

## Bloco 3

# Fotometria

Atualizado:  
Setembro/2015

AST203-CVR

3-1

## Bibliografia

- Lena – Cap. 3
- Kitchin – Cap. 3
- Smith – Cap. 8
- Walker – Cap. 1
- Handbook of CCD Astronomy, Steve Howell – Cap. 5 (fotometria de abertura) e 4 (equação do CCD)

### Links

- Observational astronomy: Michael Richmond
  - ↳ <http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/colors/colors.html>
- Sistemas fotométricos – Bessel 2005, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 43: 293
  - ↳ <http://arjournals.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.astro.41.082801.100251>

AST203-CVR

3-2

## Tópicos

- Radiometria
- Magnitude
  - ↳ aparente
  - ↳ absoluta
  - ↳ bolométrica
- Tipo espectral
- Sistemas de magnitudes
- Índices de cor x propriedades estelares
- Calibração fotométrica
- Fotometria com CCDs

AST203-CVR

3-3

## Definindo fotometria

- A fotometria compreende a definição, medida e calibração das quantidades físicas associadas com a energia transportada pela radiação eletromagnética
- Purismo:
  - ↳ fotometria: relativa à radiação no domínio óptico
  - ↳ radiometria: relativa a todo espectro eletromagnético

AST203-CVR

3-4

## Radiometria

- Vamos relebrar alguns conceitos importantes de radiometria (vide curso de Processos Radiativos II)
- **Intensidade específica:** energia emitida por unidade de frequência por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido (área da fonte) por unidade de área coletora (observador)

$$I_{\nu} = \frac{dE_{\nu}}{d\nu dt d\Omega \cos\theta dA}$$

- É importante lembrar que:

$$I_{\nu} |d\nu| = I_{\lambda} |d\lambda|$$

AST203-CVR

3-5

## Pergunta:

- Imagine duas situações onde medimos a energia de objetos celestes:
  - ↳ medida da energia emitida do Sol com resolução espacial suficiente para discerni-lo como mais de um ponto;
  - ↳ medida da energia de um estrela sem resolução espacial.
- Em qual situação medimos fluxo? Em qual, medimos intensidade?

- Sol: intensidade
  - Estrela: fluxo

AST203-CVR

3-7

- **Fluxo (monocromático):** energia emitida por unidade de frequência por unidade de tempo por unidade de área coletora (observador)

$$f_{\nu} = \frac{dE_{\nu}}{dA dt d\nu}$$

$$f_{\nu} = \int_{source} I_{\nu} \cos\theta d\Omega$$

- ↳ Uma unidade de fluxo usada em astronomia: Jansky
  - 1 Jansky =  $10^{-26}$  W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>
- Site útil para conversão de medidas de fluxo
  - ↳ <http://www.gemini.edu/?q=node/11148>

AST203-CVR

3-6

- **Luminosidade:** energia total emitida por um objeto por unidade de tempo

$$L = \int_0^{\infty} \int_{superfície} f_{\nu} dA d\nu$$

↳ Luminosidade monocromática

$$L_{\nu} = \frac{dE_{\nu}}{dt}$$

$$L_{\nu} = \int f_{\nu} dA$$

- Pergunta: Qual é a luminosidade monocromática de um estrela esférica de raio R e fluxo isotrópico  $f_{\nu}$  na sua superfície?

$$L_{\nu} = 4\pi R^2 f_{\nu}$$

AST203-CVR

3-8

## Fluxo x distância

- Como o fluxo depende com a distância,  $d$ , ao objeto?

$$L_\nu = \int f_\nu dA = k$$

$$L_\nu = 4\pi d^2 f_\nu(d)$$

$$f_\nu(d) = \frac{L_\nu}{4\pi d^2}$$

AST203-CVR

3-9

## Radiação de corpo negro

- A radiação de um corpo negro é aquela emitida por um corpo em equilíbrio termodinâmico.

- Sua **intensidade** depende apenas da temperatura do corpo, de acordo com a Lei de Planck. Sua forma em frequência é:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left\{ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right\}^{-1}$$

- O fluxo de uma esfera emitindo isotropicamente como um corpo negro é:

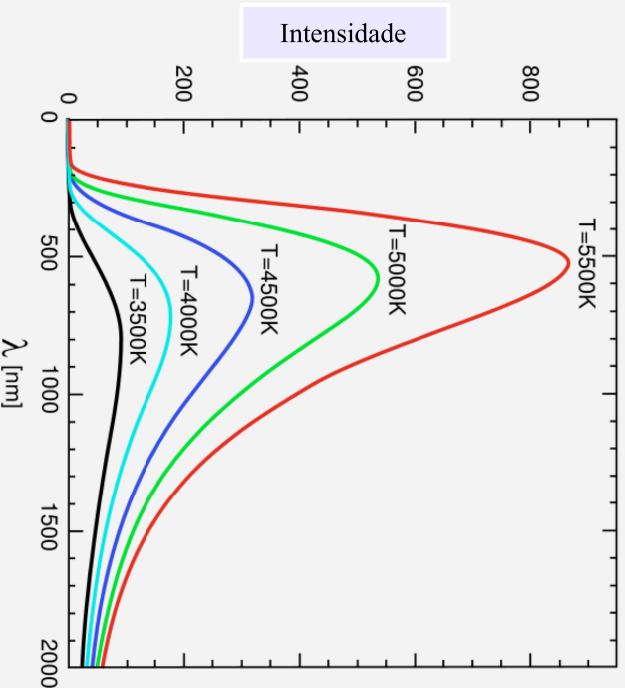
$$f_\nu(T) = \pi B_\nu(T) (R/d)^2$$

- Na superfície da estrela  $d = R$ , de modo que:

$$f_\nu(T) = \pi B_\nu(T)$$

AST203-CVR

3-10



AST203-CVR

Wikipedia  
Black body

3-11

## Luminosidade de um corpo negro

- A Lei de Stefan-Boltzmann define a potência total emitida de um corpo negro

$$\int_{4\pi} \int_0^\infty B_\nu(T) d\nu d\Omega = \sigma T^4$$

- Assim, se aproximarmos uma estrela por um corpo negro, podemos considerar que:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

- Entretanto, o espectro de uma estrela possui diferenças daquele de um corpo negro...

AST203-CVR

3-12

## Temperatura efetiva

- Devido ao espectro estelar não ser exatamente um corpo negro, é adequado definir a temperatura efetiva,  $T_{\text{eff}}$ , de uma estrela
  - ◊ A  $T_{\text{eff}}$  de um objeto é a temperatura de um corpo negro, de mesmo tamanho, e que possui a mesma luminosidade da estrela em questão:

$$L = \int_0^{\infty} \int_{\text{superfície}} f_{\nu} dA d\nu = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

AST203-CVR

3-13

## Magnitude

- O primeiro reconhecimento de que os objetos celestes possuem diferentes brilhos é o resultado de uma medida realizada por nosso olho - um detector de radiação eletromagnética - que discrimina diferentes quantidades de energia
- Hiparcos (11 AC.): catálogo de ~1.000 estrelas com classificação visual em seis categorias de brilho
- Pogson (1856): propõe lei logarítmica consistente com sistema de Hiparcos

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \left\{ \frac{f_1}{f_2} \right\}$$

$f_i$ : fluxo do objeto  $i$

$m_i$ : magnitude do objeto  $i$

AST203-CVR

3-14

## Magnitude aparente

$$m(\lambda) = -2.5 \log \frac{f(\lambda)}{f_o(\lambda)}$$

$$m(\lambda) = -2.5 \log f(\lambda) + q(\lambda)$$

Qual a magnitude de uma estrela com fluxo  $f_o$ ?

- ◊  $f(\lambda)$ : fluxo monocromático de um objeto fora da atmosfera
- ◊  $m(\lambda)$ : magnitude monocromático de um objeto fora da atmosfera
- ◊  $f_o(\lambda)$ : fluxo monocromático de referência
- ◊  $q(\lambda)$ : constante de magnitude zero

AST203-CVR

3-15

1. Magnitude é uma medida relativa de fluxo!
2. Magnitudes não são aditivas!

- Considerando um único comprimento de onda, qual a dependência do magnitude com a distância?

$$m(\lambda) = -2.5 \log f(\lambda) + q(\lambda)$$

$$m(\lambda) = -2.5 \log \left[ \frac{L(\lambda)}{4\pi d^2} \right] + q(\lambda)$$

- Magnitude aparente,  $m$ , é magnitude observada de um dado objeto
  - ⇨ depende de sua distância e da luminosidade da fonte na **banda** que define a magnitude

AST203-CVR

3-16

## Índice de cor

- O índice de cor é a diferença entre duas magnitudes em diferentes bandas espectrais de um mesmo objeto
  - ↳ Uma diferença de magnitudes tende a ser mais precisa que cada valor absoluto!
- Qualquer índice de cor de um corpo negro depende apenas da temperatura
- (B-V) pode ser usado para estimar a temperatura de uma estrela, isto é, seu tipo espectral

AST203-CVR

3-17

- Magnitude absoluta,  $M$** , é a magnitude aparente que o objeto teria se sua distância,  $d$ , fosse 10 pc

$$M - m = -2.5 \log \left[ \frac{d}{10} \right]^2$$

Módulo de distância

$$m - M = 5 \log d - 5$$

- Se sabemos a luminosidade em uma dada banda de um dado objeto, e portanto sua magnitude absoluta, podemos a partir da magnitude aparente determinar a distância
- Exemplos de classes de objetos com luminosidade bem conhecidas:
  - ↳ Cefeidas, RR Lyrae, algumas supernovas

AST203-CVR

3-19

186

Magnitude systems and stellar spectra

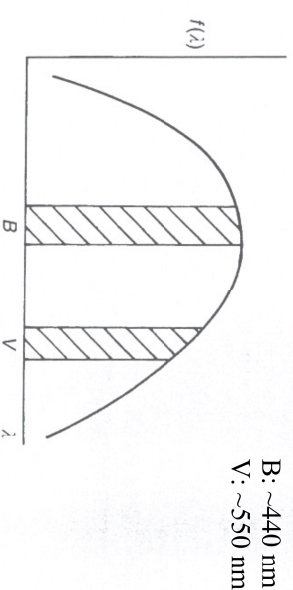


Fig. 8.3. The shape of the continuum in a stellar spectrum can be estimated by measuring the flux in two wavebands (e.g. B and V) and taking the ratio of these fluxes. For a black body, this ratio would be uniquely determined by the temperature

Smith

AST203-CVR

3-18

- Magnitude bolométrica,  $m_{bol}$** , relaciona-se com a energia emitida por um dado objeto integrada em todos os comprimentos de onda, isto é, com a luminosidade

$$m_{bol} = -2.5 \log f + q_{bol}$$

$$M_{bol} = -2.5 \log L + Q_{bol}$$

- onde
  - ↳  $f$  é o "fluxo" integrado em todo espectro,  $f = \int_0^{\infty} f_{\nu} d\nu$
  - ↳  $L$  é a luminosidade integrada em todo o espectro

Qual é a diferença entre  $f$  e  $L$ ?

