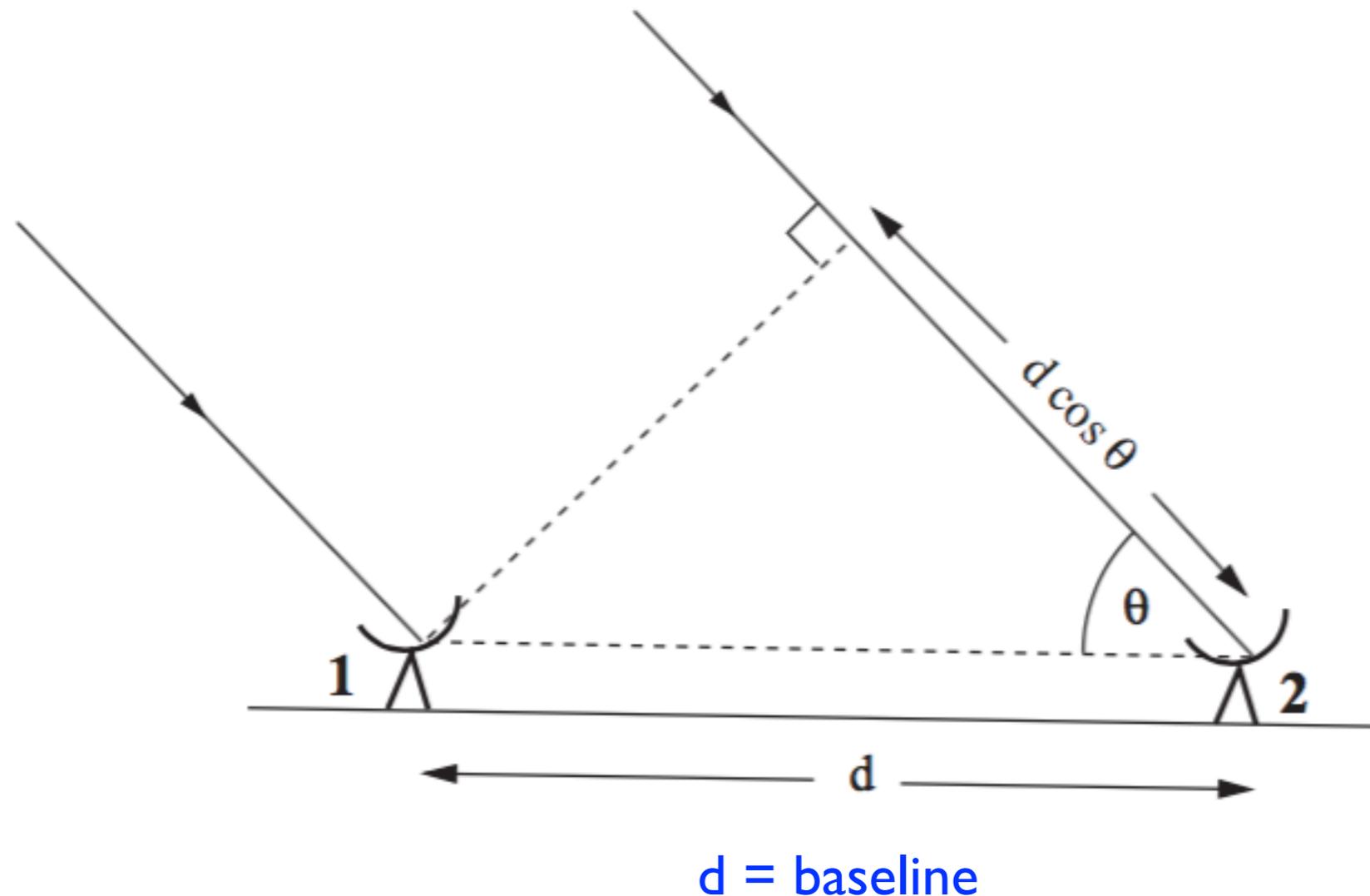
$$\lambda/(d \sin \theta)$$

e tem uma resolução espacial equivalente a um único prato de diâmetro

$$d \sin \theta$$

Os sinais são tratados e correlacionados e resultam em um padrão de interferência

$$S \propto \cos(2\pi d \cos \theta / \lambda)$$



Síntese baseada na rotação da Terra

- Se a fonte astronômica não for variável, não é necessário ter todos os telescópios em um único lugar, espera-se a rotação da Terra “varrer” uma área como se fosse único prato

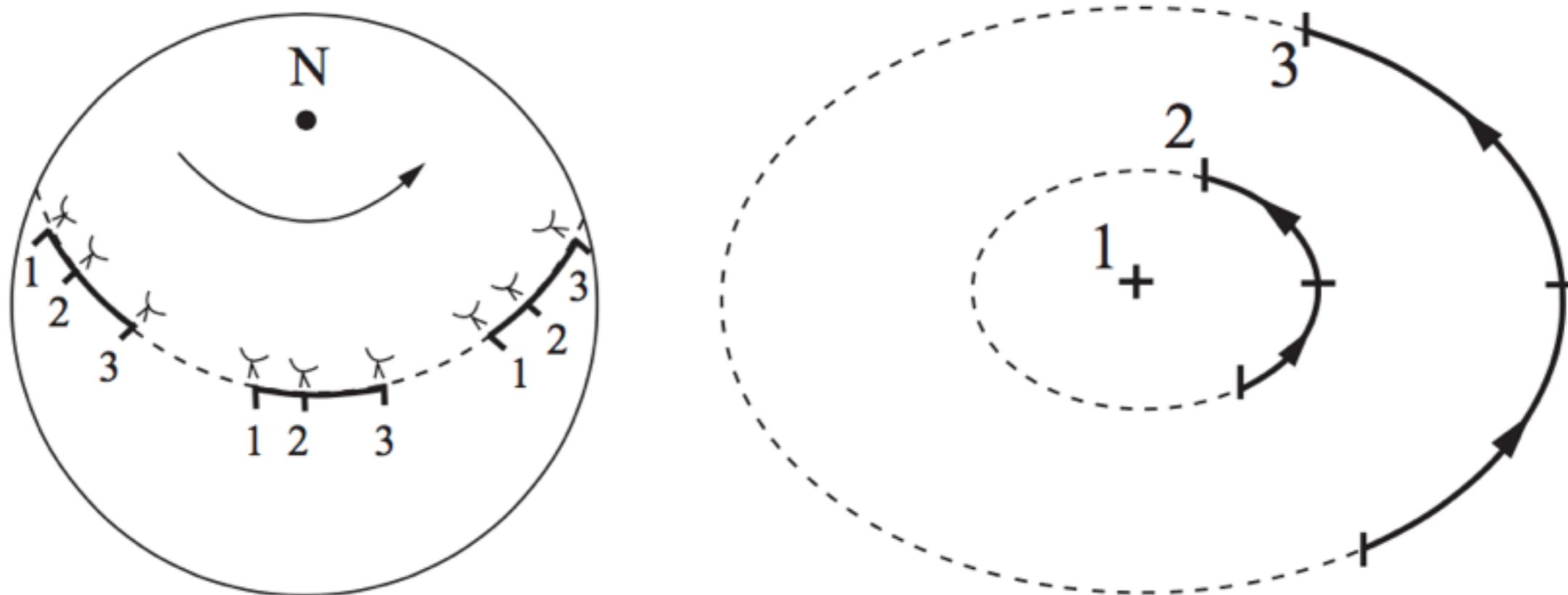


Fig. 5.12. Earth-rotation synthesis: during a day's observation, as seen from the source, the baseline vectors from dishes 2 and 3 to dish 1 sweep out an ellipse.

Síntese de abertura

- Para agilizar as observações, alguns observatórios de rádio colocam as antenas em uma disposição de Y, como o Very Large Array, New México. 4h de observação cobrem várias orientações de baselines

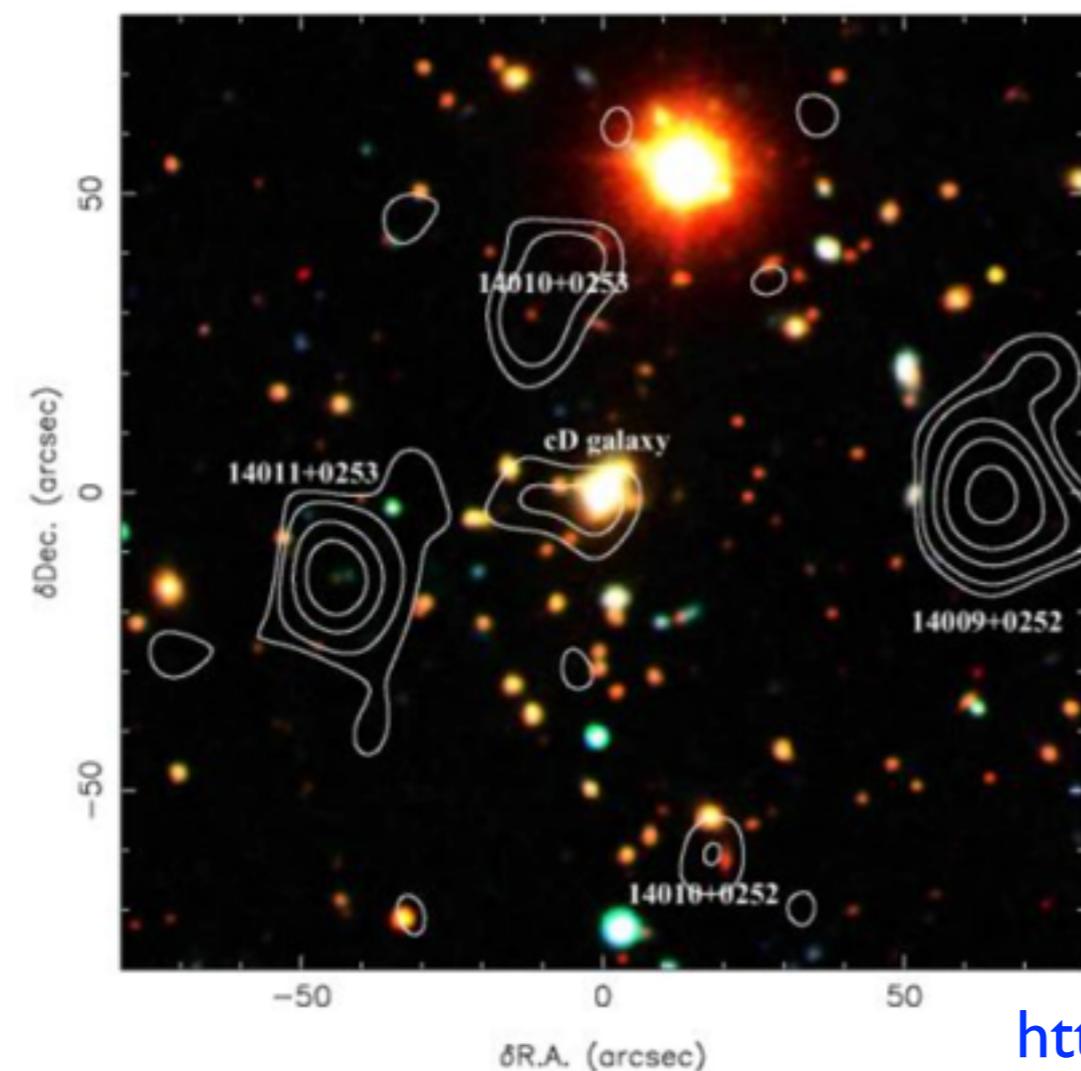
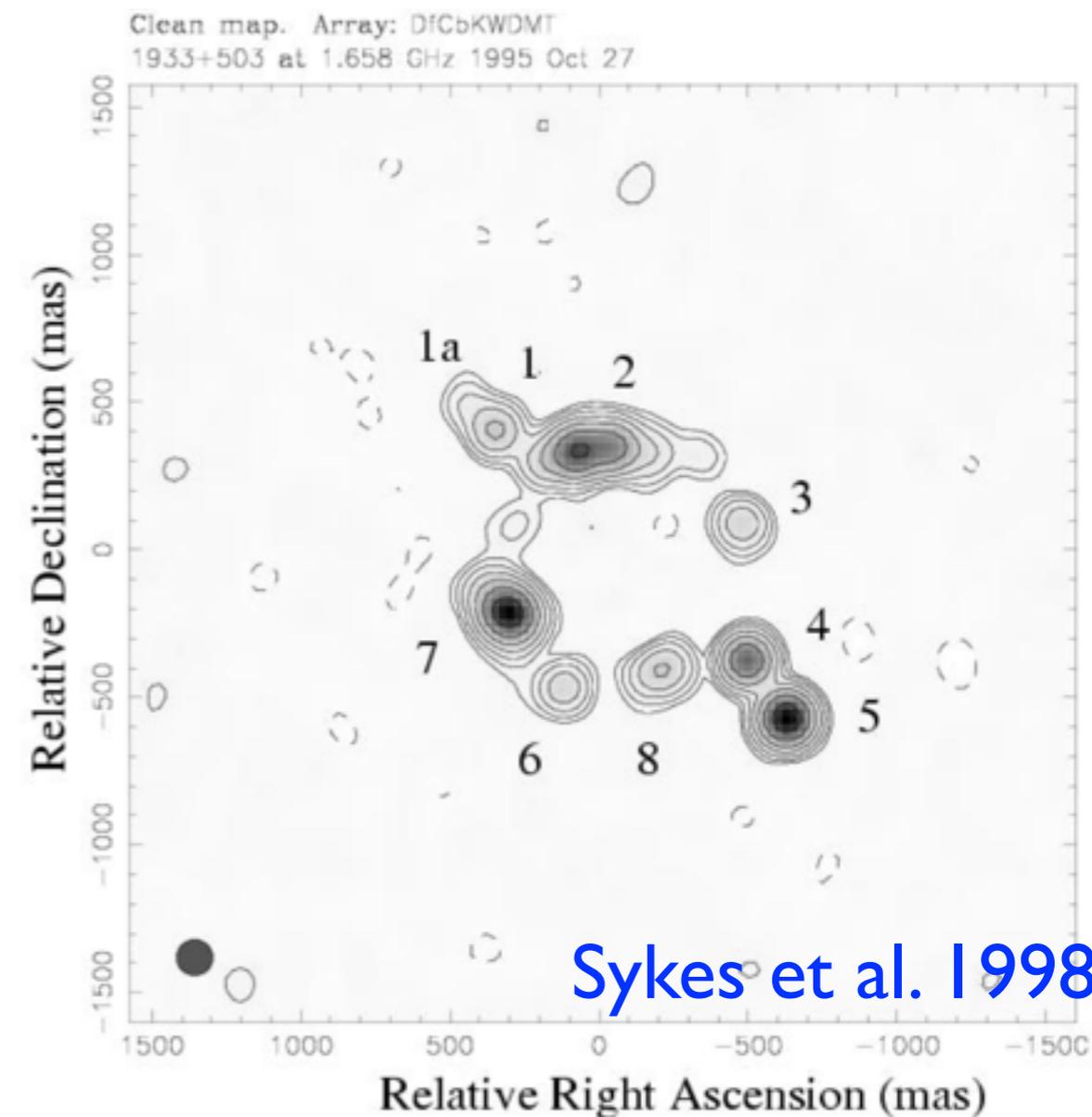


VLA
NRAO



Síntese de abertura

- Very Long Baseline Interferometry (VLBI), os telescópios combinados podem ser tão grandes quando a Terra, e obter imagens com resoluções de $0.001''$



- **várias** análises de Fourier são necessárias para transformar os sinais em mapas...

