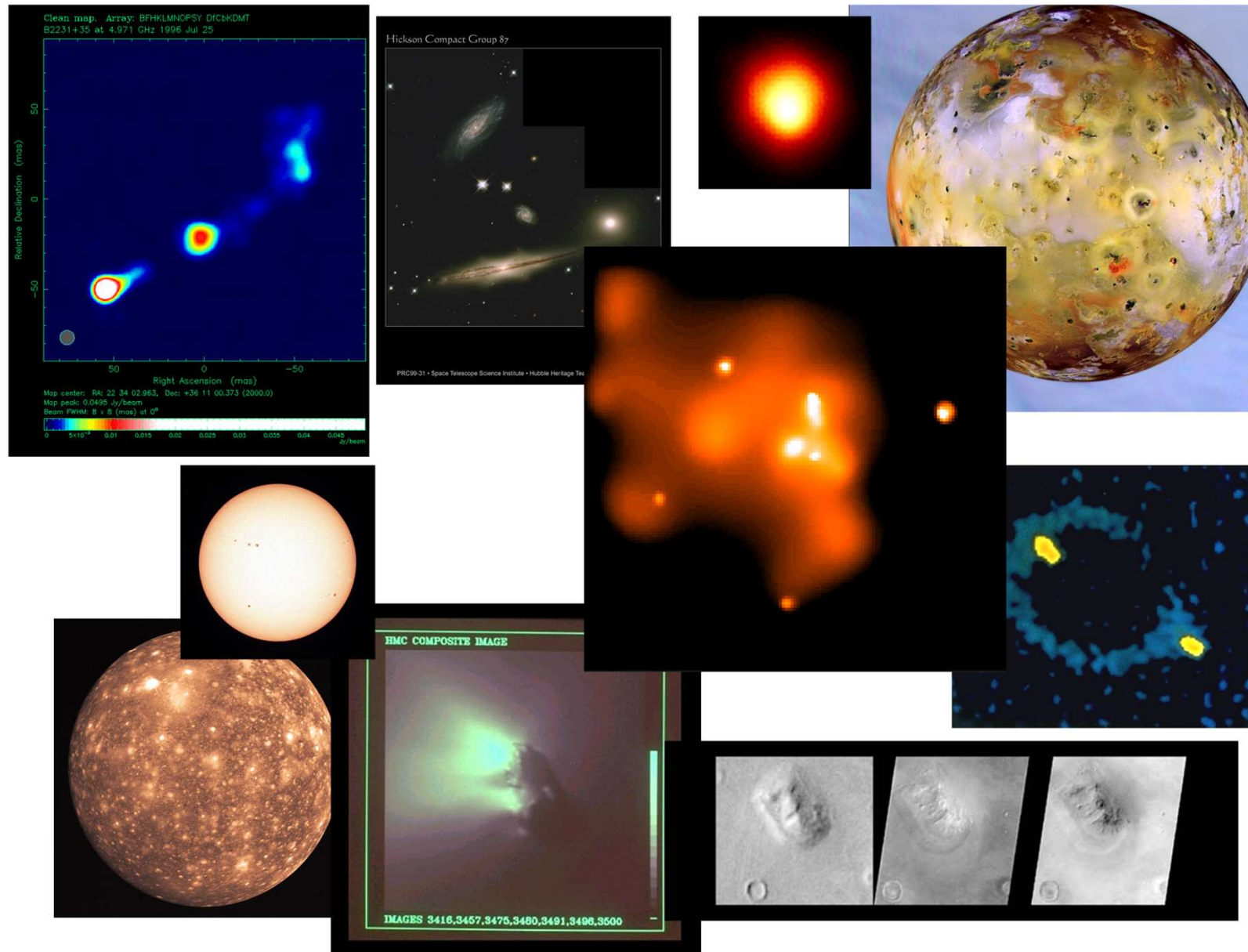


*“motivation is [...] more important [...] than innate ability”*  
(Scientific American, August 2006)

*“it takes [...] a decade of heavy labor to master any field”*  
(Scientific American, August 2006)



**“...all observation must be for or against  
some view if it is to be of any service!”**

*Charles Darwin*

## O que é a Astronomia?

- A mais antiga das Ciências (c.f. Astrologia)
- Uma Ciência multidisciplinar por excelência:
  - pequena percentagem de “linguagem própria”
  - 90% Astrofísica
  - e ainda

Astronomia do Sistema Solar e Planetária	Astrogeologia Astrobiologia
Astronomia Estelar e Galáctica	Astroquímica
Astronomia Instrumental	Engenharia
Astronomia de Posição	Referenciais/Geodesia
Astroarqueologia	História

## Unidades

$$1 \text{ pc} \approx 3.3 \text{ anos-luz} \approx 3.1 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 M_{\odot} \approx 2.0 \times 10^{30} \text{ Kg} \text{ (massa solar)}$$

$$1 \text{ U.A.} \approx 1.50 \times 10^{11} \text{ m} \text{ (unidade astronómica)}$$

$$1 R_{\odot} \approx 6.96 \times 10^8 \text{ m} \text{ (raio solar)}$$

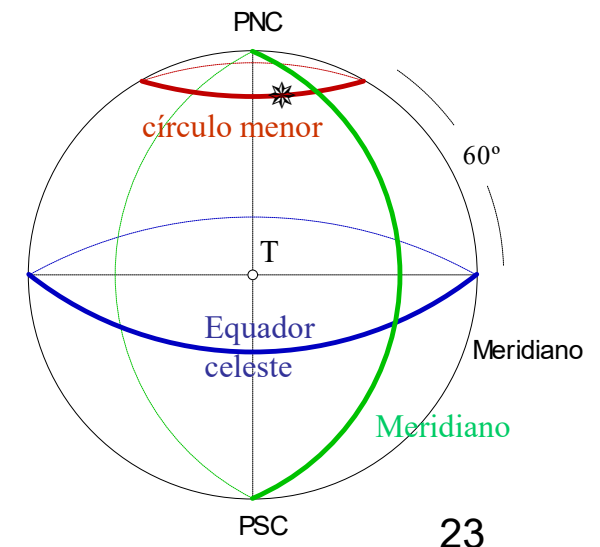
$$c \approx 300 \times 10^3 \text{ km/s} \text{ (velocidade da luz)}$$

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Sistemas de coordenadas e tempo

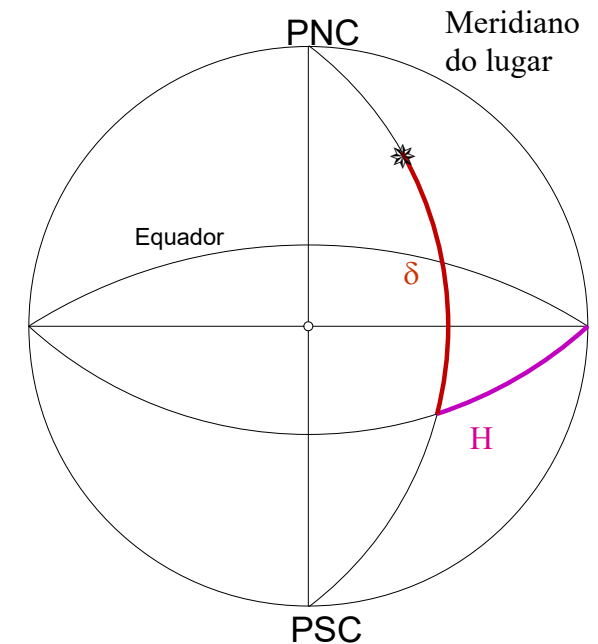
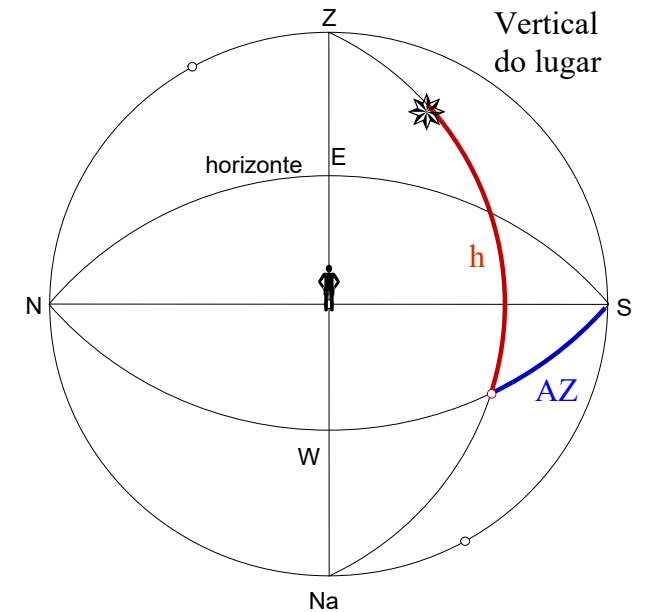
Devido ao movimento de rotação da Terra, todos os astros do Universo têm movimentos aparentes circulares em torno do prolongamento do eixo terrestre (que passa nos pólos). Sabemos que é assim pelo Sol (apesar deste ter nascimento e ocaso) e também pelas estrelas. Longas exposições fotográficas nocturnas tornam este movimento bem evidente.

Definimos, então, a **esfera celeste** com raio arbitrário e onde se encontram todos os astros. Na intersecção do eixo de rotação da Terra com a esfera celeste temos o **pólo sul celeste** (PSC) e o **pólo norte celeste** (PNC); este último está muito próximo da famosa **Estrela Polar**. O **equador celeste** é o conjunto de todos os pontos à mesma distância dos PNC e PSC: diz-se uma **circunferência máxima** por ser um diâmetro da esfera. Finalmente definimos os **meridianos**: a infinidade de circunferências máximas perpendiculares ao equador, logo, passando pelos PNC e PSC. Todos os astros se deslocam sobre **círculos menores**, paralelos ao equador celeste.



Usando o mesmo raciocínio, mas agora concentrando-nos no observador, definimos o **sistema de coordenadas horizontal local**. Este contém o **horizonte** como **circunferência máxima principal** (que define o sistema) e o **zénite** (ponto mais alto no céu) e o **nadir** como “pólos”. À infinidade de circunferências máximas que são ortogonais ao horizonte chamam-se **verticais**, sendo que o **vertical do lugar** é aquele que passa no ponto cardeal sul. As duas coordenadas, já que o sistema é bidimensional (mas não-cartesiano: é esférico) são o **azimute (AZ)** e a **altura (h)**. O primeiro é medido a partir do ponto cardeal sul e vai de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  (pelo oeste). A segunda vai de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ , sendo que alturas negativas não são vistas pelo observador (estão abaixo do horizonte), a não ser que o mesmo suba a uma montanha.