AST203-CVR

3-20

- Correção bolométrica
  - ↳  $BC = m_{bol} - V = M_{bol} - M_V$
- Escala bolométrica
  - ↳  $BC = 0$  para  $T_{eff} = 6500$  K
- V (B e outras magnitudes) são magnitudes em bandas específicas - vide próximo slide
- $T_{eff}$  é a temperatura efetiva e será definida a seguir. É relacionada à temperatura da estrela.

AST203-CVR

3-21

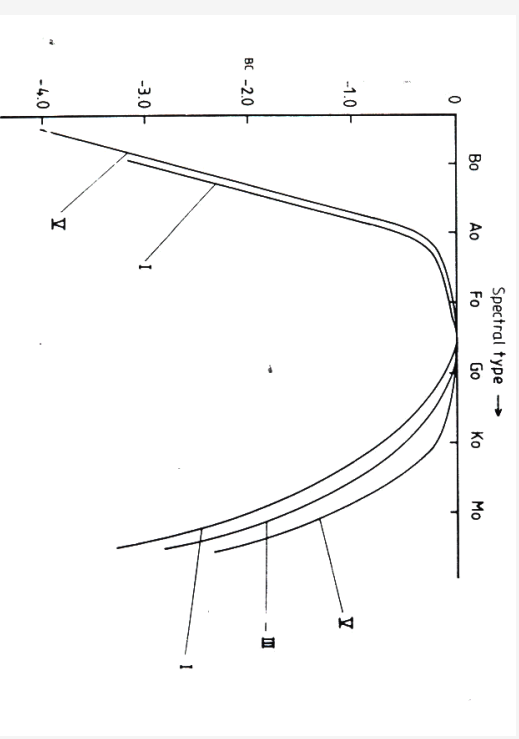
## Tipo espectral

- O espectro fornece muitas informações sobre um objeto astrofísico, em particular, das estrelas
- Classificação dos **espectros estelares** em função das **linhas** presentes e de suas características
  - ↳ Temperatura: OBAFGKM + L (temperatura decresce)
    - com subclasses de 0 a 9
    - intensidade das linhas de Balmer
  - ↳ Luminosidade: I – V + VI e VII (luminosidade decresce)
- Não deixe de conferir:
  - ↳ [http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral\\_class](http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_class)
  - ↳ Morgan & Keenan (1973)

AST203-CVR

3-23

## Correção bolométrica na prática



Kitchin  
 Figure 3.1.4 Bolometric corrections for main sequence stars (type V), giants (type III) and supergiants (type I).  
 AST203-CVR

AST203-CVR

3-22

## Escala de temperatura

O	30,000 - 60,000 K	Blue stars
B	10,000 - 30,000 K	Blue-white stars
A	7,500 - 10,000 K	White stars
F	6,000 - 7,500 K	Yellow-white stars
G	5,000 - 6,000 K	Yellow stars (like the Sun)
K	3,500 - 5,000K	Yellow-orange stars
M	< 3,500 K	Red stars

AST203-CVR

3-24

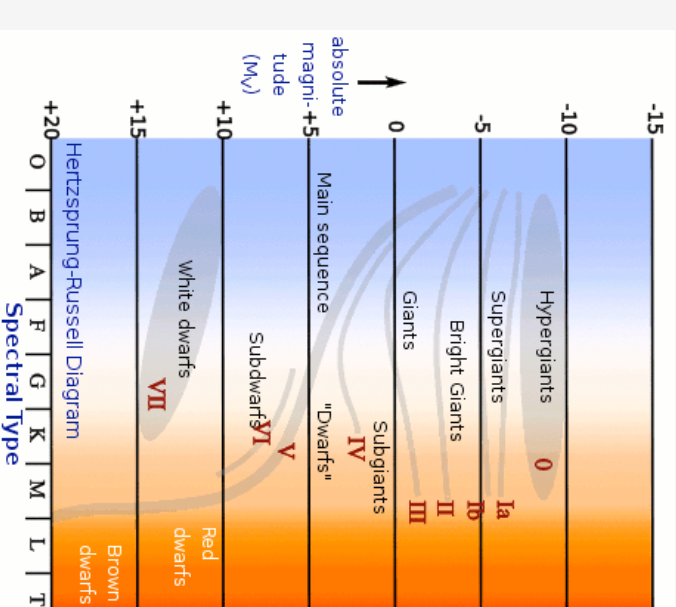
# Escala de Luminosidade

- I supergigantes
- II gigantes brilhantes
- III gigantes
- IV sub-gigantes
- V seqüência principal
- VI sub-anãs
- VII anãs brancas

AST203-CVR

3-25

Wikipedia  
Stellar classification



AST203-CVR

3-26

## 24 • Introdução à Estrutura e Evolução Estelar

Tabela 1.4. Classe I (supergigantes).

Sp	$T_{eff}$	cor	$M_V$	BC	$M_{bol}$	$\log L/L_{\odot}$
(U-B) <sub>0</sub>						
O3	47300	-1.21	-6.8	-4.41	-11.2	6.34
O5	40300	-1.17	-6.6	-3.87	-10.5	6.04
O6	39000	-1.16	-6.5	-3.74	-10.2	5.95
O8	34200	-1.13	-6.5	-3.35	-9.8	5.79
(B-V) <sub>0</sub>						
B0	26000	-1.06	-6.4	-2.49	-8.9	5.41
B3	16300	-0.83	-6.3	-1.26	-7.6	4.88
B5	13600	-0.72	-6.2	-0.95	-7.2	4.72
B8	11200	-0.56	-6.2	-0.66	-6.9	4.60
(B-V) <sub>10</sub>						
A0	9700	-0.38	-6.3	-0.41	-6.7	4.54
A3	8800	-0.14	-6.5	-0.21	-6.7	4.54
A5	8500	-0.07	-6.6	-0.13	-6.7	4.54
A8	7900	0.11	-6.6	-0.03	-6.6	4.51

## Maiel

Propriedades Fixas das Estrelas • 25

Tabela 1.6. Classe III (gigantes).

Sp	$T_{eff}$	cor	$M_V$	BC	$M_{bol}$	$\log L/L_{\odot}$
(U-B) <sub>0</sub>						
O3	50000	-1.22	-6.6	-4.58	-11.2	6.32
O5	42500	-1.18	-6.3	-4.05	-10.3	6.00
O6	39500	-1.17	-6.1	-3.80	-9.9	5.81
O8	34700	-1.13	-5.8	-3.39	-9.2	5.53
(B-V) <sub>0</sub>						
B0	29000	-1.08	-5.1	-2.88	-8.0	5.04
B3	17100	-0.74	-3.0	-1.60	-4.6	3.70
B5	15000	-0.58	-2.2	-1.30	-3.5	3.26
B8	12400	-0.37	-1.2	-0.82	-2.0	2.66
(B-V) <sub>10</sub>						
A0	10100	-0.03	0.0	-0.42	-0.4	2.03
A3	8600	0.08	0.5	-0.17	0.3	1.72
A5	8100	0.15	0.7	-0.14	0.6	1.63
A8	7400	0.25	1.2	-0.10	1.1	1.41
(B-V) <sub>20</sub>						
F0	7100	0.30	1.5	-0.11	1.4	1.30
F2	6900	0.35	1.7	-0.11	1.6	1.23
F5	6500	0.43	1.6	-0.14	1.6	1.23
F8	6100	0.54	1.6	-0.16	1.5	1.25
(B-V) <sub>30</sub>						
G0	5900	0.65	1.0	-0.30	0.8	1.33
G2	5500	0.77	0.9	-0.27	0.6	1.00
G3	5200	0.86	0.9	-0.34	0.6	1.03
G8	4900	0.94	0.8	-0.32	0.4	1.71
(B-V) <sub>40</sub>						
K0	4800	1.00	0.7	-0.50	0.2	1.78
K2	4400	1.16	0.5	-0.61	-0.1	1.50
K3	4000	1.30	-0.2	-1.02	-1.2	2.34
K7	3800	1.53	-0.3	-1.17	-1.5	2.45
(U-B) <sub>40</sub>						
M0	3800	0.50	-0.4	-1.25	-1.6	2.48

1

7

## Luminosidade

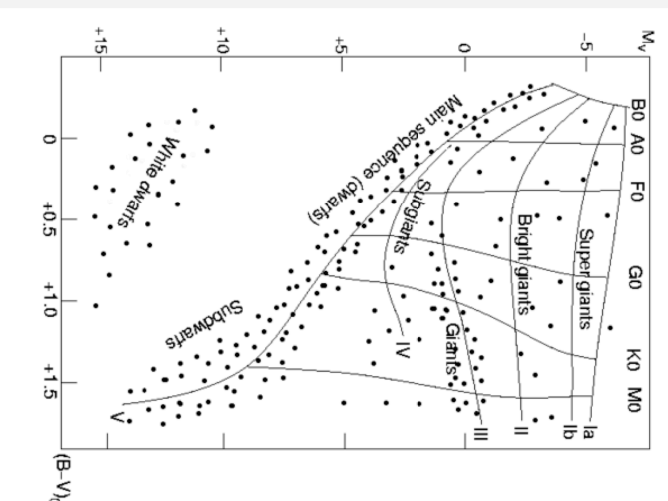


Diagrama Hertzsprung-Russell  
= Diagrama HR

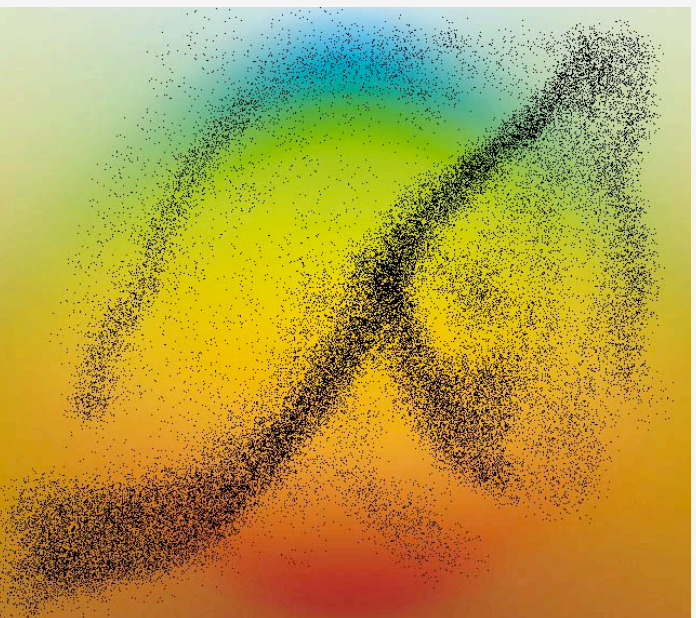
Detalhes?  
Evolução estelar!