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830)

had crazy idea (1807):

***Any** periodic function
can be rewritten as a
weighted sum of sines
and cosines of different
frequencies.*

Don't believe it?

- Neither did Lagrange, Laplace, Poisson and other big wigs
- Not translated into English until 1878!

But it's true!

- called Fourier Series





Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

In search of our Cosmic Origins

ALMA -the largest astronomical project in existence- is a single telescope of revolutionary design, composed of 66 high precision antennas located on the Chajnantor plateau, 5000 meters altitude in northern Chile.



SKA TELESCOPE

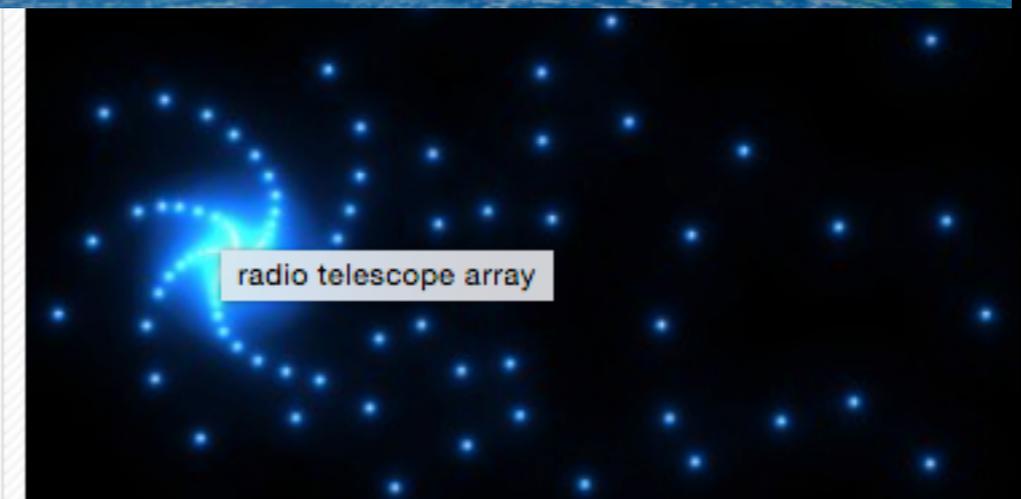
SQUARE KILOMETRE ARRAY

Exploring the Universe with the world's largest radio telescope

Choose your local minisite



Milhares (!!!!) de antenas, espalhadas na África do Sul e Austrália. Área total maior do que 1km². Quando em operação total, mais que 1 Exabyte de dados serão produzidos por dia.



The antennas of the SKA will extend across a continent.

Credit : SKA Organisation

Gás e matéria escura em galáxias disco

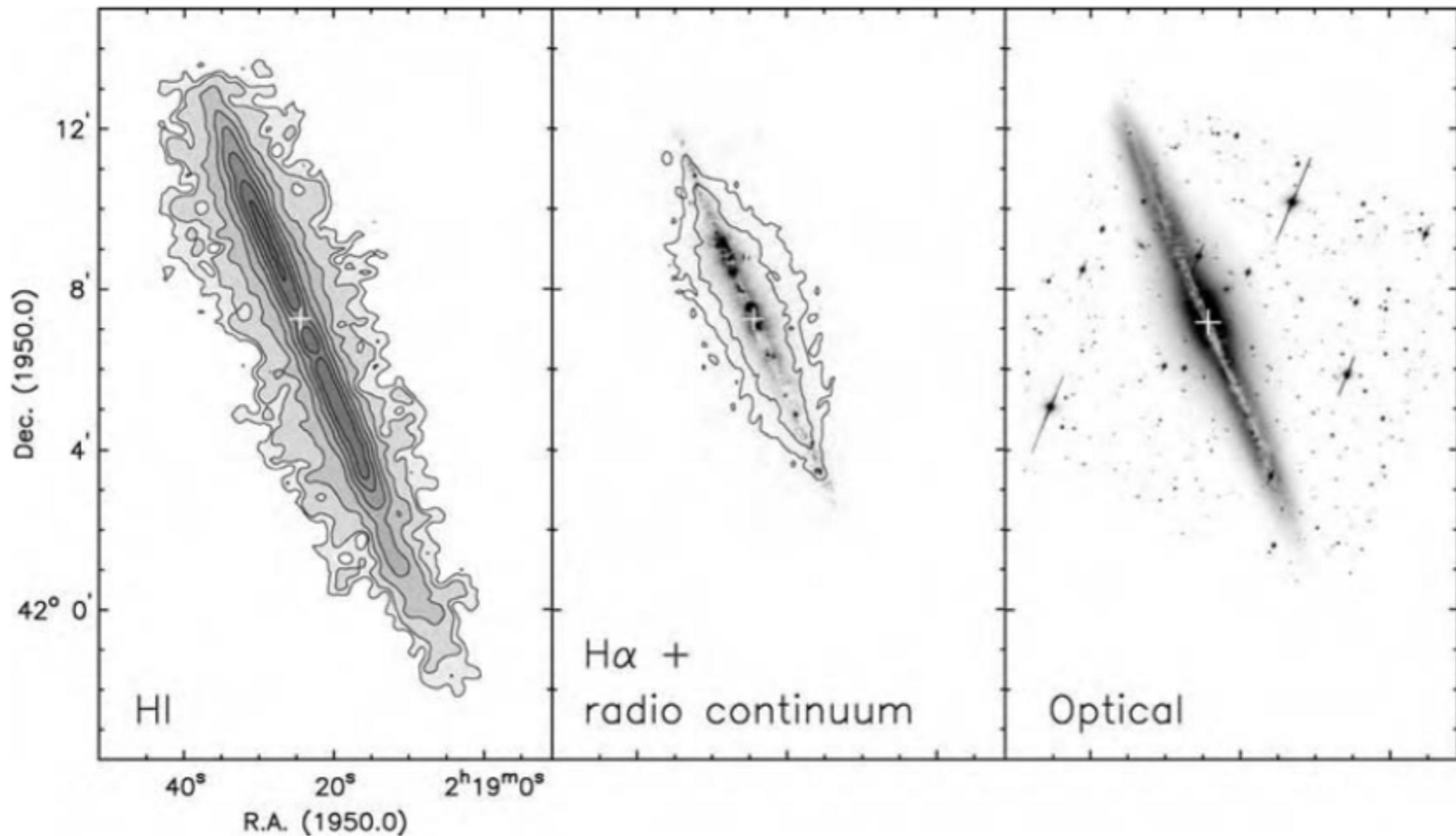


Fig. 5.16. Stars and interstellar gas in the edge-on Sc galaxy NGC 891: the cross marks the galaxy center. Left, surface density of HI gas; center, an image in H α , with contours showing radio emission in the 20 cm continuum; right, *R*-band optical image; sloping lines through bright stars show where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

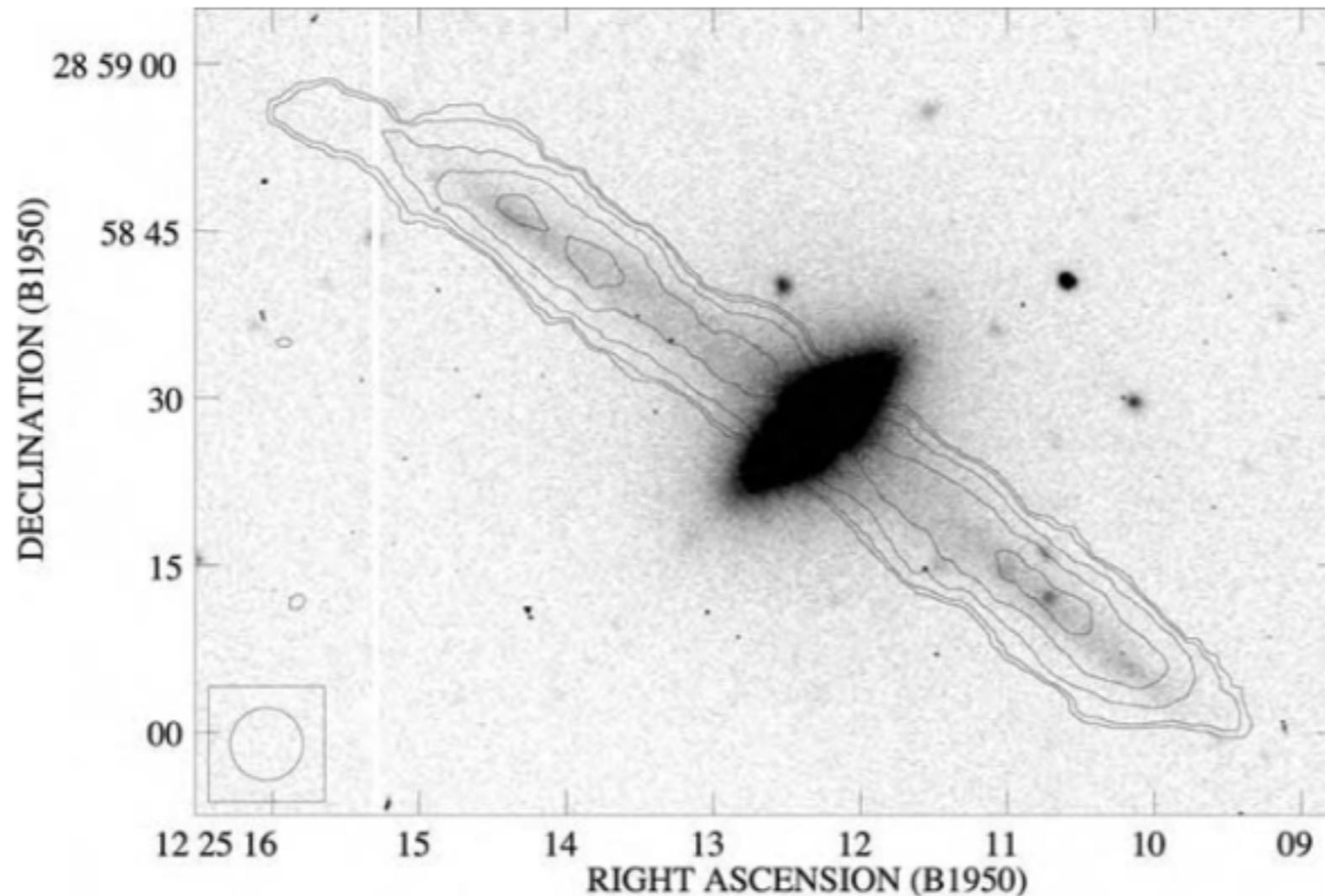


Fig. 5.17. A negative image of the S0 galaxy UGC 7576 in the V band: a thin ring of dust, gas, and stars orbits over the galaxy's pole. Contours show $5 \times 10^9 \mathcal{M}_{\odot}$ of HI gas in the polar ring; the disk of the S0 galaxy has hardly any cool gas. The circle on the left shows the radio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

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

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_{ν} in janskys, and V_r in 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

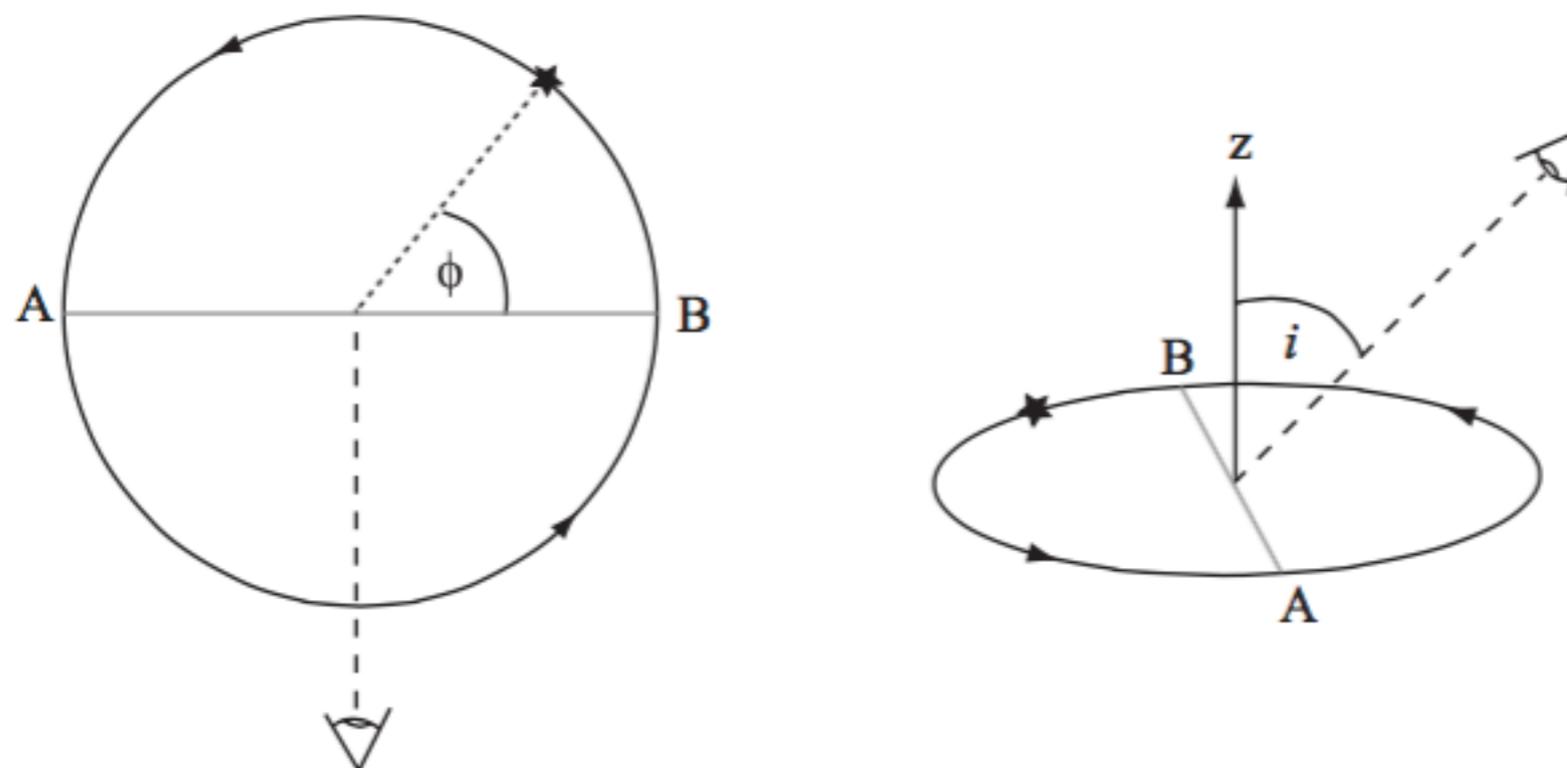


Fig. 5.18. Left, a rotating disk viewed from above. Azimuth ϕ , measured in the disk plane, gives a star's position in its orbit; an observer looks from above the disk, perpendicular to diameter AB. Right, the observer's line of sight makes angle i with the disk's rotation axis z .