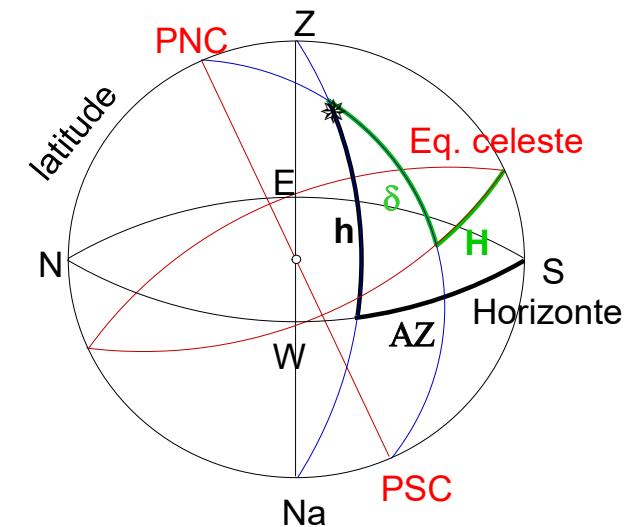
O primeiro sistema em que falámos é o **sistema de coordenadas equatorial local** e não se pode dissociar do horizontal local. A “misteriosa” definição dos pontos cardiais depende do primeiro, já que os pontos cardiais norte e sul vão estar sobre um meridiano (**do lugar**) e o vertical do lugar. As duas coordenadas do sistema equatorial local são o **ângulo horário (H)** e a **declinação ( $\delta$ )**. O primeiro é medido a partir do meridiano do lugar e vai de 0h a 24h. A segunda vai de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ , valendo  $0^\circ$  sobre o equador celeste.



Mas os dois sistemas foram, de facto, criados para funcionarem juntos. Desde tempos anteriores aos Descobrimentos portugueses que se sabia que a Estrela Polar era um excelente indicador da latitude do lugar. Isto porque a sua altura é quase exactamente idêntica aquela, pela sua proximidade ao PNC. Basta, então, a **latitude** do lugar para definirmos o ângulo entre os dois sistemas.

E chegou a hora de falarmos num tempo, relacionado com uma das motivações da utilização do sistema equatorial local e do ângulo horário (que é dado em horas): o **tempo que uma estrela está acima do horizonte** é exactamente igual ao ângulo horário descrito pela mesma entre o seu nascimento ( $h=0^\circ$ ) e o seu ocaso ( $h=0^\circ$ ).

Chegou também a hora de mencionarmos um problema com o sistema equatorial local: é que apenas uma das coordenadas ( $\delta$ ) é sempre fixa. A outra (H) muda constantemente em ciclos de 24 horas com o movimento do respectivo astro. A solução foi definir uma outra origem para este sistema (o **ponto vernal  $\gamma$** ) que não muda ao longo do tempo. Assim, definimos uma nova coordenada (**ascensão recta –  $\alpha$** ) e o novo sistema, chamado **equatorial celeste** é, finalmente “imutável” e fixo em relação ao Universo.



Mas de onde surgiu este misterioso ponto vernal? A resposta é bastante simples. Mas para tal temos de nos concentrar noutra movimento aparente do Sol: aquele que faz ao longo do ano, devido ao movimento de translação da Terra.

O movimento anual aparente do Sol descreve a **eclíptica**, que vai servir de círculo máximo principal para um novo sistema de coordenadas (o **eclíptico**). Claro que temos o PNE e PSE. Ainda, a eclíptica vai fazer um ângulo de  $23.5^\circ$  com o equador celeste, já que é esta a inclinação do eixo de rotação da Terra. O ponto vernal é um dos dois pontos de intersecção da eclíptica com o equador celeste e é aquele ponto onde o Sol se encontra no equinócio de Primavera.

Uma famosa definição é a de **tempo sideral** local: (... o ângulo horário do ponto vernal)

$$T.S.L. = \alpha + H$$

Ora, o **dia sideral** é medido entre duas passagens sucessivas do ponto vernal no meridiano do lugar.

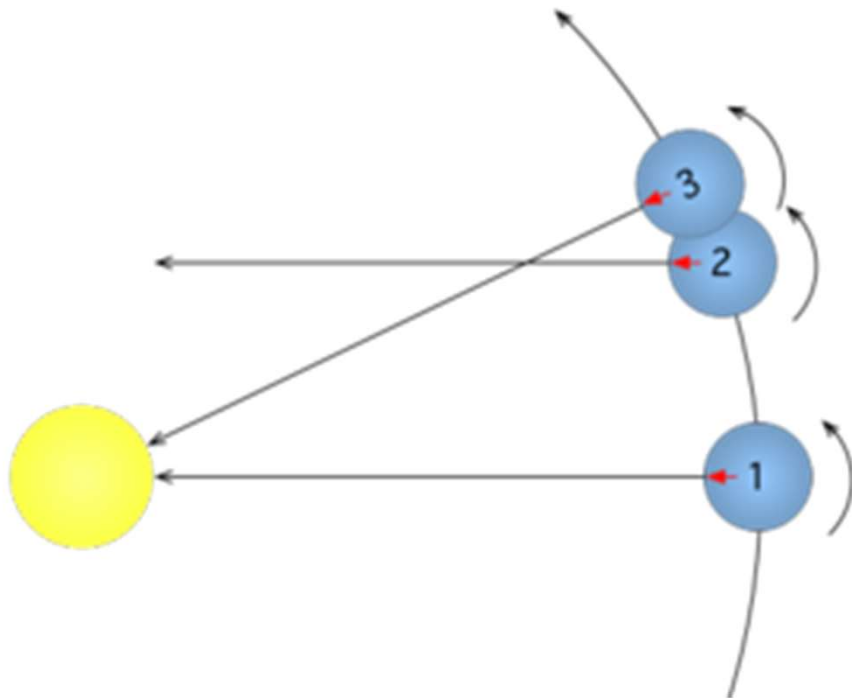
Do mesmo modo, o **dia solar** é medido entre duas passagens sucessivas do Sol no mesmo meridiano.

São diferentes!

**PORQUÊ?**



... devido à translação e rotação da Terra:



Em relação às estrelas, a Terra completa uma rotação num tempo **inferior** ao medido em relação ao Sol:

- é esse o **dia sideral**

O ângulo extra que a Terra tem de fazer para se alinhar com o Sol é dado por:

$$360^\circ / 365 \approx 1^\circ$$

A diferença, em tempo, entre os dois dias é dada por:

$$\begin{array}{r} 24 \times 60min \quad \text{—————} \quad 360^\circ \\ x \quad \text{—————} \quad 1^\circ \end{array}$$

Assim, aproximadamente, a diferença é de **quatro minutos**.

Mais exactamente, de facto, o dia sideral tem de duração 23h56m4.1s.

## 1.2 As grandezas em Astronomia

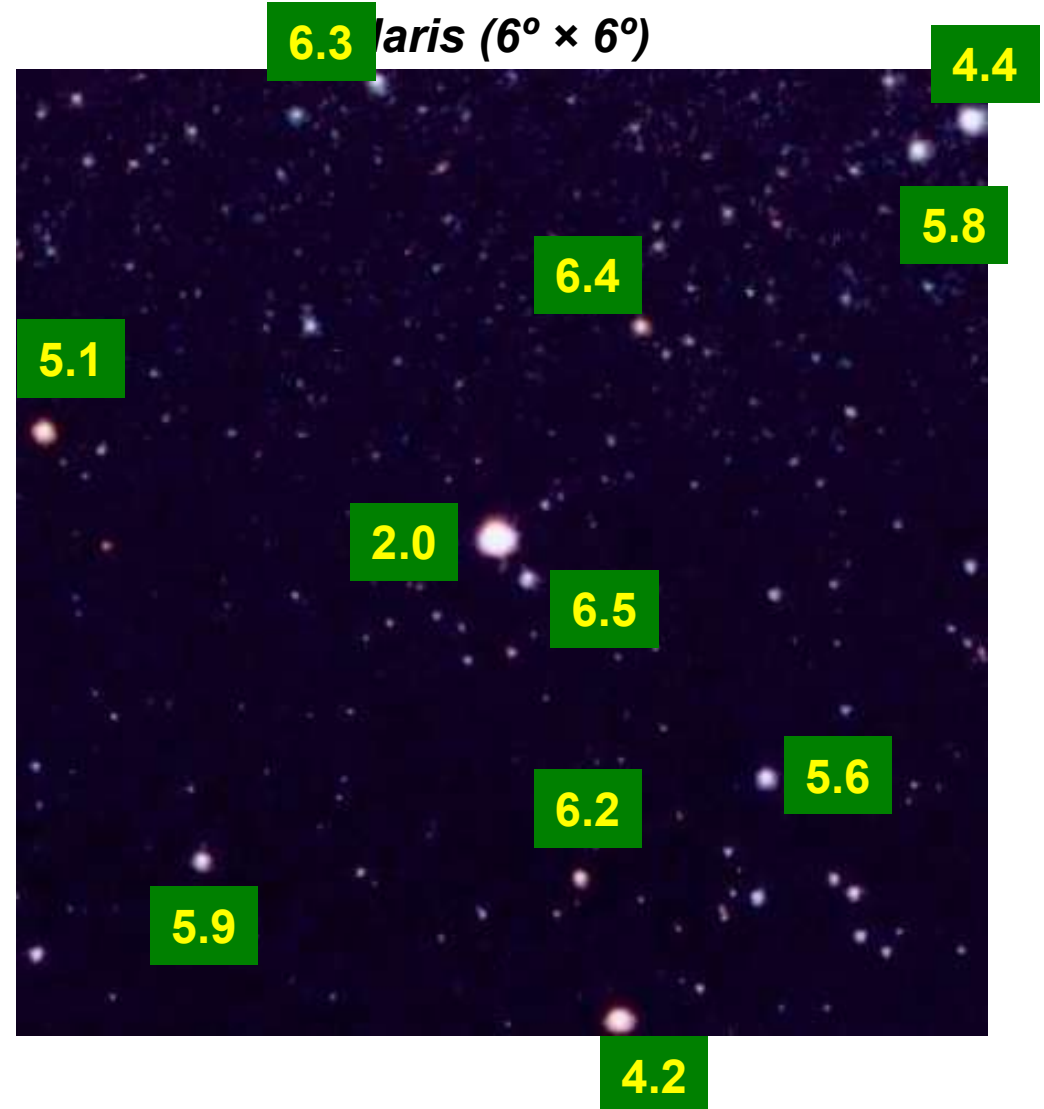
$m \equiv$  grandeza aparente

(gregos) estrela  $m=1 \rightarrow$   
100 vezes **mais** brilhante que  
estrela  $m=6$

(mais distante? mais **luminosa**?)

