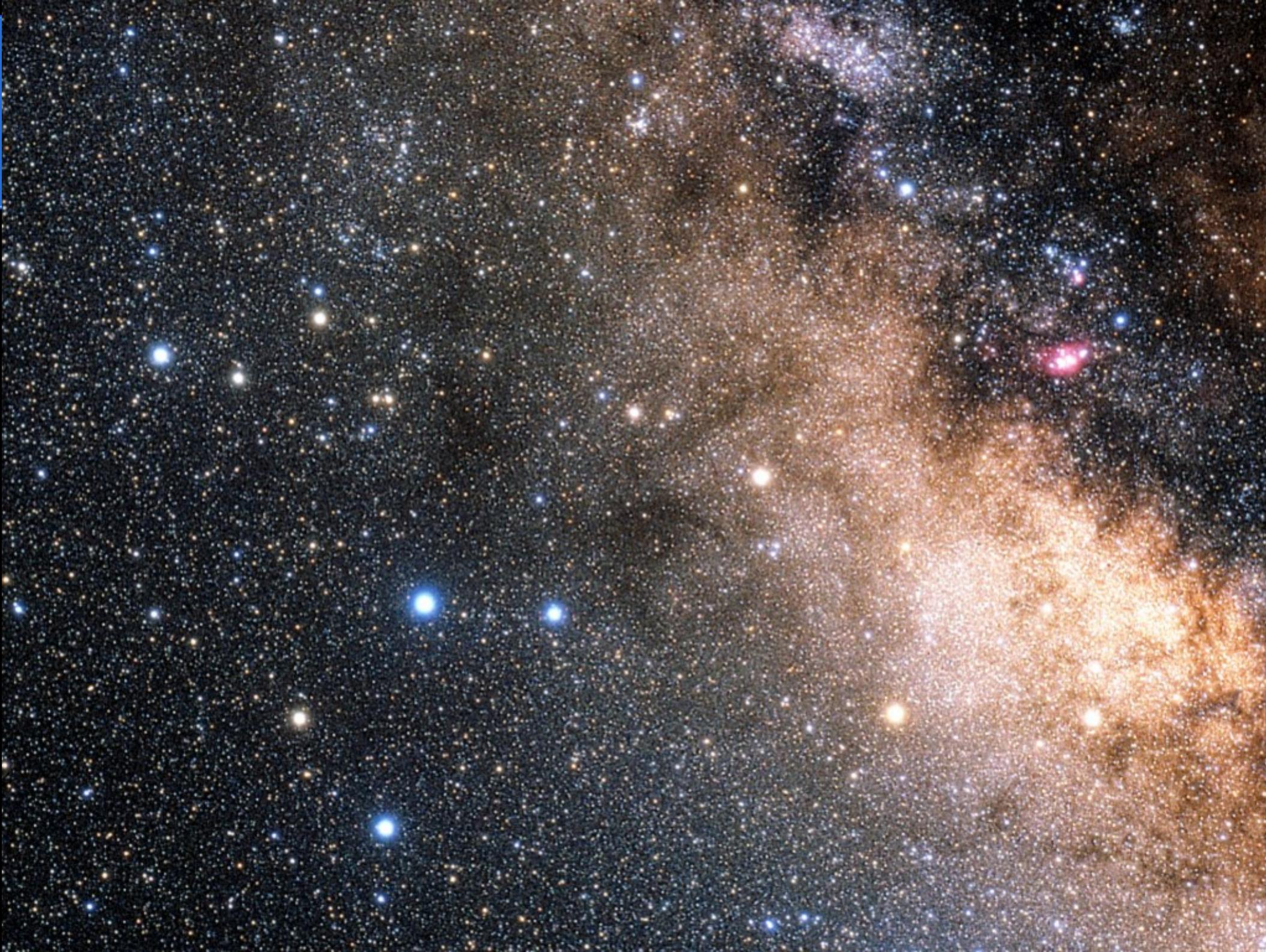


# Radiação eletromagnética. Magnitudes, cores. Corpos negros

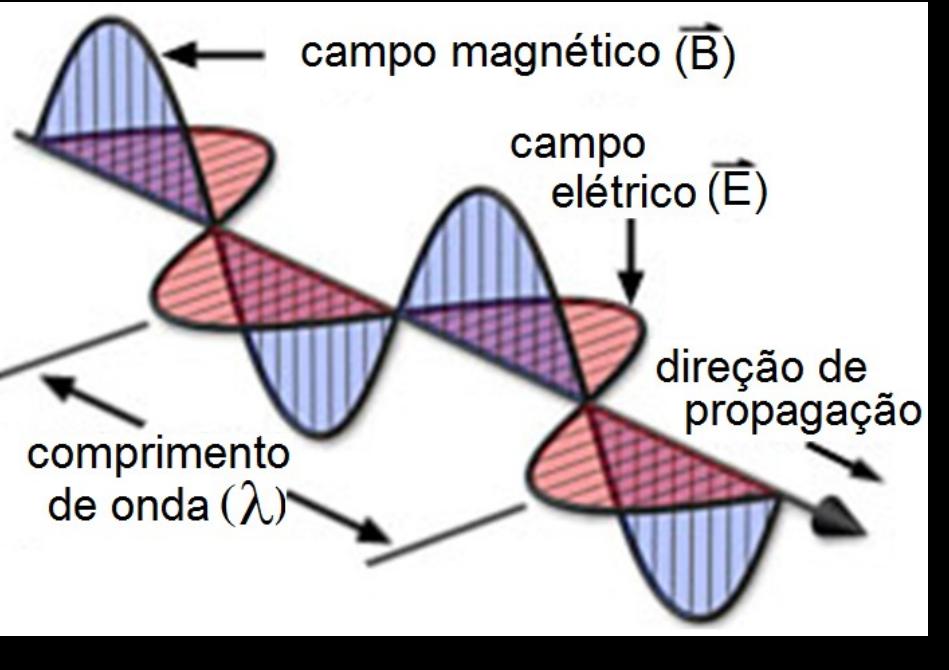
Tópicos – aula 9

Silvia Lorenz Martins  
OV/UFRJ





# Radiação eletromagnética



A luz é o resultado de uma perturbação eletromagnética que se propaga à velocidade característica  
Há duas formas complementares de descrever a luz:  
**Ondas eletromagnéticas:** variações dos campos acoplados elétrico e magnético, durante a propagação que no vácuo, tem a velocidade da luz.