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

Velocidade sistêmica, V_r no centro da galáxia

Movimentos do Gás

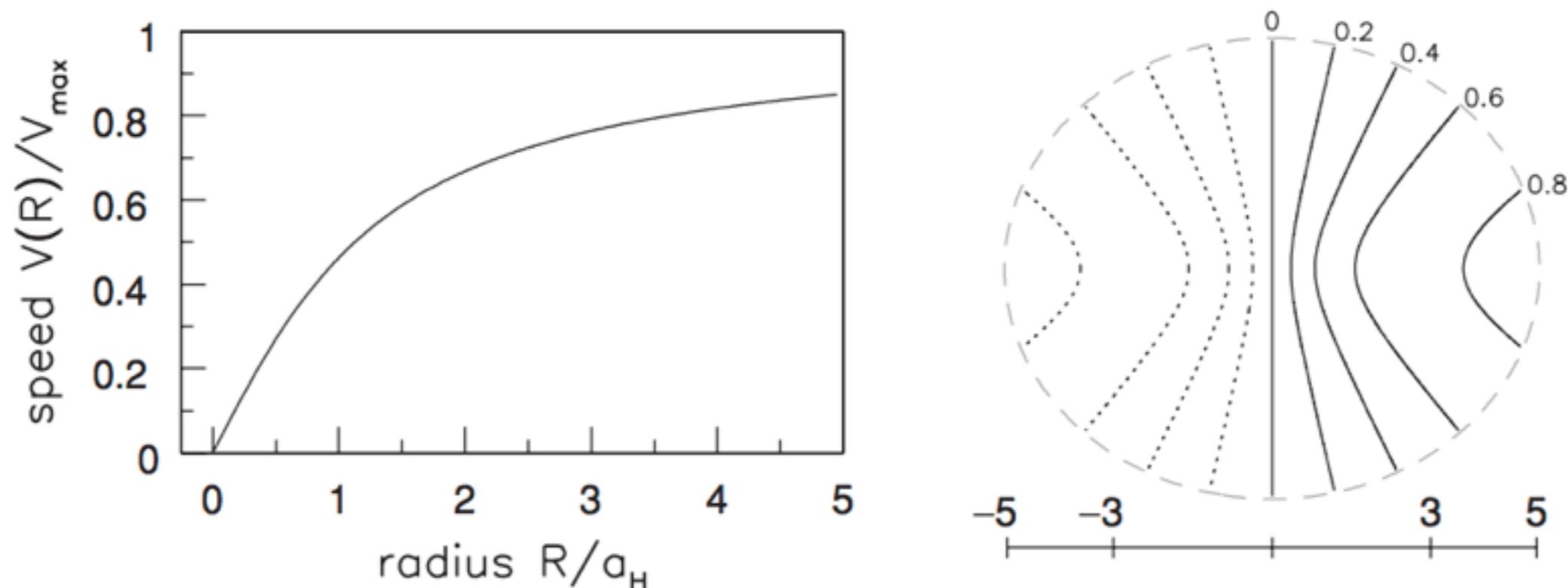


Fig. 5.19. Left, the rotation curve $V(R)$ in the ‘dark-halo’ potential of Equation 2.19, in units of $V_H = V_{\max}$. Right, the spider diagram of $V_r - V_{\text{sys}}$ for a disk observed 30° from face-on; contours are marked in units of $V_H \sin 30^\circ$, with negative velocities shown dotted.

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

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

Movimentos do gás

- A partir dos diagramas de aranha (spider diagram), determina-se $V(R)$ e i .

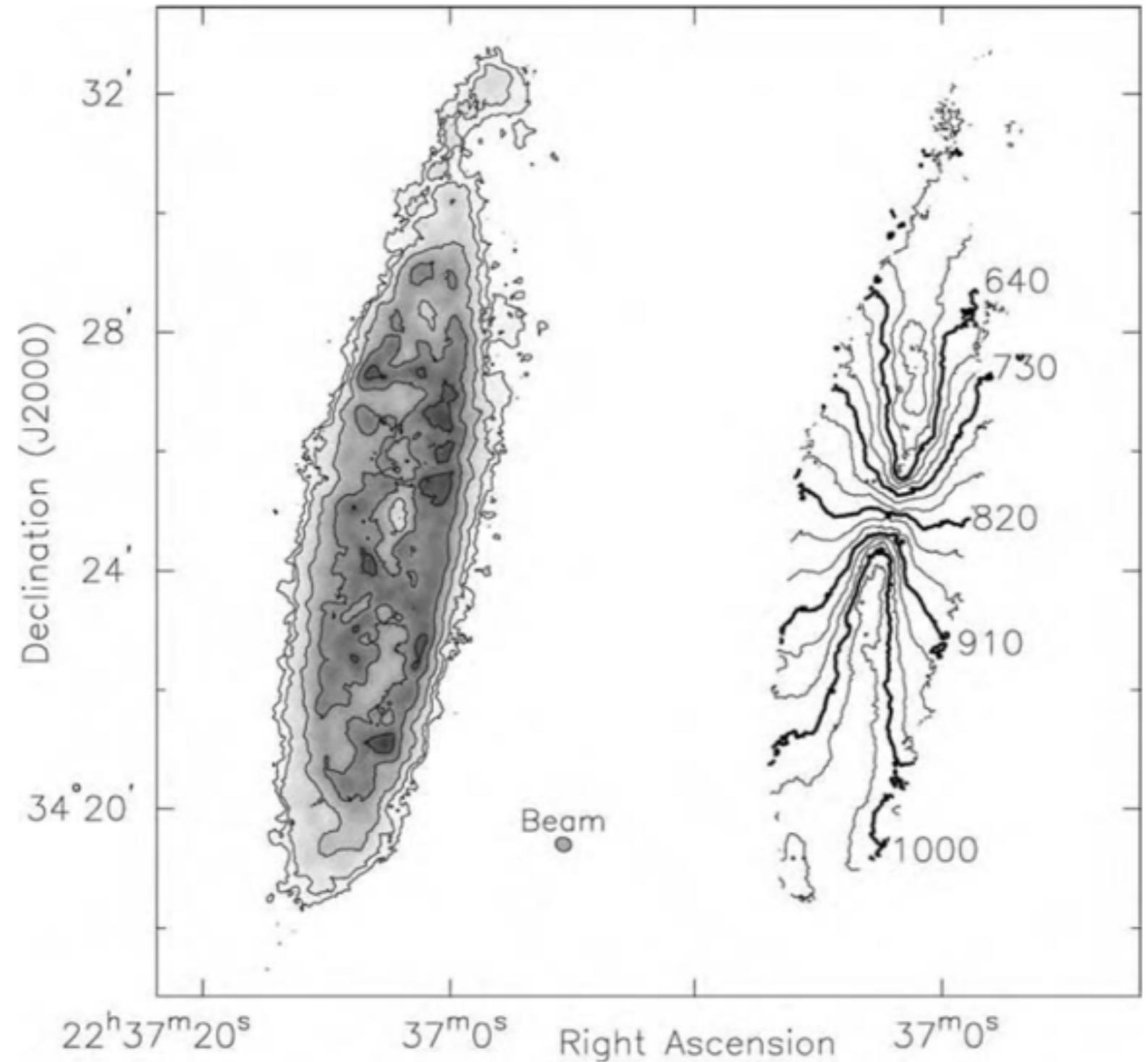


Fig. 5.13. HI gas in NGC 7331, observed with the VLA. Left, gas surface density; at $d = 14$ Mpc, we see $11.3 \times 10^9 M_{\odot}$ of HI, and $1' = 4$ kpc. The outer contour shows diffuse gas, at $N_{\text{H}} = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$; higher levels are at $1.2, 3.3, 6.4,$ and $9.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$. 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 km s^{-1} apart – M. Thornley and D. Bambic.

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

Curvas de rotação

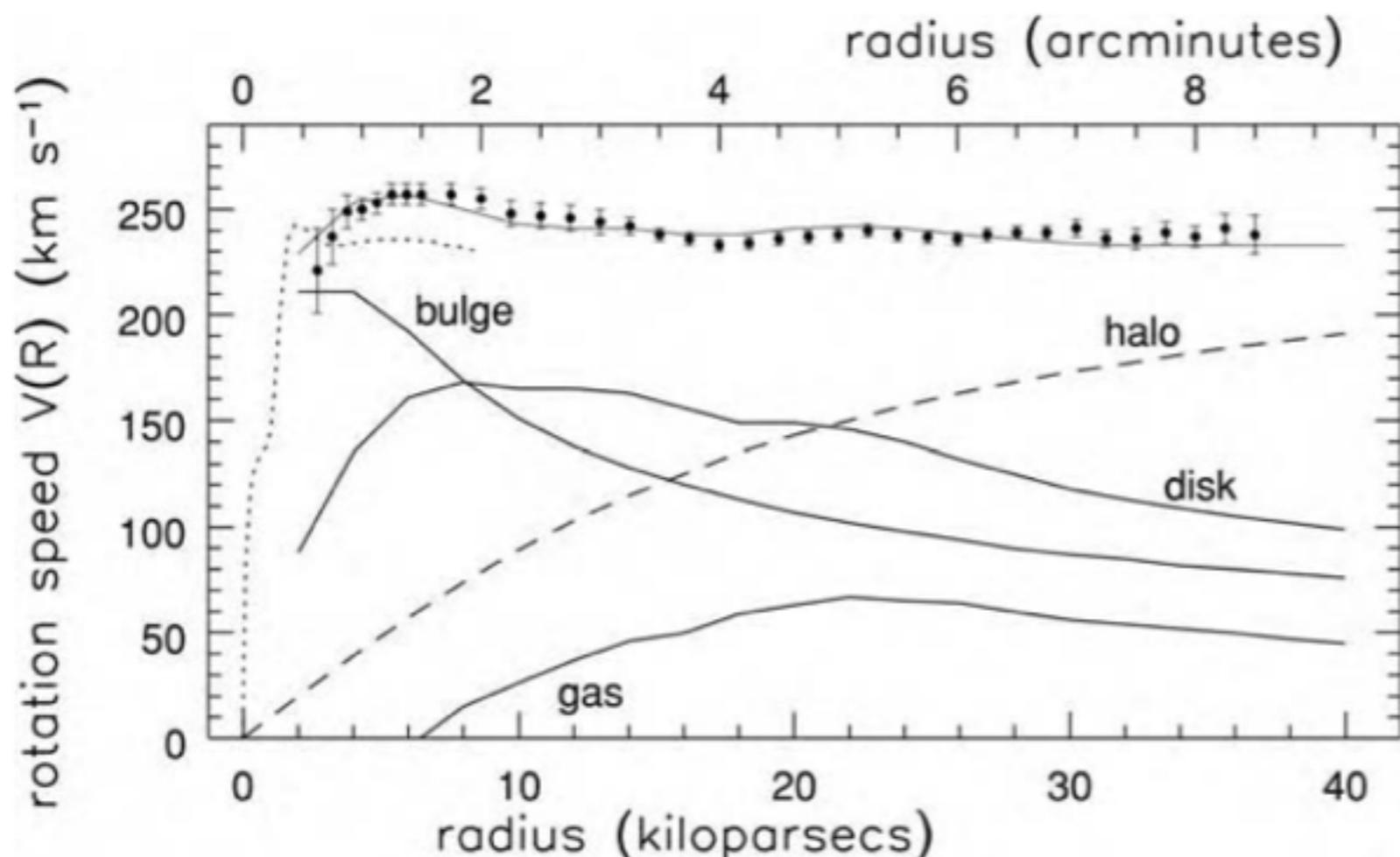


Fig. 5.20. Points give the rotation curve of NGC 7331, as found from the HI map of Figure 5.13; vertical bars show uncertainty. CO gas (dotted), observed with a finer spatial resolution, traces a faster rise. The lower solid curves show contributions to $V(R)$ from the gas disk, the bulge, and the stellar 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 HI.