$m$  (Vega) = 0.000  
 $m$  (Sol) = - 27  
 $m$  (Lua) > - 13  
 $m$  (Vénus) > - 4  
 $m$  (Sirius) = - 1.5  
 $m_{lim}$  (olho) = + 6.5  
 $m_{lim}$  (HST) = + 31

$M \equiv$  grandeza absoluta (=  $m$  à distância padrão  
de 10 pc = 32.6 anos-luz)



$M$  (Sol) = + 4.7  
 $M$  (Lua) > + 32  
 $M$  (Vénus) > + 30  
 $M$  (Sirius) = + 1.4

(gregos) estrela  $m=1 \rightarrow$

100 vezes **mais** brilhante que  
estrela  $m=6$

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log (b_1/b_2)$$

$$M - m = 5 - 5 \log d(\text{pc}) \quad (\text{módulo de distância})$$

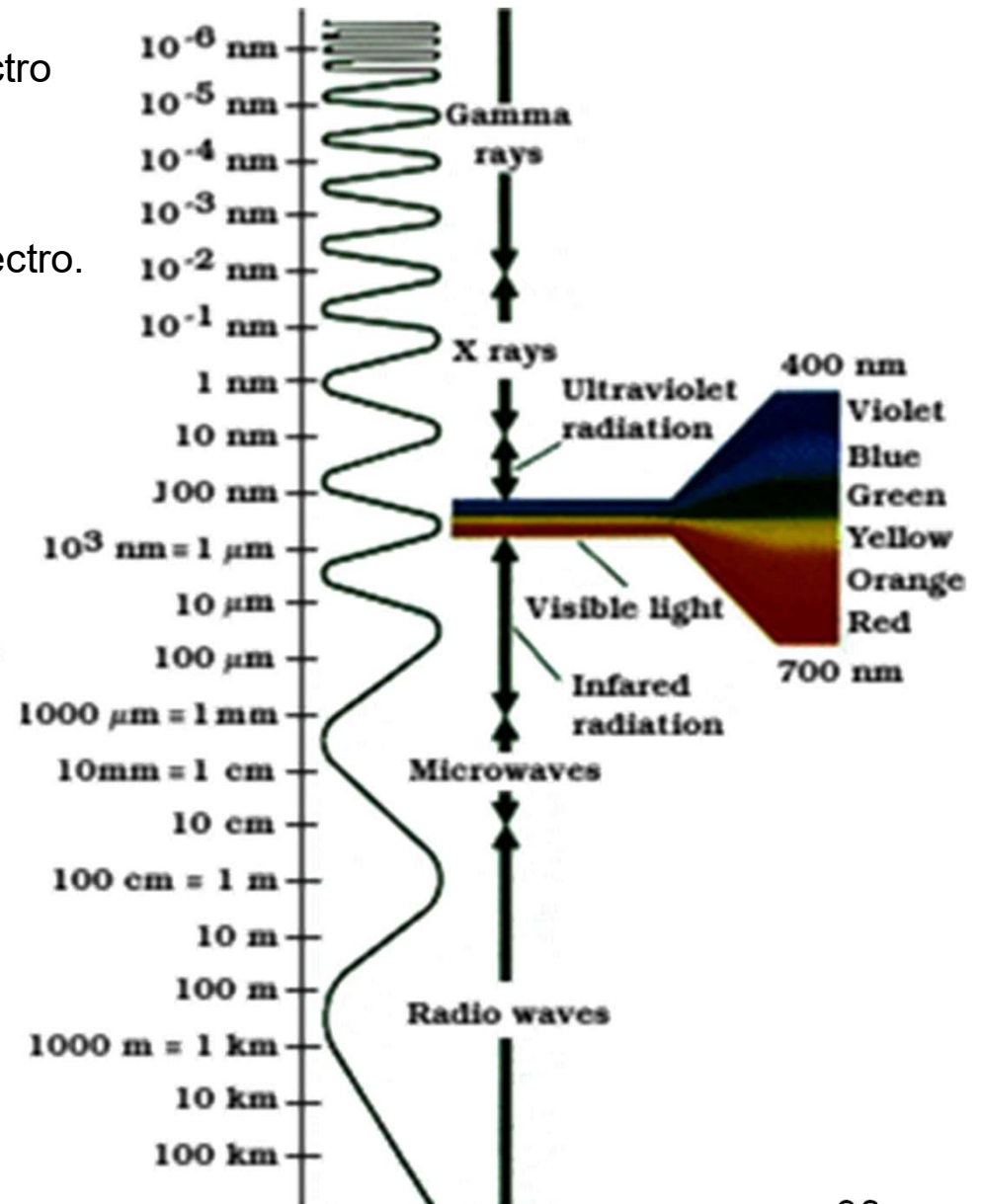
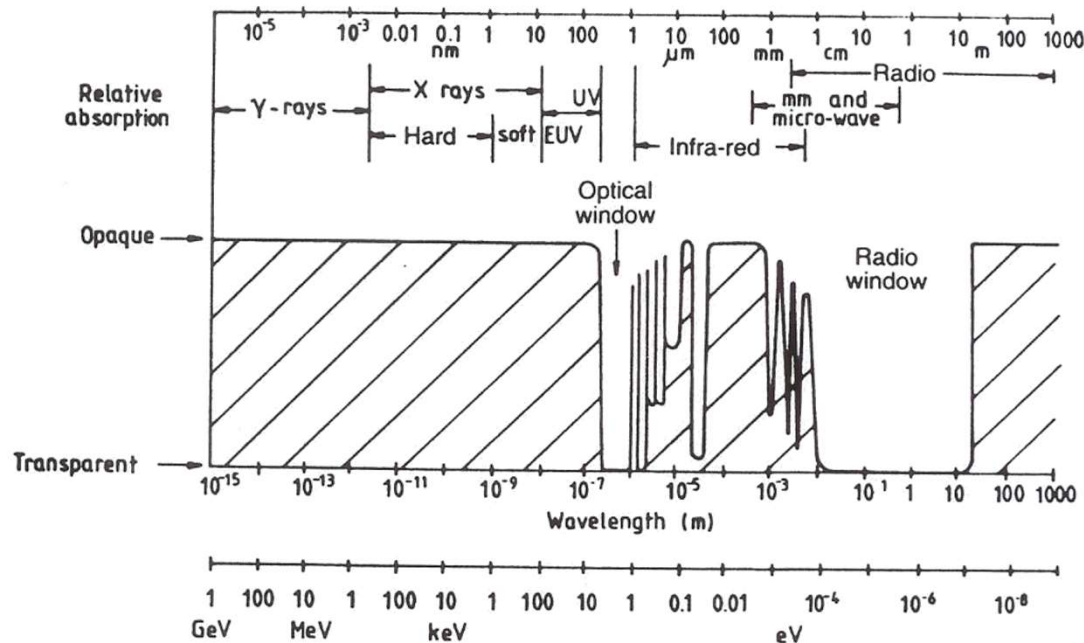
$L \equiv$  luminosidade, potência ou brilho intrínseco  $= 4\pi d^2 b$

$$M_1 - M_2 = -2.5 \log (L_1/L_2)$$

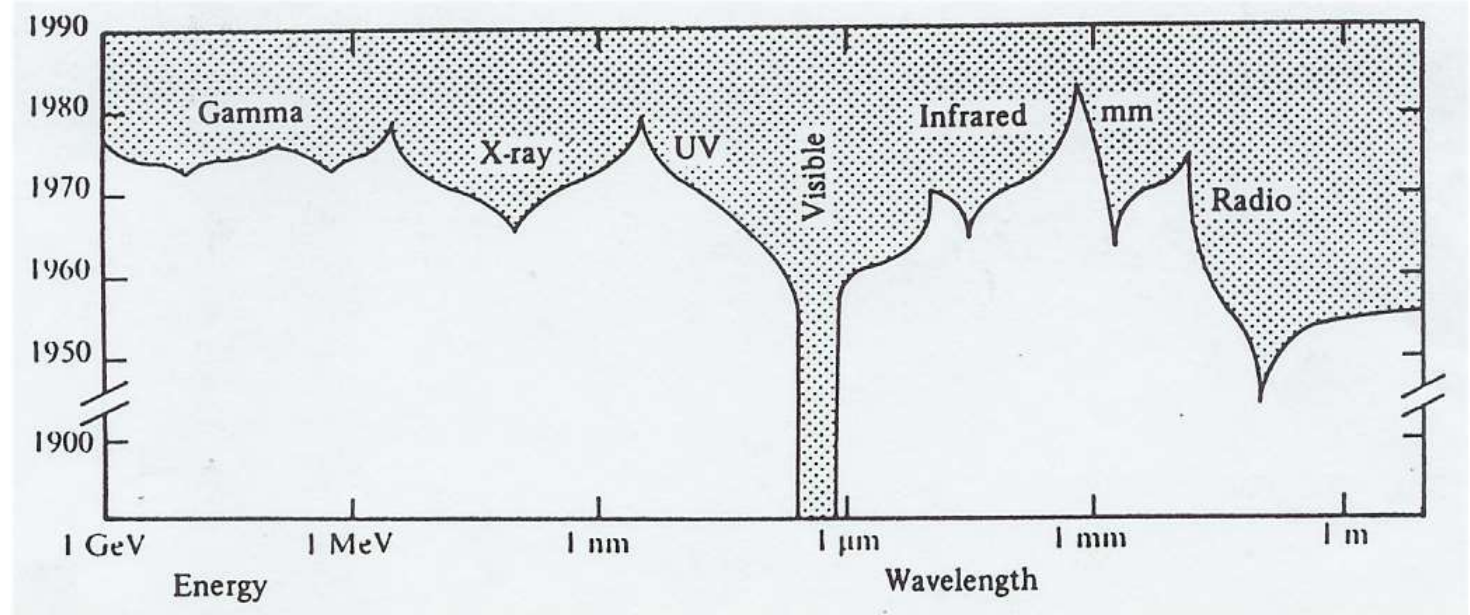
## 1.3 O Espectro Electromagnético

A luz visível é apenas uma pequena porção do espectro electromagnético. O estudo de qualquer objecto astronómico não fica completo sem se conhecer informação sobre o mesmo em outras partes do espectro.

(In)felizmente, contudo, a atmosfera da Terra bloqueia a maioria da radiação. Só o óptico e o rádio chegam com facilidade, havendo também algumas “janelas” no IV e micro-ondas...



...Daí só há relativamente poucos anos termos conquistado todo o espectro para a Astronomia.



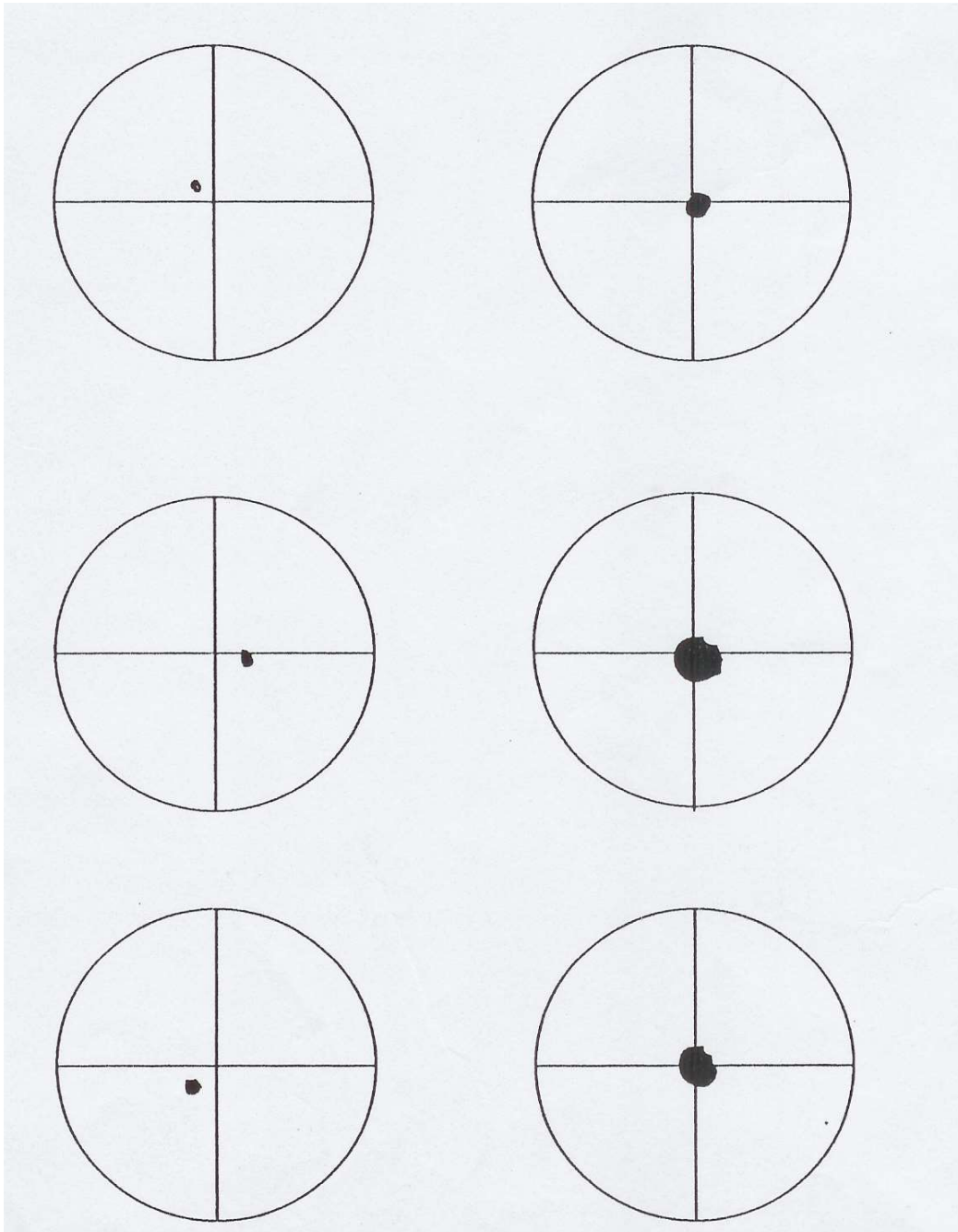
Por definição, para um telescópio de diâmetro  $D$  a observar no comprimento de onda  $\lambda$ :

