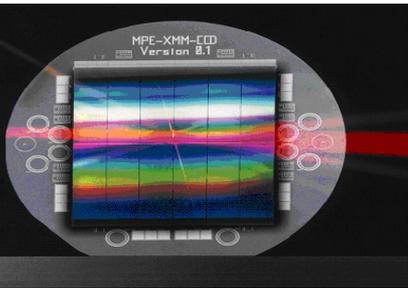
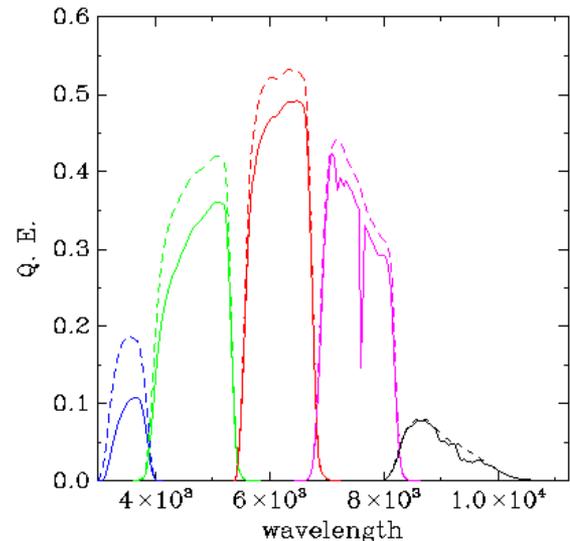


5. Magnitudes das Galáxias

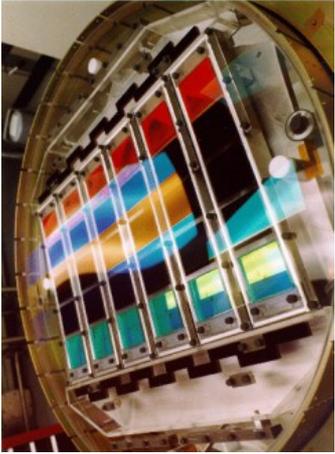
Como se medem magnitudes?



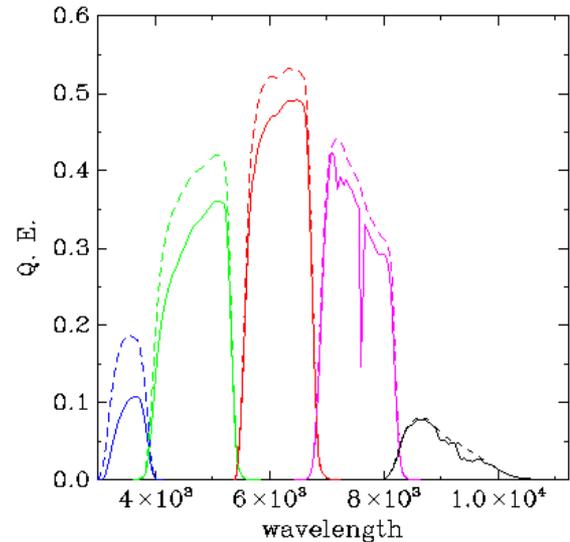
- As imagens no ótico são obtidas com detectores CCD, geralmente através de um *filtro* que só deixa passar fótons dentro de um certo intervalo de comprimentos de onda
- Os CCDs são detectores de fótons, mas o que interessa não é saber o número de fótons em um dado pixel, mas sim o fluxo: a energia por unidade de área por unidade de tempo e por unidade de frequência que chega no pixel.

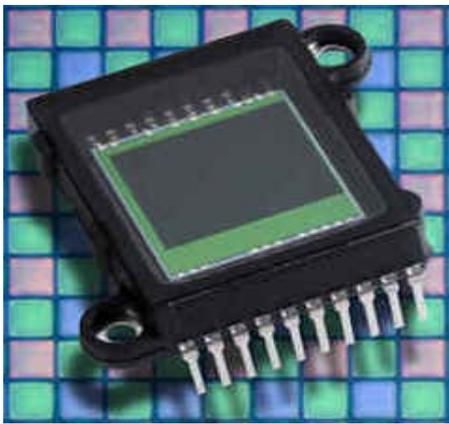


Como se medem magnitudes?



- Para se “calibrar” as medidas obtidas com um CCD (isto é, converter contagens de fótons em fluxo) é necessário se fazer diversas observações adicionais
- Calibração do CCD: requer geralmente medidas de *bias* e *flat-field*:
contagens corrigidas = (contagens medidas - bias)/flat-field
- Calibração fotométrica: requer medidas de extinção atmosférica e de estrelas padrão

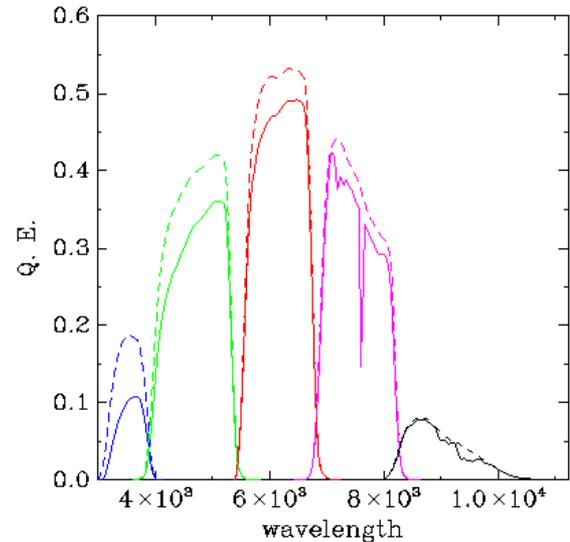




Como se medem magnitudes?



- Corrigindo-se as contagens de fótons por efeitos introduzidos pelo detector, telescópio e atmosfera (um procedimento denominado ***redução*** das observações), obtém-se uma imagem calibrada, onde as contagens são proporcionais ao fluxo.



Magnitudes

- m : medida do fluxo monocromático de um objeto
- Fluxo integrado: $[f_i]$: $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
fluxo integrado numa dada banda
- Fluxo monocromático (= densidade de fluxo):
fluxo numa dada frequência ou comprimento de onda
 $[f_\lambda]$: $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$
 $[f_\nu]$: $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$
- Unidade de fluxo importante: Jansky
 $1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$

Magnitudes

- m : medida do fluxo monocromático de um objeto
- Magnitude aparente: **$m = -2.5 \log (f / f_0)$**
 f_0 é o “ponto zero” da escala de magnitudes

Aqui, e daqui em diante, f pode ser tanto fluxo integrado quanto fluxo monocromático, a menos que explicitamente mencionado o tipo

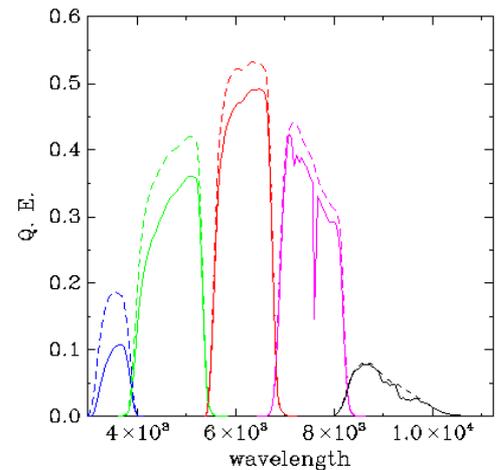
(mas geralmente consideraremos o fluxo monocromático)

Como se medem magnitudes?