Fótons (**partículas** de luz): quando interage com a matéria, a radiação tem um comportamento de partículas. Então, a radiação também pode ser entendida como **fóton**, ou **quantum** elementar da radiação.

# Natureza ondulatória da luz



James Clerk Maxwell (1831-1879) criou a teoria que sintetizou a eletricidade, o magnetismo e a luz. Em 1860, derivou sua lei de distribuição de velocidades.

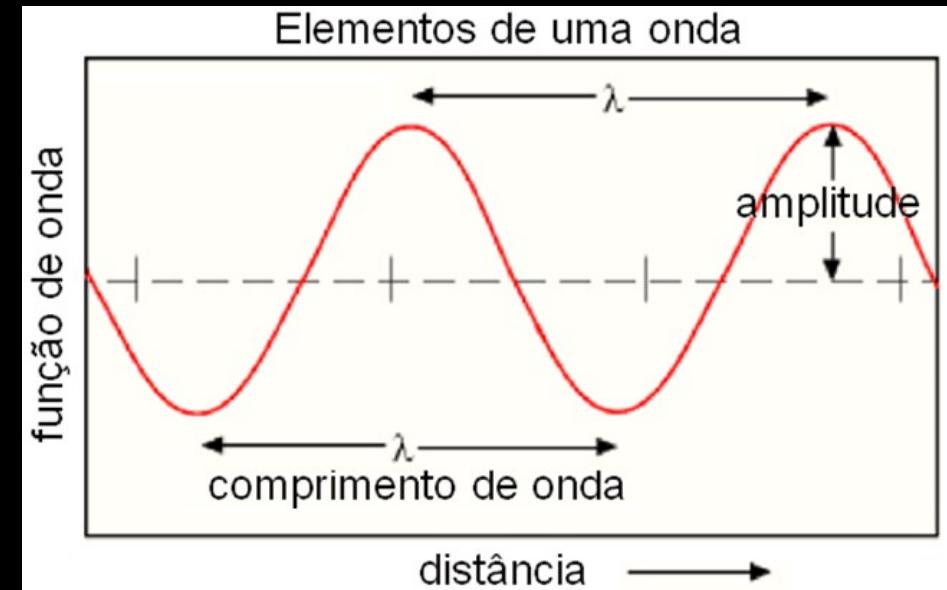
- Ondas eletromagnéticas não precisam de um meio para se propagarem (como ondas no mar ou ondas sonoras).
- Viajam no vácuo com a velocidade da luz  
 $c = 299.792,458 \text{ km/s}$
- que é independente do comprimento de onda ou frequência da onda de luz.