$$\text{Resolução} \propto D / \lambda \quad [\text{rad}] \quad \alpha_{\text{sep}} = 1.22 \lambda / D \quad [\text{rad}]$$

Ainda, temos que:

$$\text{Sensibilidade} \propto D^2$$

A atmosfera faz bem pior à Astronomia do que simplesmente bloquear bandas: gera efeitos perturbadores das observações. No caso do óptico, tais efeitos produzem o disco de “[seeing](#)” efectivamente limitando a resolução das observações a 0.5-2”, independentemente do diâmetro do telescópio utilizado.



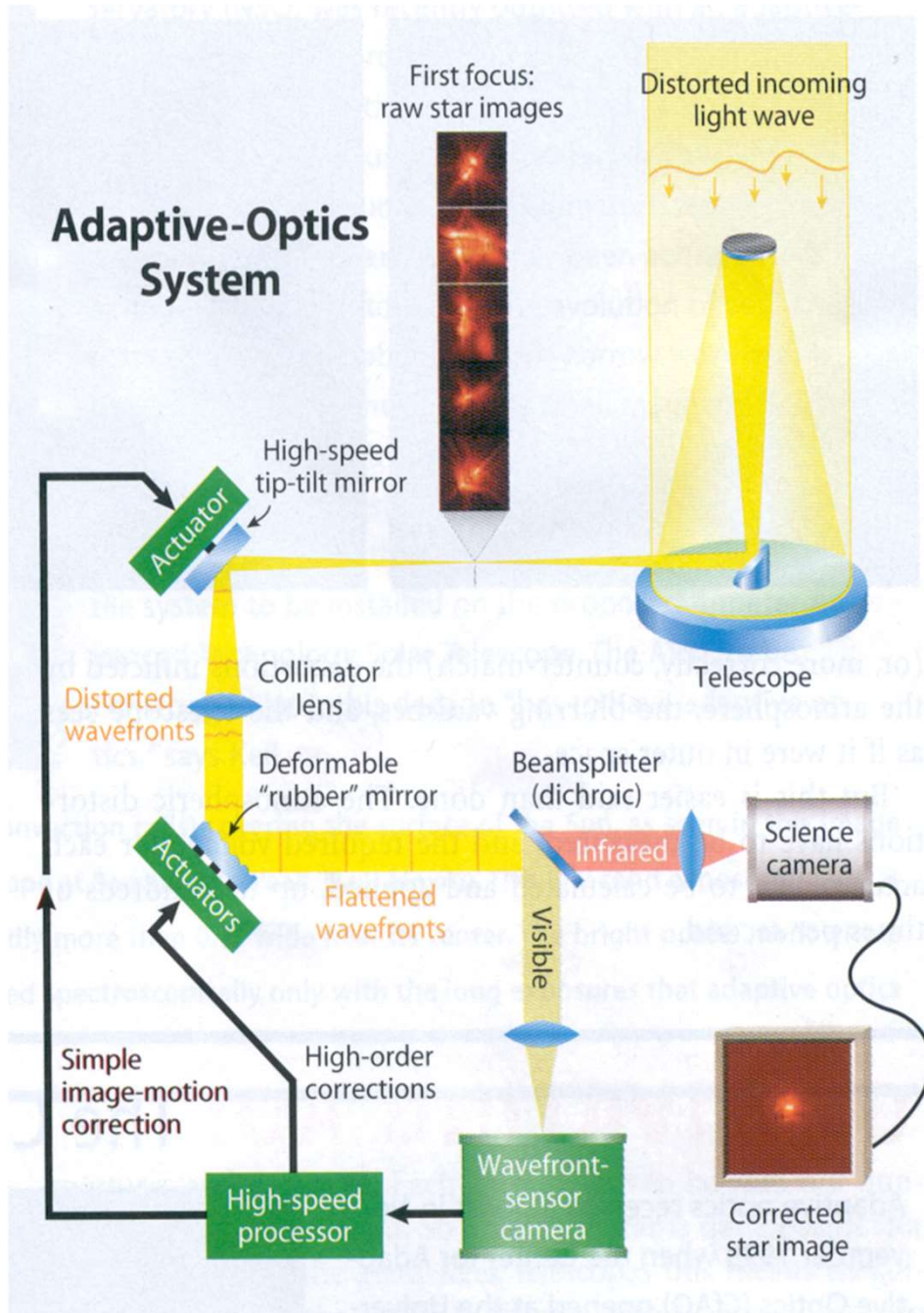
Os típicos efeitos do “seeing” num telescópio pequeno (coluna da esquerda) e num grande. Note-se que não só a **forma** da estrela observada é constantemente alterada pelo seeing como também a sua **posição**. Quando o telescópio é grande a distorção mantém-se mas a posição não se altera tanto.

Por exemplo, para o caso do Keck I ( $D=10\text{m}$ ), observando no visível ( $\lambda = 0.55\mu\text{m}$ ), vem:

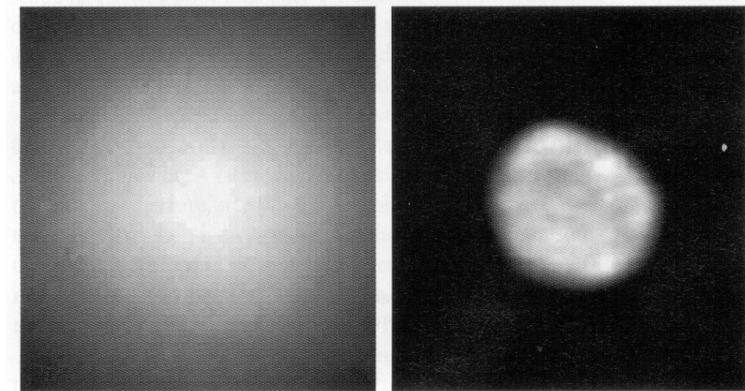
*Mínima separação detectável*

$$1.22 \lambda / D \sim 6.7 \times 10^{-8} \text{ rad} \sim 0.013''$$

[ óptica adaptativa ]

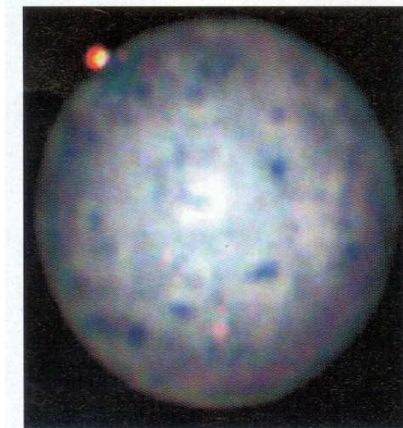


*AO numa estrela...*



*AO para Vesta (asteróide)*

*AO para Io  
(satélite de Júpiter)*



## 1.4 Telescópios e detectores

Longe vai o tempo em que o astrónomo “clássico” usava o velhinho modelo de telescópio **refractor** (no caso mais simples com apenas duas lentes). Hoje em dia o telescópio **reflector** é o utilizado quase 100% das vezes. Principais vantagens: o pouco peso relativo e a inexistência de aberrações.



*O telescópio de Yerkes, o maior refractor do mundo (1m de diâmetro).*

*Um típico telescópio reflector profissional (Cerro Tololo 4m).*





*O VLT, considerado o melhor (conjunto) telescópio do mundo: Quatro telescópios reflectores de 8m de diâmetro + vários de 2m.*



*O Keck, com dois telescópios reflectores de 10m de diâmetro.*



*O diâmetro dos espelhos dos maiores telescópios reflectores do mundo. Da antiga “classe dos 4m” já estamos na “classe dos 8-10m”.*

