

Fotometria de objetos extensos

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

Aula expositiva: – Fluxo, magnitude e Brilho superficial – Projeção de uma distribuição 3D e relação com brilho superficial – Perfis radiais de brilho superficial: caso de discos e galáxias elípticas; perfil de Sérsic. – Cálculo do raio efetivo, brilho superficial efetivo e luminosidade total: exemplo com os perfis estudados – Relações de escala: relação de Kormendy para galáxias elípticas.

Atividade prática: – Obtenção da imagem do SDSS na banda r de uma galáxia elíptica – Visualização com DS9 – Uso da task ellipse do IRAF para obtenção do perfil radial de brilho superficial – Ajuste do perfil de De Vaucouleurs e obtenção dos parâmetros raio efetivo e brilho superficial central – comparação dos resultados da turma e análise da relação de escala obtido.

Objetos Extensos

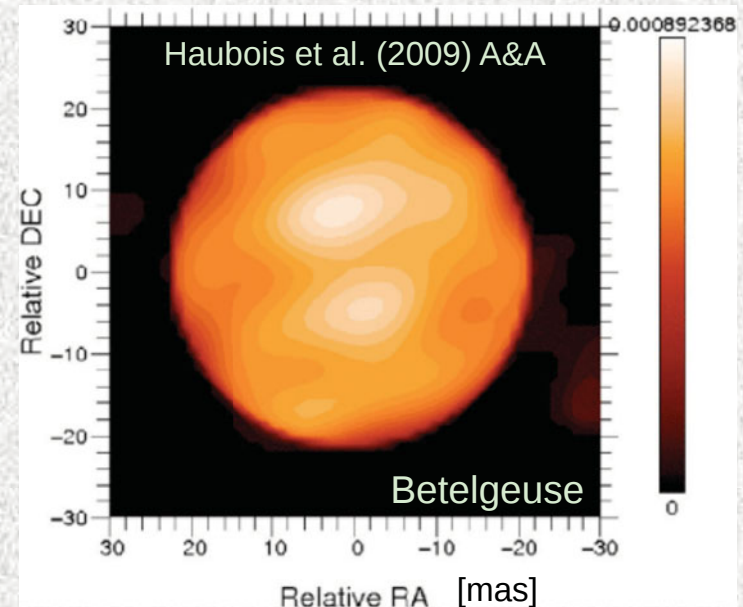
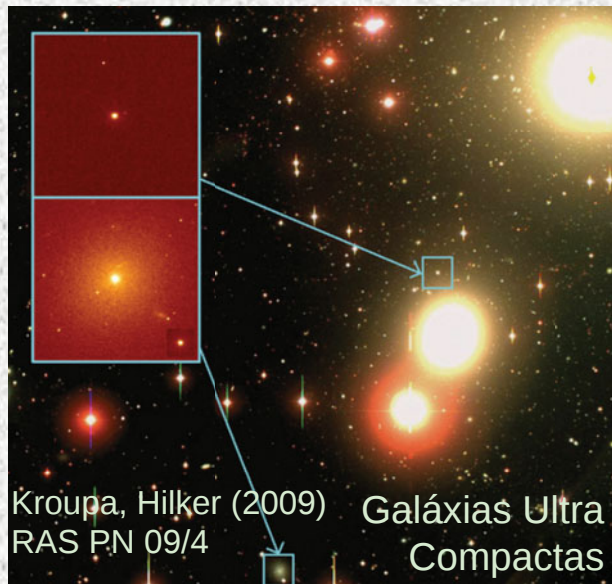
- Imagens resolvidas espacialmente.
 - Tamanho aparente maior do que a PSF (*Point Spread Function*).
- Exemplos:
 - Galáxias, Regiões HII, Nebulosas Planetárias, Restos de Supernovas.
 - Fontes puntiformes como estrelas, AGNs (Núcleos Ativos de Galáxias), não são geralmente extensos.



Objetos Extensos

- Imagens resolvidas espacialmente.
 - Tamanho aparente maior do que a PSF (*Point Spread Function*).
- Exceções: Algumas estrelas gigantes vermelhas são resolvidas por interferometria.