AST203-CVR

Temperatura

3-28

## Diagrama HR



ASI 203-CVR <http://cfa-www.harvard.edu/~pberlind/atlases/atframes.html>

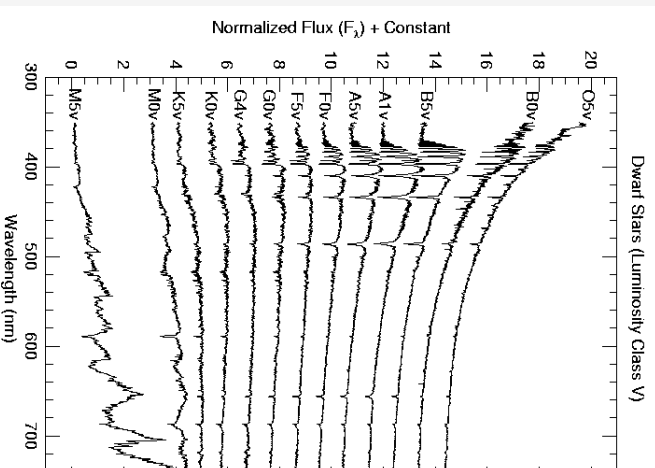
3-29

## Extinção interestelar

- A emissão de uma fonte astrofísica pode sofrer extinção no meio interestelar
  - ↳ **extinção = absorção + espalhamento**
  - ↳ **origem: grãos interestelares**
- Um modo de quantificar essa perda de energia é através do **acréscimo de magnitude por unidade de caminho óptico (distância)**. Assim, podemos definir  $A = \text{mag pc}^{-1}$ 
  - ↳  $A \sim 0.002 \text{ mag pc}^{-1}$
- Assim, temos que:  $M = m + 5 - 5 \log D - A D$
- A **extinção interestelar** é muito dependente do comprimento de onda:  $A(\lambda)$ . Assim, seu efeito nas diferentes magnitudes de um mesmo objeto é numericamente diferente.

AST203-CVR

3-31

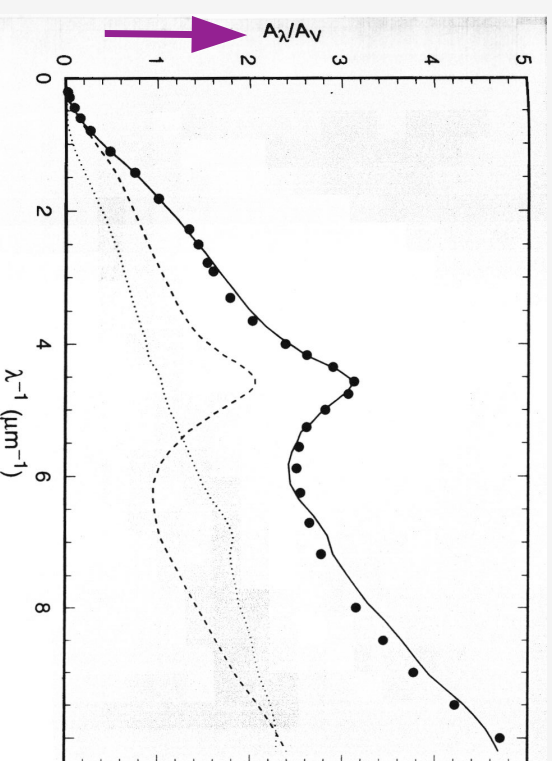


AST203-CVR

<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Astr162/Unit1/SpTypes/>

3-30

- Assim, o tipo espectral fornece informações diretas da temperatura e luminosidade do objeto
- O espectro de linhas, não apenas o contínuo, também possui características comuns dentro de cada tipo espectral
- Exemplos de espectros de diferentes classes de objetos
  - ↳ <http://cfa-www.harvard.edu/~pberlind/atlases/atframes.html> - link



Whittet

Figure 3.18. A fit to the extinction curve based on the 'MRN' two-component model (in the version of Draine and Lee 1984). The total extinction predicted by the model (continuous curve) is the sum of the contributions from graphitic grains (broken curve) and silicate grains (dotted curve). The mean observational curve (table 3.1) is plotted as full  $A_{\lambda}$  circles.

3-32



## Excesso de cor

- **A dependência da extinção interestelar no comprimento de onda altera os índices de cor originais do objeto**
- Podemos definir o excesso de cor, que corresponde a diferença entre o índice de cor observado (=avermelhado) e o intrínseco do objeto. Por exemplo:
  - ◊  $E(B-V) = (B-V) - (B-V)_0$
  - ◊  $E(B-V) = B-V - B_0 + V_0$ 
    - onde o subscrito “0” corresponde ao valor intrínseco

AST203-CVR

3-33

## Razão entre extinção total e seletiva

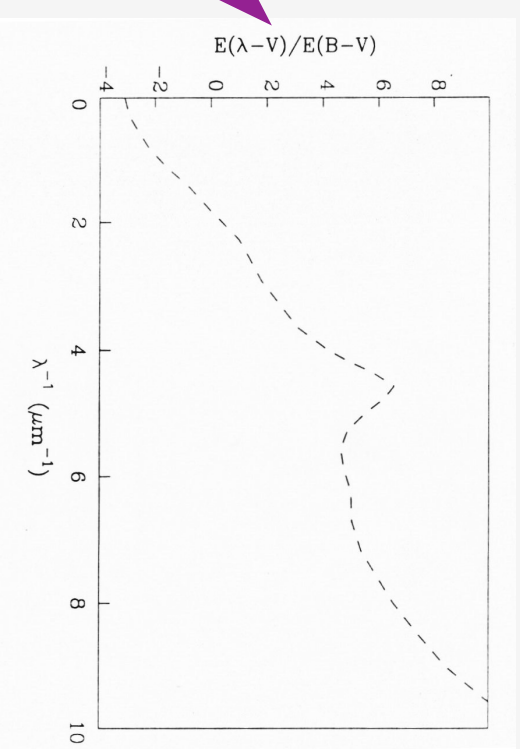
- Um parâmetro também usado para representar a extinção e útil em correções de avermelhamento interestelar e a chamada razão entre extinção total e seletiva, R

$$R_V = \frac{A(V)}{E(B-V)}$$

- $R = 3,2$  – esse valor varia pouco no MI (é dependente do tamanho dos grãos que causam a extinção, que varia pouco no meio interestelar difuso)
- Notem que a partir do excesso de cor e de R, podemos estimar  $A(V)$  em uma dada direção

AST203-CVR

3-35



AST203-CVR

Maciel – Meio interestelar – fig. 9.3

3-34

## Razão de avermelhamento

- Se a forma espectral da extinção é única, mesmo sendo seu valor absoluto variável, pode-se demonstrar que a razão entre dois excessos de cor é invariável. Assim:

$$\frac{E(U-B)}{E(B-V)} = \text{constante}$$

- em particular, para a curva de extinção padrão

$$\frac{E(U-B)}{E(B-V)} = 0.72 \pm 0.03$$

AST203-CVR

3-36

## Parâmetro Q

- Ainda dentro do sistema de Johnson, podemos definir o parâmetro Q (Johnson & Morgan 1953)

$$Q = (U - B) - \left\langle \frac{E(U - B)}{E(B - V)} \right\rangle (B - V)$$

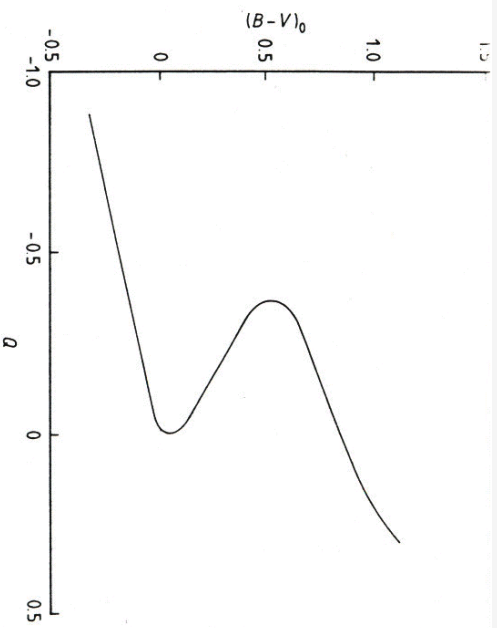
$$Q = (U - B)_o - \left\langle \frac{E(U - B)}{E(B - V)} \right\rangle (B - V)_o$$

$$Q = (U - B) - 0,72(B - V)$$

- Se um grupo de objetos está sujeito à mesma lei de avermelhamento, podemos usar o parâmetro Q para estimar o tipo espectral o objeto