## COLLECTING AREA OF THE LARGE TELESCOPES



**GranTeCan** 10.4m (2009)

**Giant Magellan Telescope (GMT)** 24m (2018)

**Thirty-Meter Telescope (TMT)** 30m (2018)

**Extremely Large Telescope (ELT)** 42m (2018)

Northern Hemisphere

Southern Hemisphere

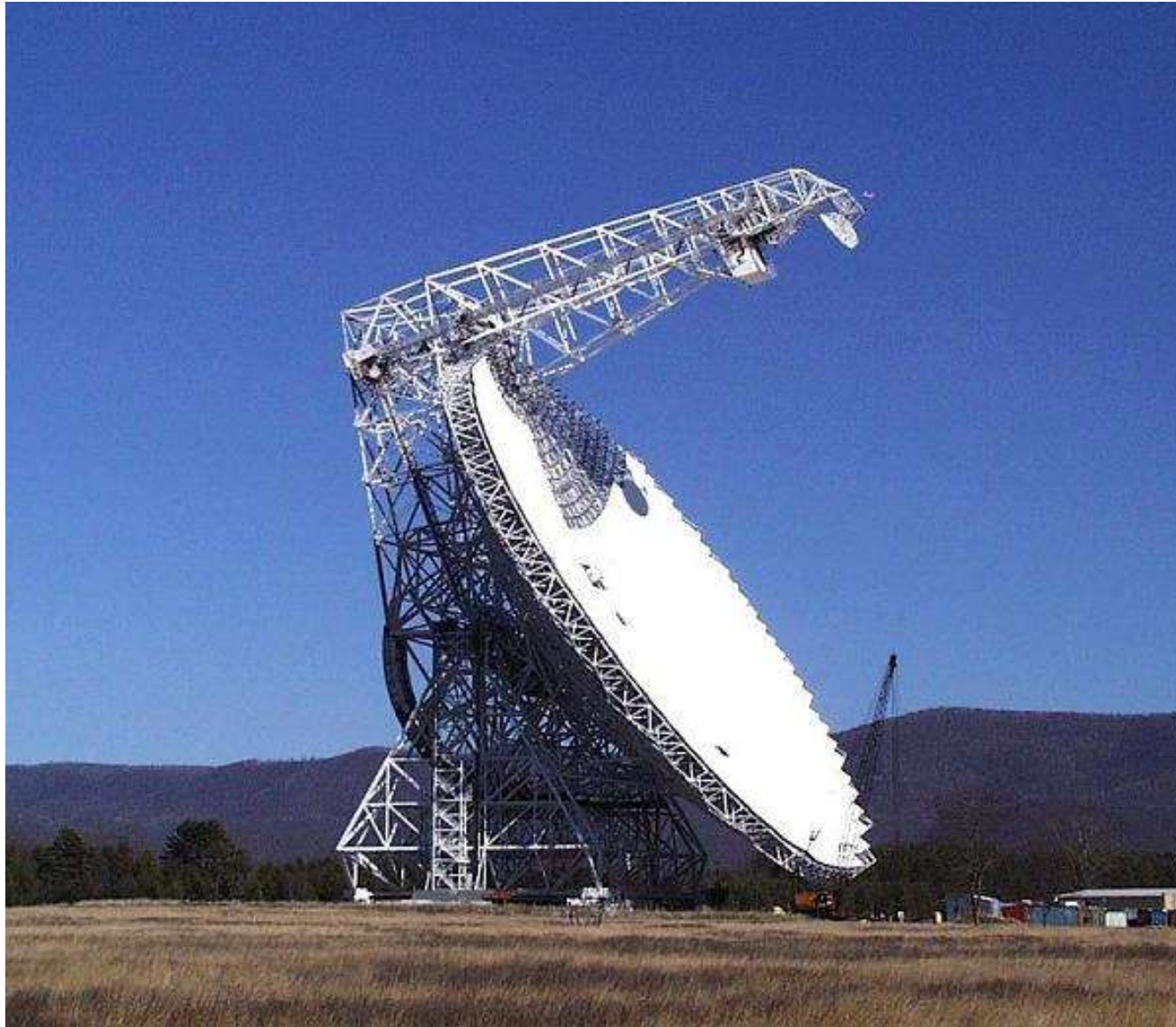
Desde há décadas que a Rádio Astronomia entrou em acção, com os seus **Rádio Telescópios**, muitos bem diferentes de um telescópio óptico.

*O maior do mundo (300m) - Arecibo*



***É “furado”! E agora?!...***

*O maior do mundo amovível (110×100m<sup>2</sup>) – Green Bank (Virginia)*



*Um clássico (76m, Jodrell Bank)*



*Uma antena VLBI (32m, Cambridge)*



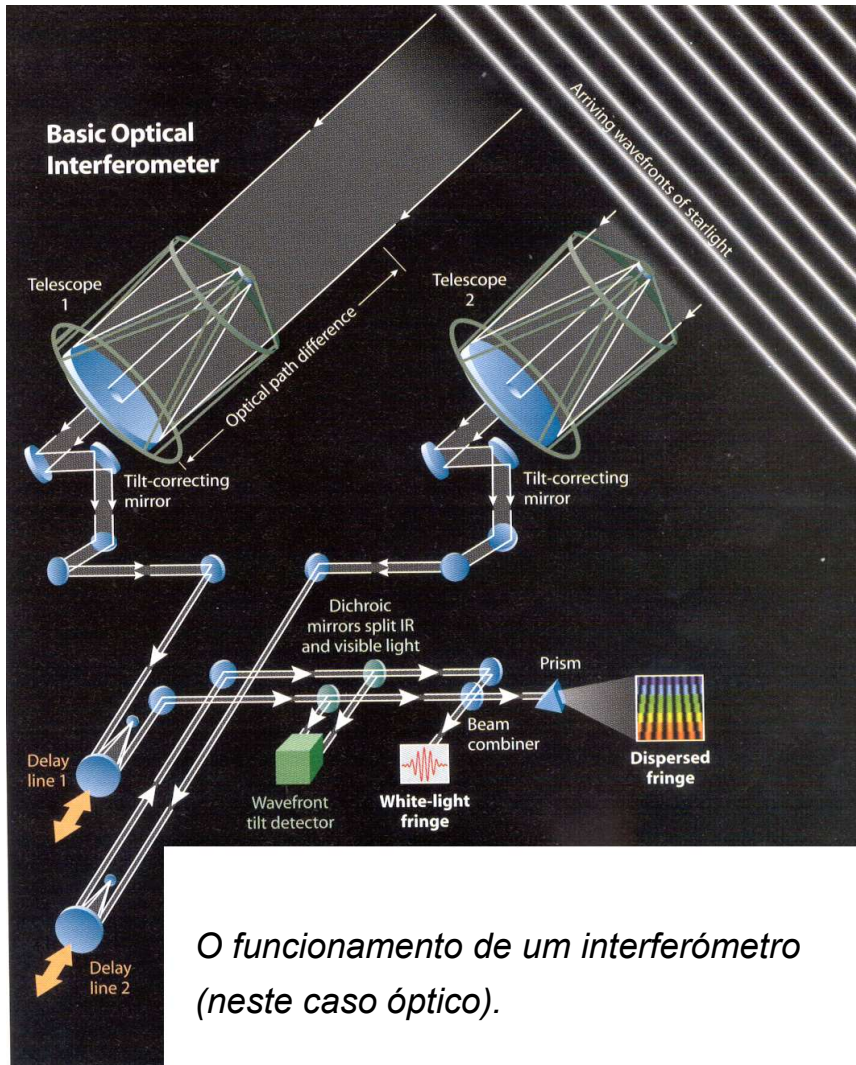
*Rede de dipolos BSA (Puschino, Rússia); 70000m<sup>2</sup>.*



*Rede de dipolos em forma parabólica (MOST, Austrália); 18000m<sup>2</sup>.*



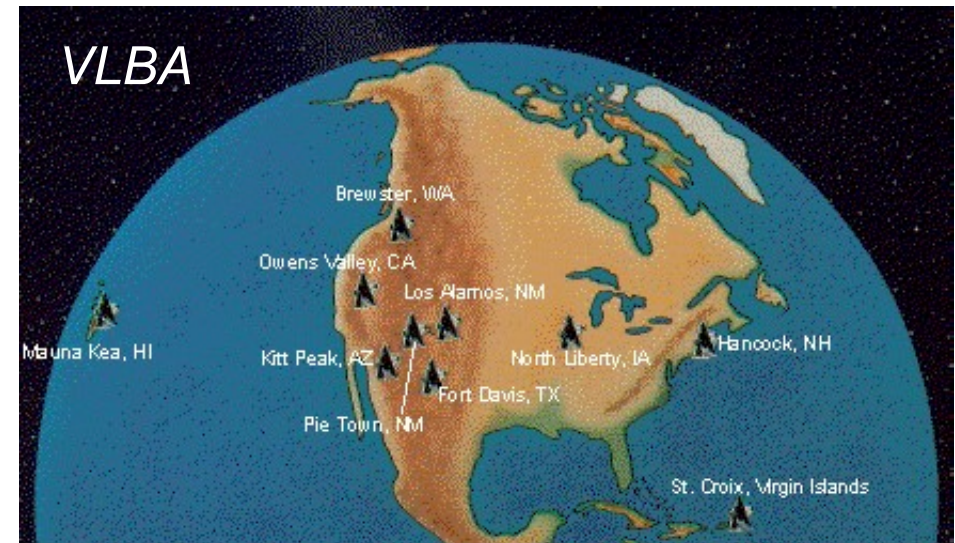
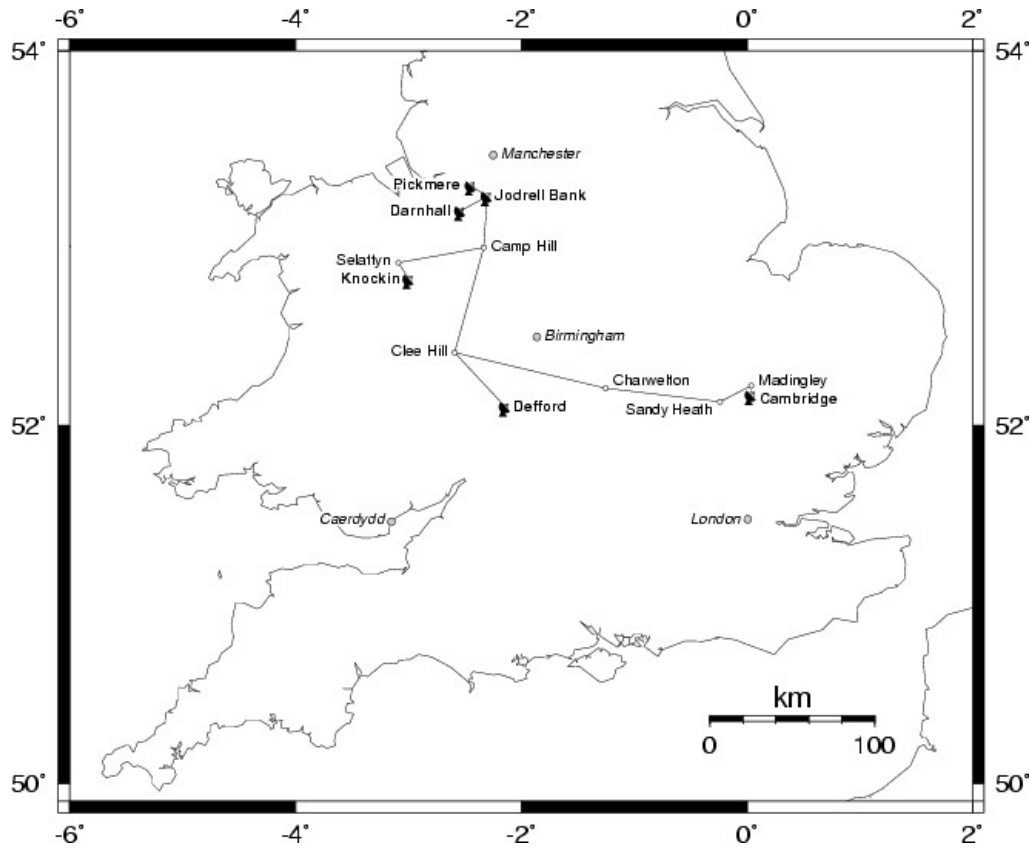
Mas a principal revolução que a Rádio Astronomia trouxe, só em 2001 concretizada no óptico (VLT e Keck), foi a técnica da **interferometria**. A ideia é colocar vários rádio telescópios a observar o mesmo objecto (ao mesmo tempo) e combinar o sinal. Na prática, obtém-se o equivalente a um rádio telescópio com o diâmetro da **distância máxima** entre antenas (em termos de resolução).



O VLA, o interferómetro mais sensível (e famoso) do mundo. Tem flexibilidade o suficiente para ter quatro comprimentos máximos: 1, 3.6, 10 e 36 km.

O VLBI junta o EVN e o VLBA para chegar ao diâmetro da Terra.

O MERLIN (Inglaterra) tem um comprimento máximo de 230 km.