# Natureza ondulatória da luz

Ondas harmônicas diferem entre si pelo comprimento de onda.

$$\lambda = \frac{v}{\nu} \quad \text{ou} \quad \nu = \frac{v}{\lambda}$$

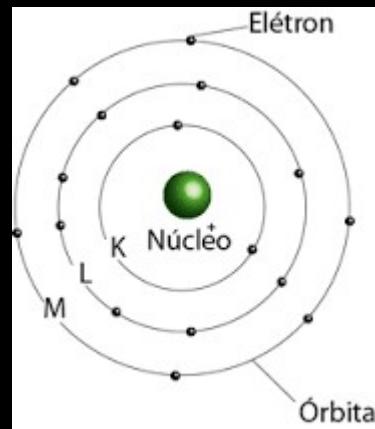
$v$  = velocidade e  $\nu$  = frequência



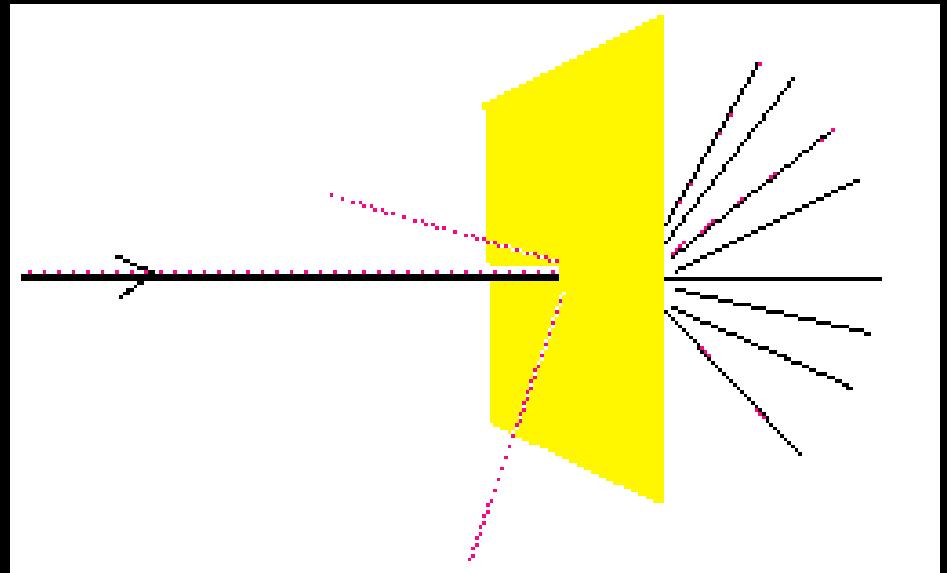
Ondas eletromagnéticas podem ser produzidas por oscilações dos campos elétrico e magnético

# Espectros e átomos

- No início do século XX → bases para a compreensão da formação dos espectros
- Entendimento do átomo