AST203-CVR

3-37

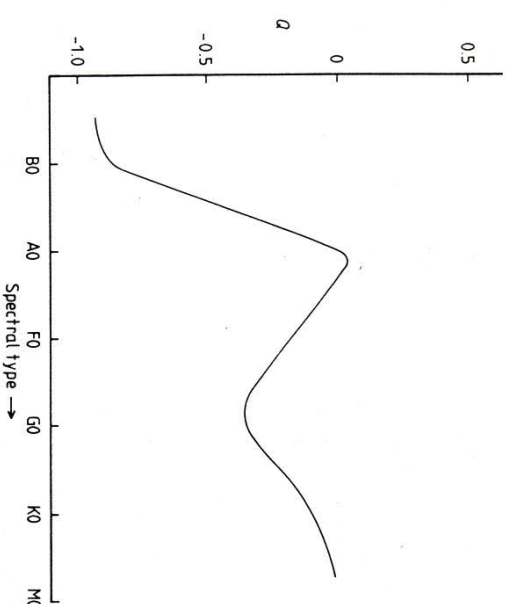


**Figure 3.1.18** Relationship between colour factor and the  $B - V$  intrinsic colour index.

Kitchin

AST203-CVR

3-39



**Figure 3.1.17** Variation of colour factor with spectral type.

Kitchin

AST203-CVR

3-38

## Avermelhamento x tipo espectral

- Uma estrela avermelhada tem seu índice de cor alterado, mas as características espectrais não mudam
- Desse modo, o tipo espectral pode ser determinado pelas linhas presentes no espectro.
- A diferença (no contínuo) entre o espectro observado e o intrínseco permite a determinação da extinção em cada comprimento de onda

AST203-CVR

3-40

## Fazendo medidas

- Considere:
  - ↳ um mesmo arranjo instrumental instalado em dois observatórios
  - ↳ uma observação simultânea de um dado objeto com o objetivo de medir seu fluxo
- A medida será a mesma?
- Provavelmente não...
- Assim, é necessário um procedimento específico para tornar as medidas consistentes

### Sistema de magnitudes

AST203-CVR

3-41

## Sistema de magnitudes

- O sistema de magnitude tem como principal objetivo definir um padrão comum na astronomia de modo que uma dada observação/medida represente a mesma quantidade física independentemente do observador e/ou observatório
- Um sistema de magnitudes é composto por:
  - ↳ um sistema instrumental (**defina faixas espectrais**)
  - ↳ um sistema de estrelas-padrões que fornecem fluxos conhecidos para calibração do sistema (**defina conversão de magnitude para fluxo**)
- Um sistema pode ser definido de modo a fornecer informações físicas de uma classe de objeto (ver a seguir alguns exemplos de sistemas específicos)

AST203-CVR

3-42

## Sistema instrumental

- Quando se pensa em imagens astronômicas, os fluxos não são monocromáticos. Uma câmara CCD, ou o seu olho, detectam o fluxo em um dado intervalo de frequências. Assim, podemos expressar o fluxo observado como:

$$F = \frac{\int_0^{\infty} f(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s(\lambda) d\lambda}$$

- onde:
  - ↳  $f(\lambda)$ : fluxo monocromático da fonte fora da atmosfera
  - ↳  $s(\lambda)$ : função de transmissão que define a **banda** das observações e inclui

- efeitos atmosféricos
- resposta do detector
- **filtros**
- etc.

AST203-CVR

3-43

- Assim, podemos redefinir magnitude como:

$$m_1 = -2.5 \log \left\{ \frac{\int_0^{\infty} s_1(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s_1(\lambda) d\lambda} \right\} + q_{\lambda_0}$$

- $s_1(\lambda)$  é a transmissão da banda 1

AST203-CVR

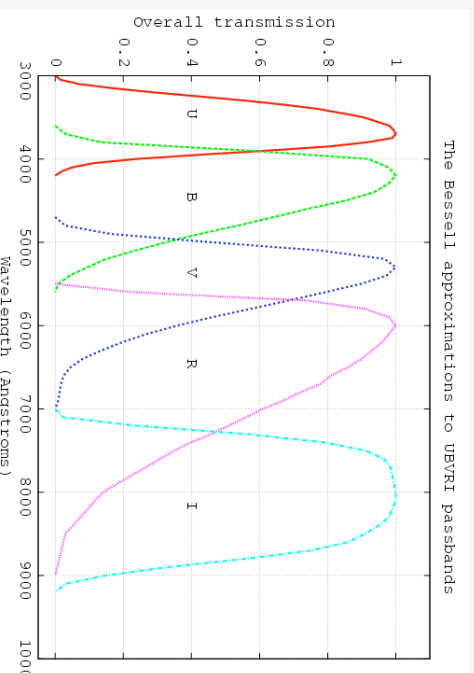
3-44

- Assim, um dado  $s(\lambda)$  dificilmente é igual em diferentes telescópios devido a sua dependência com fatores de difícil controle ou calibração, por exemplo, a transparência atmosférica.
  - ↳ Se conseguíssemos controlá-lo completamente não haveria necessidades de estrelas-padrões
- Os filtros usados na definição da transmissão de um sistema podem ser classificados em:
  - ↳ **largos:** 100 nm
  - ↳ **intermediários:** 10 – 50 nm
  - ↳ **estreitos:** 0.05 – 10 nm
- A fotometria fornece a dependência espectral da emissão de um dado objeto com baixa resolução
  - ↳ e com  **muito menos tempo de telescópio que a espectroscopia**

AST203-CVR

3-45

- ## Filtros
- Um filtro é um dos elementos que define a curva de transmissão de um sistema de magnitude

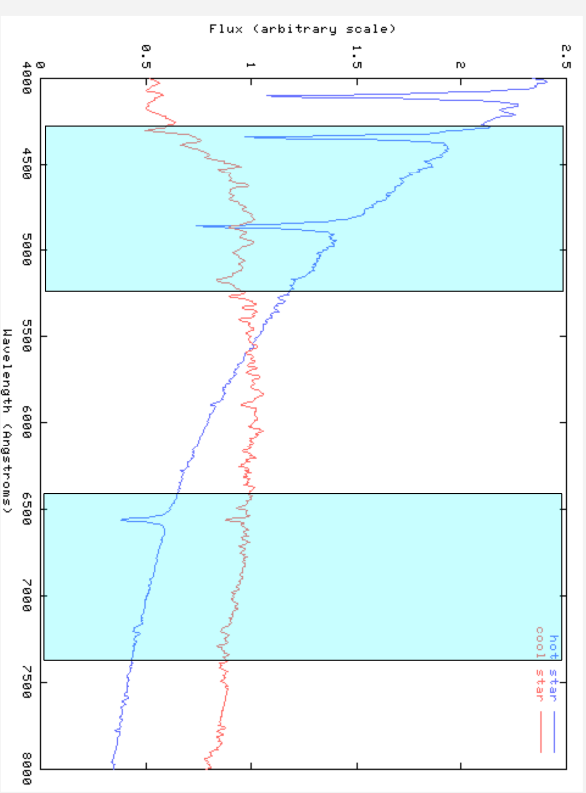


AST203-CVR

<http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/colors/colors.html>

3-47

Para cada uma das bandas abaixo, qual das estrelas tem o fluxo maior?



AST203-CVR

<http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/colors/colors.html>

3-46

## Alguns sistemas fotométricos históricos

- Olho humano,  $m_v$ 
  - ↳ pico 510 nm – largura 200nm
- Placas fotográficas,  $m_p$ 
  - ↳ pico 450 nm –  $\lambda < 500$  nm
  - ↳ magnitudes das placas fotográficas são diferentes das magnitudes visuais
  - ↳ magnitude fotovisual,  $m_{pv}$ : sistema que possui a mesma resposta do olho humano

AST203-CVR

3-48

## Sistemas atuais

- UBV de Johnson + extensão
- Strömgren
- Estreitos
- entre outros

AST203-CVR

3-49

## Sistema UBV e aplicações

- Sistema UBV – Johnson & Morgan (1953) - figura
  - ↳ B ~ placas fotográficas
  - ↳ V ~ olho humano
  - ↳ U: região violeta e ultravioleta
- ↳ As curvas de transmissão desse sistema consideram:
  - a atmosfera, que delimita o limite inferior em  $\lambda$  no filtro U, - figura
  - e o detector, no caso uma fotomultiplicadora específica.
- ↳ Assim, uma dada medida dependerá fortemente da atmosfera local.
- ↳ Extensão para comprimentos de ondas maiores – Johnson (1966)

AST203-CVR

3-50

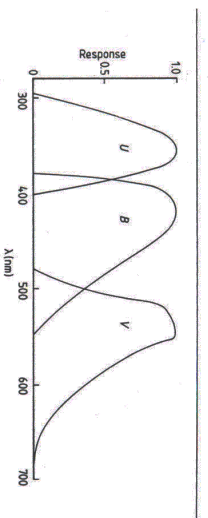


Figure 3.1.1 Normalised *UBV* response curves, excluding the effects of atmospheric absorption.

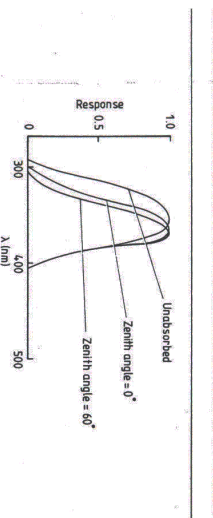
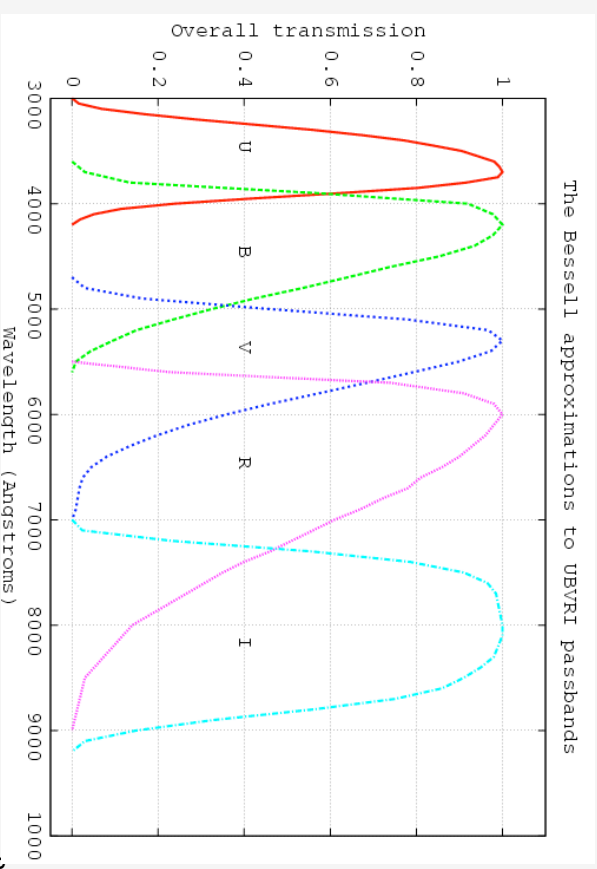


Figure 3.1.2 Effect of atmospheric absorption at sea level upon the *U* response curve (normalised).