- Atualmente os fluxos são medidos em imagens obtidas com detectores CCD equipados com um conjunto de filtros
- S_λ : função de resposta do filtro-dá a sensibilidade resultante no detector em função de λ (ou ν) levando em conta os efeitos da atmosfera, telescópio, detector e filtro
- Fluxo medido num dado filtro:

$$f_i = \int f_\lambda S_\lambda d\lambda$$

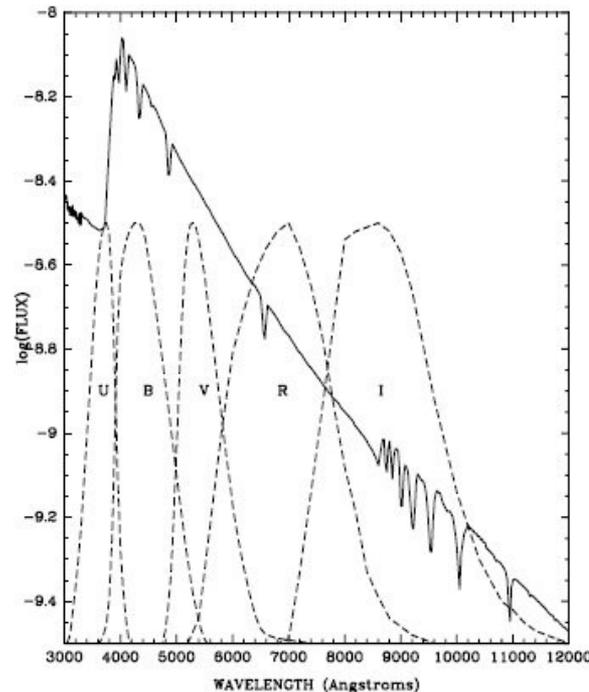
$$\int S_\lambda d\lambda = 1$$



Como se medem magnitudes?

- Sistema de Vega

$$m_{\text{Vega}} = -2.5 \log \left[\frac{\int f_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{\int f_{\lambda}(\text{Vega}) S_{\lambda} d\lambda} \right]$$



Como se medem magnitudes?

- Sistema AB

$$m_{AB} = -2.5 \log \left(\int f_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda / \int S_{\lambda} d\lambda \right) - 48.6$$

(para f_{ν} em $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$)

Note que $f_{\lambda} d\lambda = f_{\nu} d\nu$

Modelo simples de um filtro

- Fluxo integrado num dado filtro:

$$f_i = \int f_\lambda S_\lambda d\lambda$$

$$\int S_\lambda d\lambda = 1$$

- Vamos aproximar por

$$f_i \approx f_{\lambda_0} \Delta\lambda$$

onde λ_0 é o comprimento de onda central e $\Delta\lambda$ a largura da *banda fotométrica*

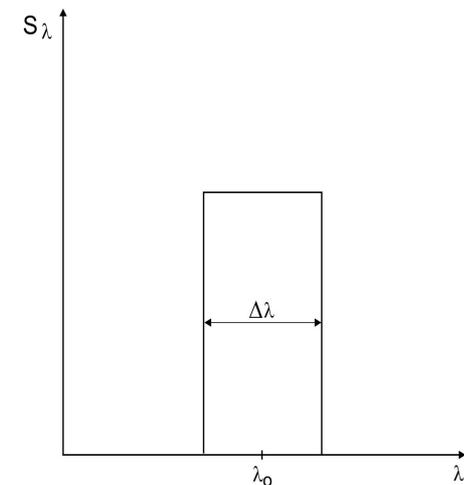
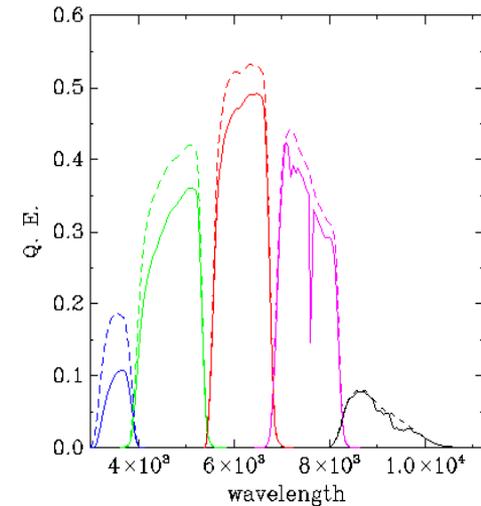


Tabela 1: Sistema Fotométrico Padrão (Zombeck, pag. 100)

banda	λ_0 (μm)	$\Delta\lambda$ (μm)	$f_\lambda(0)$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$)	$f_\nu(0)$ ($\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$)
U	0.365	0.068	4.27×10^{-9}	1.90×10^{-23}
B	0.44	0.098	6.61×10^{-9}	4.27×10^{-23}
V	0.55	0.089	3.64×10^{-9}	3.67×10^{-23}
R	0.70	0.22	1.74×10^{-9}	2.84×10^{-23}
I	0.90	0.24	8.32×10^{-10}	2.25×10^{-23}
J	1.25	0.3	3.18×10^{-10}	1.65×10^{-23}
H	1.65	0.4	1.18×10^{-10}	1.07×10^{-23}
K	2.2	0.6	4.17×10^{-11}	6.73×10^{-24}
L	3.6	1.2	6.23×10^{-12}	2.69×10^{-23}
M	4.8	0.8	2.07×10^{-12}	1.58×10^{-23}
N	10.2		1.23×10^{-13}	4.26×10^{-25}

λ_0 - comprimento de onda do centro da banda; $\Delta\lambda$ - largura da banda (FWHM: largura à meia altura); $f_\lambda(0)$ e $f_\nu(0)$ - fluxos de uma estrela de magnitude zero

Exemplo: a que magnitude aparente corresponde um fluxo de $1 \mu\text{Jy}$ na banda J?

- Sistema de Vega:

$$f_j = 1 \mu\text{Jy} = 10^{-6} \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

$$f_j(0) = 1.65 \times 10^{-23} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ (ver tabela 1)}$$

$$m_j = -2.5 \log(f_j / f_j(0)) = 23.04$$

- Magnitude AB:

$$f_j = 1 \mu\text{Jy} = 10^{-6} \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} = \\ 10^{-29} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

$$m_{\text{AB}} = -2.5 \log f_j - 48.6 = 23.9$$

Magnitude Absoluta

- M = magnitude absoluta = magnitude aparente a uma distância de 10 pc

- relação entre fluxo f e luminosidade L para uma fonte à distância d :

$$f = L / (4\pi d^2)$$

- logo,

$$m - M = 5 \log(d/10) = 5 \log(d) - 5$$

para d medido em pc

- $m - M$: módulo de distância

Magnitude Absoluta

- magnitude absoluta = magnitude aparente a uma distância de 10 pc

$$m-M = 5 \log(d/10) = 5 \log(d) - 5$$

para d medido em pc

- Exercício: como fica o módulo de distância para d medido em Mpc?