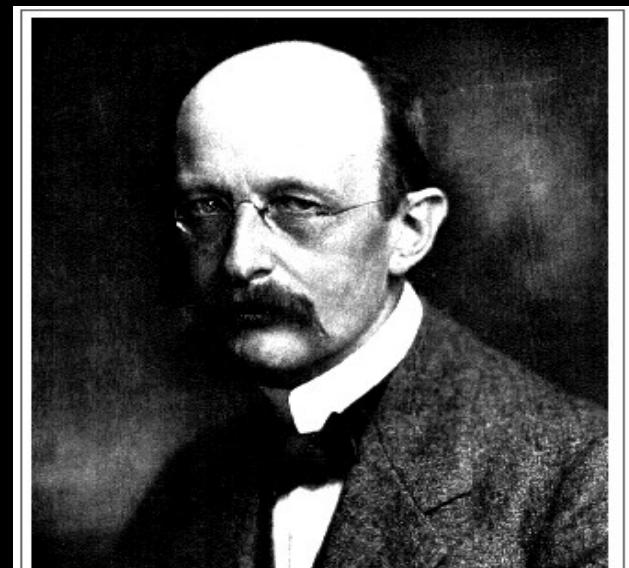
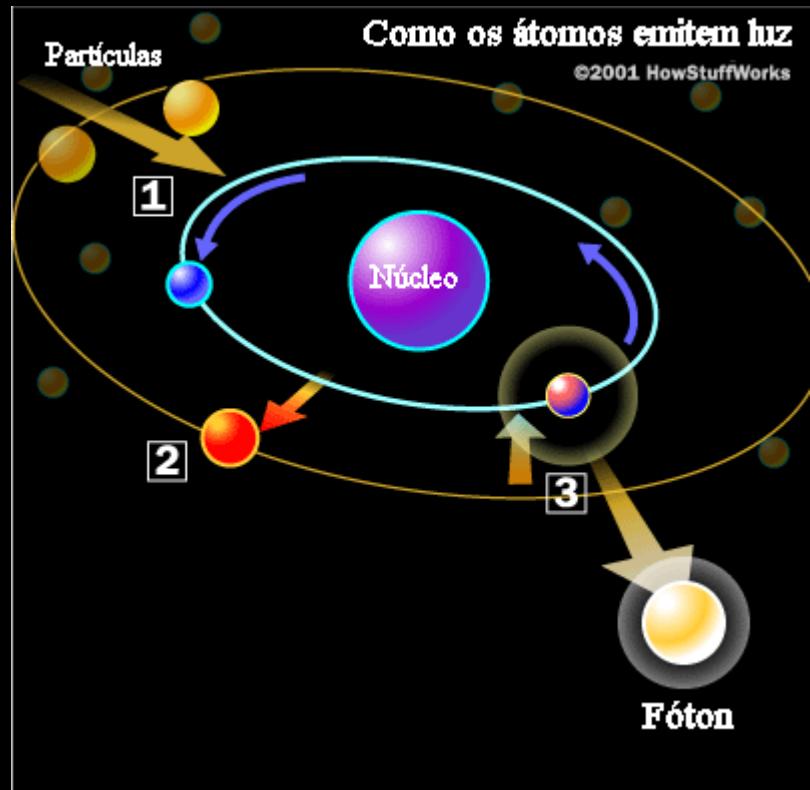