AST203-CVR

Kitchin

3-51



Filtros que mimetizam o sistema UBVR I original com CCDs  
Bessel, PASP 102, 1181 (1990)

AST203-CVR

3-52

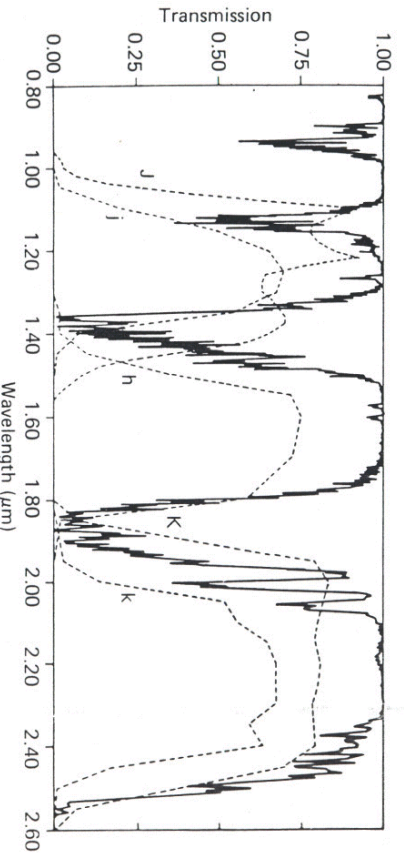


Fig. 1.8 The Kitt Peak summer atmospheric transmission in the near infrared. The transmission curves for the Johnson J and K filters, and the Kitt Peak J, H, and K, filters (indicated by j, h, and k) are shown by the dashed lines. (Reproduced from [272].)

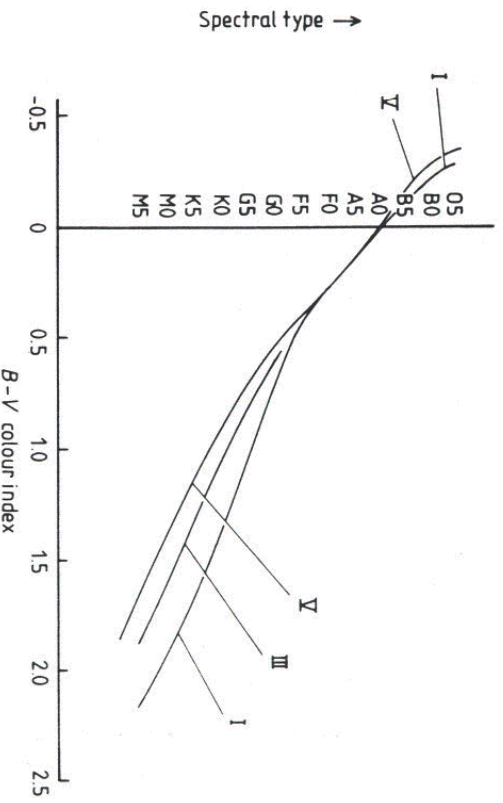


Figure 3.1.5 Relationship between spectral type and  $B - V$  colour index.

Table 1.2 Photometric filter characteristics

System	Filter	$\lambda$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
UBV (Johnson–Morgan)	U	365	70
	B	440	100
	V	550	90
Infrared (Johnson)	R	700	220
	I	880	240
	J	1250	380
	K	2200	480
	L	3400	700
	M	5000	1200
	N	10400	5700

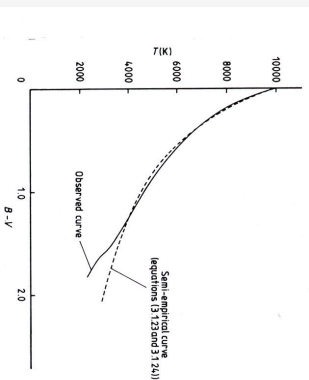


Figure 3.1.7 Observed and semi-empirical  $B - V/T$  relationships over the lower part of the main sequence.

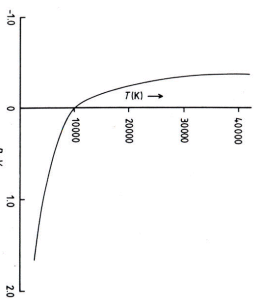


Figure 3.1.8 Observed  $B - V/T$  relationship for the whole of the main sequence.

# Descontinuidade de Balmer

Ionização do H I no segundo nível de energia

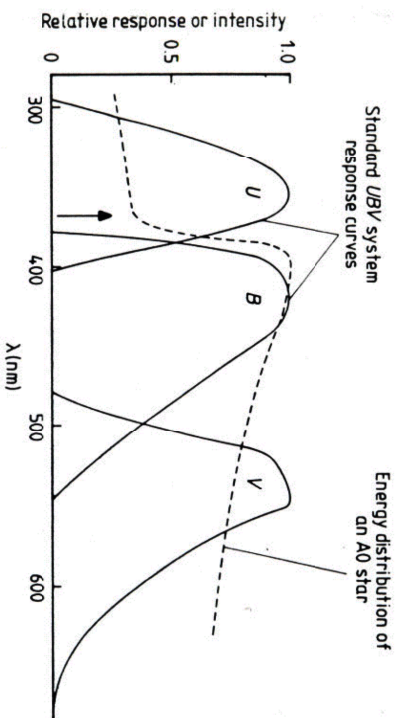
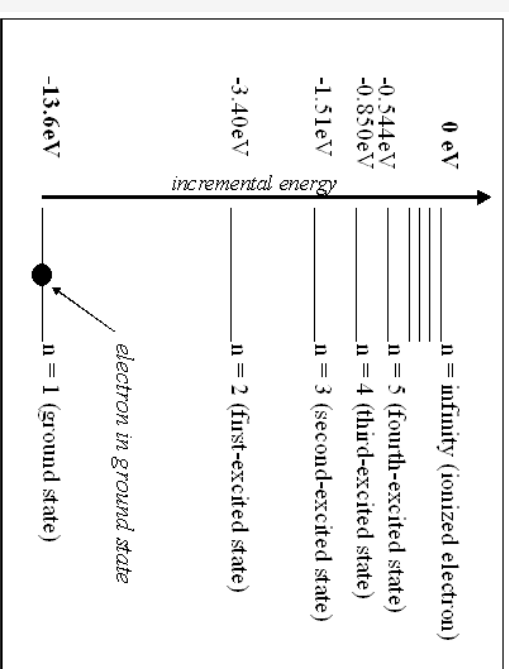
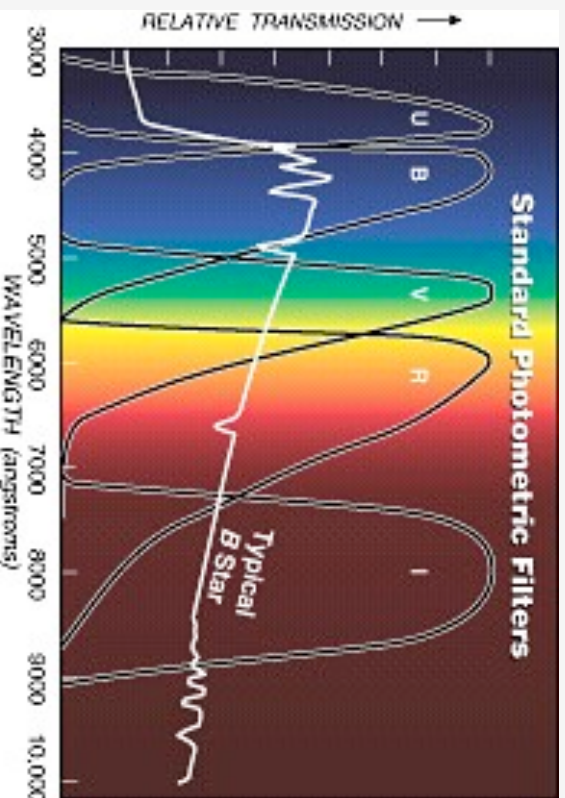


Figure 3.1.10 Position of the standard *UBV* filters with respect to the Balmer discontinuity (arrowed).



[http://www.theschemata.com/energy\\_hydrogen.html](http://www.theschemata.com/energy_hydrogen.html)

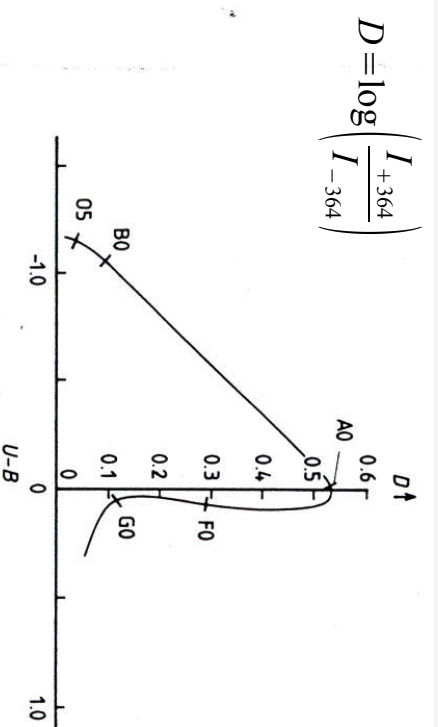


Figure 3.1.11 Variation of *D* with *U - B* for main sequence stars.