Luminosidades em unidades solares

- A magnitude absoluta é uma medida de luminosidade :

$$L \propto 10^{-0.4M} = \text{dex}(-0.4 M)$$

- Em termos de unidades solares, numa certa banda X:

$$L_X = \text{dex}[-0.4(M_X - M_{X,S})] L_{X,S}$$

onde $L_{X,S}$ e $M_{X,S}$ são a luminosidade e a magnitude absoluta do Sol na banda X

Luminosidades em unidades solares

- Em termos de unidades solares, numa certa banda X:

$$L_X = \text{dex}[-0.4(M_X - M_{X,S})] L_{X,S}$$

onde $L_{X,S}$ e $M_{X,S}$ são a luminosidade e a magnitude absoluta do Sol na banda X

- Para $X = U, B, V, R, I$, temos que, no sistema de Vega:

$$M_{X,S} = 5.66, 5.47, 4.82, 4.28, 3.94$$

- Para $X = u, g, r, i, z$ (SDSS, Blanton et al. 2003), no sistema AB:

$$M_{X,S} = 6.80, 5.45, 4.76, 4.58, 4.51$$

Exemplo: a magnitude absoluta do Sol na banda V é +4.82. Qual é a fração da energia solar que é emitida nessa banda?

- $M_V = -2.5 \log (f_V / f_0)$
- Sistema de Vega: $f_0 = 3.64 \times 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ (ver tabela)
- Para $M_V = +4.82$, $f_V = 4.30 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$
- Como $\Delta\lambda_V = 890 \text{ \AA}$, vem que $F_V \approx f_V \Delta\lambda_V = 3.82 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

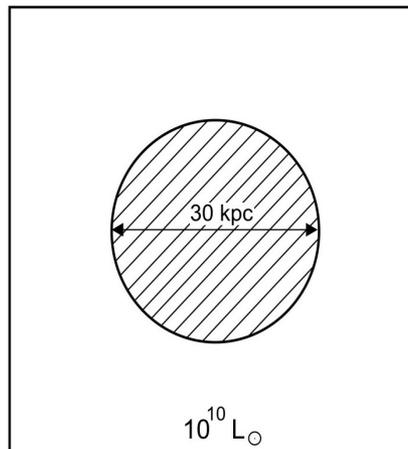
Exemplo: a magnitude absoluta do Sol na banda V é +4.82. Qual é a fração da energia solar que é emitida nessa banda?

- $F_V \approx f_V \Delta\lambda_V = 3.82 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Como M_V corresponde à magnitude da fonte se ela estivesse a $d = 10 \text{ pc}$, a luminosidade do Sol na banda V é $L_V = 4\pi d^2 F_V = 4.58 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$
- Como a luminosidade bolométrica (integrada em todos os comprimentos de onda) do Sol é $3.83 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$, a fração da luminosidade total do Sol que é emitida na banda V é $L_V / L_S = 0.119$

O brilho superficial

- Conceito muito importante na astronomia extragaláctica
- Densidade superficial de luminosidade:
 $\Sigma = L/A$ (A: área)
unidades: $L_S \text{ pc}^{-2}$
- Exemplo: qual é a densidade superficial de luminosidade de um disco de 30 kpc de diâmetro com luminosidade de $10^{10} L_S$ visto de face?

$$\Sigma = L/A = 10^{10} L_S / [\pi \times (15 \text{ kpc})^2] = 14.1 L_S \text{ pc}^{-2}$$



O brilho superficial

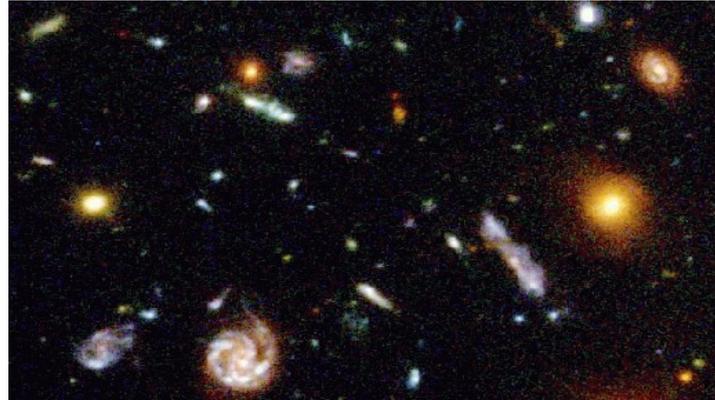
- O brilho superficial é definido em termos de magnitudes e áreas aparentes como:

$$\mu = m + 2.5 \log A$$

A em geral está em unidades de arcsec^2 , então se escreve as unidades de μ como mag arcsec^{-2}

Exemplo: brilho superficial típico do fundo do céu escuro no LNA, em mag arcsec⁻²:

- $\mu_U \approx 21.6$
- $\mu_B \approx 22.0$
- $\mu_V \approx 21.0$
- $\mu_R \approx 20.4$
- $\mu_I \approx 19.3$



- O fluxo proveniente de 1 arcsec² do fundo do céu na banda V é igual ao recebido de uma estrela com $m_V=21.0$
- O fundo do céu fica mais brilhante conforme se vai para o vermelho
- Exemplo: brilho superficial típico de um disco de galáxia espiral: $\mu_V \approx 22.5$ mag arcsec⁻²

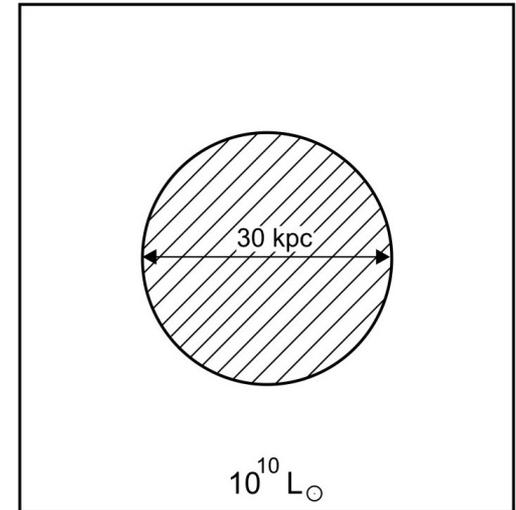
Exemplo: em termos de fluxo, o brilho superficial de 25 mag arcsec⁻² em B está quanto acima do nível do fundo do céu?