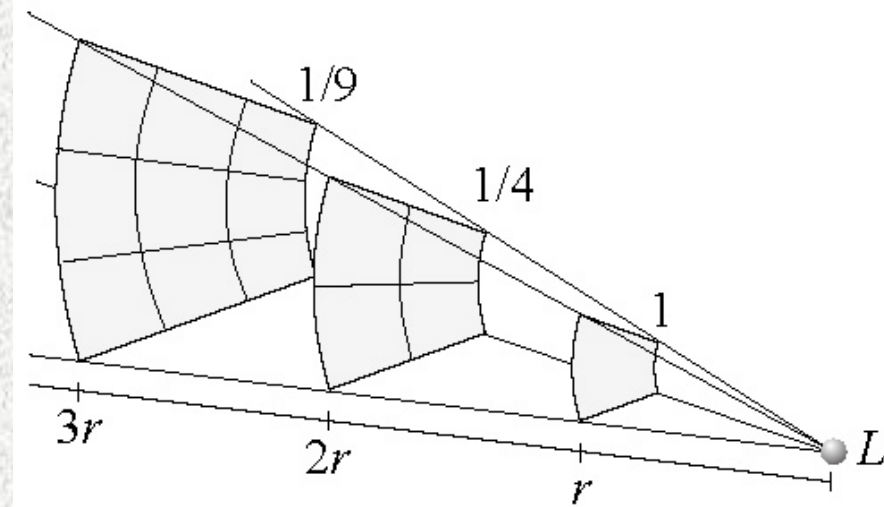
Aglomerados globulares extragalácticos, galáxias anãs distantes não são resolvidos...



Intensidade da radiação

- Fluxo é a medida de energia emitida por uma fonte, detectada pelo observador.
- Luminosidade = energia emitida por unidade de tempo.
 - grandeza intrínseca do astro
- Brilho = *fluxo* de energia(energia por unidade de tempo e por unidade de superfície).
 - grandeza aparente (observada) do astro
 - depende da distância

$$\text{fluxo} = \frac{\text{luminosidade}}{4\pi \text{ distância}^2}$$



Magnitude

- No séc. XIX, é estabelecido uma escala de magnitude quantitativa (Pogson N., 1856, 1857, MNRAS).
 - Defini-se que uma diferença de 5 magnitudes corresponde a um fator 100× em fluxo.
 - Isto é: $(\text{magnitude} + 5) \Rightarrow \text{fluxo} / 100$
- Matematicamente expressamos a relação entre magnitude e fluxo como:

$$\text{magnitude} = -2,5 \log(\text{fluxo}) + \text{constante}$$

- Comparando dois astros:

$$\text{mag}_1 - \text{mag}_2 = -2,5 \log (\text{fluxo}_1 / \text{fluxo}_2)$$

Brilho Superficial

- Para objetos extensos, o brilho pode variar espacialmente.
- Podemos definir o Brilho superficial de 2 formas:



(1): Luminosidade do objeto por unidade de área:

$$I(\vec{R}) = \int j(\vec{r}) dz$$

unidades: $[L_{\odot}/\text{pc}^2]$.

$j(r)$ é a densidade de luminosidade do objeto.
 $I(R)$ é a projeção na linha de visada de $j(r)$.

Brilho Superficial

- Para objetos extensos, o brilho pode variar espacialmente.
- Podemos definir o Brilho superficial de 2 formas:



(2): Brilho observado por unidade de ângulo sólido:

$$\mu(\vec{R}) \propto -2,5 \log I(\vec{R}) ; \quad I(\vec{R}) = \frac{\text{fluxo}}{\Omega}(\vec{R})$$

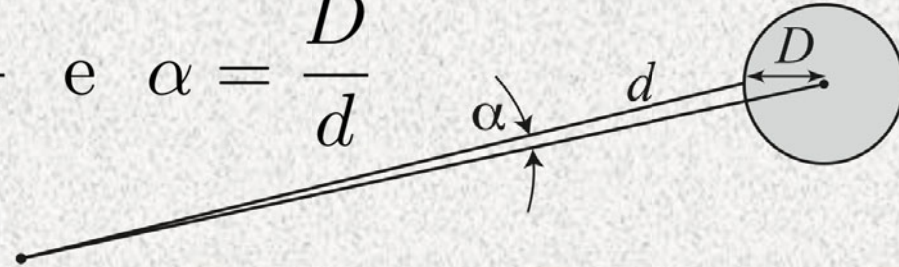
Ω é o ângulo sólido observado (área na esfera celeste).

unidades: [mag/arcsec²].