## Diagrama cor-cor

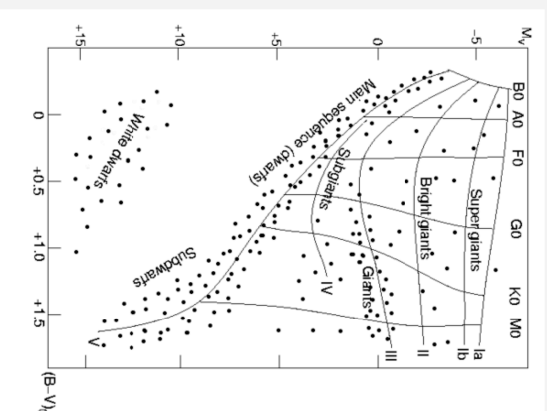
- É bastante comum termos apenas fotometria em 3 cores de um objeto ou de uma região
- Um modo de se obter alguma informação é verificar a posição dos objetos em “diagramas cor-cor”

AST203-CVR

3-61

## Diagrama cor-magnitude

- No diagrama H-R, o conhecimento das distâncias está implícito na magnitude absoluta



AST203-CVR

3-63

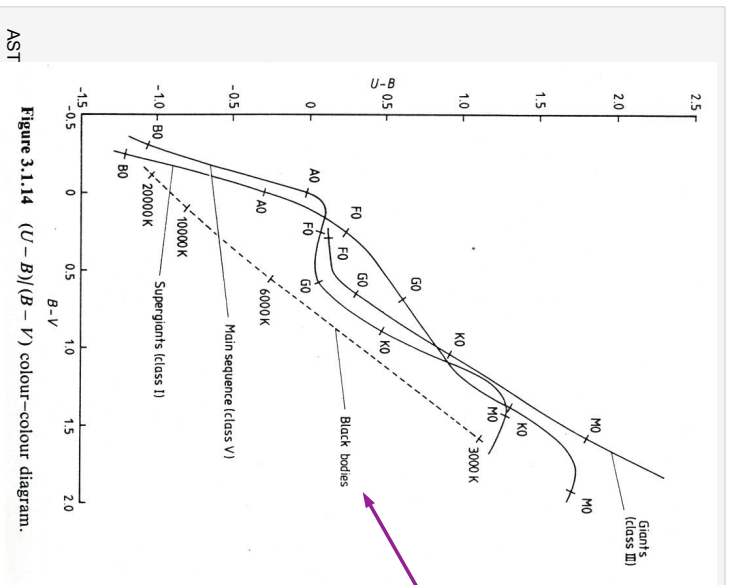


Figure 3.1.14  $(U-B)/(B-V)$  colour-colour diagram.

AST

Kitchin

3-62

## Sistema de Strömgren

- Sistema uvby
- ↳ filtros intermediários

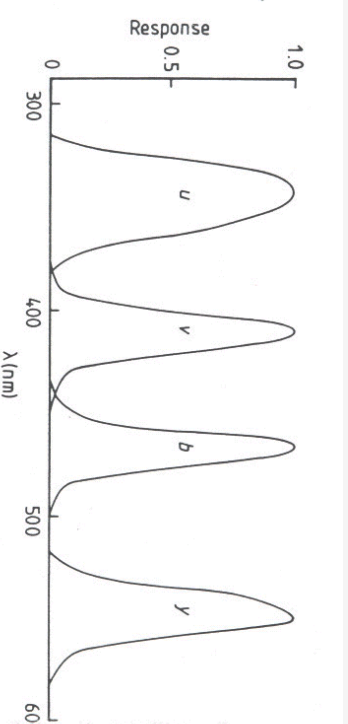


Figure 3.1.3 Normalised transmission curves for the *uvby* system, not including the effects of atmospheric absorption.

Kitchin

AST203-CVR

3-64



Table 1.2 Photometric filter characteristics

System	Filter	$\lambda$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
ubvy $\beta$ (Strömgren–Crawford)	u	350	34
	v	410	20
	b	470	16
	y	550	24
	$\beta$	486	3, 15

Kitchin  
AST203-CVR

3-65

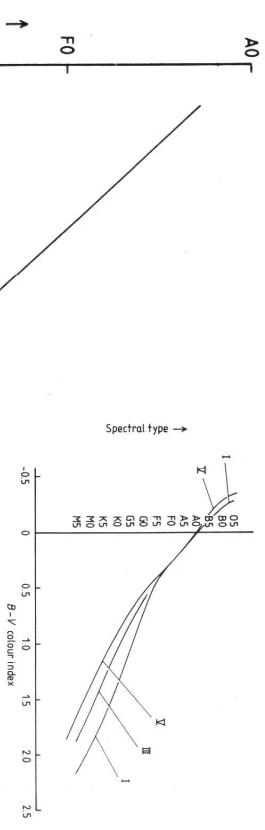


Figure 3.1.5 Relationship between spectral type and  $B - V$  colour index.

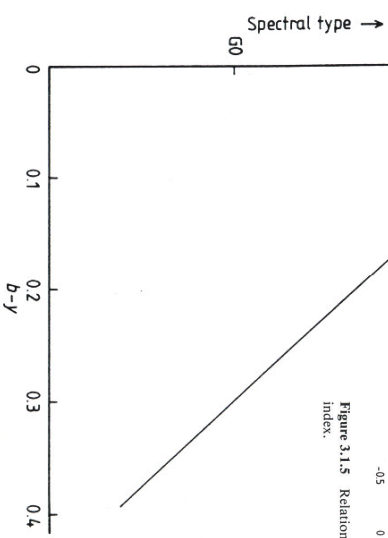


Figure 3.1.9 Relationship between spectral type and  $b - y$  colour index.

Kitchin

3-66

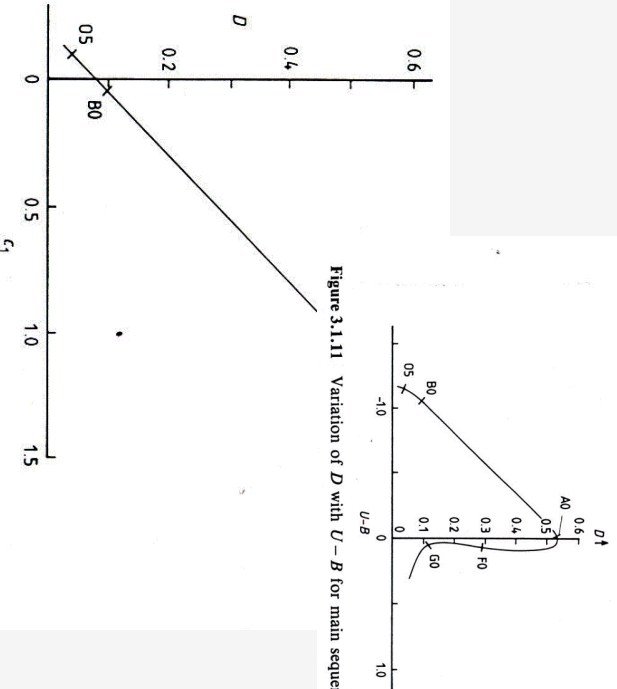
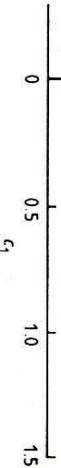


Figure 3.1.11 Variation of  $D$  with  $U - B$  for main sequence stars.

Kitchin

Figure 3.1.13 Variation of  $D$  with the  $c_1$  index of the  $ubvy$  system for main sequence stars.

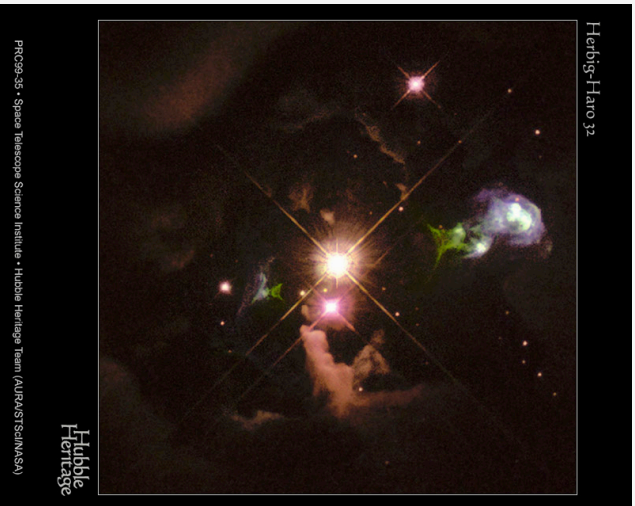


3-67

- Filtros estreitos
  - ↪ costuma-se montar sistemas com filtros centrados em linhas de emissão de determinados objetos astrofísicos e filtros próximos às linhas, mas fora delas, para quantificar o contínuo
  - ↪ vide figura

AST203-CVR

3-68



Red: F675W (R),  
Green: F656N (H-alpha),  
Blue: F673N (IS III)

## Outros sistemas

- Outros sistemas de magnitudes de importância recente são aqueles associados a telescópios específicos
  - ↳ Sistema do Hubble Space Telescope
  - ↳ Sistema do Sloan Digital Sky Survey
  - ↳ ambos baseiam-se em filtros largos na região óptica do espectro
- Asiago database of photometric systems
  - ↳ informação sobre > 200 sistemas fotométricos
  - ↳ web based