- Brilho do céu em B: $\mu_{c,B} \approx 22.0$ mag arcsec⁻²
- logo, $\mu_B - \mu_{c,B} = -2.5 \log(f/f_c) = 3$
- ou, $f \approx 0.063 f_c$
- isto é, este *nível isofotal* está a 6.3% acima do nível do céu

Exemplo: qual é o brilho superficial de um disco (no sistema de Vega) de 30 kpc de diâmetro e luminosidade $10^{10} L_{\odot}$ na banda V, visto de face? Apresente o resultado em $L_{\odot} \text{ pc}^{-2}$ e em mag arcsec $^{-2}$.

- Densidade superficial de luminosidade do disco:

$$\Sigma = L/A = 10^{10} L_{\odot} / (\pi \times (15 \text{ kpc})^2) \approx 14.1 L_{\odot} \text{ pc}^{-2}$$
- Para determinar quanto isso vale em mag arcsec $^{-2}$, vamos supor que $14.1 L_{\odot}$ são emitidos por uma área de 1 pc de lado
- Para que essa área seja vista como um quadrado de 1 arcsec de lado ela deve estar a uma distância d tal que $d = D/\theta$, onde $D = 1 \text{ pc}$ e $\theta = 1 \text{ arcsec} = \pi / (180 \times 3600) \text{ radianos}$
 logo, $d = 180 \times 3600 / \pi \approx 206 \text{ kpc} \approx 6.39 \times 10^{23} \text{ cm}$



Exemplo: qual é o brilho superficial de um disco (no sistema de Vega) de 30 kpc de diâmetro e luminosidade $10^{10} L_{\odot}$ na banda V, visto de face? Apresente o resultado em $L_{\odot} \text{ pc}^{-2}$ e em mag arcsec⁻².

- $d = 180 \times 3600 / \pi \approx 206 \text{ kpc} \approx 6.39 \times 10^{23} \text{ cm}$
- O fluxo, então será: $f_V = 14.1 L_{\odot} / (4 \pi d^2) \approx 1.05 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Logo, como o brilho superficial é a magnitude aparente dentro de uma área de 1 arcsec²,

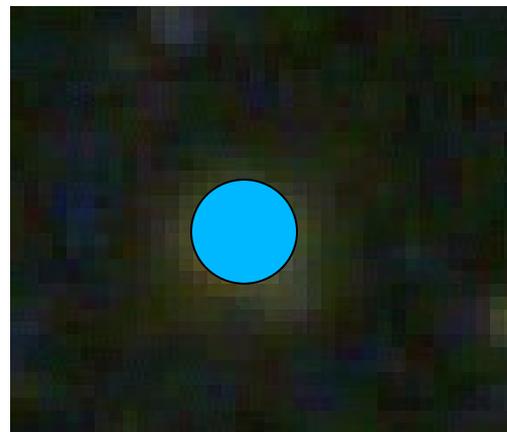
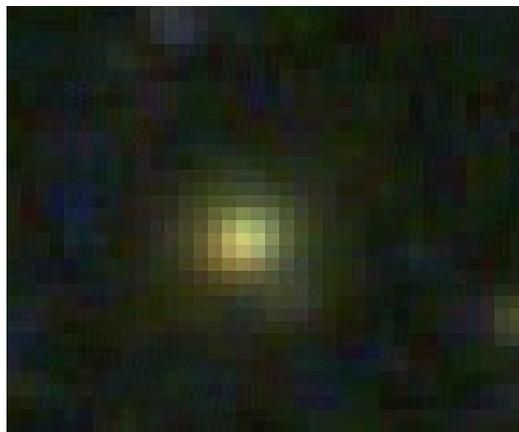
$$\mu_V \approx -2.5 \log(f_V / f_{\lambda V} \Delta\lambda_V) \approx 21.2 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

Como o brilho superficial depende da distância?

- Considere um disco de luminosidade L , raio R e à distância d visto de face
- Densidade superficial de luminosidade: $\Sigma = L/(\pi R^2)$
- Fluxo: $f=L/(4\pi d^2)$
- Diâmetro aparente: $\theta=2R/d$
- Logo, como $\mu = m + 2.5 \log(A)$, $m \propto -2.5 \log (f)$, $A \propto \theta^2$, vem que $\mu \propto 2.5 \log (\theta^2 / f) \propto 2.5 \log (R^2 / L)$
- **Classicamente, o brilho superficial não depende da distância! Mas na cosmologia relativística isso não é verdade...**

Medidas de magnitudes de galáxias

- Galáxias são objetos *extensos*- não pontuais- sem bordas bem definidas: isso leva a várias formas de se medir suas magnitudes
- **Magnitude de abertura:** é a medida da magnitude dentro de uma certa abertura, geralmente circular, centrada no centro da galáxia; a abertura é caracterizada por seu diâmetro D , em arcsec
- Problema: a fração da luz da galáxia que cai dentro da abertura varia com a distância, tamanho, inclinação e tipo da galáxia

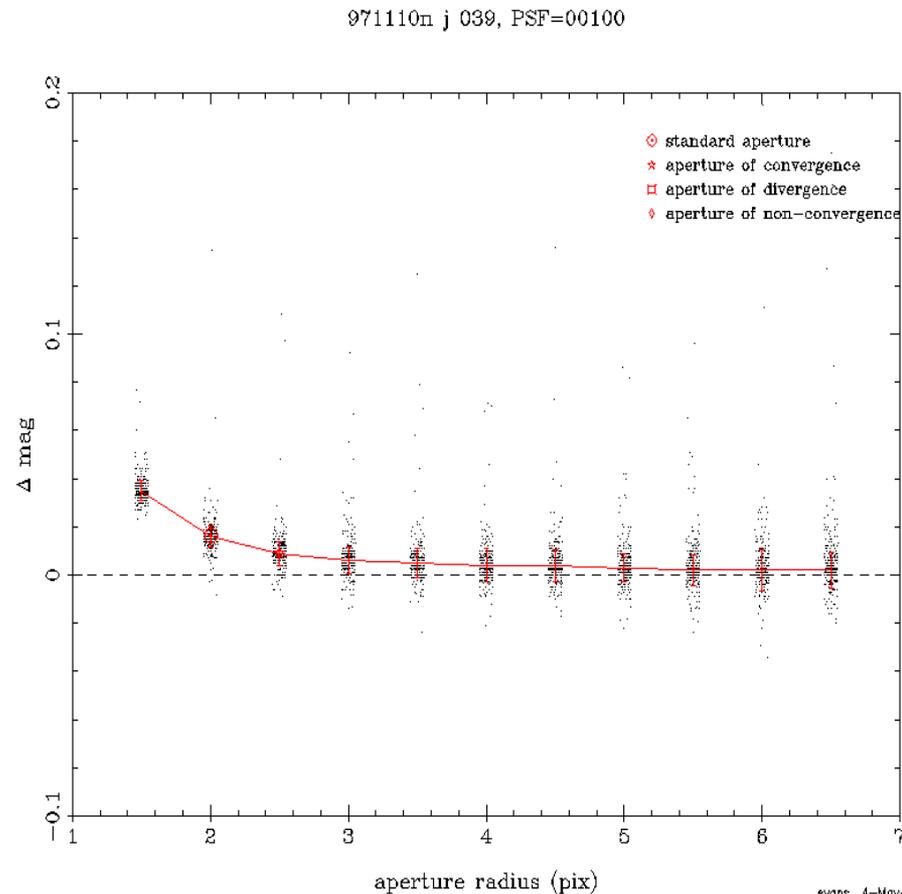


Medidas de magnitudes de galáxias

- **Magnitude de abertura:**

Problema: a fração da luz da galáxia que cai dentro da abertura varia com a distância, tamanho, inclinação e tipo da galáxia