Brilho superficial: distâncias

$$I(\vec{R}) = \frac{f}{\alpha^2}$$

$$f = \frac{L}{4\pi d^2} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{D}{d}$$



$$\Rightarrow I = \frac{L/(4\pi d^2)}{(D/d)^2} = \frac{L}{4\pi D^2}$$

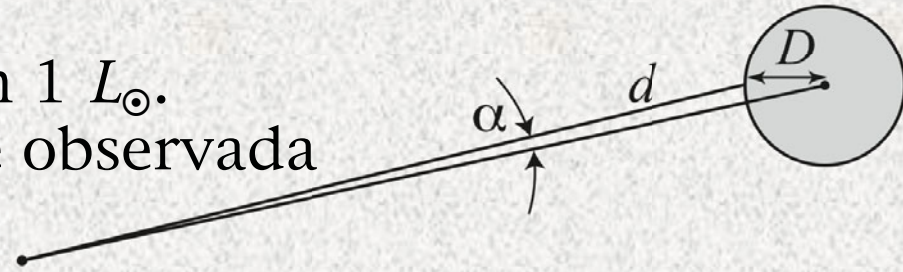
O brilho superficial é independente da distância

- Isto é válido apenas para distâncias não cosmológicas.
- Para grandes distâncias, o brilho superficial diminui com a distância.

Brilho superficial

- Qual é a correspondência entre $L_{\odot}/\text{pc}^2$ e $\text{mag}/\text{arcsec}^2$?

- Suponha uma área de 1 pc^2 com $1 L_{\odot}$.
Suponha que esta mesma área é observada em $(1 \text{ arcsec})^2$.



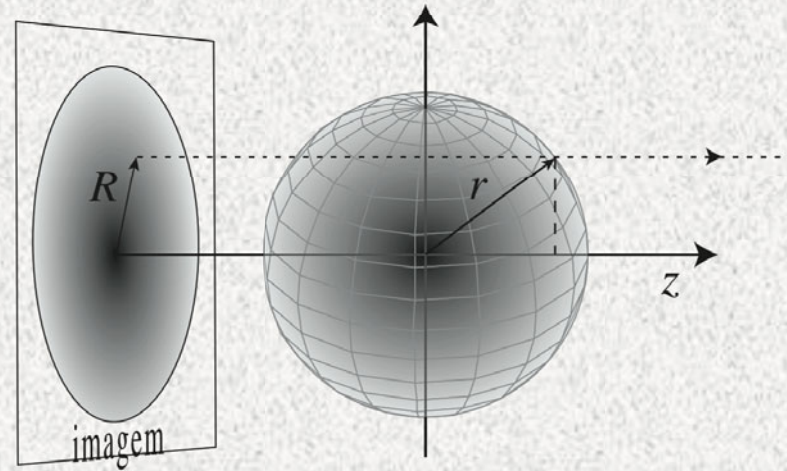
- $I = 1 L_{\odot} / \text{pc}^2$ e $\mu = x \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. O problema é achar x .
- $m - M_{\odot} = 5 \log d_{\text{pc}} - 5$ [pois $L = 1 L_{\odot}$]
- $d_{\text{pc}} = D_{\text{pc}} / (1'')_{\text{rad}} = 1 \text{ pc} / [\pi / (180 \times 3600)]$
- $\mu [\text{mag}/\text{arcsec}^2] = \mu_0 - 2,5 \log I [L_{\odot}/\text{pc}^2]$.
- $\mu [\text{mag}/\text{arcsec}^2] = M_{\odot} + 5 \log d_{\text{pc}} - 5 - 2,5 \log I [L_{\odot}/\text{pc}^2]$.
- $\mu [\text{mag}/\text{arcsec}^2] = M_{\odot} + 21,572 - 2,5 \log I [L_{\odot}/\text{pc}^2]$.
- $M_{\odot} = 5,48 (B); 4,83 (V); 4,42 (R); 5,21 (g'); 4,50(r'); 4,16(i')$

Brilho superficial

- Alguns valores para comparação:
 - Céu noturno,
(Lua Nova) : $\mu_B = 22,7$; $\mu_R = 20,9$; $\mu_H = 13,7$ [mag/'²]
(Lua Cheia): $\mu_B = 19,5$; $\mu_R = 19,9$; $\mu_H = 13,7$ [mag/'²]
 - Dia claro : $\mu_V = \sim 3$ [mag/'²]
 - Céu é mais brilhante no infra-vermelho do que no azul.
 - O brilho da Lua afeta observações no azul, mas não no IV.
- Pela relação entre μ e I : $I_{\text{obl}}/I_{\text{céu}} = 10^{(2/5)(\mu_{\text{céu}} - \mu_{\text{obj}})}$.
 - P. ex., $\mu = 25$ [mag/'²] banda $R \Rightarrow I_{\text{obj}} = 12\%$ do céu.