Ernest Rutherford em 1909  
→ folhas de ouro



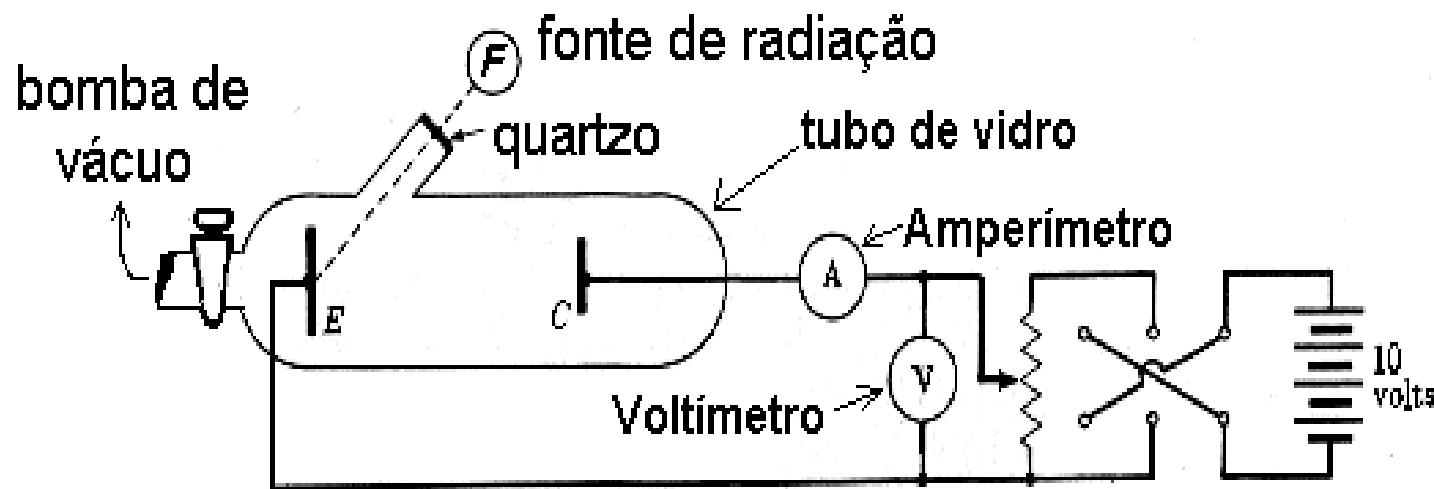
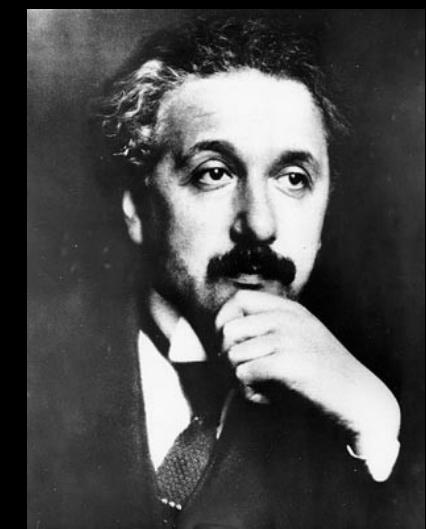
# Como os átomos emitem luz?

- Planck 1900 → quantização da luz
  - Pacotes de energia → *quanta*



Max Planck (1858-1947) introduziu a idéia de que a radiação eletromagnética consiste de quanta, ou partículas. Foto de 1913, 13 anos após a publicação de seu trabalho.  
Prêmio Nobel de 1918.

# Natureza corpuscular da luz



*Aparelho de investigação do efeito fotoelétrico*

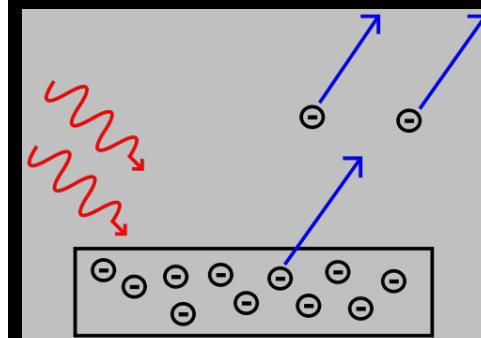
Einstein forneceu uma explicação para o **efeito fotoelétrico**