Curva de crescimento



Medidas de magnitudes de galáxias

- **Magnitude total:** é a medida de *toda* a luz da galáxia numa dada banda
- Problema: onde termina a galáxia?
- Pode ser determinada com uma “curva de crescimento”: mede-se a magnitude de abertura $m(D)$ em várias aberturas D e estima-se o valor assintótico de m quando D tende a infinito
- **Magnitude métrica:** medida dentro de uma abertura fixa em kpc

Medidas de magnitudes de galáxias

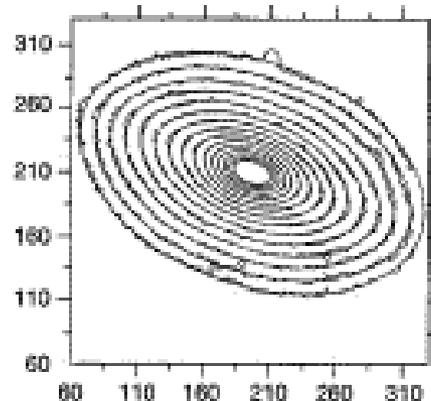
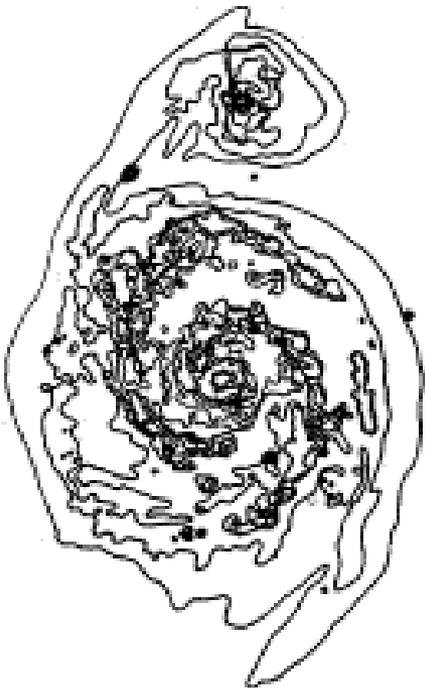
- **Magnitude isofotal:**

- isofotas: regiões de mesmo brilho superficial na imagem de uma galáxia

- magnitude isofotal: magnitude dentro de um dado nível isofotal

- exemplo: $\mu_B = 25 \text{ mag arcsec}^{-2}$ é comumente usado

R_{25} : raio isofotal: raio médio da isofota de $25 \text{ mag arcsec}^{-2}$



isofotas da galáxia espiral M51
e da galáxia elíptica NGC4697

Medidas de magnitudes de galáxias

- **Magnitude de Petrosian:**

- é uma das magnitudes do SDSS
- o objetivo é medir uma fração constante da luz, independentemente da distância da galáxia
- *razão de Petrosian* R_p em um raio r , medido a partir do centro do objeto: é igual à razão entre o brilho superficial em um anel de raio r e o brilho superficial médio dentro do raio r
- *o raio de Petrosian* r_p é definido como o raio onde R_p atinge algum valor fixo (0.2 no caso do SDSS)
- *o fluxo de Petrosian* é o fluxo dentro de um raio igual a $N_p R_p$ (N_p igual a 2 no SDSS)
- *a magnitude de Petrosian* é a magnitude AB correspondente ao fluxo de Petrosian

Absorção da luz na Via Láctea

- O gás e a poeira na Via Láctea absorvem ou espalham parte da luz proveniente de corpos mais distantes
- A extinção estelar tem duas características:
 - atenua a luz das estrelas
 - avermelha a luz das estrelas



Composição dos grãos de poeira:
grafite, silicatos, ferro, gelo sujo (água + amônia + metano + ...), PAHs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), ...

Absorção da luz na Via Láctea

- Atenuação da luz por gás e poeira:

ao percorrer um intervalo de comprimento ds em um meio homogêneo com densidade de partículas n (em cm^{-3}), um feixe de luz de intensidade I_0 é parcialmente absorvido, tal que:

$$dI = I - I_0 = -n \sigma I ds$$

onde σ é a seção de choque de absorção mais espalhamento

- Logo,

$$I = I_0 \exp(-n \sigma s) = I_0 \exp(-\tau)$$

τ : profundidade ótica na banda em consideração

- A absorção em magnitudes A_G devido à Galáxia e a profundidade ótica τ se relacionam como
- $A_G = -2.5 \log(I/I_0) = 2.5 \log(e) \tau \approx 1.086 \tau$

- Correção da magnitude pela absorção galáctica:

$$m_{corr} = m_{obs} - A_G$$

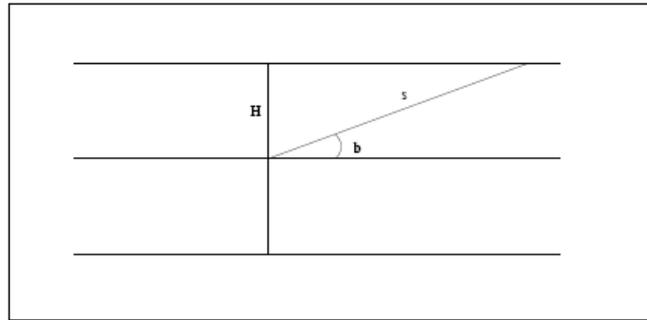
Absorção da luz na Via Láctea

- Dependência com a latitude galáctica b :

o gás e a poeira estão concentrados no disco e, então, espera-se que A_G dependa da latitude galáctica b

supondo que o disco é homogêneo e que tem escala de altura H , a linha de visada dentro do disco entre um observador no plano da Galáxia e uma galáxia na latitude b é:

$$s = H \operatorname{cosec}(b)$$



- Logo,

$$A_G \propto \tau \propto \operatorname{cosec}(b)$$

isto é, a absorção galáctica depende fortemente de b .