Distribuição espacial da emissividade

- Projeção 3D $\rightarrow$ 2D
- Só é tratável analiticamente em casos simples.
- Caso particular de simetria esférica:



$$I(R) = \int_{-\infty}^{+\infty} j(r) dz = 2 \int_R^{\infty} j(r) \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}$$

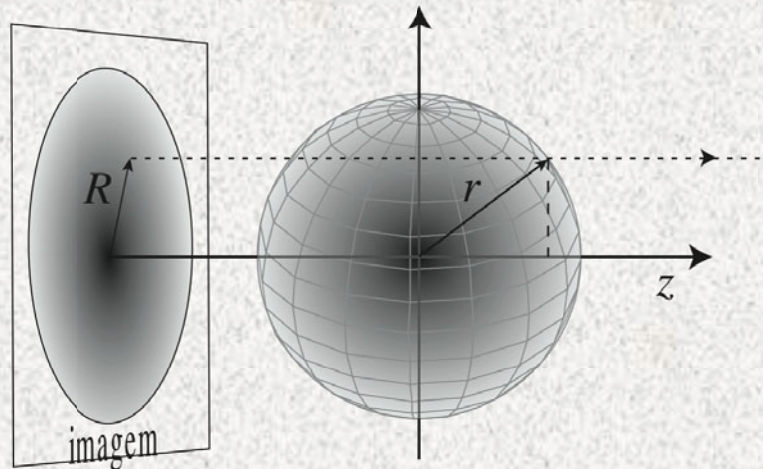
- Mas, em geral, nós observamos a distribuição projetada (isto é, o brilho superficial) e queremos obter a distribuição volumétrica, a densidade de luminosidade em 3D.

Deprojeção

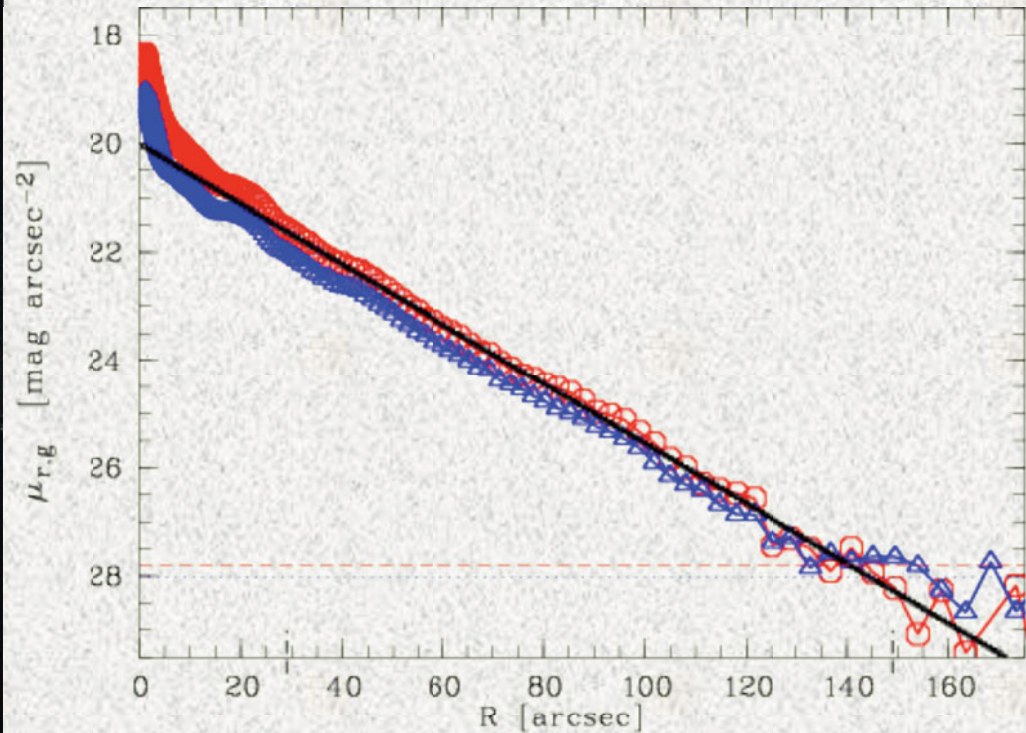
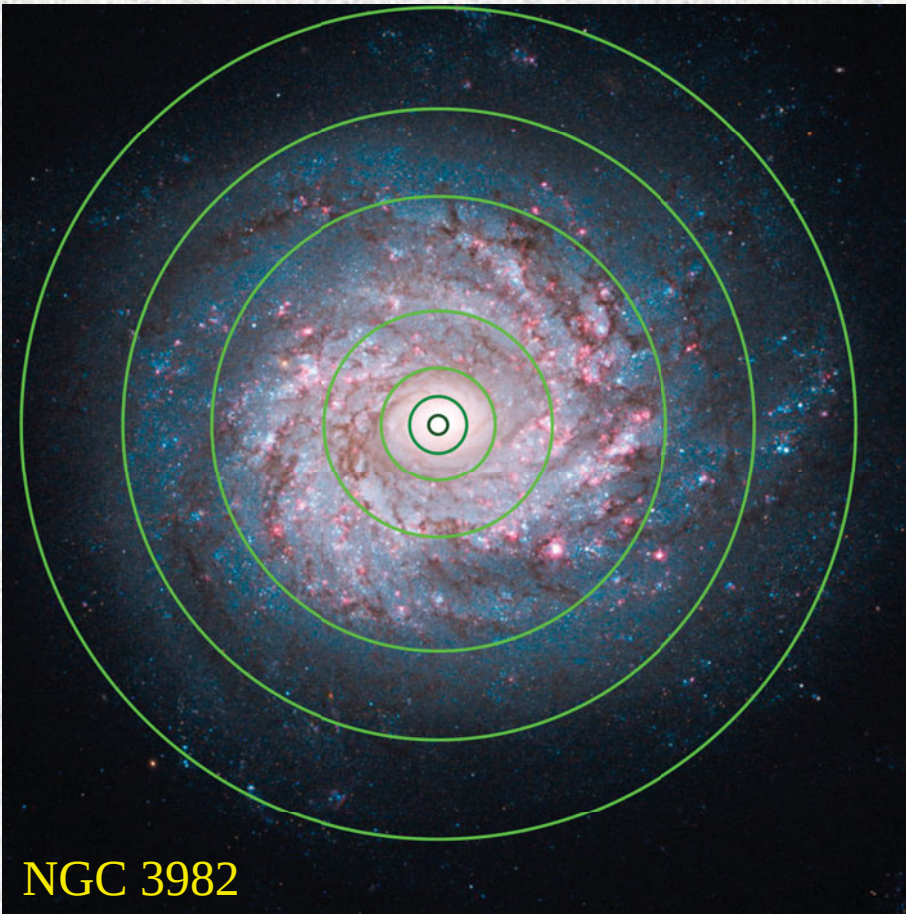
- A deprojeção do brilho superficial vem da solução de uma equação integral, conhecida como Equação de Abel:

$$I(R) = \int_{-\infty}^{+\infty} j(r) dz = 2 \int_R^{\infty} j(r) \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}$$

$$j(r) = -\frac{1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_r^{\infty} I(R) \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}} = -\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{dI(R)}{dR} \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}}$$



Perfil radial de brilho superficial



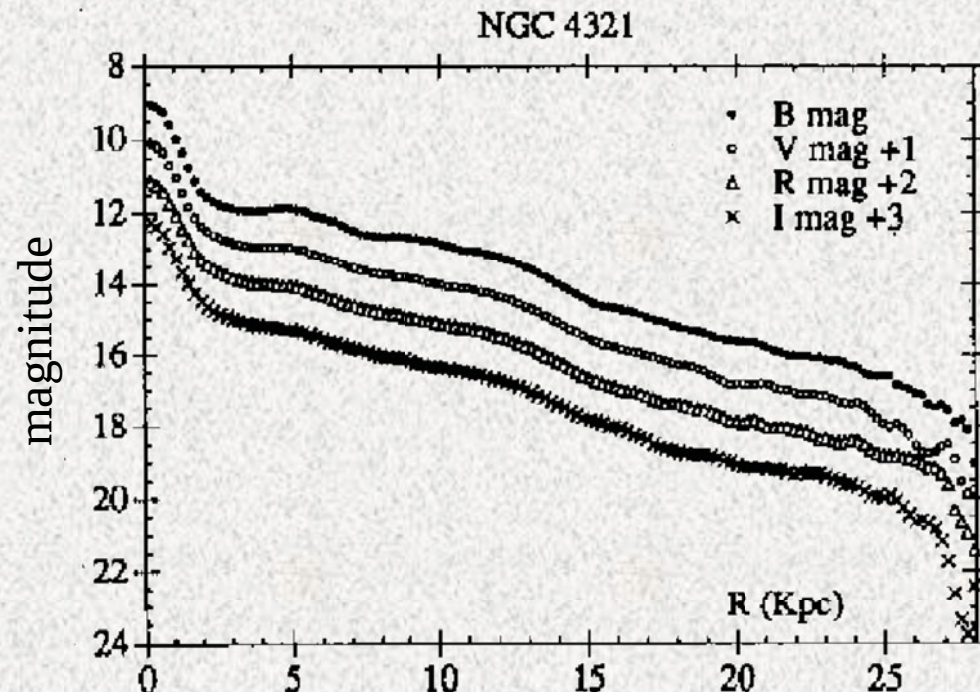
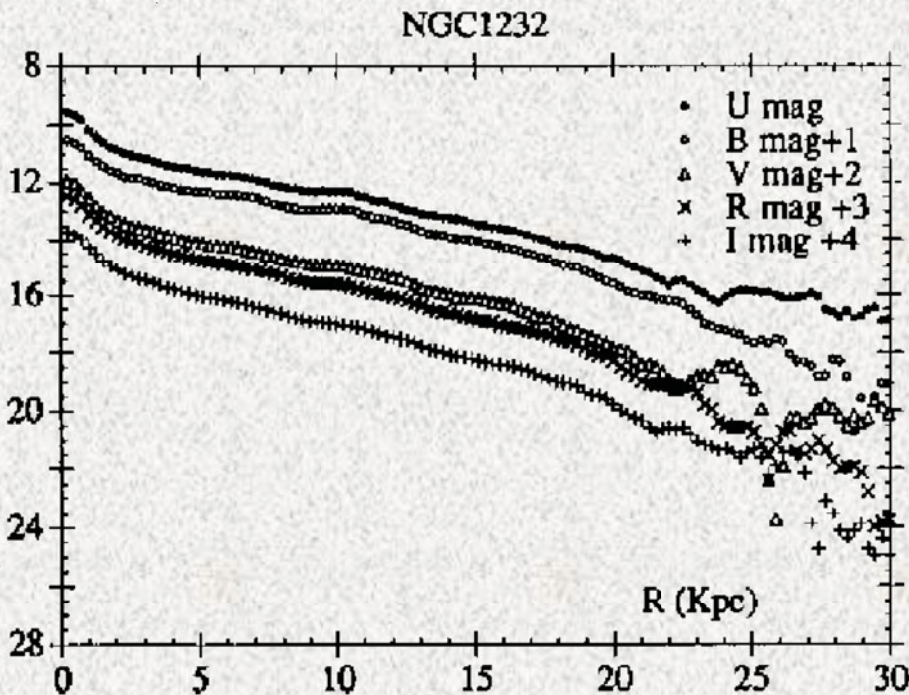