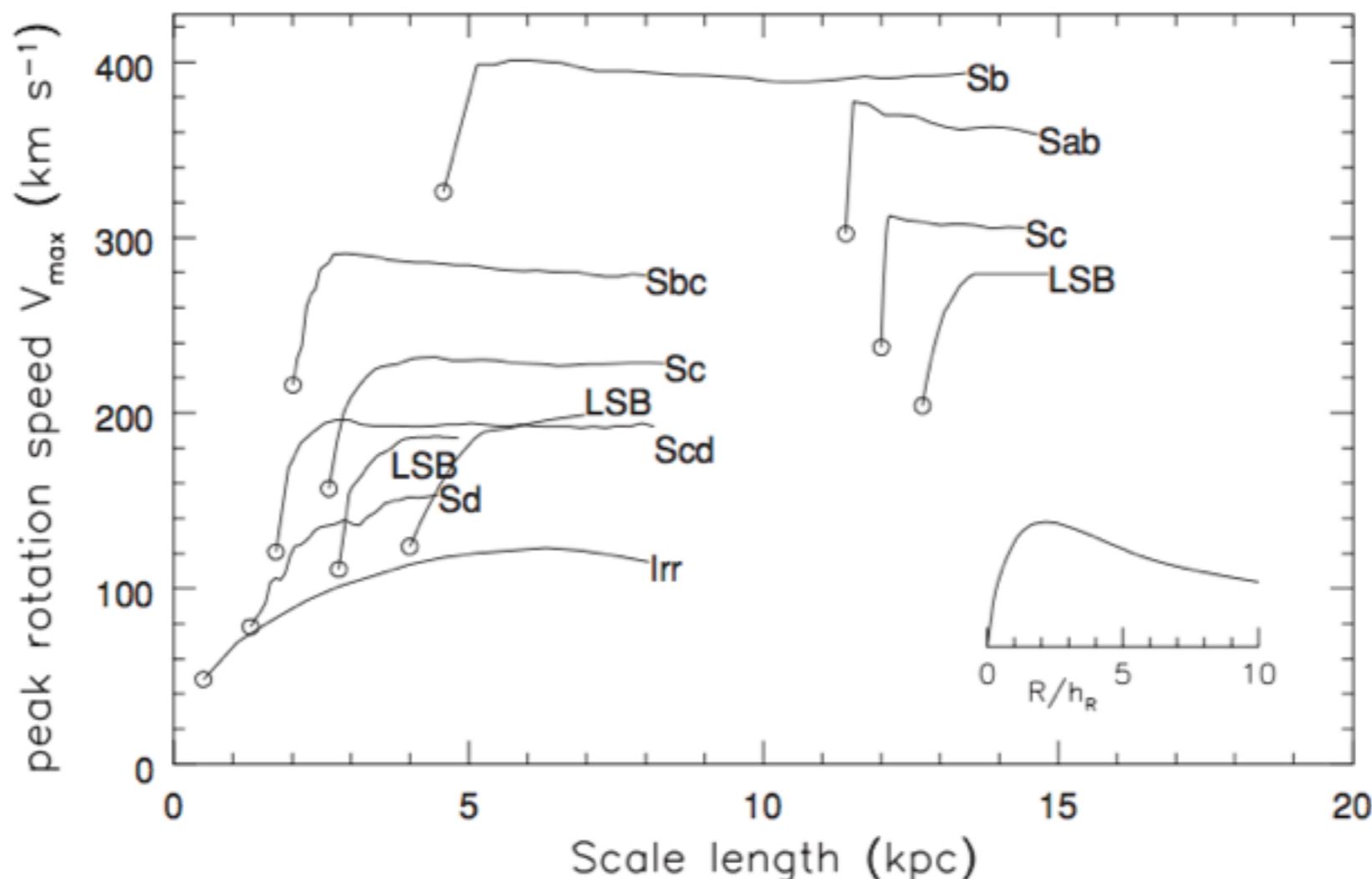
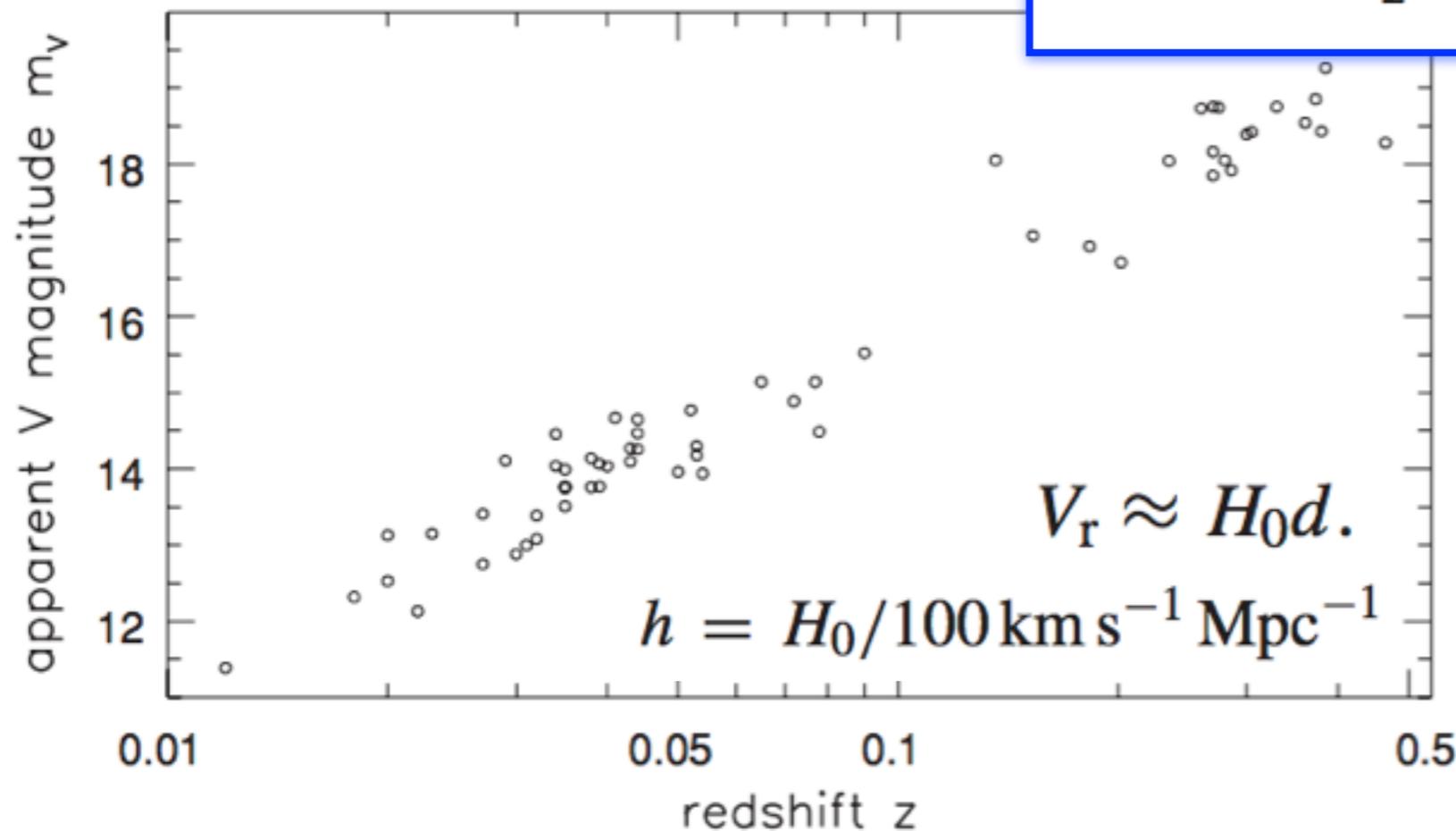


Fig. 5.21. Rotation curves for disk galaxies of various types. Open circles show the scale length h_R of the stellar disk and the peak rotation speed V_{max} for each galaxy. Curves are plotted in units of R/h_R , to the same horizontal scale as for the inset, showing $V(R)$ for the exponential disk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

Expansão cósmica

$$d = h^{-1} [V_r (\text{km s}^{-1}) / 100] \text{ Mpc.}$$



Quando a distância é obtida a partir de medidade de velocidade radial e da Lei de Hubble,

$$L \propto h^{-2}$$

$$n_{\star} \propto h^3$$

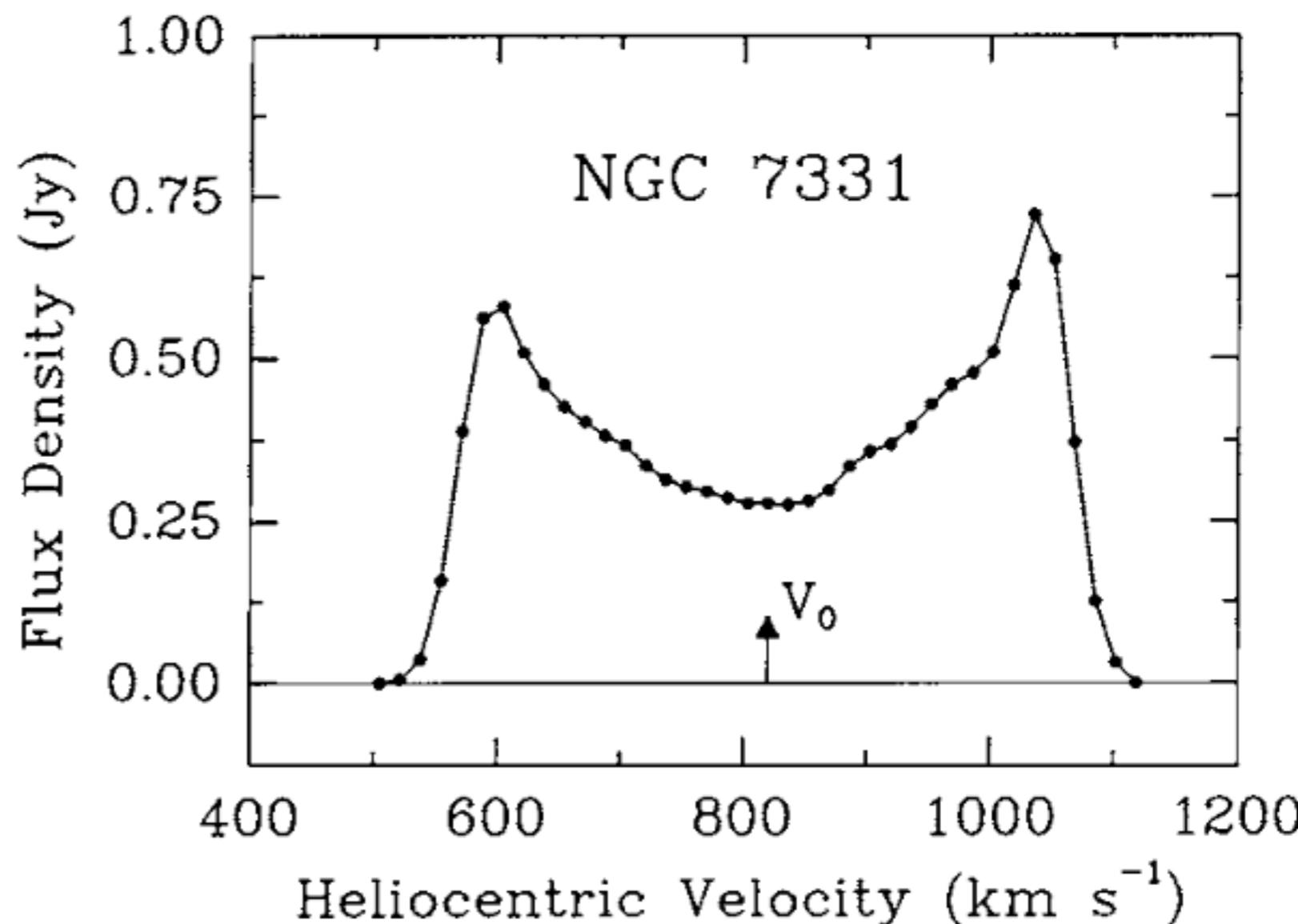
$$\mathcal{M} \propto h^{-1}$$

$$\mathcal{M}/L \propto h$$

Fig. I.17. Apparent magnitude in the V band for the brightest galaxies in rich galaxy clusters. The magnitude increases proportionally to the logarithm of the redshift z , as we expect if the galaxy's distance is proportional to its recession speed cz – data from J. E. Gunn and J. B. Oke 1975 *ApJ* **195**, 255.

A relação Tully-Fisher

- Se quisermos saber apenas a velocidade máxima de rotação, sem resolução espacial, pode-se observar o perfil global de velocidade
- Há uma correlação entre a velocidade máxima e a luminosidade da galáxia



$$W \approx 2V_{\max} \sin i$$

A relação de Tully-Fisher

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

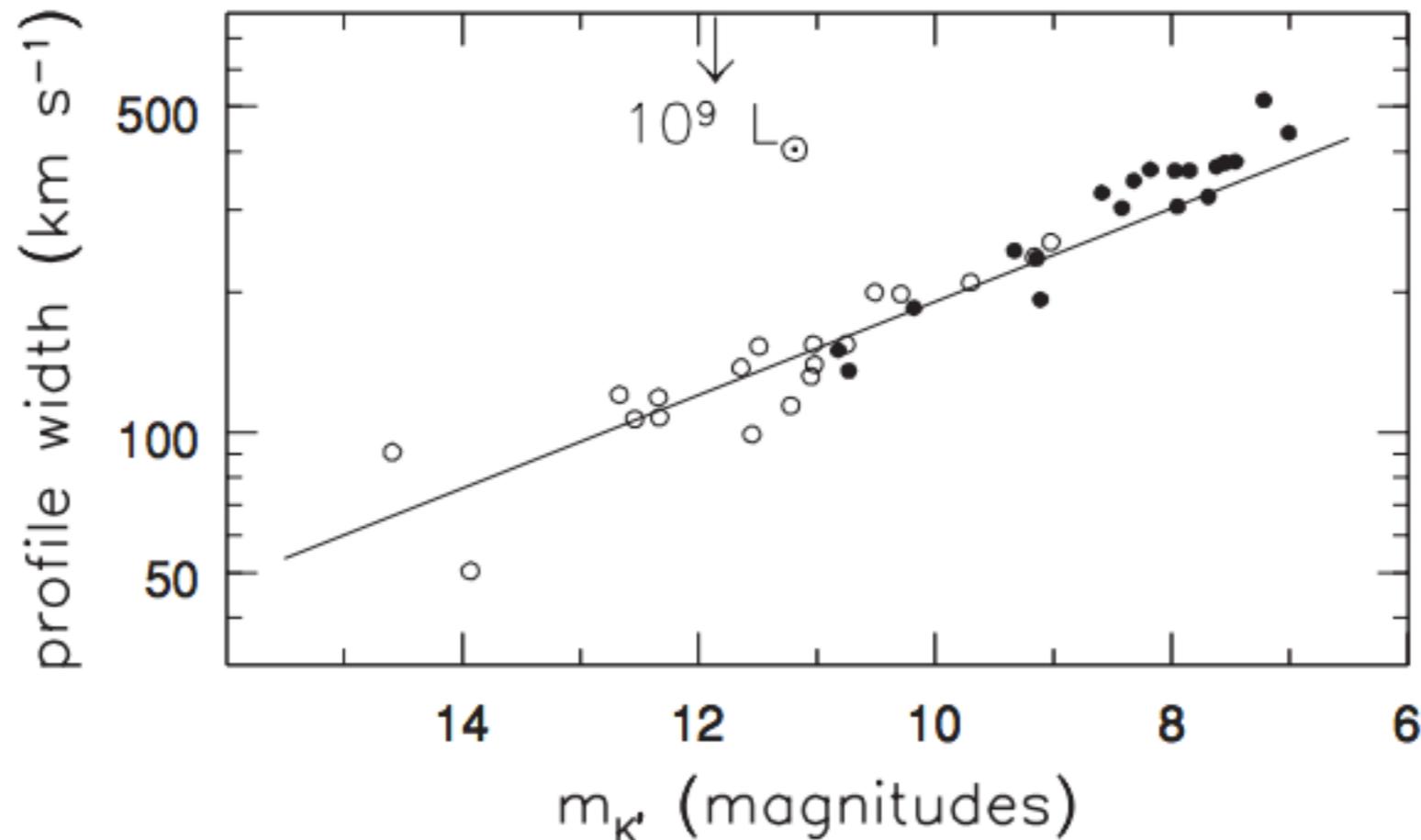


Fig. 5.23. For galaxies in the Ursa Major group: from the HI global profile, width $W/\sin i \approx 2V_{\max}$ plotted against apparent K' -magnitude. Low-surface-brightness galaxies (open circles) follow the same relationship as do those of high surface brightness (filled circles). The solid line passing 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