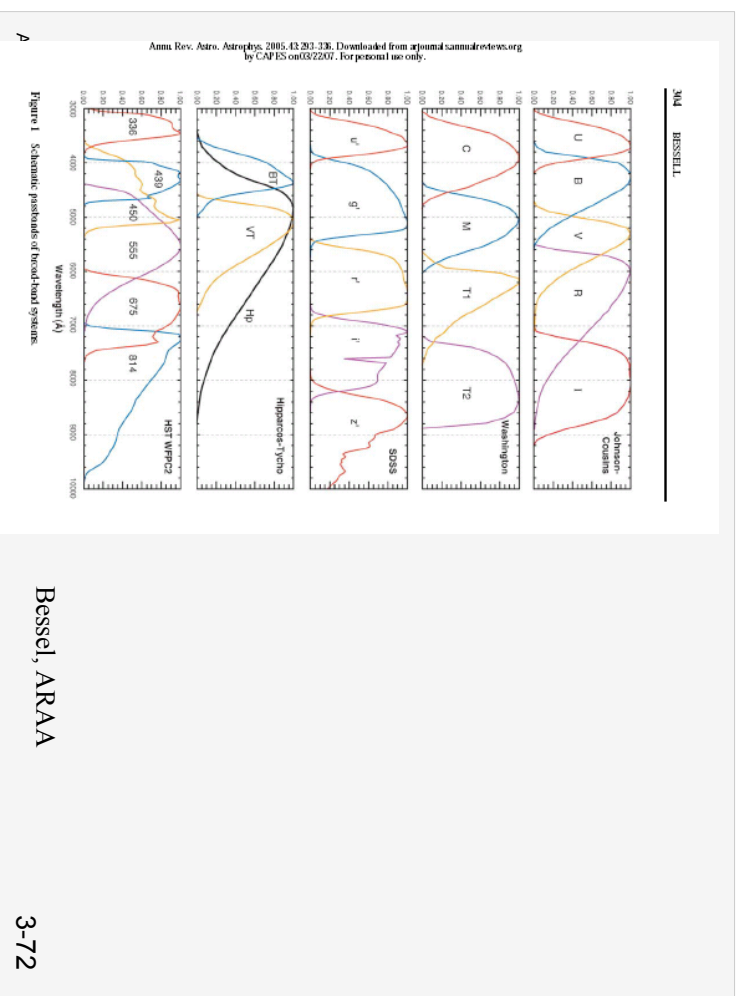
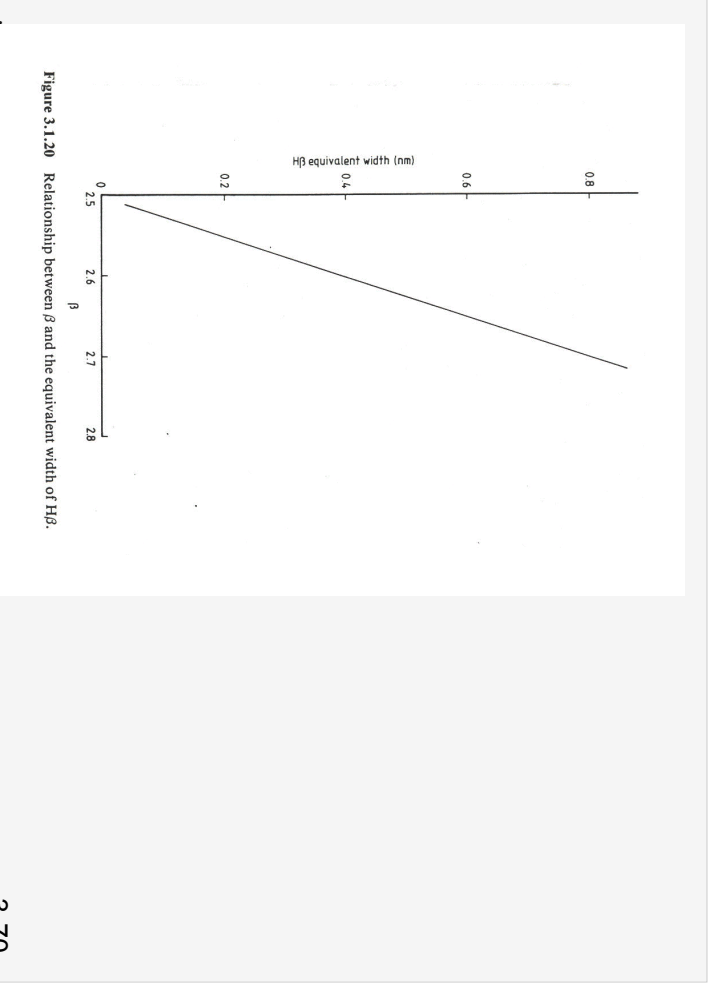


TABLE 1 Wavelengths (Å) and widths (Å) of broad-band systems

UBVR <sub>I</sub>	Washington	SDSS	Hipparcos	WFPC2
$\lambda_{eff}$ $\Delta\lambda$	$\lambda_{eff}$ $\Delta\lambda$	$\lambda_{eff}$ $\Delta\lambda$	$\lambda_{eff}$ $\Delta\lambda$	$\lambda_{eff}$ $\Delta\lambda$
<i>U</i> 3663 650	<i>C</i> 3982 1070	<i>u'</i> 3596 570	<i>H<sub>p</sub></i> 5170 2300	<i>F336</i> 3448 340
<i>B</i> 4361 890	<i>M</i> 5075 970	<i>g'</i> 4639 1280	<i>B<sub>T</sub></i> 4217 670	<i>F439</i> 4300 720
<i>V</i> 5448 840	<i>T<sub>1</sub></i> 6389 770	<i>r'</i> 6122 1150	<i>V<sub>T</sub></i> 5272 1000	<i>F555</i> 5323 1550
<i>R</i> 6407 1580	<i>T<sub>2</sub></i> 8051 1420	<i>i'</i> 7439 1230		<i>F675</i> 6667 1230
<i>I</i> 7980 1540		<i>z'</i> 8896 1070		<i>F814</i> 7872 1460

views.org

AST203-CVR

Bessel, ARAA

3-73

## Calibração relativa de um sistema de magnitudes

- A calibração da escala é feita com o auxílio de objetos de fluxo constante e conhecido. São os chamados padrões fotométricos conhecidos como objetos padrões fotométricos
- Sistema Johnson
  - ↳ A estrela Vega (A0 - 10.000K) possui, por definição, magnitude  $V = 0,03$  e todos os índices de cor nulos
- Fontes extensas tem seu fluxo medido por unidade de área, assim, temos  $[mag \text{ arcsec}^{-2}]$

AST203-CVR

3-75

## Calibração de um sistema de magnitudes

- A determinação de valores absolutos da energia recebida é uma problema fundamental da astronomia
- A calibração dos dados pode ser:
  - ↳ absoluta: em termos de unidades físicas fundamentais usando procedimentos específicos
  - ↳ relativa: usando fontes como referência de fluxo
- Lena (Cap. 3) apresenta com detalhes alguns procedimentos para calibração absoluta
- A calibração relativa é a mais usada em astronomia: tanto no óptico, quanto em frequências de rádio

AST203-CVR

3-74

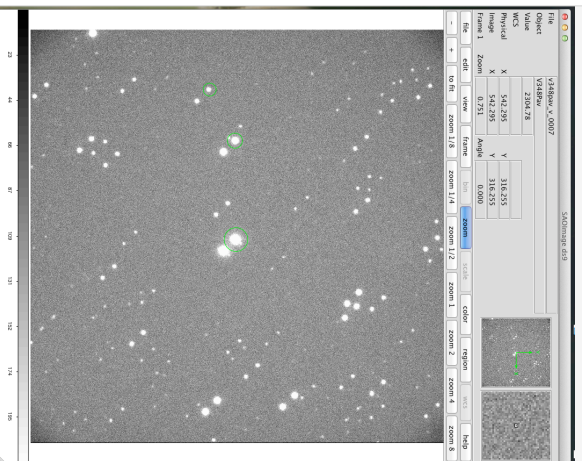
## Fotometria de abertura – fontes puntiformes

- O valor das contagens em cada pixel,  $P$ , pode ser representado como:
  - ↳  $P = S + B = S$
  - S: source – podemos ter ou não uma fonte em um dado pixel
  - B: background – é composto principalmente pelo fundo de céu atmosférico, mas pode incluir fundo de céu “astrofísico, ruído de leitura, ruído de leitura, etc.
- Processo básico para determinação do fluxo/magnitude de uma fonte consiste nas seguintes etapas
  - ↳ determinação do pixel central do objeto
  - ↳ determinação do fundo de céu
  - ↳ determinação das contagens da fonte
- A distribuição de contagens segue normalmente um perfil Gaussiano bi-dimensional, a **point-spread function (PSF)**

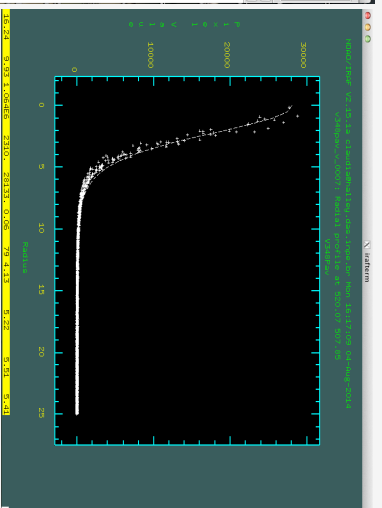
AST203-CVR

3-76

# Point-spread function

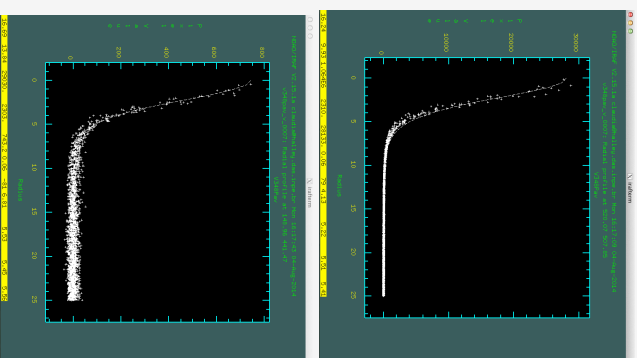


AST203-CVR

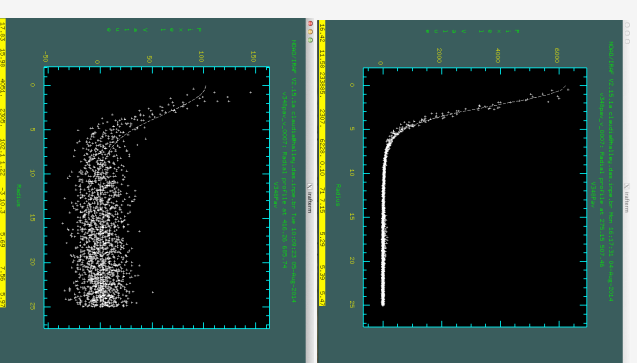


3-77

# PSF independente do brilho do objeto



AST203-CVR



3-78

# Centragem

Algoritmos fornecem tipicamente precisão da ordem 0,2 pixel, se objeto está bem exposto

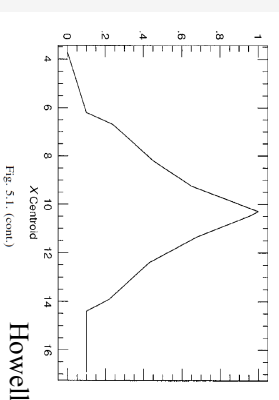
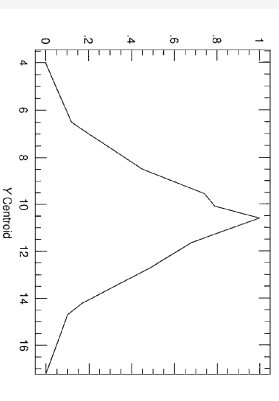
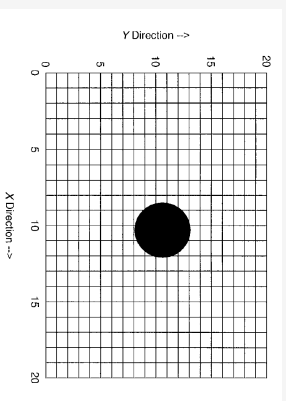


Fig. 5.1. (cont.)