- Mede-se o fluxo em anéis concêntricos.
- Em geral podem ser círculos ou elipses, mas também podem ser isofotas (curvas de mesmo brilho superficial).

Perfil radial de Brilho Superficial

- Discos de galáxias espirais: Perfil exponencial

$$I(R) = I(0) \exp \left[-\frac{R}{R_d} \right] \Rightarrow \mu(R) = \mu(0) + 1,08574 \frac{R}{R_d}$$

$$2,5 \log(e) \simeq 1,08574 \dots$$



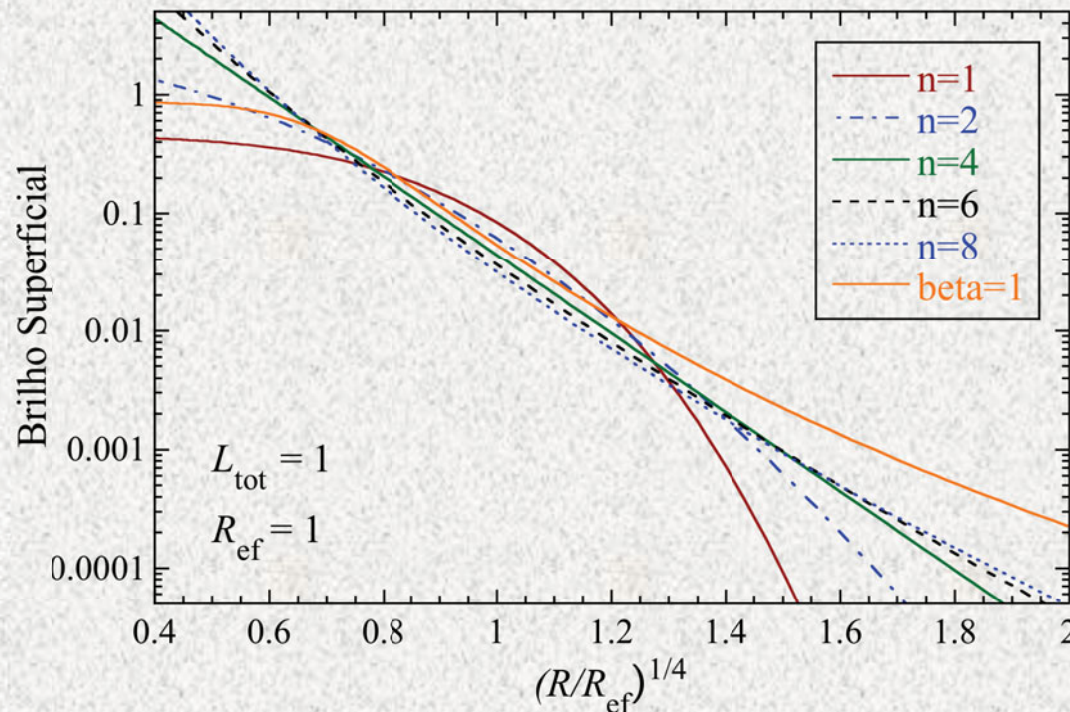
Perfil radial de Brilho Superficial

- Galáxias elípticas e bojos.