$$E_{\text{foton}} = h\nu$$

$\nu$  = frequência

$h$  = constante de Planck

$$h = 6,6262 \times 10^{-37} \text{ erg s}$$



$$E_{\text{foton}} = h\nu$$

$\nu$  = frequência

$h$  = constante de Planck

$h = 6,6262 \times 10^{-34}$  erg s

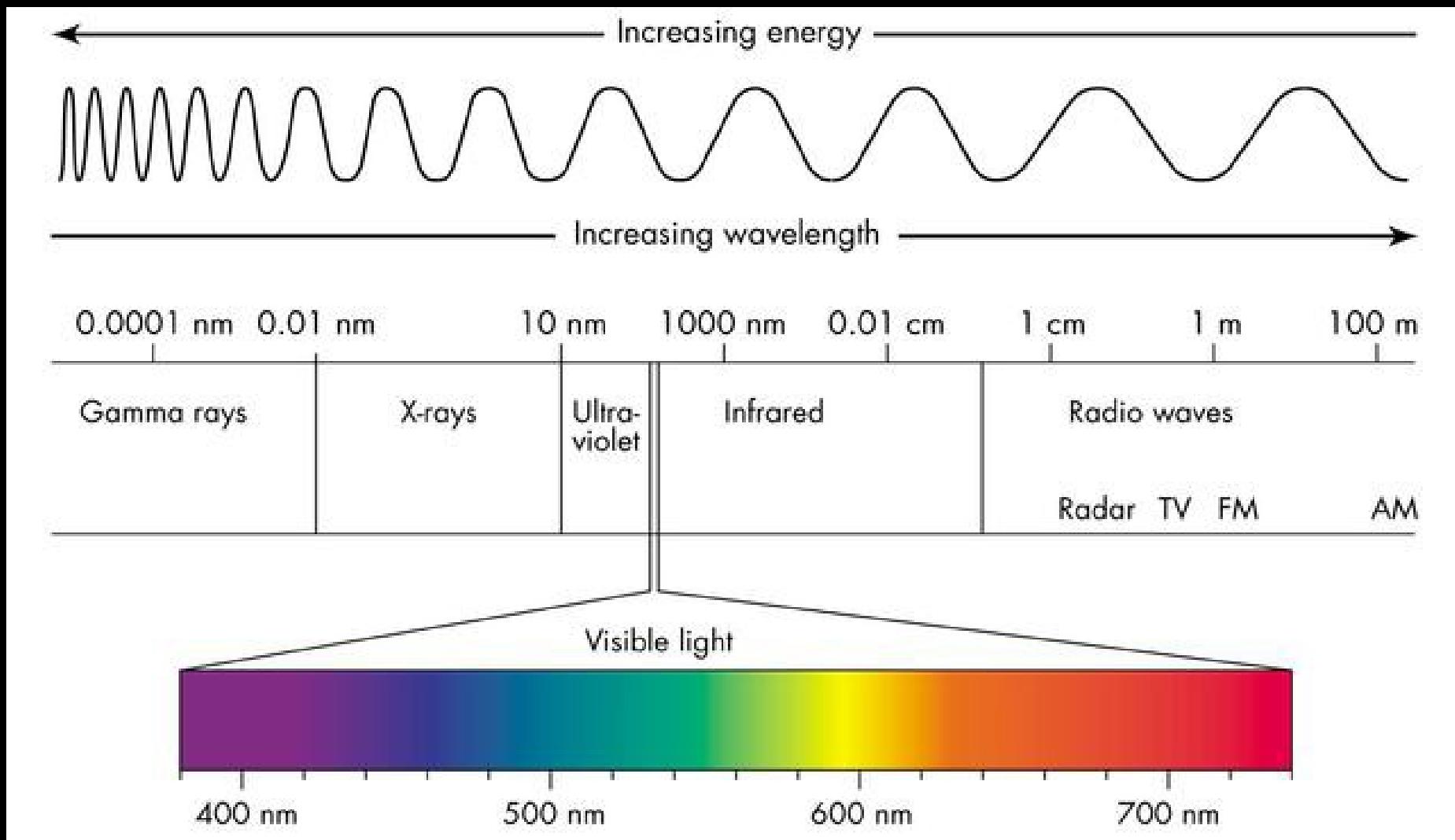
A constante de Planck é um elo entre a natureza de **partícula** e a de **onda**

# Espectro eletromagnético

- Uma distribuição de energias de fótons provenientes de uma fonte de radiação.
- Espectros são observados pela passagem de luz através de um espectrógrafo que separa a luz em seus componentes, espalhando-os (dispersão).
- Pode-se usar prismas ou redes de difração.