Sobre espirais e barras

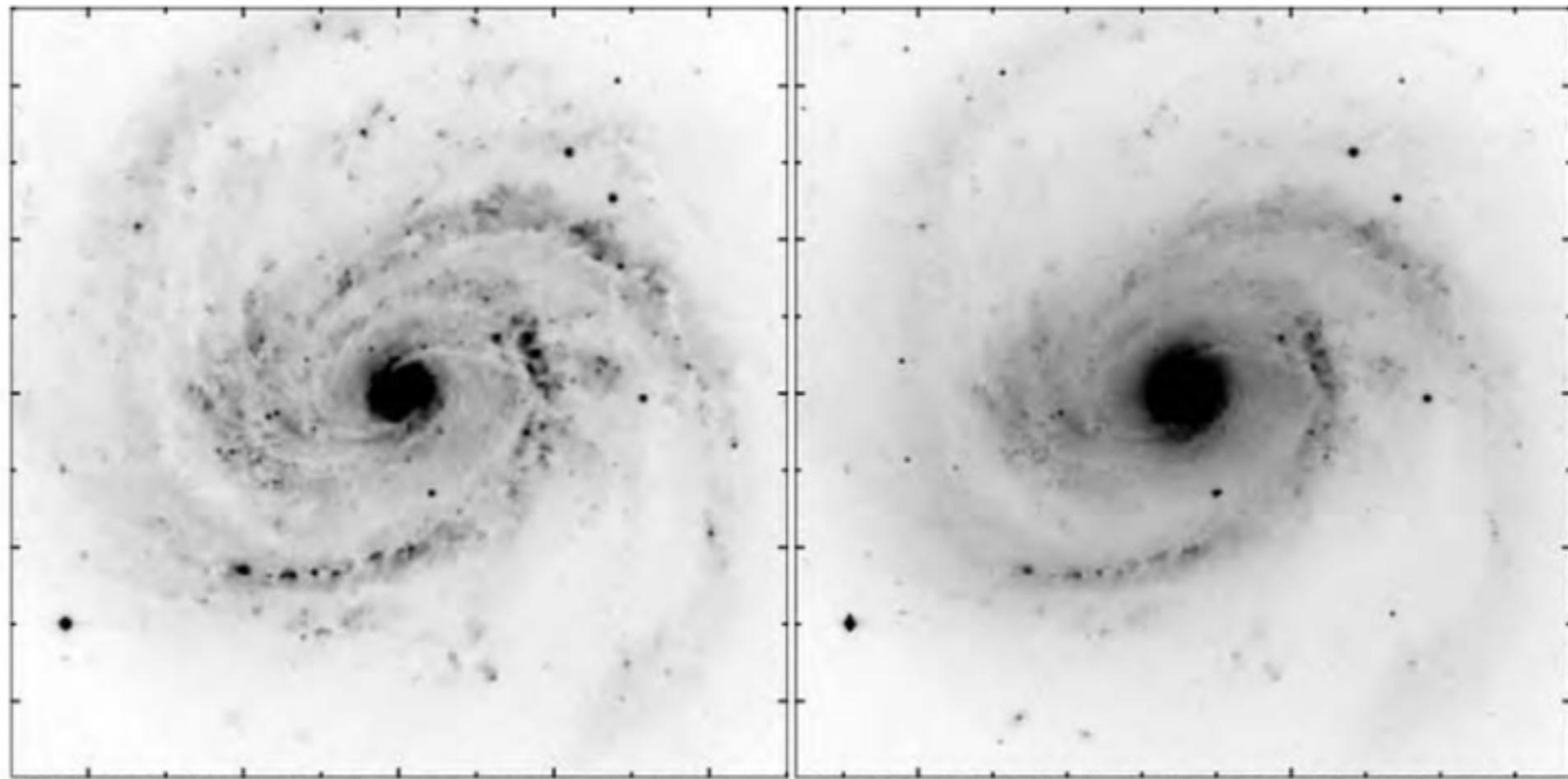
Espirais & Barras

- 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 α
- Estrelas energéticas o suficiente para ionizar o gás vivem apenas 10Myr
- 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.



Os padrões espirais

- Em coordenadas polares,

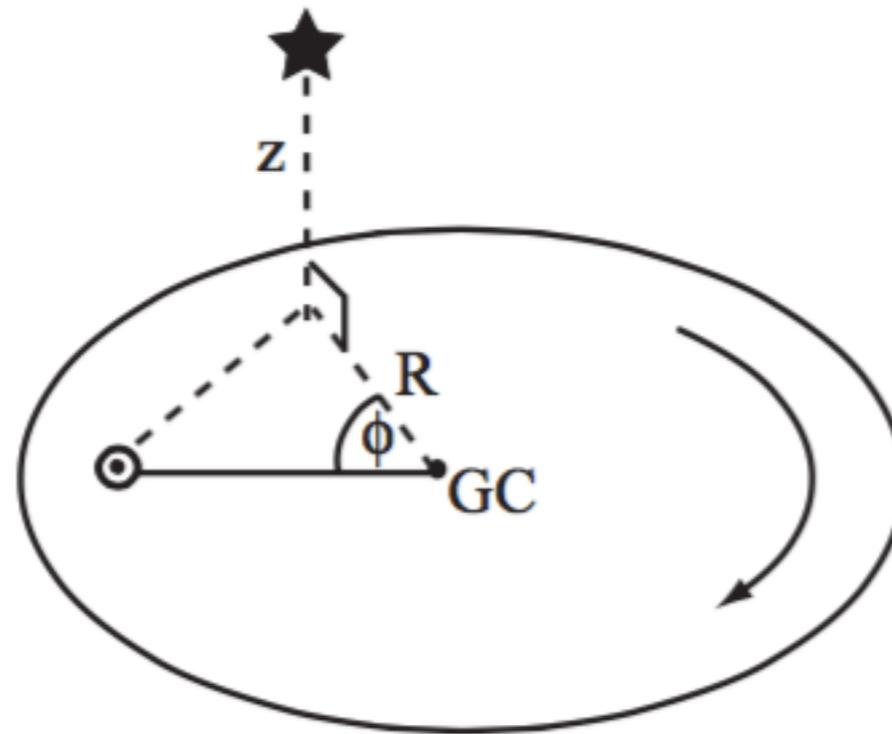


Fig. 1.10:
cylindrical polar
coordinates R ,
 ϕ , z with the
origin at the
Galactic center.

- 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 $10^\circ < i < 30^\circ$

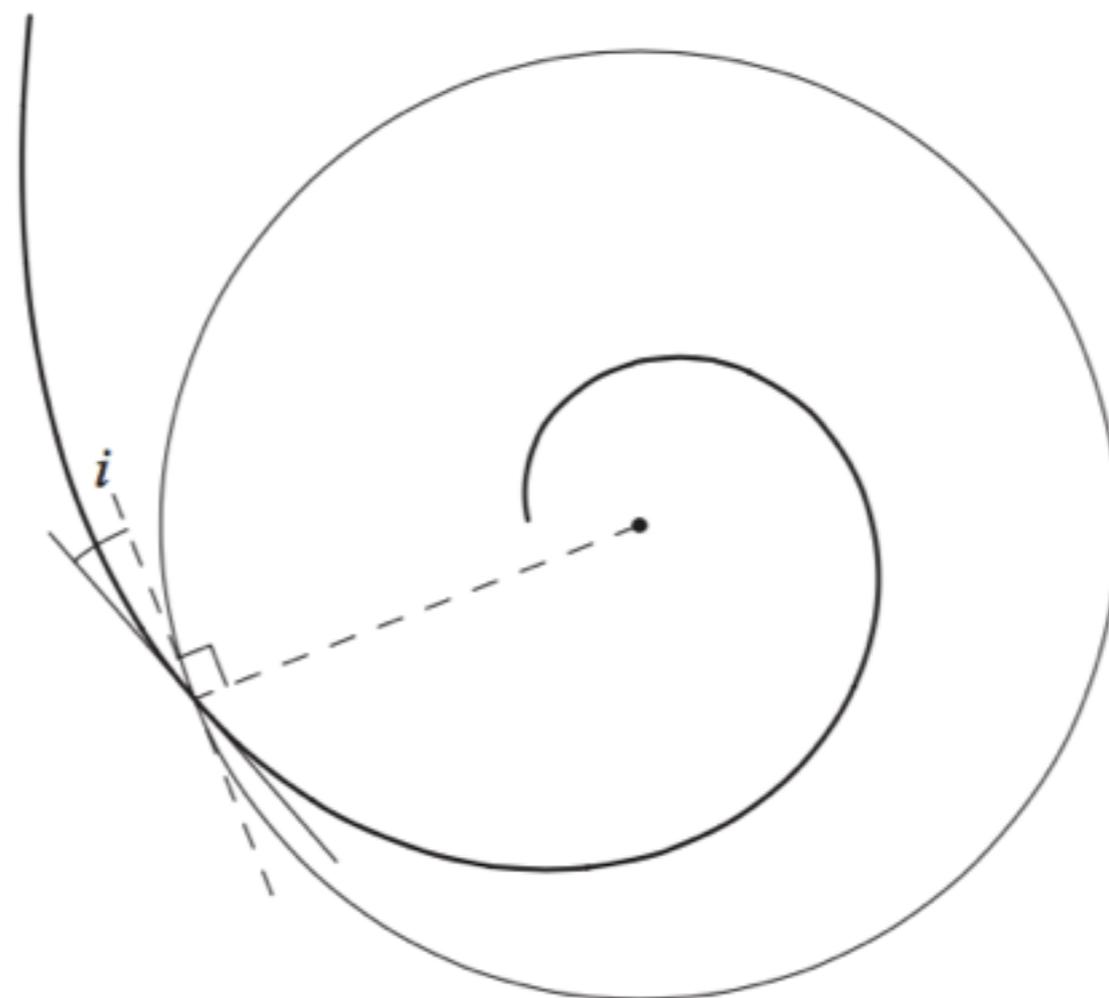


Fig. 5.28. In a disk rotating anticlockwise, where the rotation rate falls with radius R , stars that initially lie along a radial line are wound into a trailing spiral; the angle i is the *pitch angle* of the spiral.

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

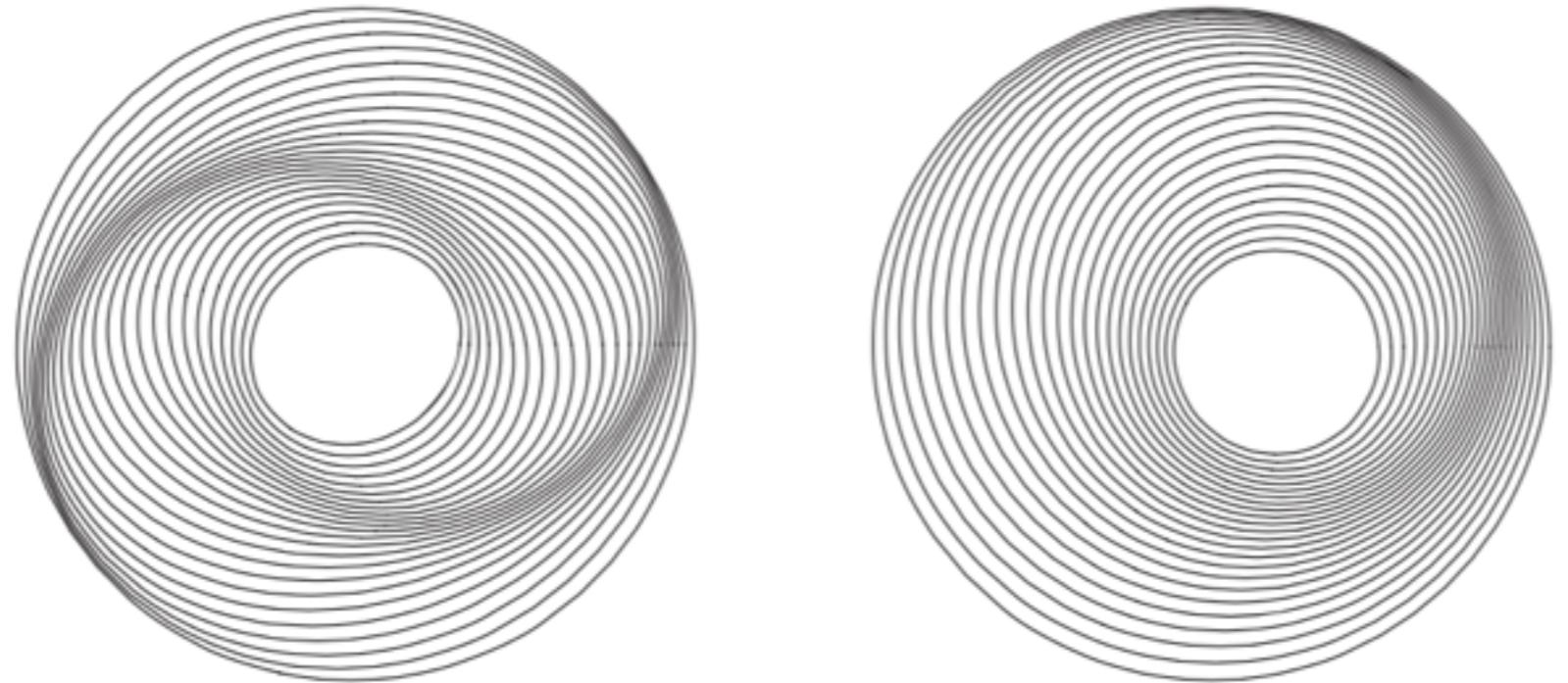
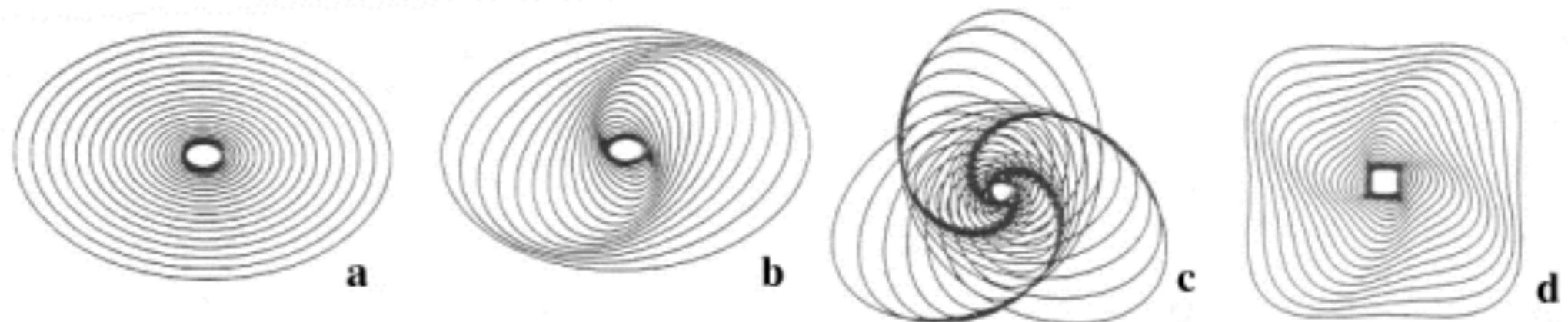
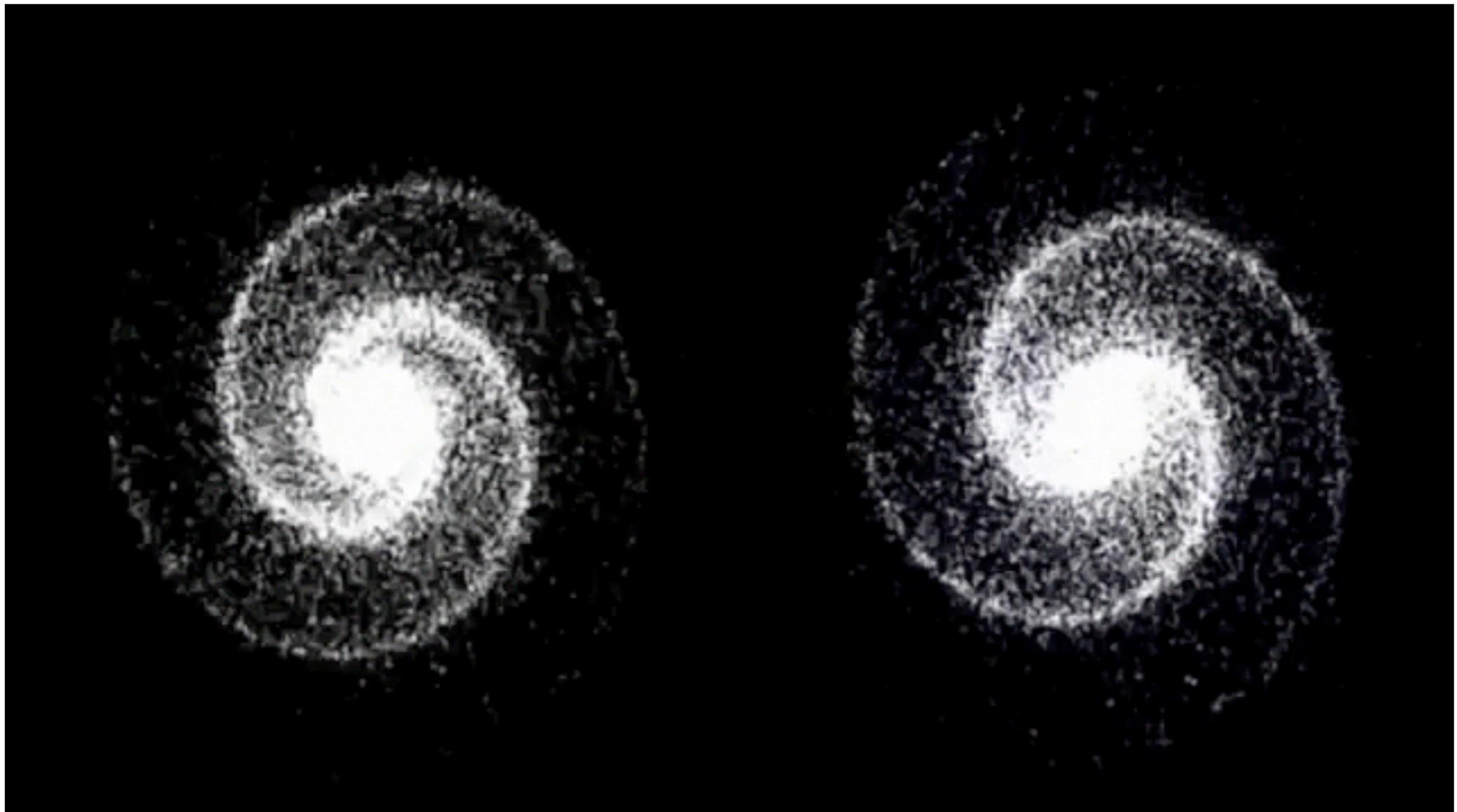