- Hoje se utiliza as tabelas preparadas por Schlegel, Finkbeiner and Davis (1998) – ver no NED, por exemplo

Absorção da luz na Via Láctea

- Dependência com o comprimento de onda:
o avermelhamento da luz é produzido pelo espalhamento da radiação por grãos de poeira:

$$\tau_\lambda = n_g \sigma_\lambda s$$

em geral diminui com o comprimento de onda

(a luz azul é mais espalhada que a vermelha)

- NED, absorção na direção de M51:

Bandas	U	B	V	R	I	J	H	K	L'
λ [μm]	0.34	0.44	0.54	0.65	0.80	1.27	1.67	2.22	3.81
A_λ [mag]	0.191	0.152	0.117	0.094	0.068	0.032	0.020	0.013	0.005

- Correção da magnitude pela absorção galáctica:

$$m_{corr} = m_{obs} - A_G$$

Se M51 tem uma magnitude observada na banda B igual a 8.6, sua magnitude corrigida pela absorção galáctica será 8.4

Absorção interna nas galáxias

- Como o gás e a poeira se concentram na componente disco, a absorção da luz em nossa direção pela própria galáxia vai depender de sua *inclinação*: uma galáxia espiral vista de face é mais transparente que vista de perfil
- A absorção interna A_i corrige a magnitude observada para a magnitude que a galáxia teria se fosse observada de face:

$$m_{corr} = m_{obs} - A_i$$

- Essa correção é muito incerta: quão transparente um disco é?



Absorção interna nas galáxias

- Inclinação i : ângulo entre o plano da galáxia e o plano do céu
- Supondo que o disco é intrinsecamente circular e é observado como uma elipse com semi-eixos a e b , então

$$i = \arccos(b/a)$$

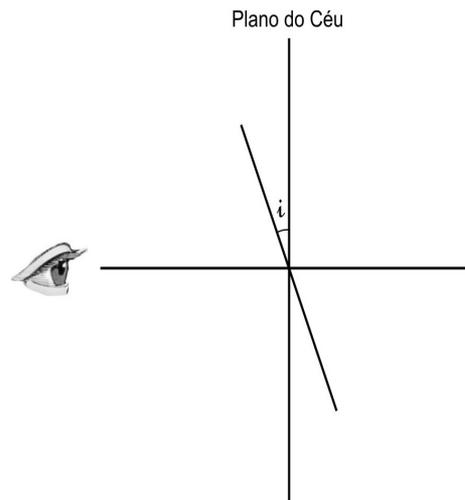
galáxia vista de face: $i=0$

galáxia vista de perfil: $i=90^\circ$

- Esse tipo de correção só é aplicado ocasionalmente
- de Vaucouleurs (RC3): absorção interna na banda B de uma galáxia de tipo T

$$A_B = C(T) \log \left(\frac{a}{b} \right)$$

- $C(T)$: 0 para E - S0
- $C(T)$: 1.0 para Sa
- $C(T)$: 1.4 para Sb
- $C(T)$: 1.5 para Sc
- $C(T)$: 1.4 para Sd
- $C(T)$: 1.0 para Sm



Absorção interna nas galáxias

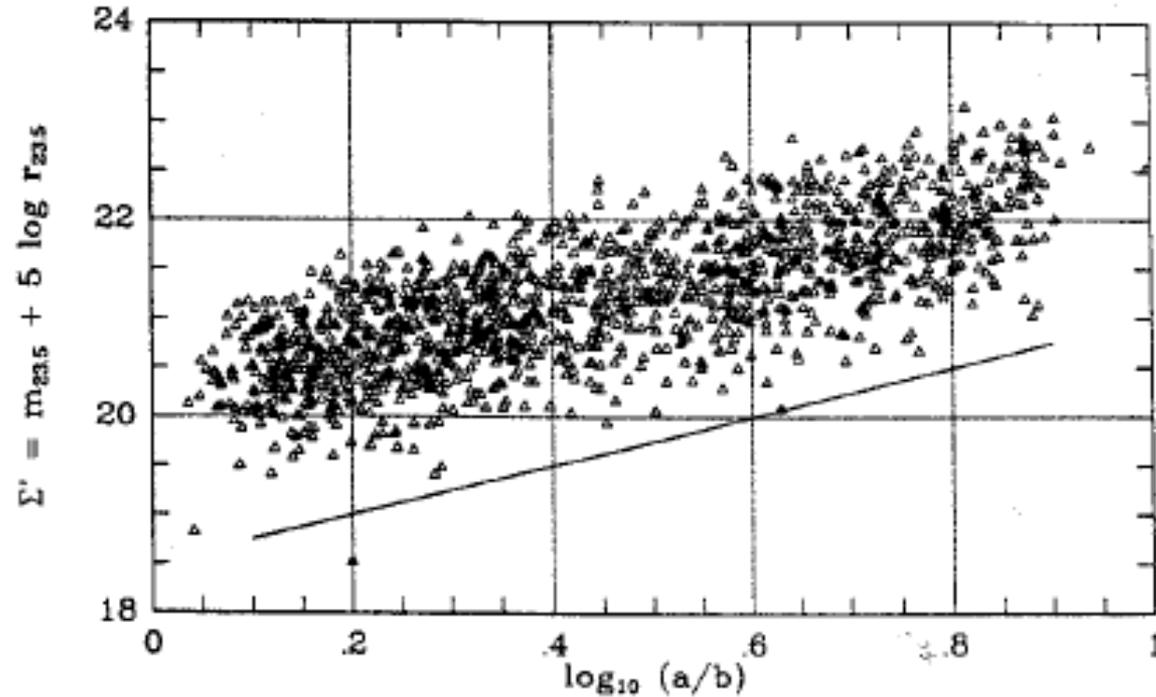


Figura 3.3: Brilho superficial médio em uma abertura circular de raio $r_{23.5}$ (na banda I) versus a razão axial para uma amostra de galáxias Sc. A linha sólida tem inclinação 2.5 (Giovanelli et al., AJ, 107, 2036, 1994).

Exemplo:

- Suponha que uma galáxia Sc tenha as seguintes características: magnitude aparente em r (6165 Å) igual a 14.2; extinção galáctica em r igual a 0.2; módulo de distância de 30.9; diâmetro aparente (eixo maior) de 5 arcmin.; elipticidade igual a 0.5.
- Qual é a inclinação da galáxia?
inclinação: $i = \arccos(b/a)$
elipticidade: $\varepsilon = 1 - b/a$
logo, $i = \arccos(1 - \varepsilon) = \arccos(0.5) = 60^\circ$

Exemplo:

- Suponha que uma galáxia Sc tenha as seguintes características: magnitude aparente em r (6165 Å) igual a 14.2; extinção galáctica em r igual a 0.2; módulo de distância de 30.9; diâmetro aparente (eixo maior) de 5 arcmin.; elipticidade igual a 0.5.

- Qual é a inclinação da galáxia? $i = 60^\circ$

- Qual é seu diâmetro?

módulo de distância: $m-M = 5 \log (d_{Mpc}) + 25 = 30.9$

logo, sua distância é $d_{Mpc} = 15.1 \text{ Mpc}$

seu diâmetro aparente é de 5 arcmin: $\theta = D/d = 5 \text{ arcmin};$

logo, o diâmetro da galáxia será

$$D = \theta d = 5 \times \pi / (180 \times 60) \times 15.1 \text{ Mpc} \approx 22 \text{ kpc}$$

Exemplo:

- Suponha que uma galáxia Sc tenha as seguintes características: magnitude aparente em r (6165 Å) igual a 14.2; extinção galáctica em r igual a 0.2; módulo de distância de 30.9; diâmetro aparente (eixo maior) de 5 arcmin.; elipticidade igual a 0.5.