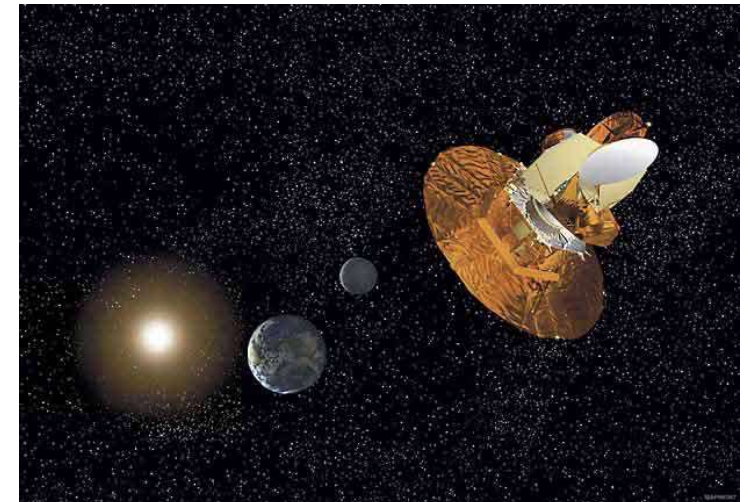




Bem mais recente (20 anos) foi o início sério da exploração do resto do espectro electromagnético: O Universo de raios X, de raios  $\gamma$ , IV, UV, microondas. O recurso aos satélites é essencial.

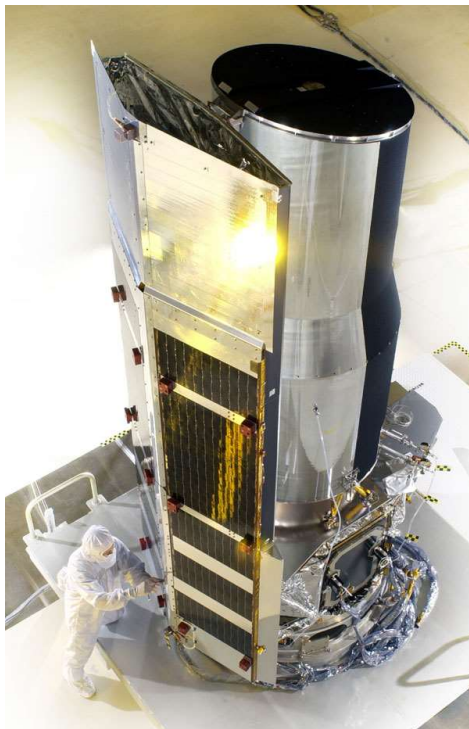
Microondas:

**COBE**



**WMAP**

**Spitzer**

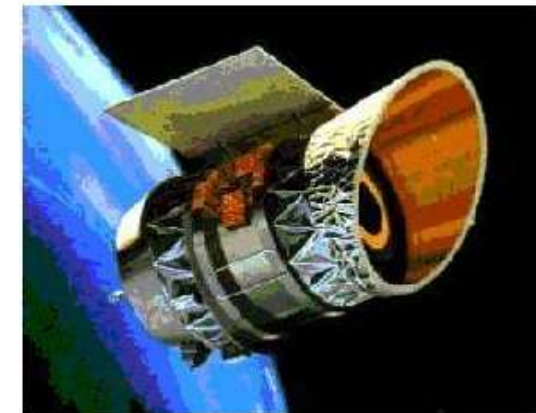


IV:



**Herschel**

**IRAS**



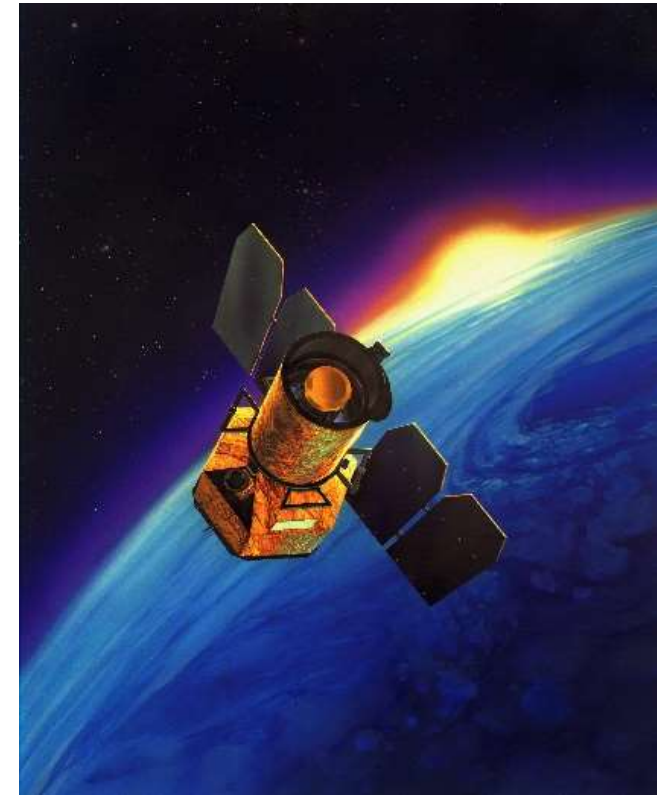
UV:



IUE



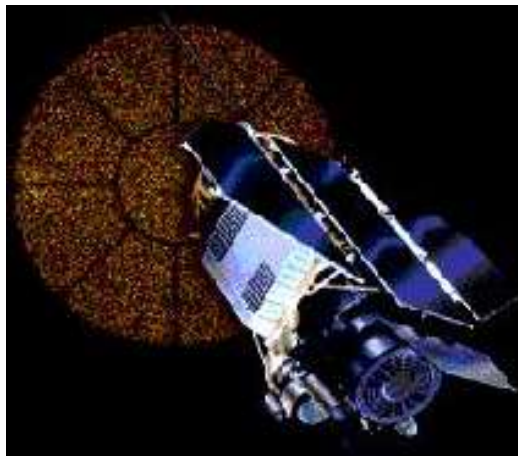
FUSE



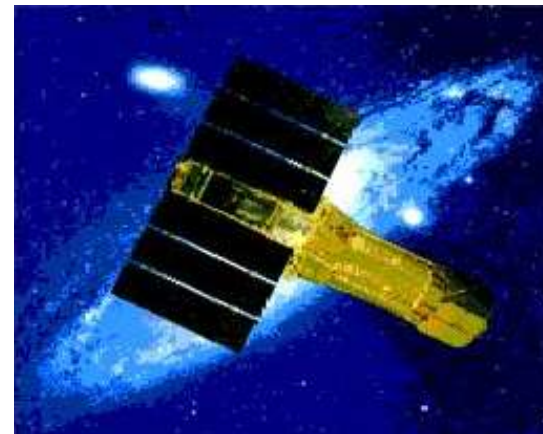
GALEX

Raios X:

ROSAT



ASCA



# O Universo

**Chandra**



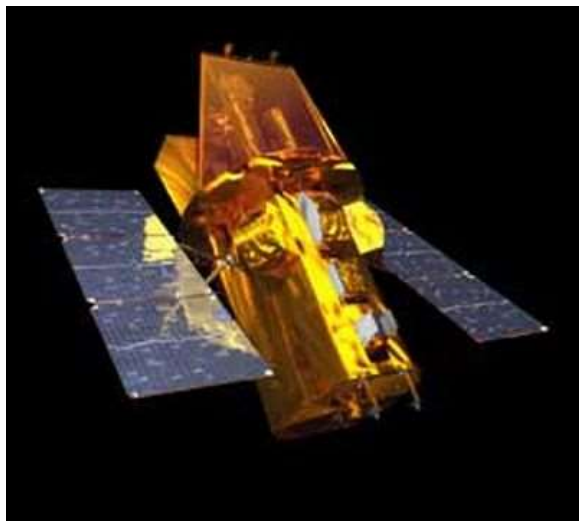
**XMM-Newton**



**Beppo-SAX**

Raios  $\gamma$ :

**Swift**



**Integral**



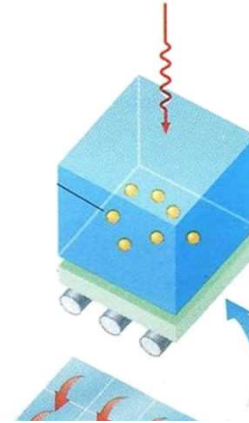
**CGRO**

## Detectores

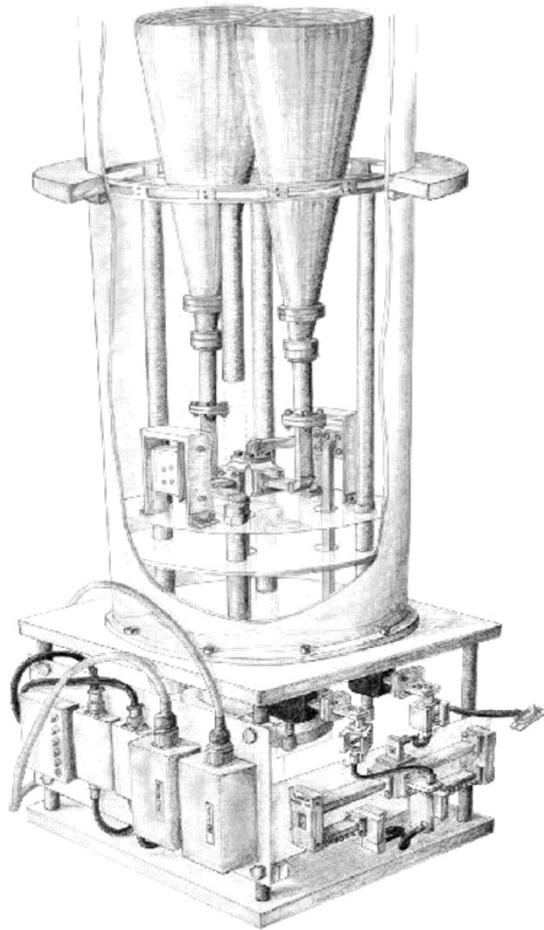
Óptico CCD (Charge-coupled device)

Uma CCD é 500 vezes mais sensível que a película

lixéis:  
os



P  
d



Nobel  
ca 2009

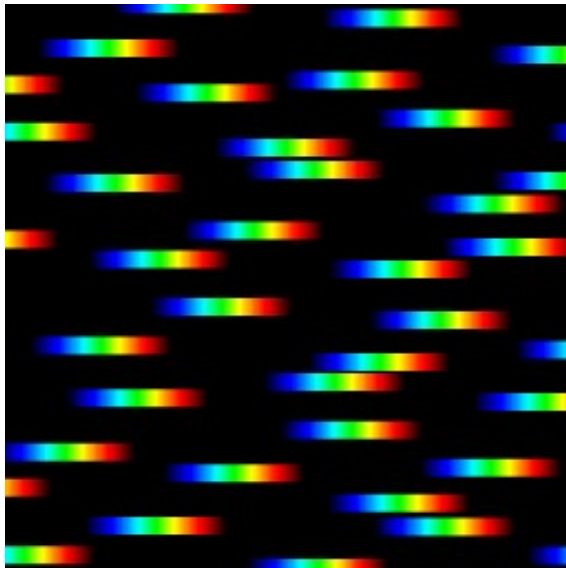
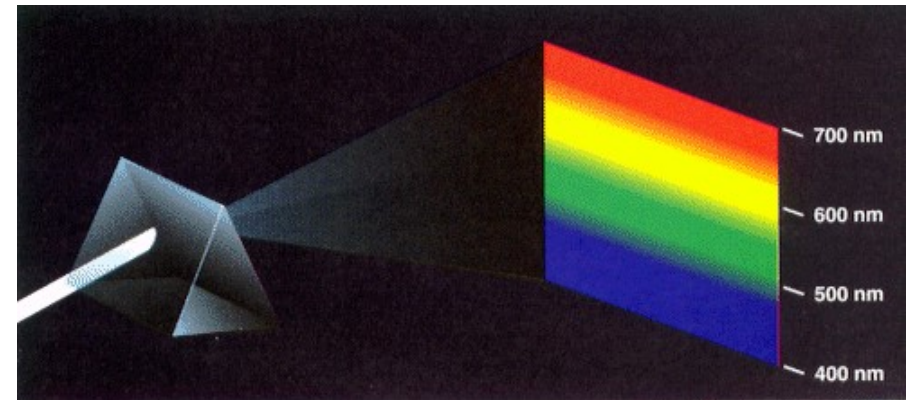
## Espectroscopia