Fig. 5.29. Left, oval orbits nested to form a two-armed spiral; the equation of the pattern is $R = R_g \{1 + 0.075 \cos[2(5 - 5R_g + \phi)]\}^{-1}$, and $0.3 < R_g < 1$. Right, a one-armed spiral, with $R = R_g [1 + 0.15 \cos(5 - 5R_g + \phi)]^{-1}$.



Teorias para a Estrutura Espiral

- E a teoria das Ondas de Densidade de Lin-Shu



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!)

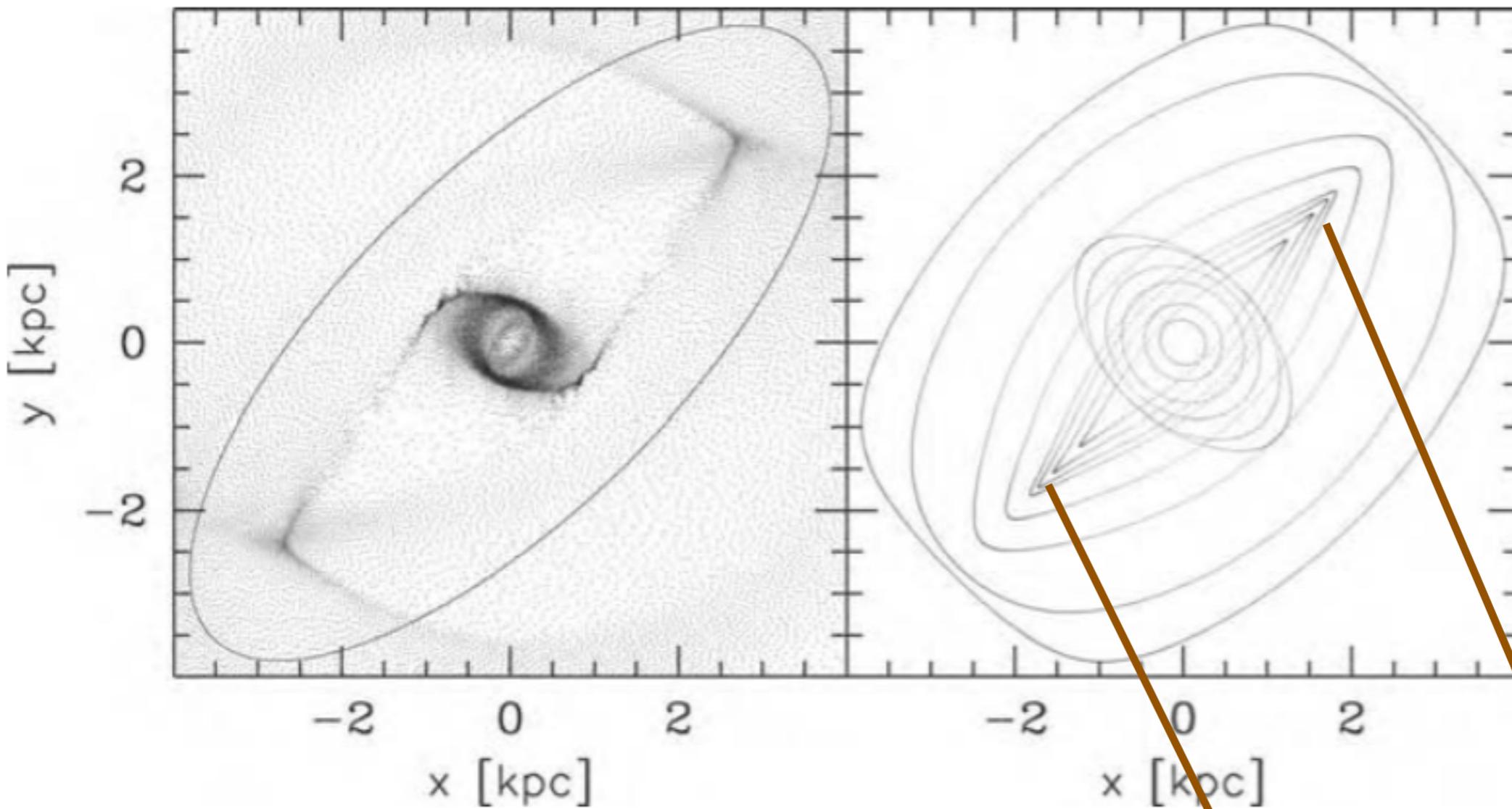


Fig. 5.33. Left, gas density from a computer simulation of flow within a bar; the solid curve outlines the bar, rotating clockwise. Right, particle orbits that close on themselves in a frame rotating with the bar. The gas flow is compressed in shocks along the leading edge of the bar, where the aligned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

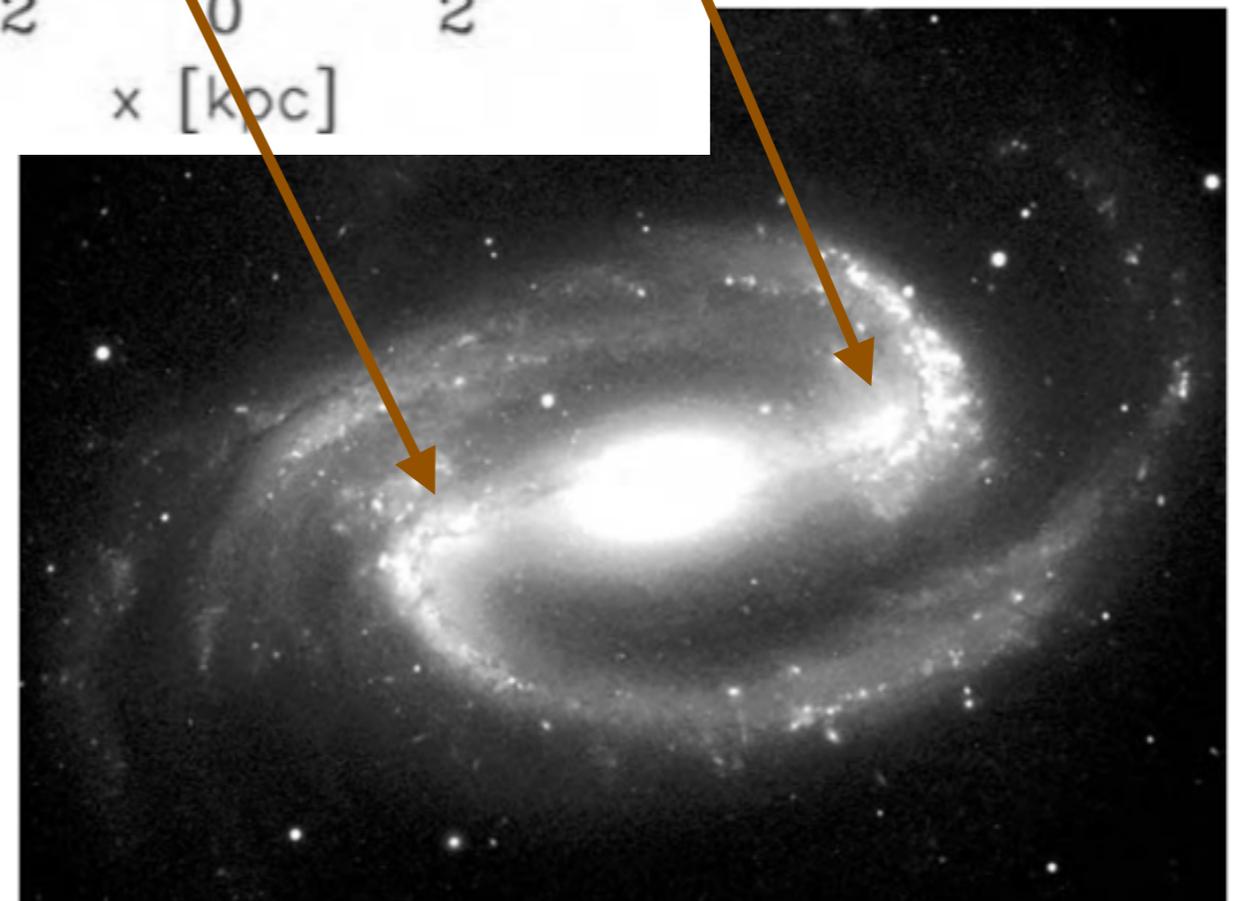


Fig. 5.32. The barred galaxy NGC 1300, classified as SBb or SBbc. The spiral arms trail; note the dust lanes on the leading edge of the bar – WIYN telescope.

Anéis

Galáxia Cartwheel

NGC4650A

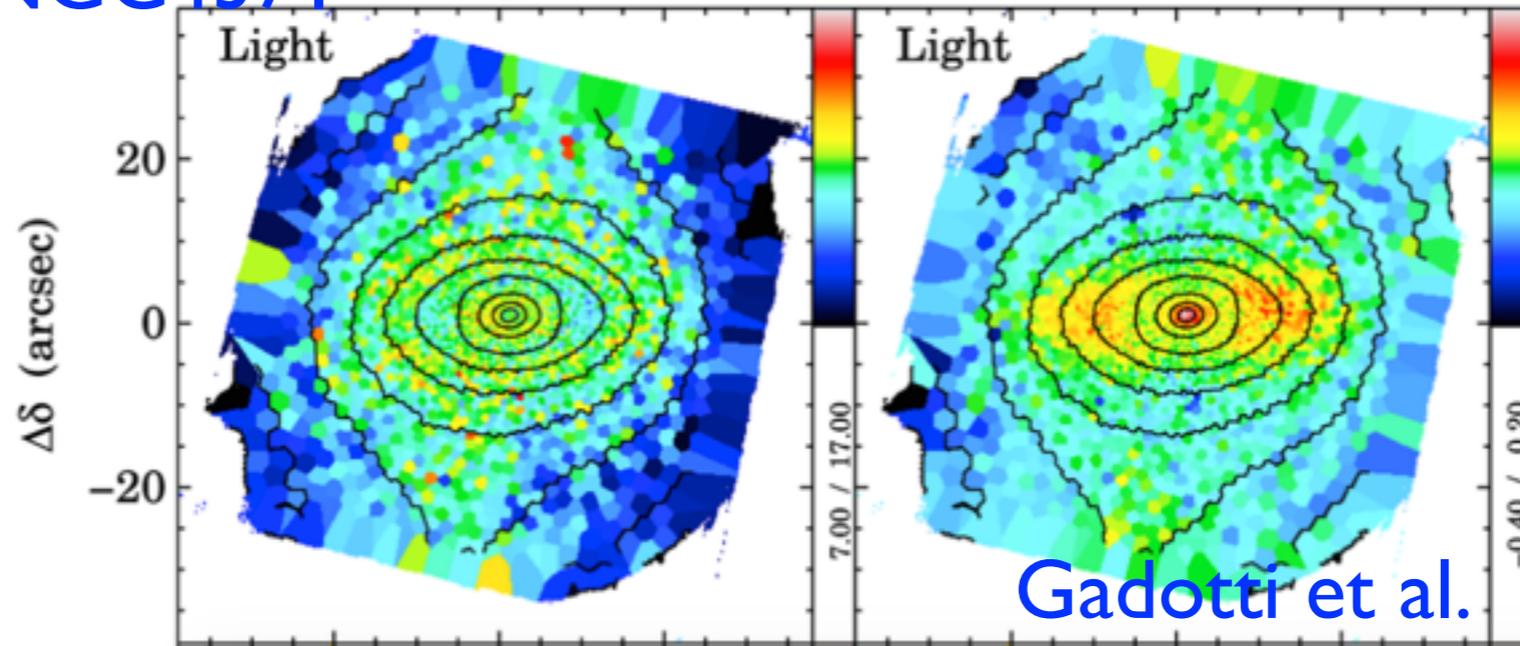
NGC660



NGC4371

Age

Metallicity



Bojos e as regiões centrais de galáxias disco

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

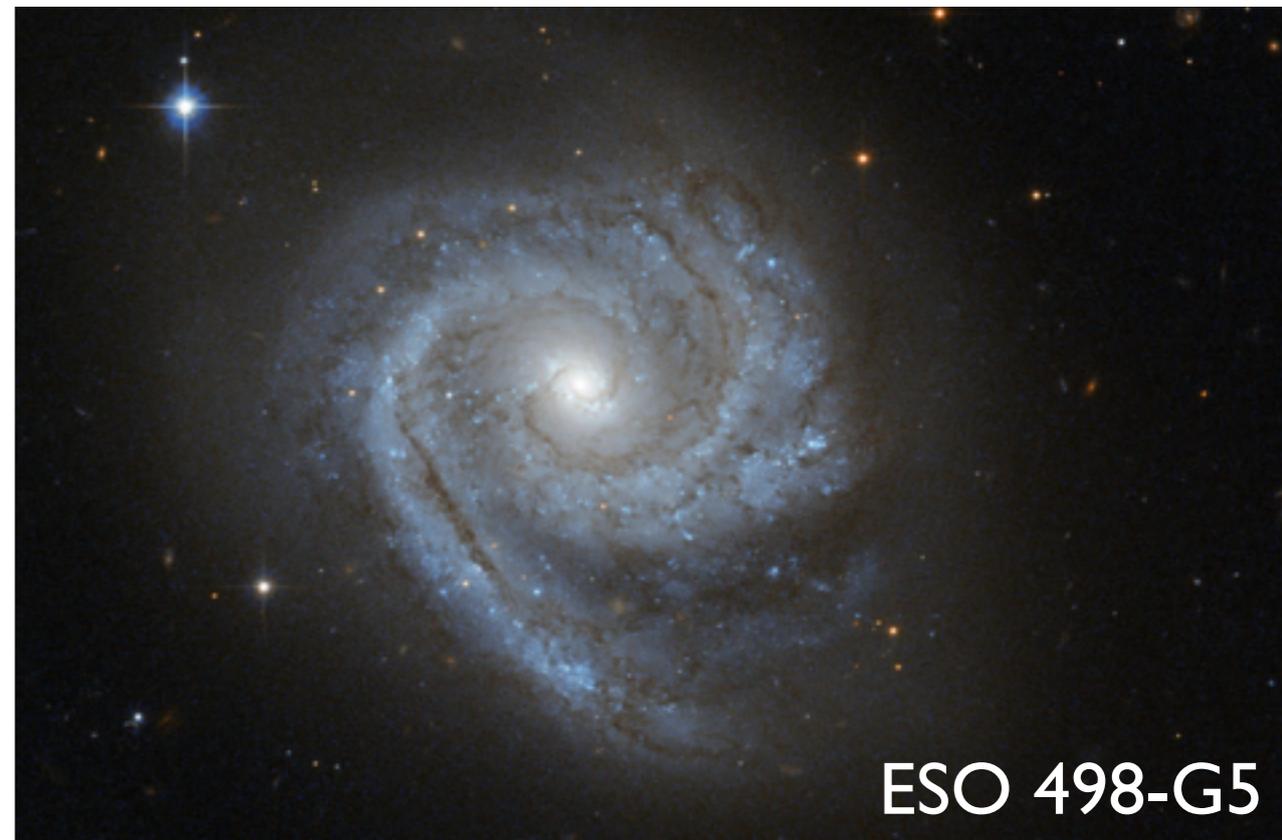
- As estrelas do bojo tem um padrão de rotação em comum, mas são dinamicamente mais quentes do que o disco, com $V/\sigma \sim 1$
- O brilho superficial de um bojo é em geral bem descrito pela fórmula de Sérsic:

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

- 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/>

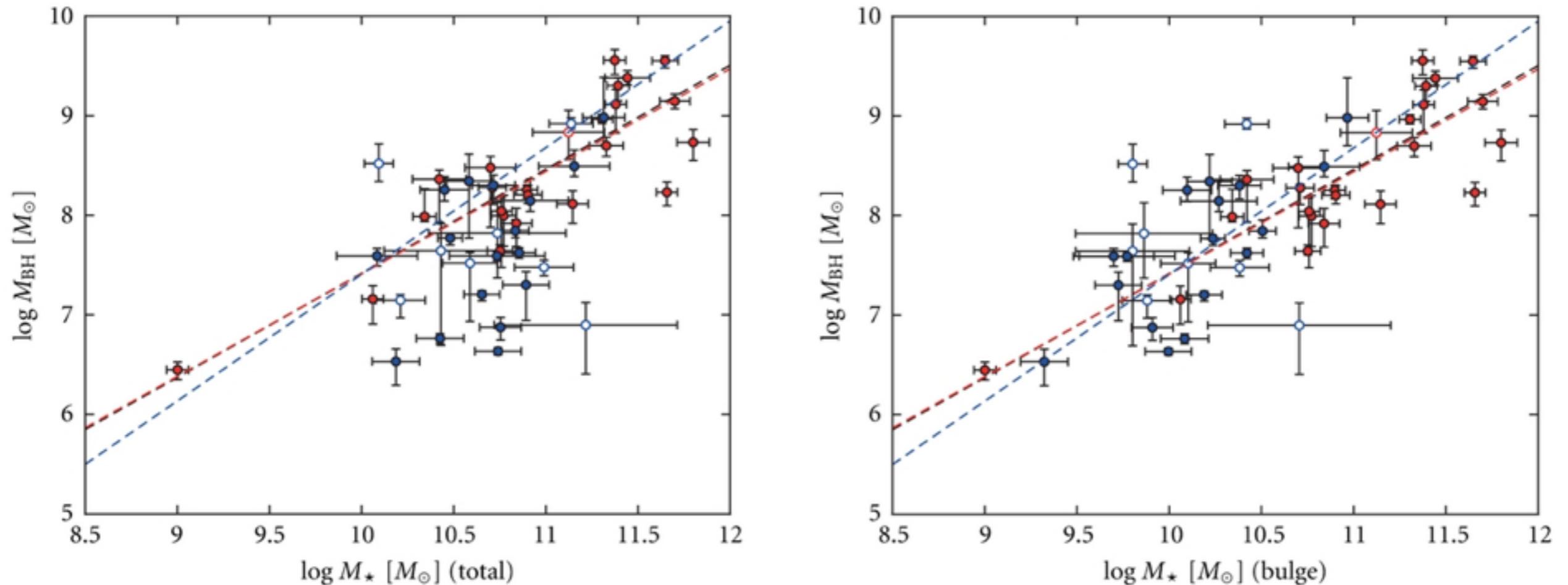
Bojos

- 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 a única galáxia conhecida onde as estrelas do bojo tem rotação contrária a do disco!

Relação entre bojo e buraco negro central

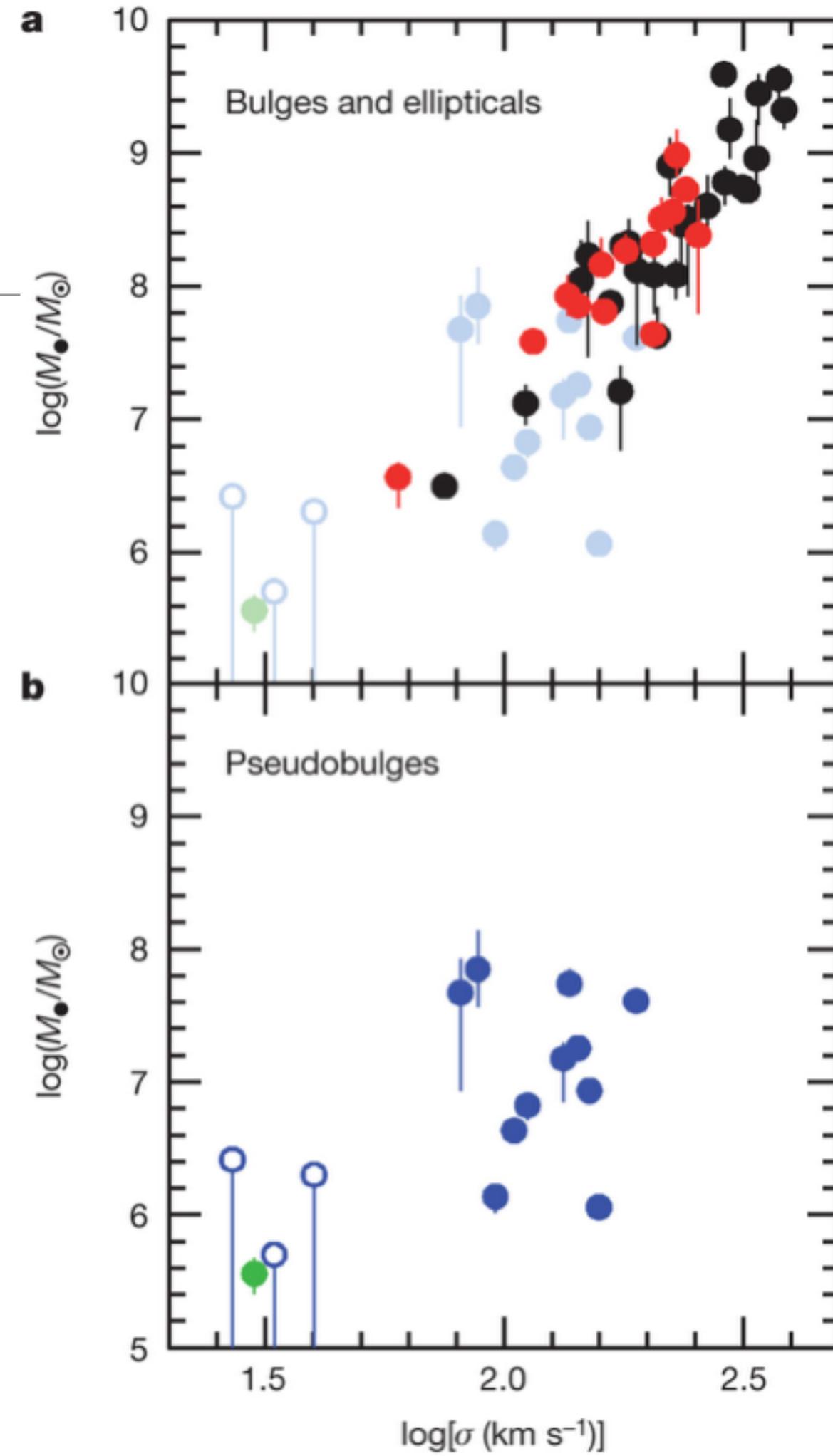


SMBH mass (red: elliptical galaxies, blue: disk galaxies) versus total galaxy stellar mass. (b): SMBH mass versus bulge stellar mass. The diagonal dashed lines are the best fits to the relation for the whole sample (black), for the elliptical galaxies (red), and for bulges of the disk galaxies (blue).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

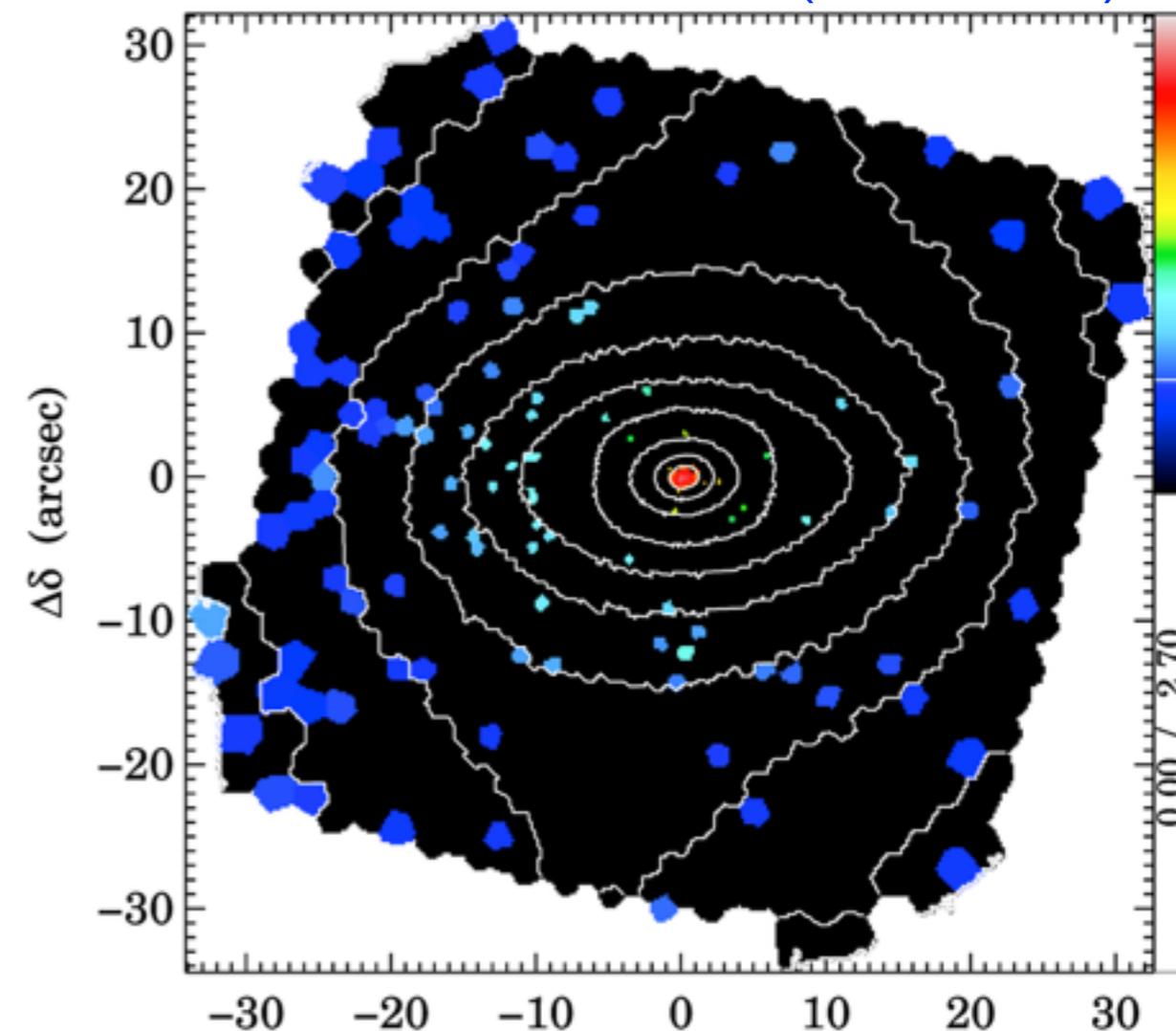
Figure 2: Correlation of dynamically measured black-hole masses with the velocity dispersions of their host galaxies.
http://www.nature.com/nature/journal/v469/n7330/fig_tab/nature09694_F2.html



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. (submitted)