- Determine a magnitude aparente corrigida da galáxia

$$r_{corr} = r - A_G - A_i \quad r=14.2; \quad A_G=0.2$$

para determinar a extinção interna, vamos adotar o método de de Vaucouleurs e supor que $C(T)=1.5$ na banda r

$$A_i = C(T) \log(a/b) = 1.5 \times \log(2) = 0.45$$

$$\text{logo, } r_{corr} = 14.2 - 0.2 - 0.45 \approx 13.5$$

- Qual é a magnitude absoluta da galáxia?

$$m-M = 30.9, \text{ logo, } M=13.5 - 30.9 = -17.4 \quad (\text{na banda r})$$

Exemplo:

- Suponha que uma galáxia Sc tenha as seguintes características: magnitude aparente em r (6165 Å) igual a 14.2; extinção galáctica em r igual a 0.2; módulo de distância de 30.9; diâmetro aparente (eixo maior) de 5 arcmin.; elipticidade igual a 0.5.

- Qual é o brilho superficial médio da galáxia?

$$\mu = m + 2.5 \log A \quad m=13.5$$

A: área em arcsec²

imagem elíptica de semi-eixos a e b : $A = \pi ab$ $a = 2.5 \text{ arcmin}$

$$A = \pi ab = \pi a^2 (1-\varepsilon) = 35343 \text{ arcsec}^2$$

$$\text{Logo, } \mu = 13.5 + 11.4 \approx 24.9 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

Magnitudes de galáxias distantes

- Para se determinar a luminosidade de galáxias distantes é necessário se levar em contas efeitos cosmológicos
- O principal é o *desvio espectral*:

- o desvio espectral é definido como

$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_e}{\lambda_e}$$

- onde λ_e é o comprimento de onda com que uma certa radiação é emitida e λ_{obs} é o comprimento de onda em que essa radiação é observada
- $\lambda_{obs} > \lambda_e$: desvio para o vermelho - *redshift*
- $\lambda_{obs} < \lambda_e$: desvio para o azul - *blueshift*

Redshift: a galáxia se afasta

Blueshift: a galáxia se aproxima

Magnitudes de galáxias distantes

- O redshift mede diretamente a expansão do universo!

$$1+z = a_0 / a$$

onde a é o *fator de escala* do universo no redshift z e a_0 é o fator de escala hoje

Exemplo: em $z=1$ as escalas eram a metade do que são hoje

- Num universo em expansão, as escalas aumentam proporcionalmente ao fator de escala a , inclusive o comprimento de onda dos fótons:

$$1+z = \lambda_{obs} / \lambda_e$$

- Como a maioria das galáxias exibe redshift, esse termo virou quase que sinônimo de desvio espectral

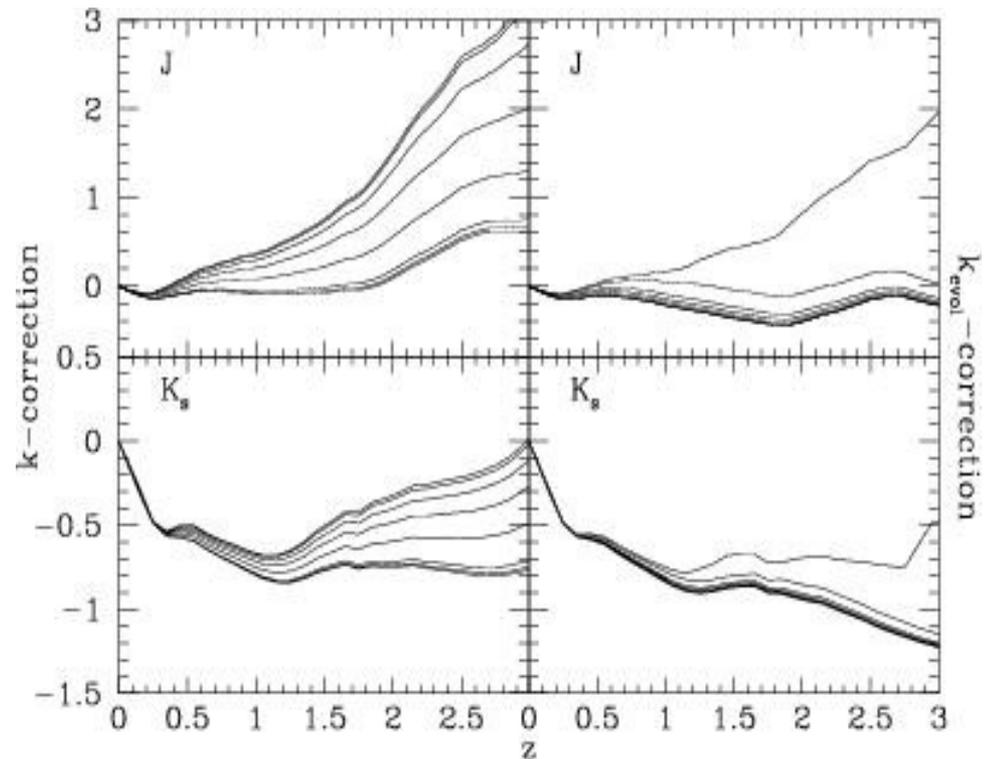
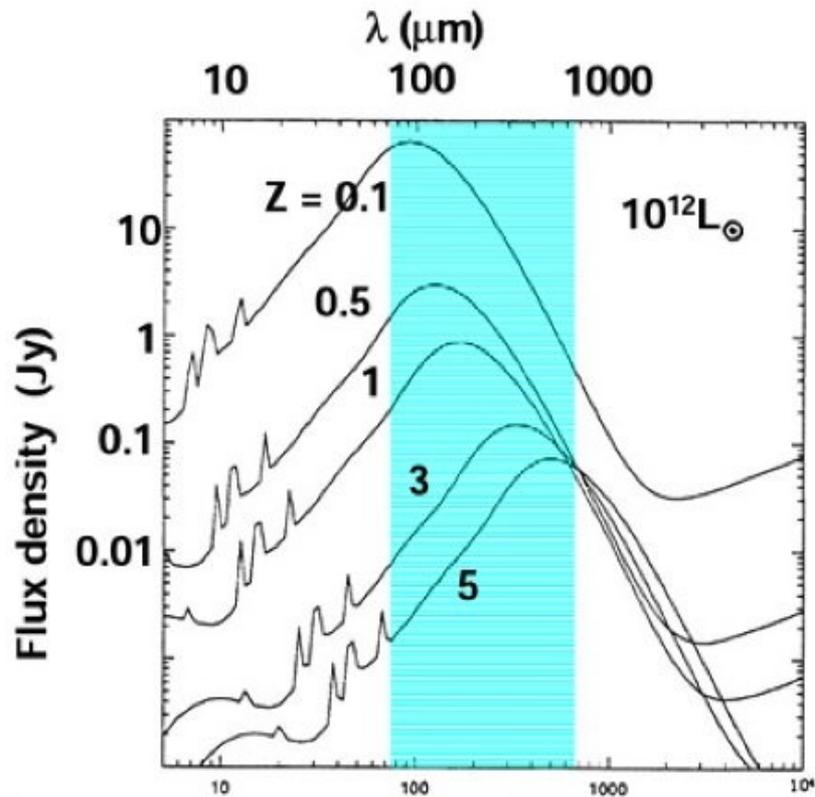
Magnitudes de galáxias distantes