Define-se **resolução espectral** (adimensional) por:

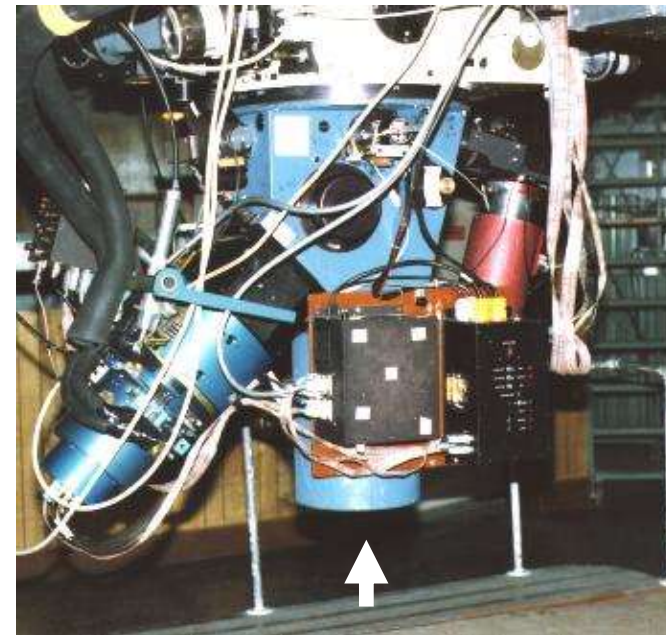
$$R = \lambda / \Delta\lambda$$

Operacionalmente:  $R < 100$  (fotometria)

$R > 100$  (espectroscopia)

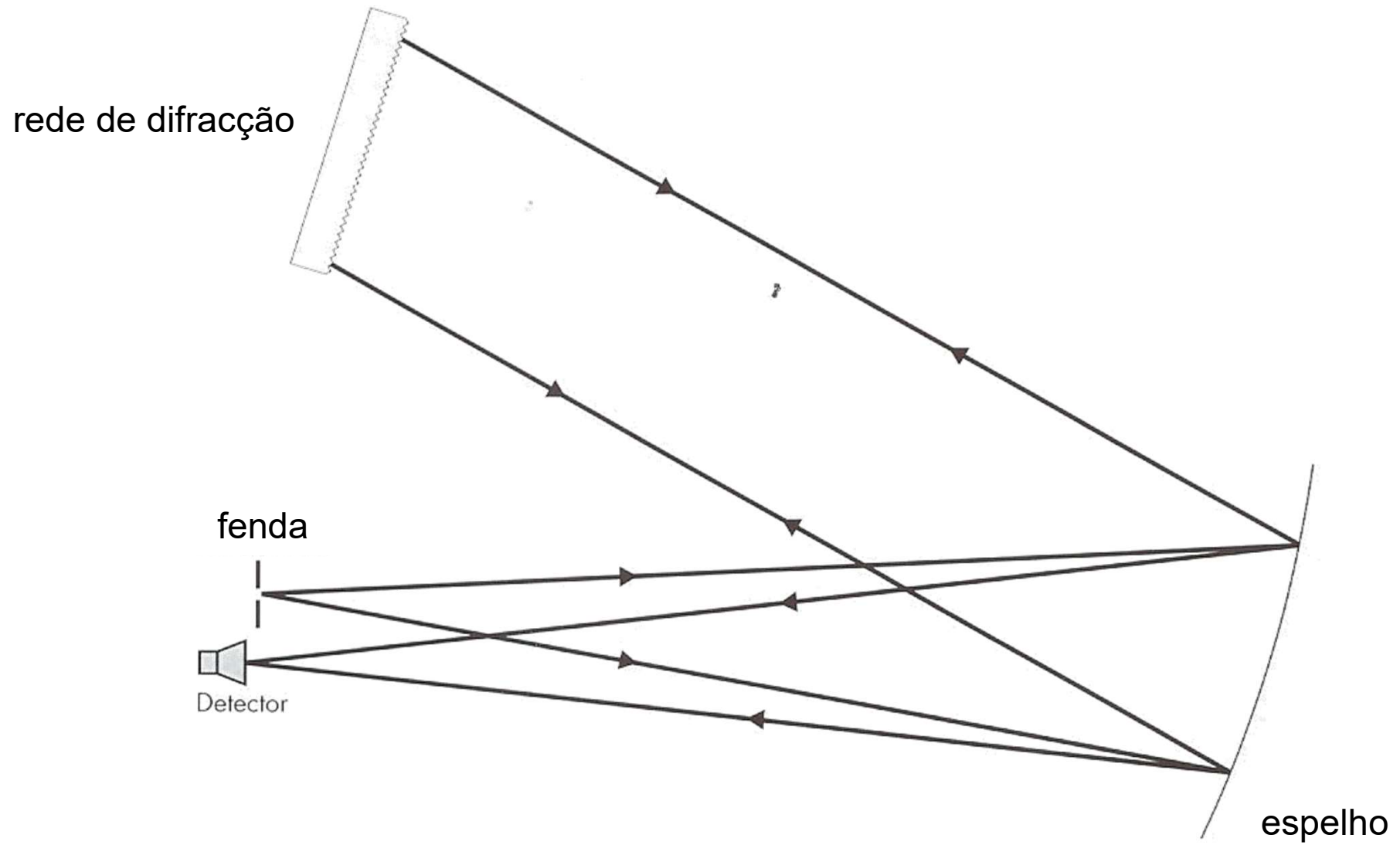


*Com um prisma todos os objectos observados aparecem com o seu espectro (baixa resolução).*