de Vaucouleurs : $I(R) = I(0) \exp \left[- \left(\frac{R}{R_a} \right)^{1/4} \right] ;$

Sérsic : $I(R) = I(0) \exp \left[- \left(\frac{R}{R_a} \right)^{1/n} \right] ;$

Modelo- β : $I(R) = I(0) \left[1 + \left(\frac{R}{R_c} \right)^2 \right]^{1/2 - 3\beta/2} .$



Luminosidade e Raio efetivo

$$\text{Luminosidade : } L(< R) = \int_0^R I(R) d\Omega = 2\pi \int_0^R I(R) R dR$$

$$\text{Luminosidade : } L_{\text{tot}} = 2\pi \int_0^\infty I(R) R dR$$

- Raio efetivo = raio que contém metade da luminosidade total

$$\frac{L_{\text{tot}}}{2} = 2\pi \int_0^{R_{\text{ef}}} I(R) R dR$$

- Caso do perfil de de Vaucouleurs (feito numericamente):

$$L_{\text{tot}} = 8\pi I_0 R_a^2 \Gamma(8).$$

$$R_{\text{ef}} = 3459,49 R_a.$$

Brilho superficial efetivo

- $I(R_{\text{ef}})$ = brilho superficial efetivo
- Outra definição: brilho superficial médio efetivo:

$$\langle I(R_{\text{ef}}) \rangle = L(R_{\text{ef}}) / \pi R_{\text{ef}}^2 = (L_{\text{tot}}/2)(1/\pi R_{\text{ef}}^2) .$$

- Para o perfil de de Vaucouleurs:

$$\langle I(R_{\text{ef}}) \rangle = 0,00168 I_0.$$

Background e Seeing

- Tanto o fundo (soma de todas as componentes não resolvidas) e o seeing (PSF, efeito da atmosfera e óptica do telescópio) devem ser levados em conta na análise fotométrica.

- Perfil observado:

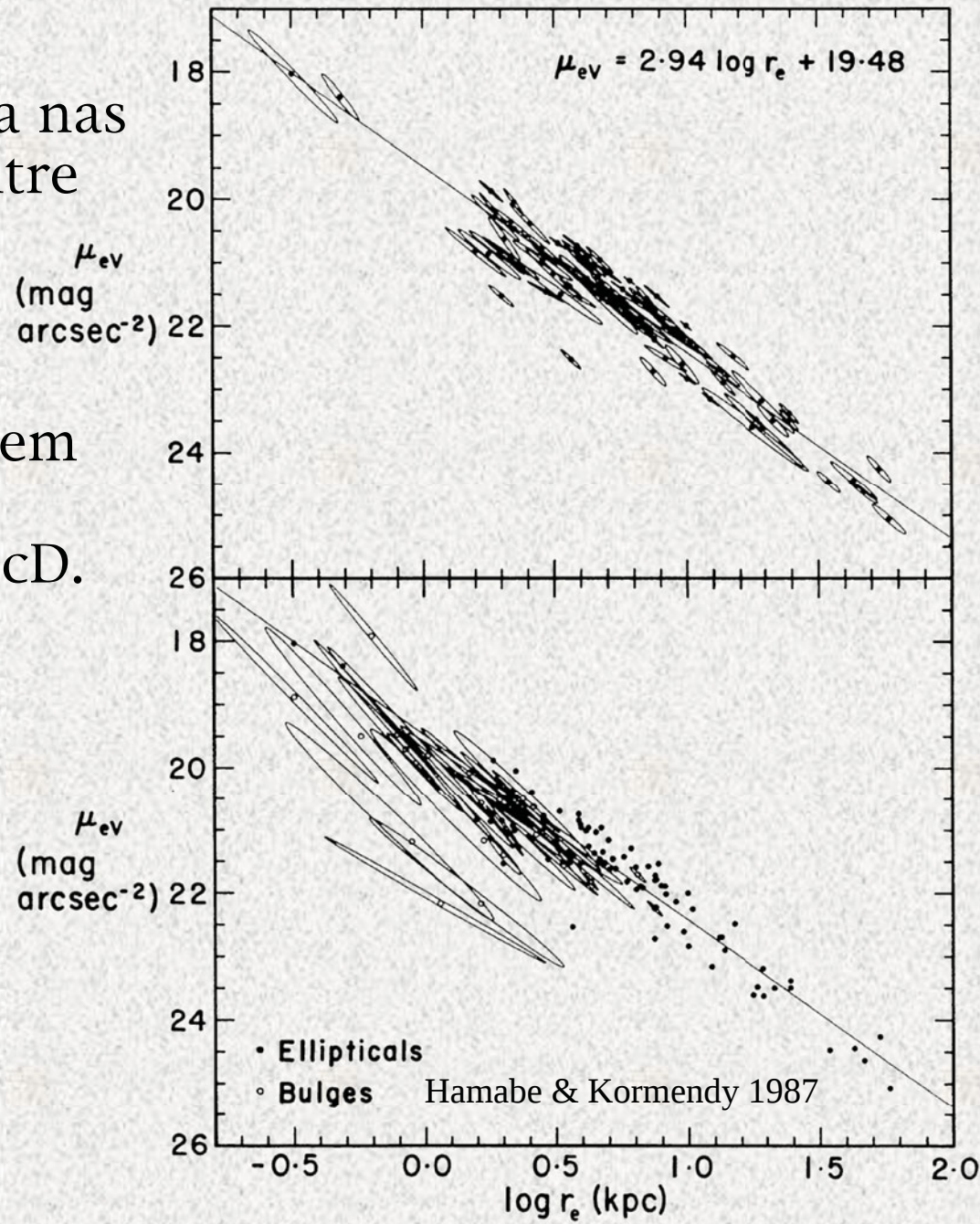
$$I_{\text{obs}}(R) = \int [I(R') + B] \text{PSF}(R - R') d^2 R'$$