Aglomerados Estelares Nucleares

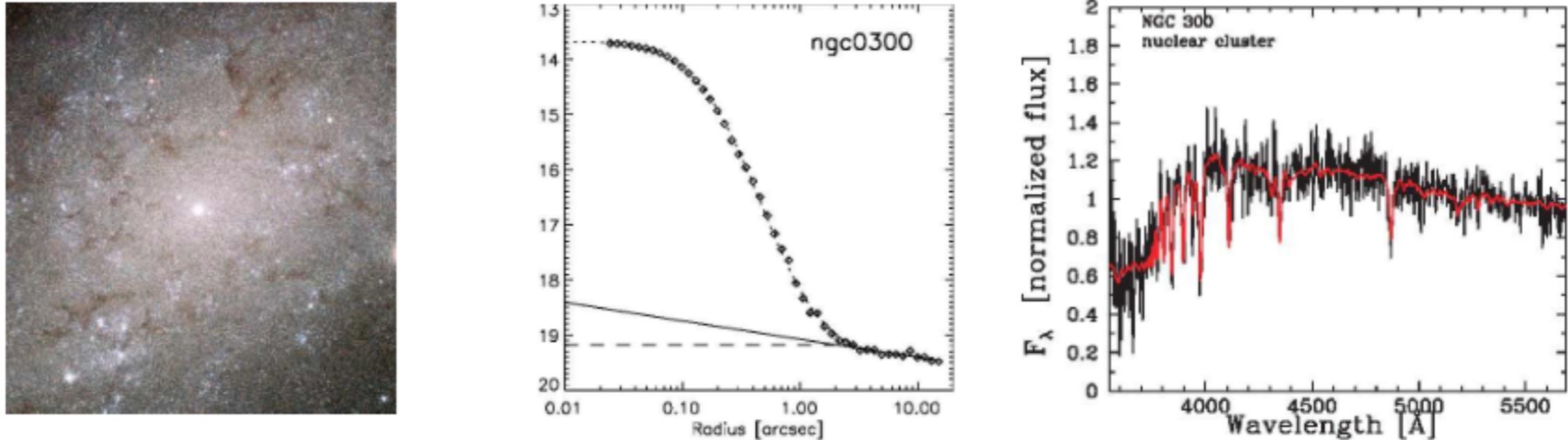
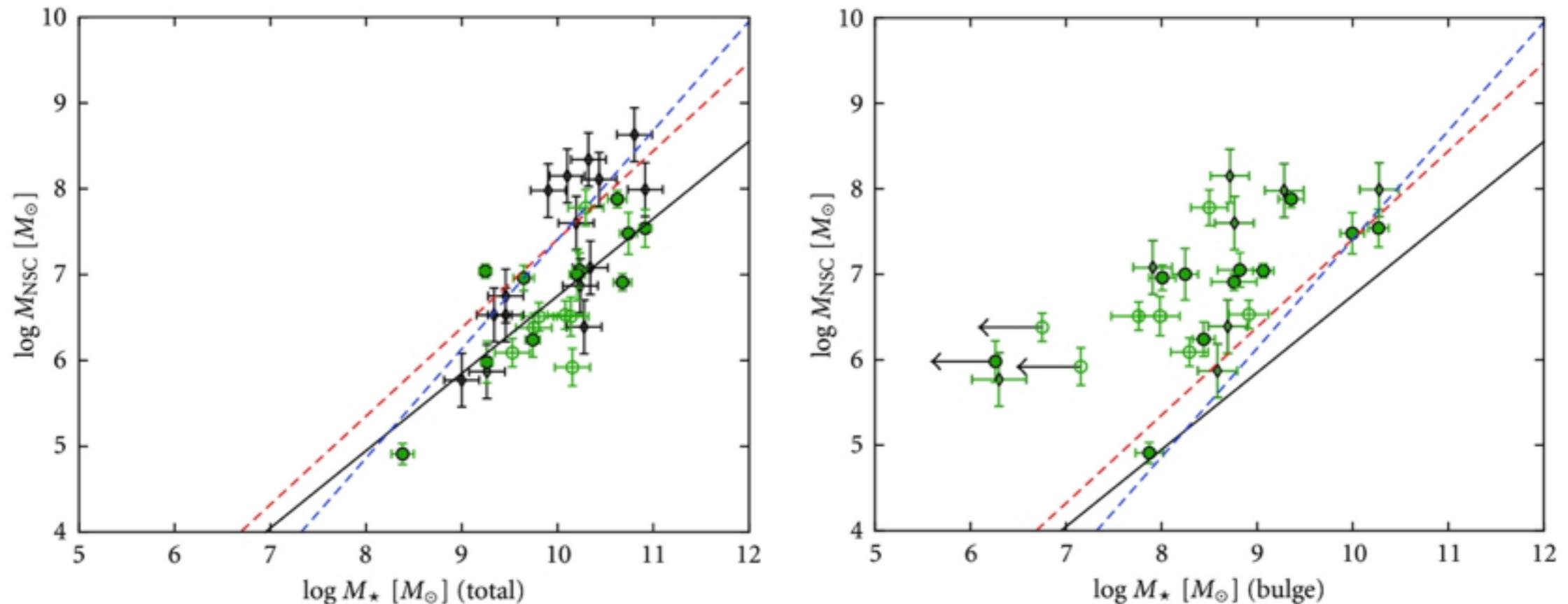


Figure 1. (a) HST/ACS color composite image of the central 1.2×1.2 kpc of the Sd galaxy NGC 300 at $D \approx 1.8$ Mpc (from the observations of Bresolin et al. 2005). A prominent nuclear star cluster (NC) resides at the center of the galaxy. (b) *I*-band surface brightness profile in $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ 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?

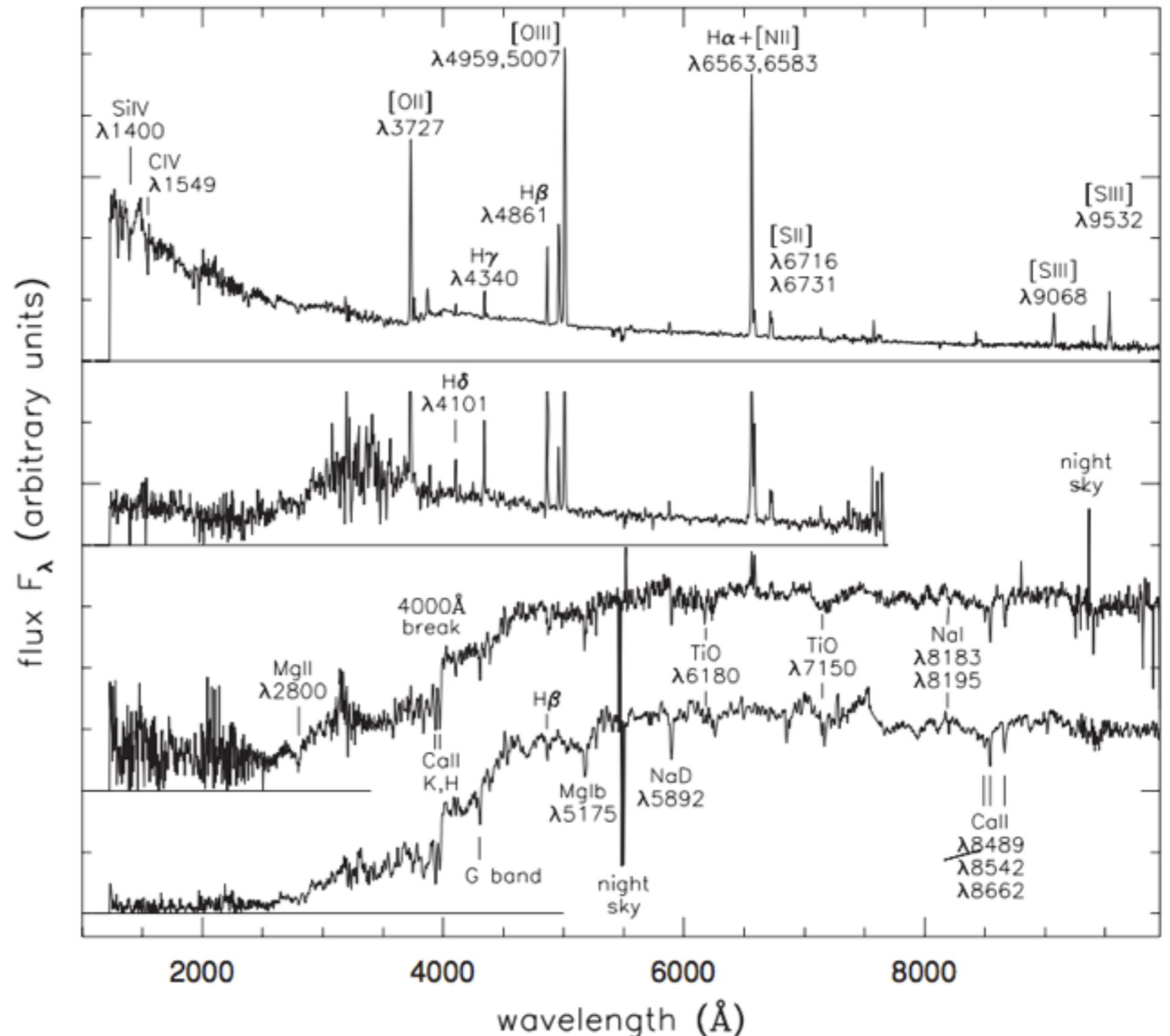
<http://www.stsci.edu/~marel/pdfdir/nucleiAU24I.pdf>



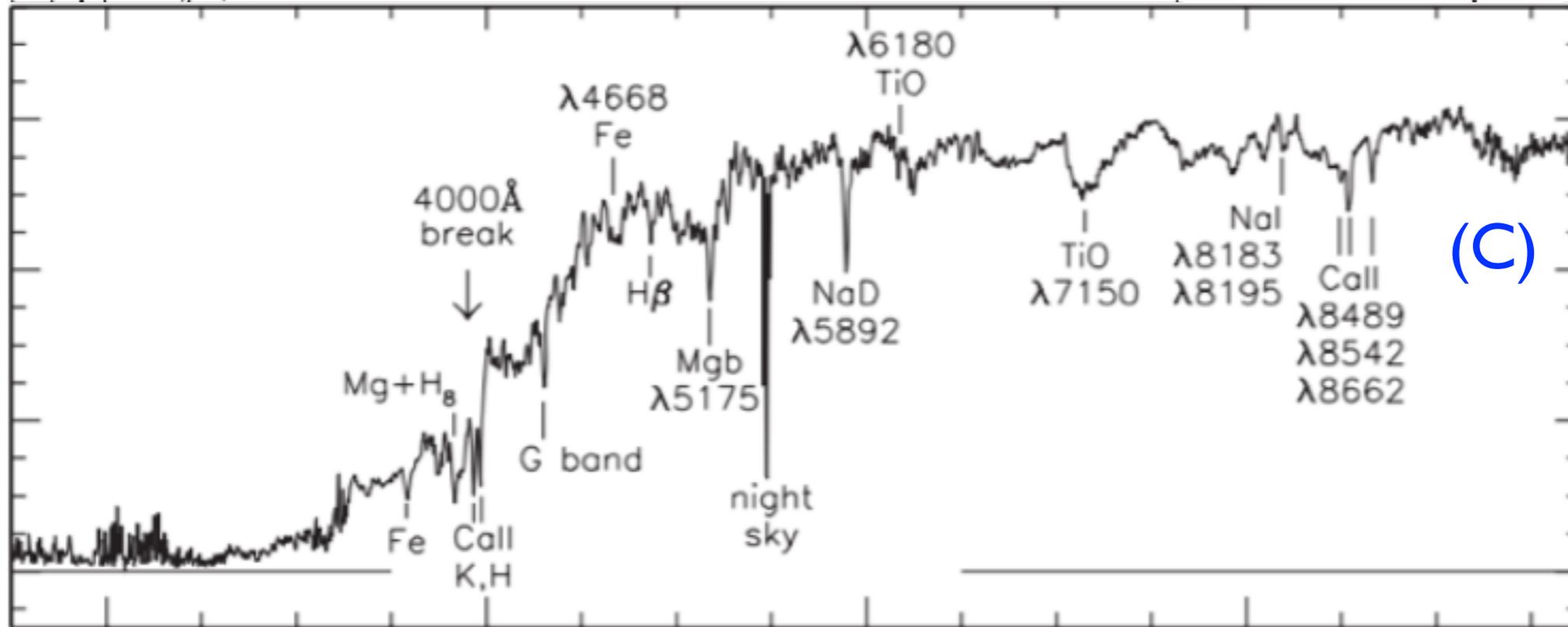
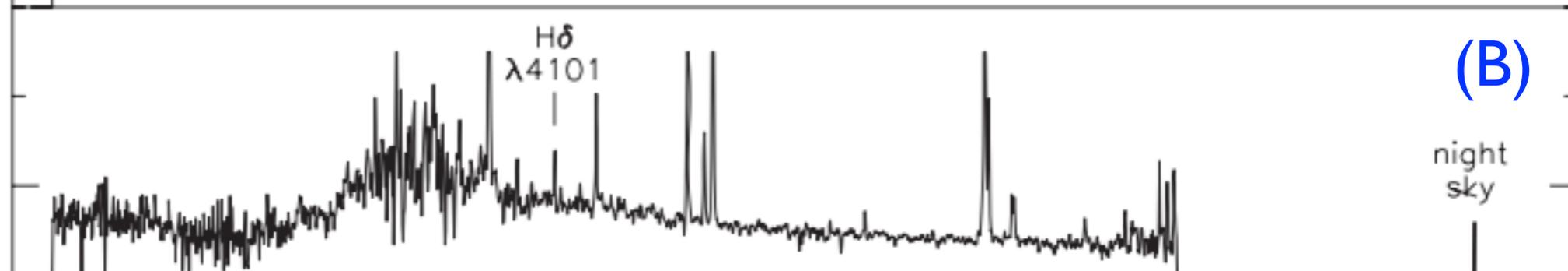
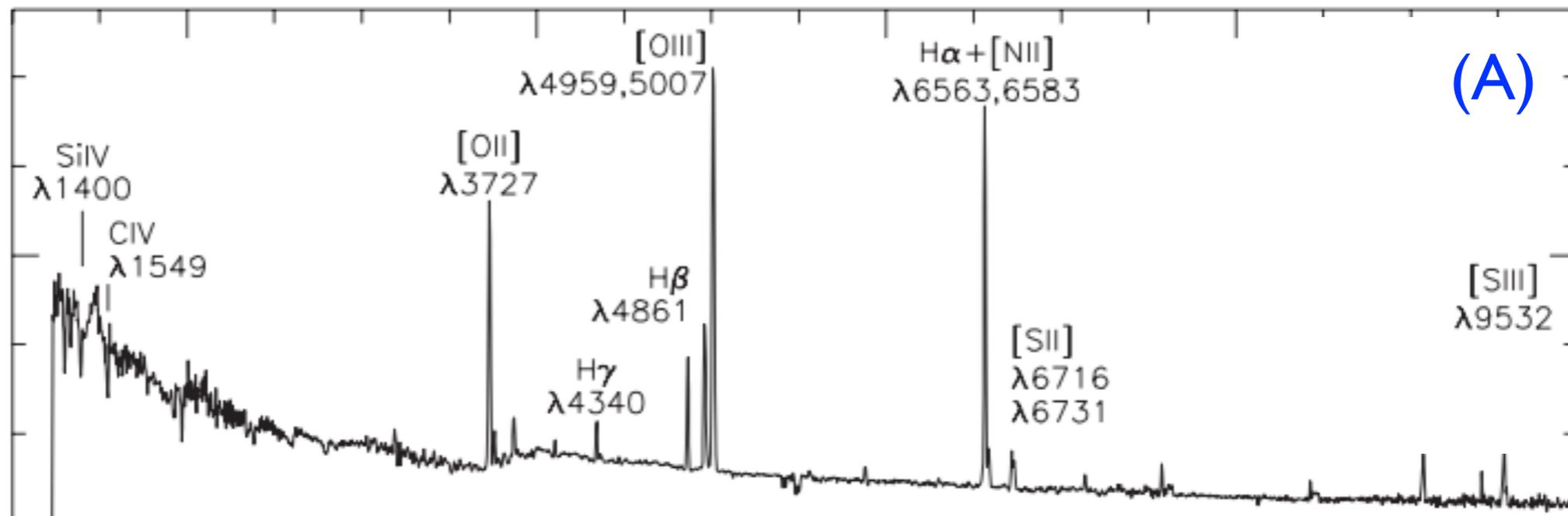
NSC mass versus total stellar mass (a) and bulge stellar mass (b). Green circles are galaxies with dynamical mass estimates for their NSCs; black diamonds are the spectroscopically estimated masses of Rossa et al. [11] (bulge mass estimates are not complete for these galaxies). Filled symbols indicate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

A sequência de Hubble revista

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



Flux F_λ (arbitrary units)



2000 4000 6000 8000

wavelength (\AA)