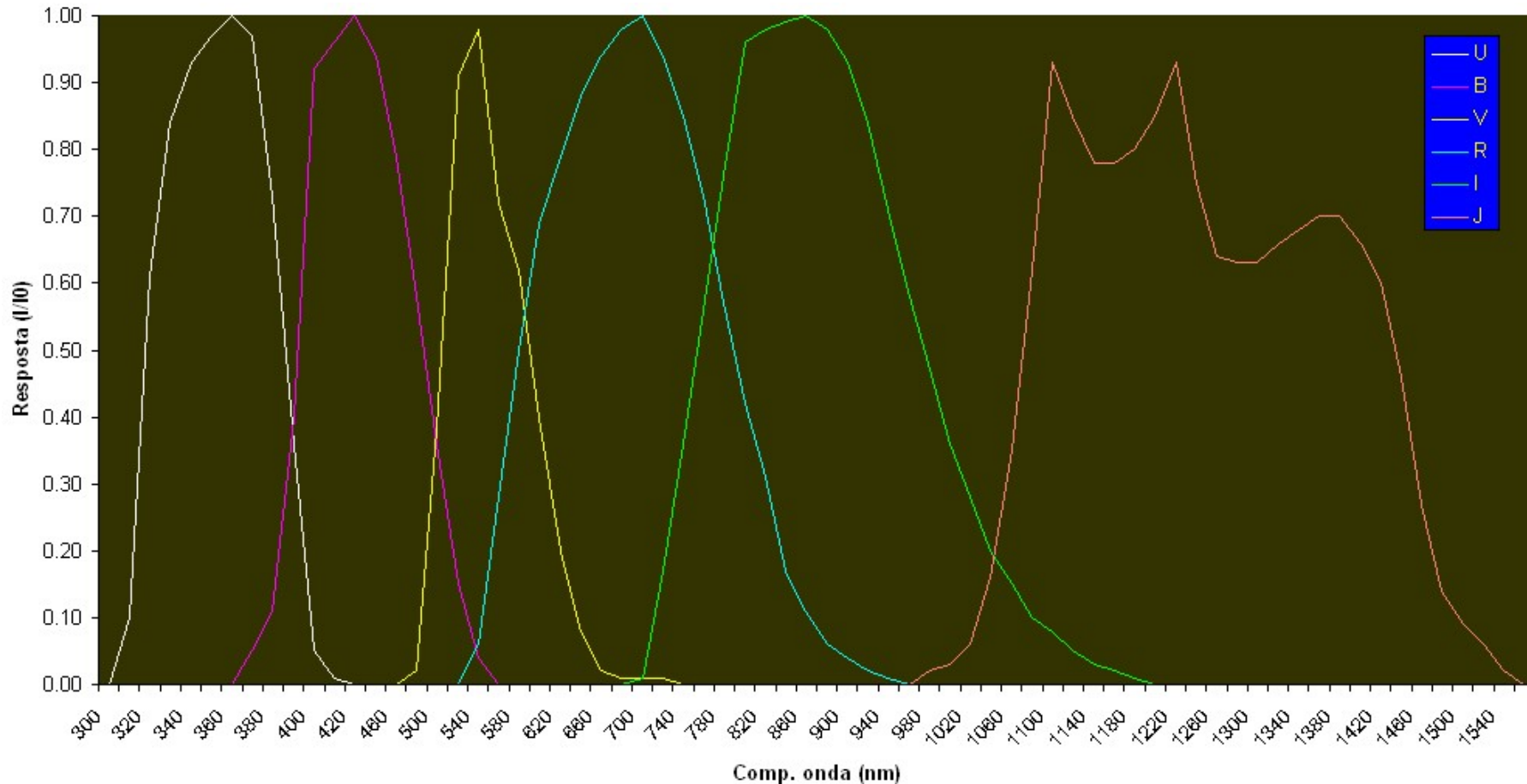
*Espectrómetro* →

↑  
CCD

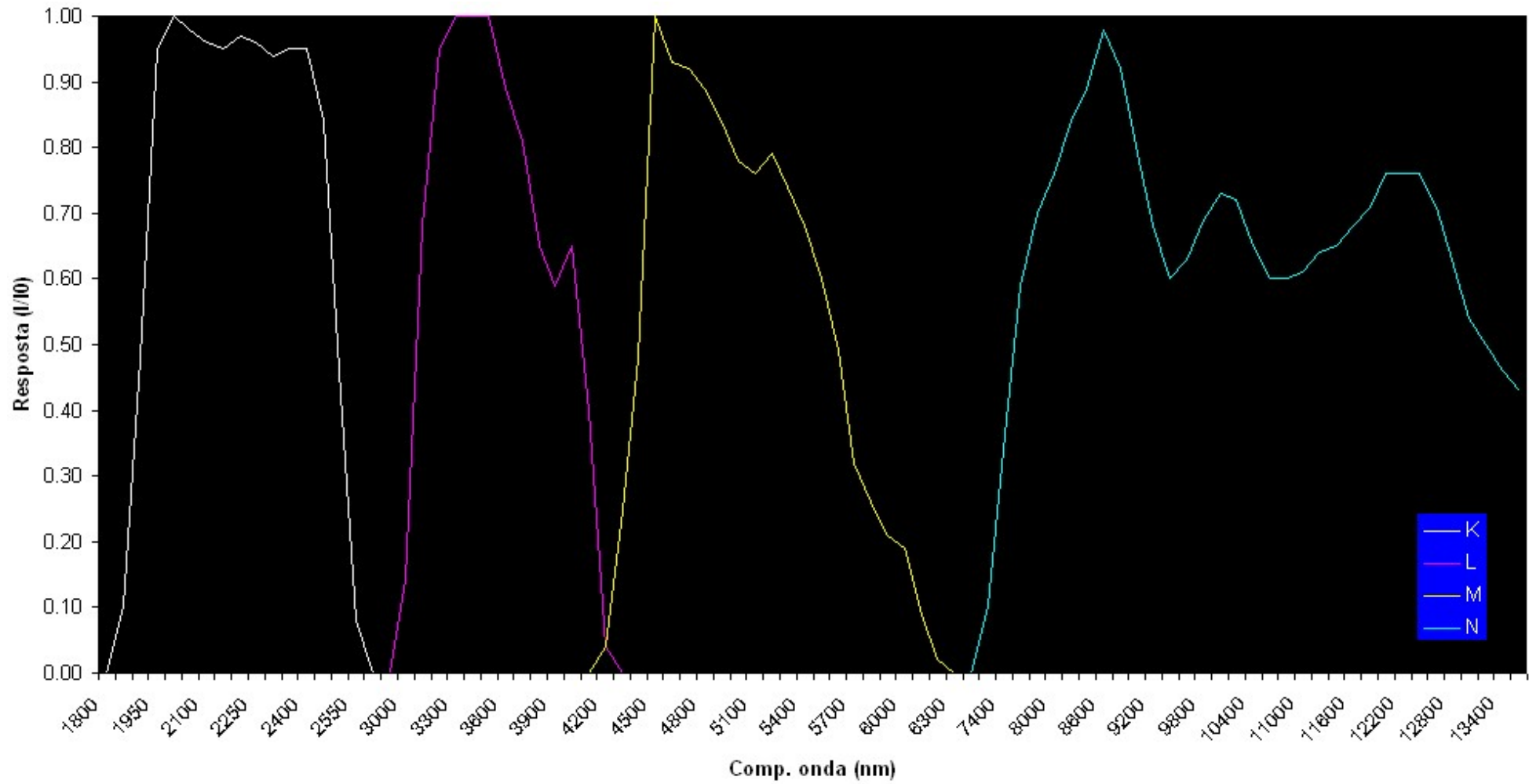


## 1.5 Sistemas de grandezas e filtros

Na prática, para conhecerem a Física dos objectos que estudam, os astrónomos não se limitam a observar os objectos em “qualquer” (ou “toda”) região do espectro (e.g. todo o visível: 400-700nm) mas têm de separar a sua luz em partes. A análise detalhada requer **espectroscopia**. Uma análise mais grosseira é a **fotometria**. Por exemplo, esta separa o visível em três bandas “Johnson” BVR, com os sistemas “estendidos” (até ao UV e IV) UBVRI, ou UBVRIJ...



... ou mesmo UBVR<sup>i</sup>JKLMN:





Os filtros Johnson, por serem tão generalizados, acabaram por definir o mais antigo **sistema de grandezas** – as grandezas aparentes têm de estar associadas a uma **cor**. Temos (por exemplo):

$$U = m_U \quad B = m_B \quad V = m_V \quad R = m_R$$

É, agora, óbvio que um objecto de cor vermelha será mais brilhante no vermelho – R do que noutras cores, por exemplo azul – B. Será assim tão óbvio?

$$B - V > 0 \quad \text{é azul ou vermelho?}$$

$$B - V > 0 \Leftrightarrow B > V \quad \text{mais brilhante no amarelo/verde, menos no azul; logo é } \text{vermelho!}$$

$$U - R > 0 \quad \text{é azul ou vermelho?}$$

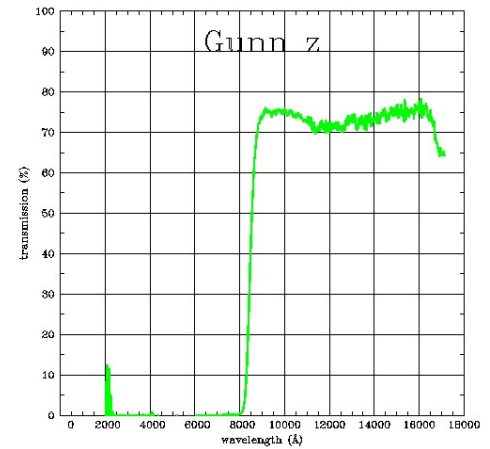
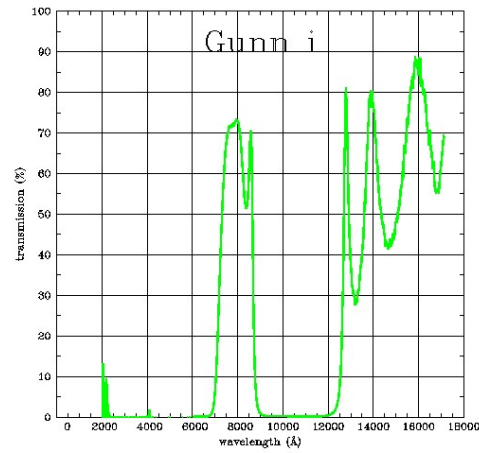
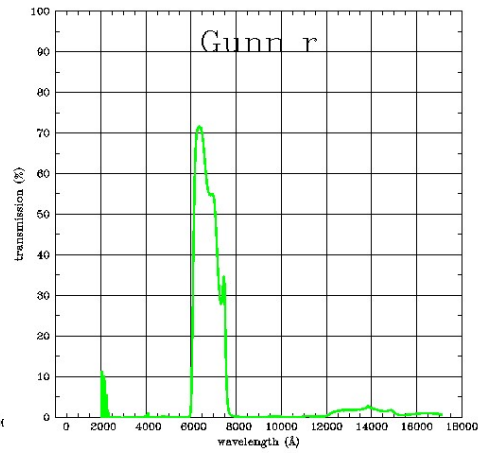
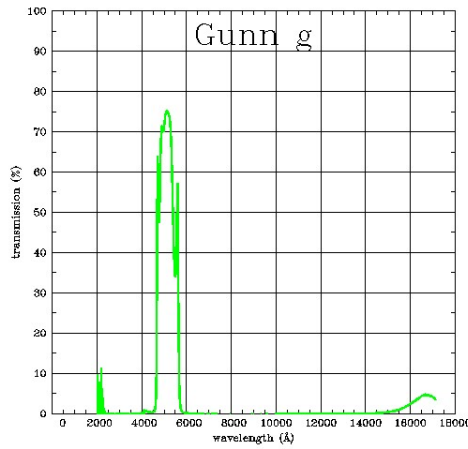
$$U - R > 0 \Leftrightarrow U > R \quad \text{mais brilhante no vermelho, menos no ultravioleta/azul; logo é } \text{vermelho!}$$

## Filtros

Há outros sistemas de grandeza, definidos por conjuntos de **filtros**.

**Gunn** *griz*

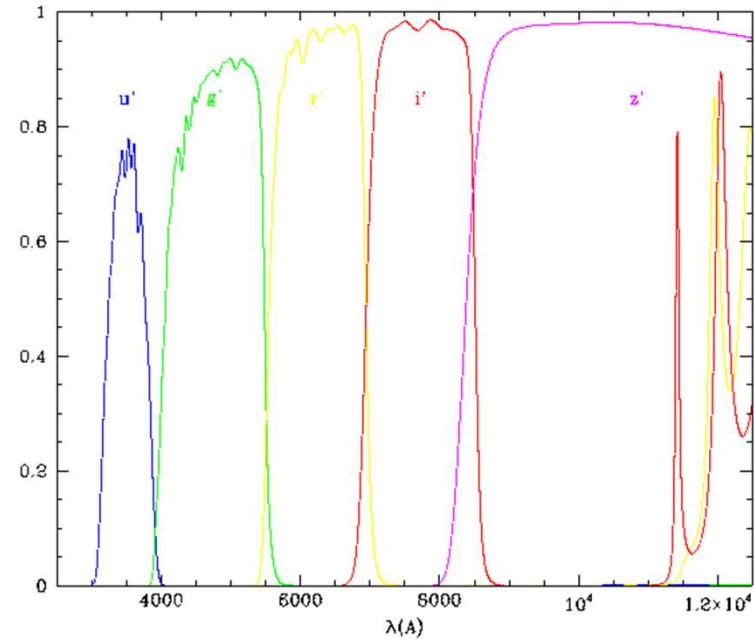
**Infra-vermelho**



**Visível**

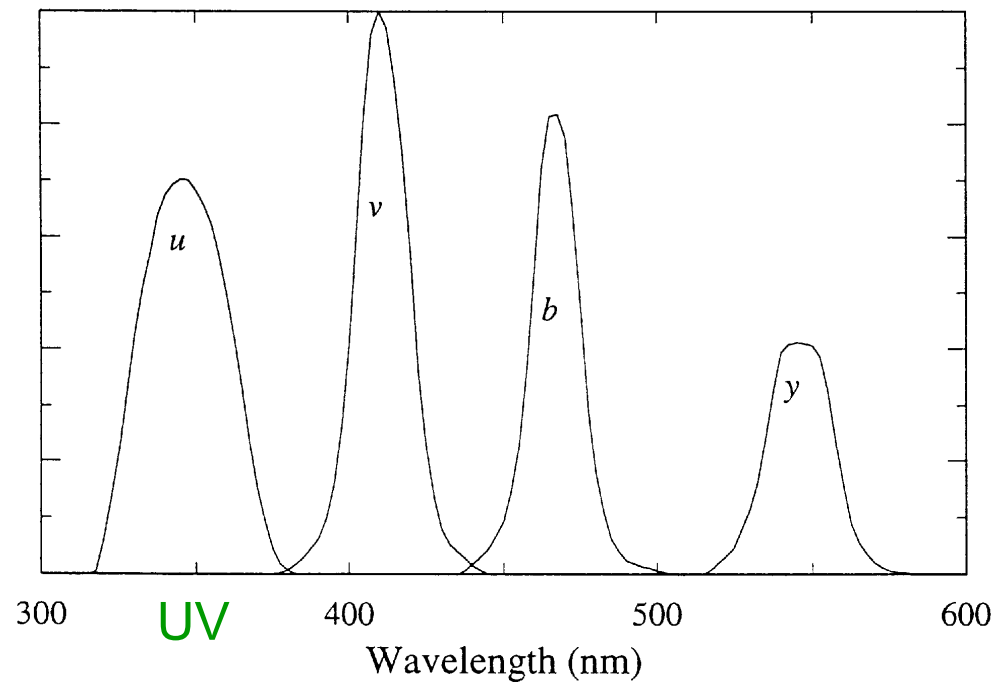
**Sloan**

*u' g' r' i' z'*  
 { } { }  
**Visível** **IV**



**Stromgren**

*u v b y*



Visível... e ainda falta!