Howell

AST203-CVR

3-79

# Estimativa do céu (fundo)

O fundo é estimado como um valor por pixel  
 ↳ determinação do valor "médio" de um pixel em uma área sem fontes,  $B_{pix}$

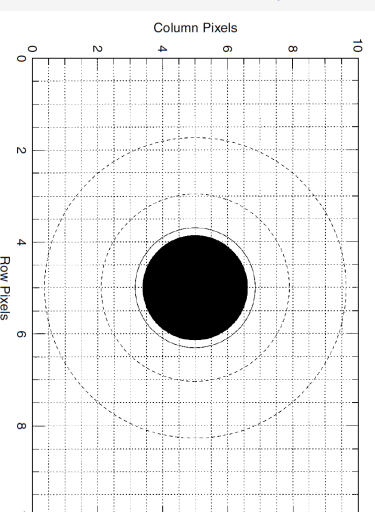
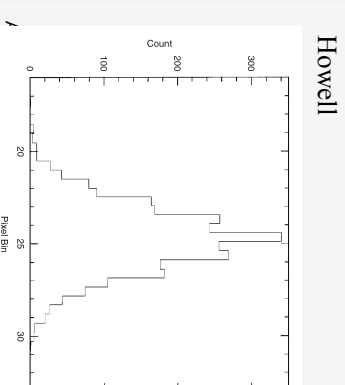


Fig. 5.2. Schematic drawing of a stellar image on a CCD pixel grid. The figure shows the location of the star, the "star" aperture (solid line), and the inner and outer "sky" annuli (dashed circles).

Fig. 5.3. Histogram of the "sky" annulus around a star in the CCD image shown in Figure 4.5. Notice the roughly Gaussian shape to the sky distribution but with an extended tail toward larger values. This tail is due to pixels that were not completely calibrated in the reduction process, pixels with possible contamination due to dark current or cosmic rays, pixels with increased counts due to unresolved PSF wings from nearby stars, and contamination of sky annulus pixels by faint unresolved background objects. The need for some histogram smoothing, such as that described in the text, is apparent, especially near the peak of the distribution.



Howell

1

3-80

## Contagens da fonte

- Somase as contagens dentro de uma data abertura, C
- O número de pixels dentro dessa abertura é  $n_{\text{pix}}$
- Assim, o valor das contagens "líquidas", F, da fonte pode ser estimado como:
  - ◊  $C = \sum_{\text{pix}} P$
  - ◊  $C = F + n_{\text{pix}} B_{\text{pix}}$
  - ◊  $F = C - n_{\text{pix}} B_{\text{pix}}$
- O valor de S é proporcional ao fluxo de um objeto estelar e pode ser usado para estimar a magnitude (ou o fluxo) do objeto

AST203-CVR

3-81

## Qual raio usar para a abertura?

- Se a PSF for Gaussiana, qual valor de raio inclui 99% do fluxo do objeto?

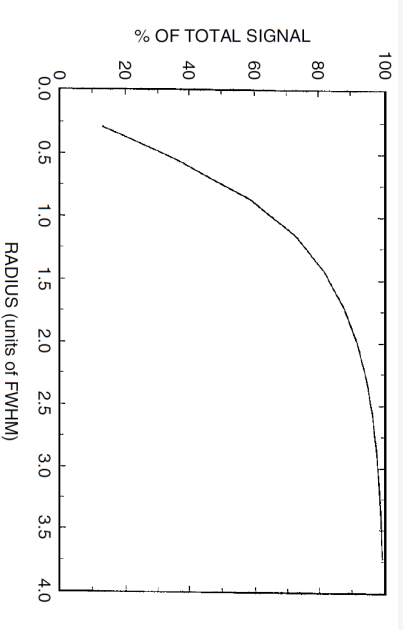


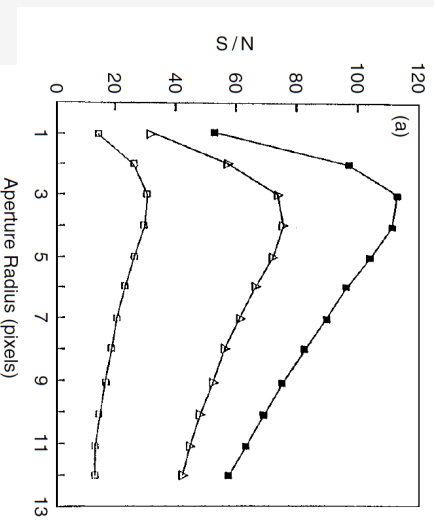
Fig. 5.6. For any reasonable PSF approximation, the figure above shows the run of the total enclosed signal with radius of the PSF in FWHM units. Note that within a radius of 3-FWHM essentially 100% of the signal is included.

Howell

AST203-CVR

3-82

- Porém, se usamos abertura =  $3 * \text{FWHM}$ , incluímos a maior parte do fluxo do objeto de interesse, mas também muito fundo...
- Como se comporta a SNR (signal noise-ratio) com a abertura?



FWHM = 3 pixels

Fig. 5.7. The S/N obtained for the measurement of a point source is not constant as a function of radius. There is an optimum radius at which the S/N will be a maximum. The top panel shows this effect for three point sources that differ in brightness by 0.3 (middle curve) and 2.0 (bottom curve) magnitudes compared with the top curve (filled squares). The bottom panel presents the same three stars as a function of their photometric precision. The image scale is 0.4 arcsec/pixel and the seeing (FWHM) was near 1.2 arcsec. From Howell (1989).

AST203-CVR

Howell

3-83

## Equação do CCD

- A equação do CCD fornece-se a SNR em função de vários números associados a uma medida.
- Pode ser encontrada em várias formas de acordo com os termos considerados.

$$\frac{S}{N} = \frac{N_*}{\sqrt{N_* + n_{\text{pix}} (N_S + N_D + N_R^2)}}$$

- ◊  $N_*$ : contagem da fonte (já descontado fundo)
- ◊  $N_S$ : contagem por pixel do fundo de céu
- ◊  $N_D$ : contagem por pixel do fundo térmico
- ◊  $N_R$ : ruído de leitura (shot noise)

AST203-CVR

3-84

## Fotometrias diferencial e absoluta

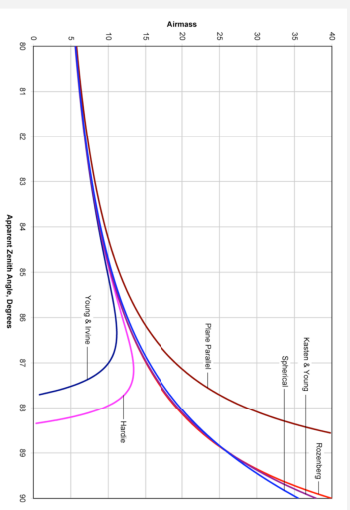
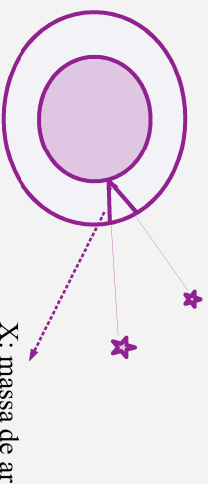
- Uma vez determinada as contagens da fonte, o objetivo seguinte pode ser determinar a magnitude do objeto em um dos sistemas fotométricos: **fotometria absoluta**
  - ↳ nesse caso é possível determinar o fluxo do objeto em unidades físicas (Jy, por exemplo)
- Nesse caso, é necessária a observação de várias estrelas-padrões em várias massas de ar e com várias cores para se proceder a calibração do sistema instrumental.
  - ↳ Esse procedimento demanda noites com extinção pouco variável (no tempo)
- Em muitos casos, porém, pode ser usar uma estrela do campo como um objeto de calibração secundário: **fotometria diferencial**. Nesse caso, a acurácia é pequena, mas a precisão é muito alta (vide figura).

AST203-CVR

3-85

## Massa de ar

- A massa de ar,  $X$ , é o comprimento da atmosfera que é atravessada pela luz de um objeto astronômico
- Na aproximação plano-paralela, ela pode ser aproximada por:
  - ↳  $X = \sec(z) = 1/\cos(z)$
  - ↳ o que é válido para distâncias zenitais pequenas



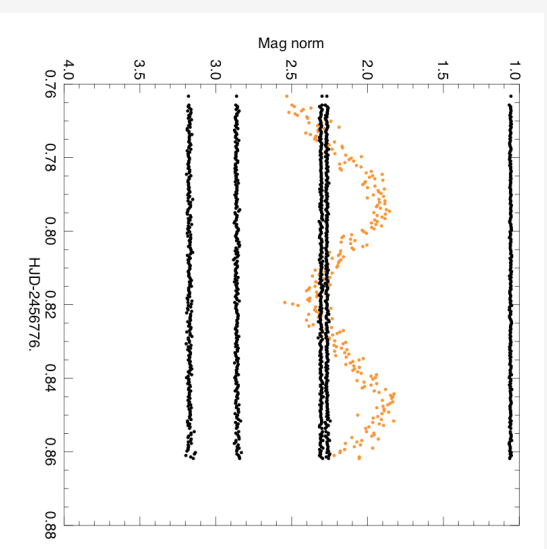
AST203-CVR

Wikipedia: Airmass

- Outras aproximações para a massa de ar podem ser vistas na figura ao lado

3-87

## Fotometria diferencial de V348 Pav



AST203-CVR

3-86

## Magnitude x Massa de ar

- Considerando que a atmosfera possui uma profundidade óptica,  $\tau$ , podemos representar o fluxo observado,  $f_{obs}$  como função do fluxo fora da atmosfera,  $f_0$ , como:
  - ↳  $f_{obs} = f_0 e^{-\tau}$
- Podemos imaginar que a profundidade óptica é proporcional à massa de ar,  $X$ . Por exemplo:
  - ↳  $\tau = \tau_0 X$ , onde  $\tau_0$  é a profundidade óptica no zênite.
- Na aproximação plano-paralela, temos:
  - ↳  $\tau = \tau_0 \sec z$ , onde  $z$  é distância zenital.
- Assim, a dependência da magnitude com a massa de ar pode ser expressa como:
  - ↳  $m(X) = m_0 + k X$ , onde  $k$  é uma constante
  - ↳  $m_0$ : magnitude fora da atmosfera

AST203-CVR

3-88