- A correção $k(z)$
- Devido ao desvio espectral, a luz de uma galáxia distante que é observada num comprimento de onda λ_{obs} não foi emitida em λ_{obs} mas num comprimento de onda menor, λ_e
- A correção k permite obter a magnitude numa dada banda num referencial em repouso na galáxia
- Módulo de distância de uma galáxia distante:

$$m-M = 5 \log(d_{l,Mpc}) + 25 + k(z) + A_G$$

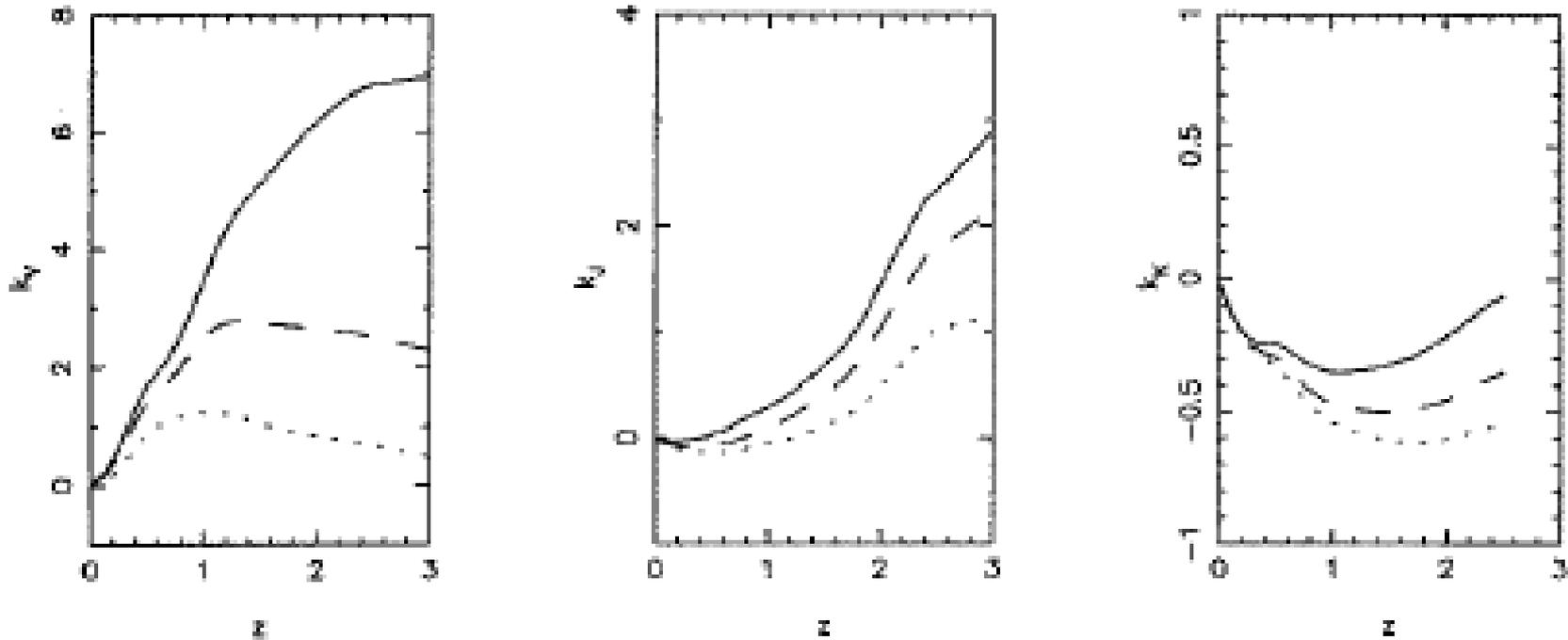
$d_l(z)$: distância de luminosidade

Magnitudes de galáxias distantes



Magnitudes de galáxias distantes

- A correção $k(z)$ depende do tipo da galáxia



Correções $k(z)$ nas bandas V, J, K para galáxias elípticas (linha sólida), Sa (linha tracejada) e Sc (linha pontilhada). De Poggianti (1997).

Como o brilho superficial depende da distância?

- Na cosmologia, o valor da distância depende do tipo da medida.
- Distância de luminosidade d_l : baseada na medida do fluxo :
$$f=L/(4\pi d_l^2)$$
- Distância de diâmetro d_d : baseada na medida do diâmetro aparente:
$$\theta=2R/d_d$$
- Estas duas distâncias NÃO são iguais e se relacionam com o redshift z como:
$$d_l = d_d (1+z)^2$$

Como o brilho superficial depende da distância?

- Na cosmologia as distâncias de luminosidade e diâmetro se relacionam com o redshift z como:

$$d_l = d_d (1+z)^2$$

- Nesse caso pode-se verificar que o brilho superficial, em termos do fluxo integrado, fica

$$\Sigma \propto (1+z)^{-4}$$

no caso de fluxo monocromático,

$$\Sigma \propto (1+z)^{-3}$$

(pois a frequência também depende de z)

- logo, $\mu \propto 7.5 \log (1+z)$

O brilho superficial depende fortemente do redshift

- Brilho superficial: $\mu = \mu_{obs} + 7.5 \log (1+z) + k(z) + A_G$

Exercícios

- (1) Mostre que $m_{AB} = m_{Vega} + m_{AB}(Vega)$.
- (2) A que magnitude aparente no sistema AB corresponde um fluxo de $1\mu\text{Jy}$?
- (3) Escreva o módulo de distância para d em Mpc.
- (4) Qual é o módulo de distância de uma galáxia a 10 Mpc?
- (5) Um erro de 0.5 mag no módulo de distância causa que erro na distância relativa de uma galáxia?
- (6) Mostre como a magnitude absoluta se relaciona com a luminosidade.
- (7) Examine como a densidade de luminosidade e o brilho superficial variam com o redshift z .
- (8) Calcule que fração da luminosidade do Sol que é emitida na banda B.
- (9) Que nível isofotal corresponde a 1% do brilho do céu em B?
- (10) Supondo que A_λ é proporcional a $\lambda^{-\alpha}$, estime α . Use a dependência entre e e de M51.
- (11) Discuta como se pode determinar a absorção interna de uma galáxia.