# Espectro eletromagnético



# Espectro visível

- O intervalo de comprimentos de onda da luz que podemos ver é 400 - 700 nanometros(nm), e o intervalo de frequência correspondente é  $7,5 \times 10^{14} - 4,3 \times 10^{14}$  ciclos/s
- Percebemos a luz de diferentes energias como cores diferentes. As cores básicas do espectro visível podem grosseiramente, ser divididas



Cor	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde	Azul	Indigo	Violeta
Comprimento de onda	700 nm	650 nm	600 nm	550 nm	500 nm	450 nm	400 nm

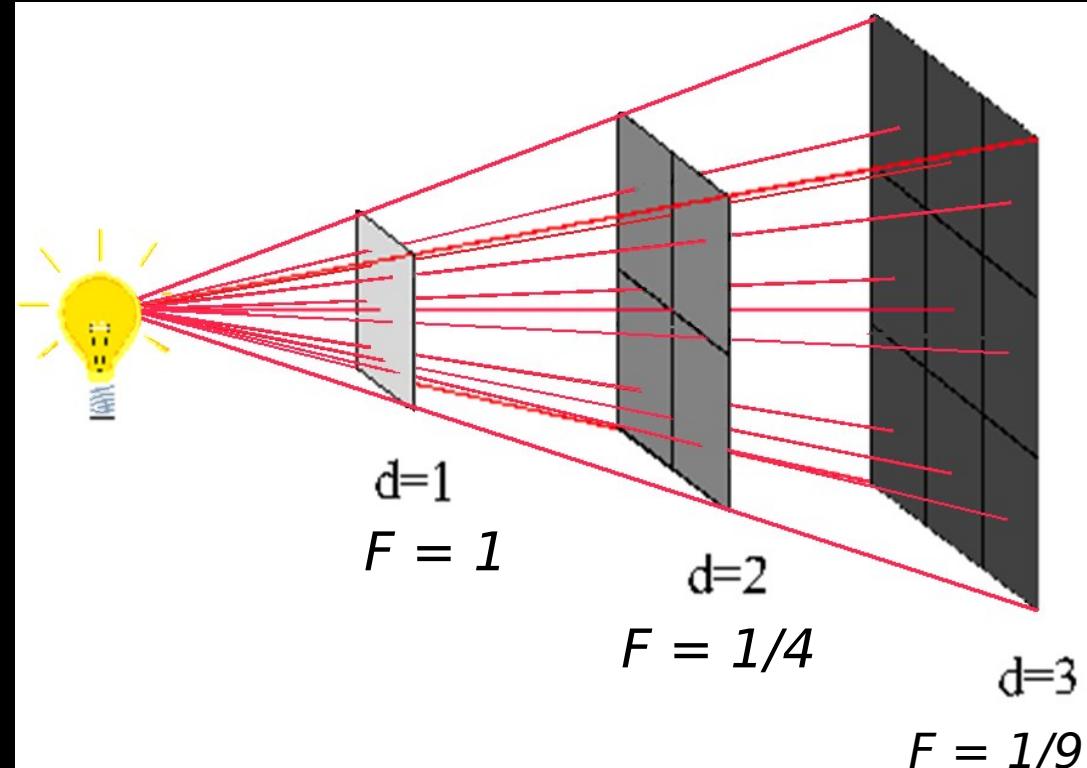
# Brilho de uma fonte

- O brilho também pode ser definido em termos ondulatório ou fotônico (e.g., número de fótons por segundo emitidos pela fonte).
- Podemos quantificar isso por meio da **luminosidade**: medida do total de energia emitida por segundo (watts, por exemplo)
- A luminosidade refere-se à superfície da fonte. É uma propriedade da fonte que independe da distância.
- Se estamos distantes, o que podemos medir é o brilho aparente que depende da distância e é um **fluxo** (energia / s / área)