- No caso mais simples, a PSF pode ser tratada como uma gaussiana.



Relação de Kormendy

- Relação de escala observada nas galáxias elípticas e bojos entre o raio efetivo e o brilho superficial efetivo.
- Nem todas as elípticas seguem precisamente o perfil $R^{1/4}$: galáxias anãs, galáxias tipo cD.



Atividade prática: perfil de brilho superficial de galáxias elípticas

- Linearizar a função de de Vaucoulers:

$$I(R) = I_0 \exp \left[- \left(\frac{R}{R_a} \right)^{1/4} \right] ;$$

$$- 2.5 \log I(R) = -2.5 \log I_0 - 2.5 \log \left\{ \exp \left[- \left(\frac{R}{R_a} \right)^{1/4} \right] \right\} ;$$

$$\mu(R) = \mu_0 + \frac{2.5}{\ln 10} \left(\frac{R}{R_a} \right)^{1/4} ;$$

$$\mu(R) = \mu_0 + b X ; \quad X \equiv R^{1/4}, \quad b \equiv \frac{1.0857362}{R_a^{1/4}}$$

Seleção de galáxias elípticas

- Usando o catálogo RC3 (de Vaucouleurs 1993), acessível em <http://vizier.u-strasbg.fr/>, selecionar as galáxias com os seguintes critérios:
 - declinação $> -1^\circ$ (para podermos ter imagens no SDSS)
 - mag < 15 e redshift entre 0.002 e 0.02 (imagens grandes o suficiente para análise fotométrica espacial).
- Procurar pela imagem no site *SDSS DR8 Finding Chart Tool*: <http://skyserver.sdss3.org/dr8/en/tools/chart/chart.asp>
- Se a imagem estiver presente, ir na opção “explore” e baixar a imagem fits.
- Galáxias selecionadas em www.astro.iag.usp.br/~gastao/aga414

Perfil radial de brilho superficial

- Para ver todas as galáxias simultaneamente:

```
%> ds9 -log -zoom 0.5 NGC*_SDSSr.fits -scale limits -0.001 50.0 -match scales &
```

- No IRAF:
 - usar a tarefa ellipse para ajustar elipses às isofototas.
 - tarefa bmodel para gerar um modelo não paramétrico.
 - tarefa tdump para gerar uma tabela com o perfil radial de brilho superficial.
- No programa preferido de cada um:
 - Ajustar o perfil de de Vaucouleurs ao perfil obtido.
 - Obter, a partir do ajuste de perfil, a luminosidade total em ($L_{\odot}$), raio efetivo (em kpc), o brilho superficial efetivo em $\text{mag}/''^2$.