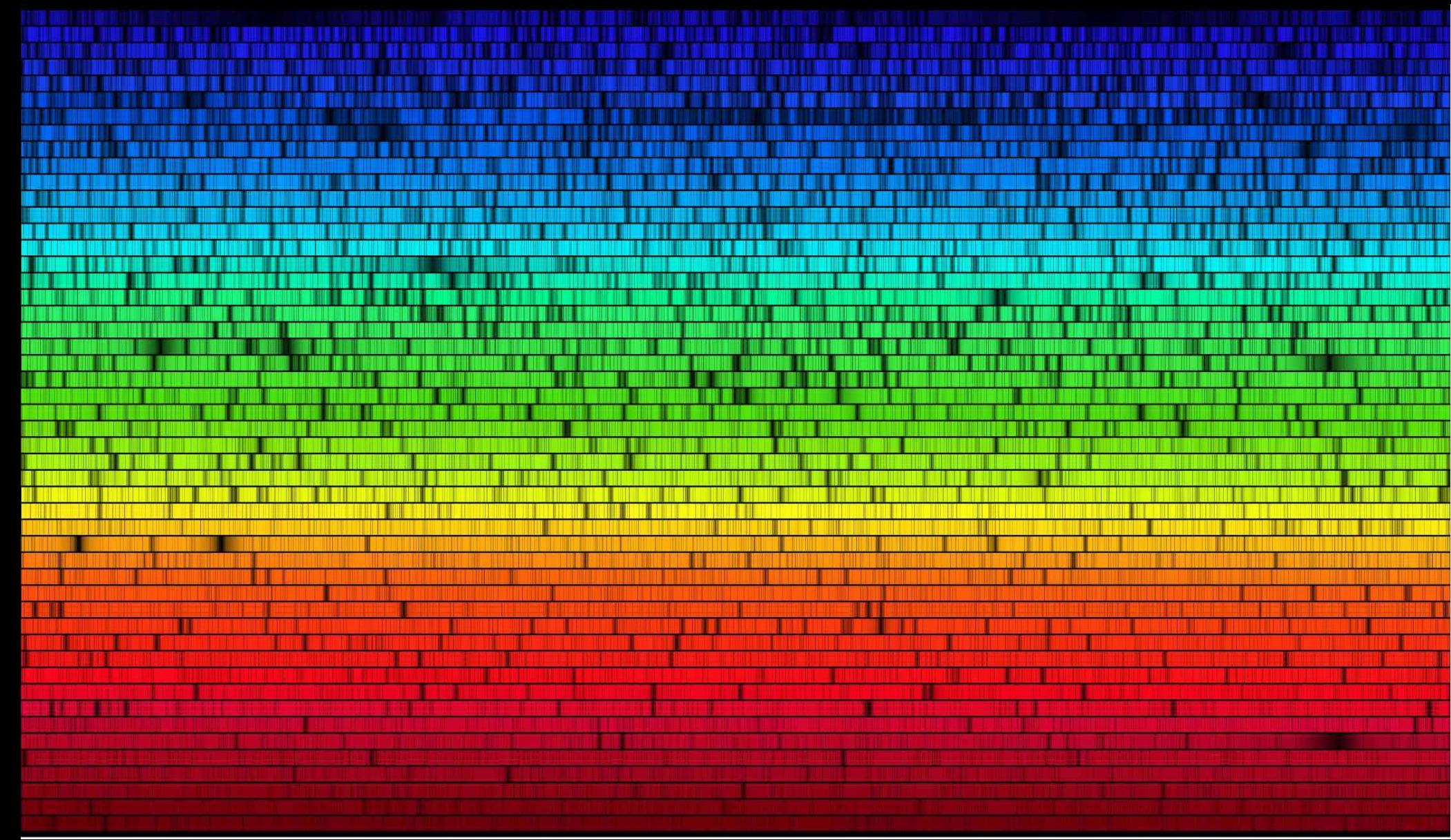
# A lei do inverso do quadrado

- À medida que a luz viaja para longe da fonte, os fótons se espalham por áreas cada vez maiores. Quanto mais a luz se espalha, mais fraca parece para uma unidade de área qualquer.
- De fato , o brilho aparente  $B$  (ou fluxo  $F$ ) da fonte de luminosidade intrínseca  $L$  diminuirá com o quadrado da distância à fonte :

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$



A imagem abaixo mostra o espectro solar entre 392 nm (azul) e 692 nm (vermelho) observado no Kitt Peak National Observatory em 1981. Kurucz fez as correções necessárias (absorção da atmosfera terrestre) e tornou um atlas público.



# A escala de magnitudes

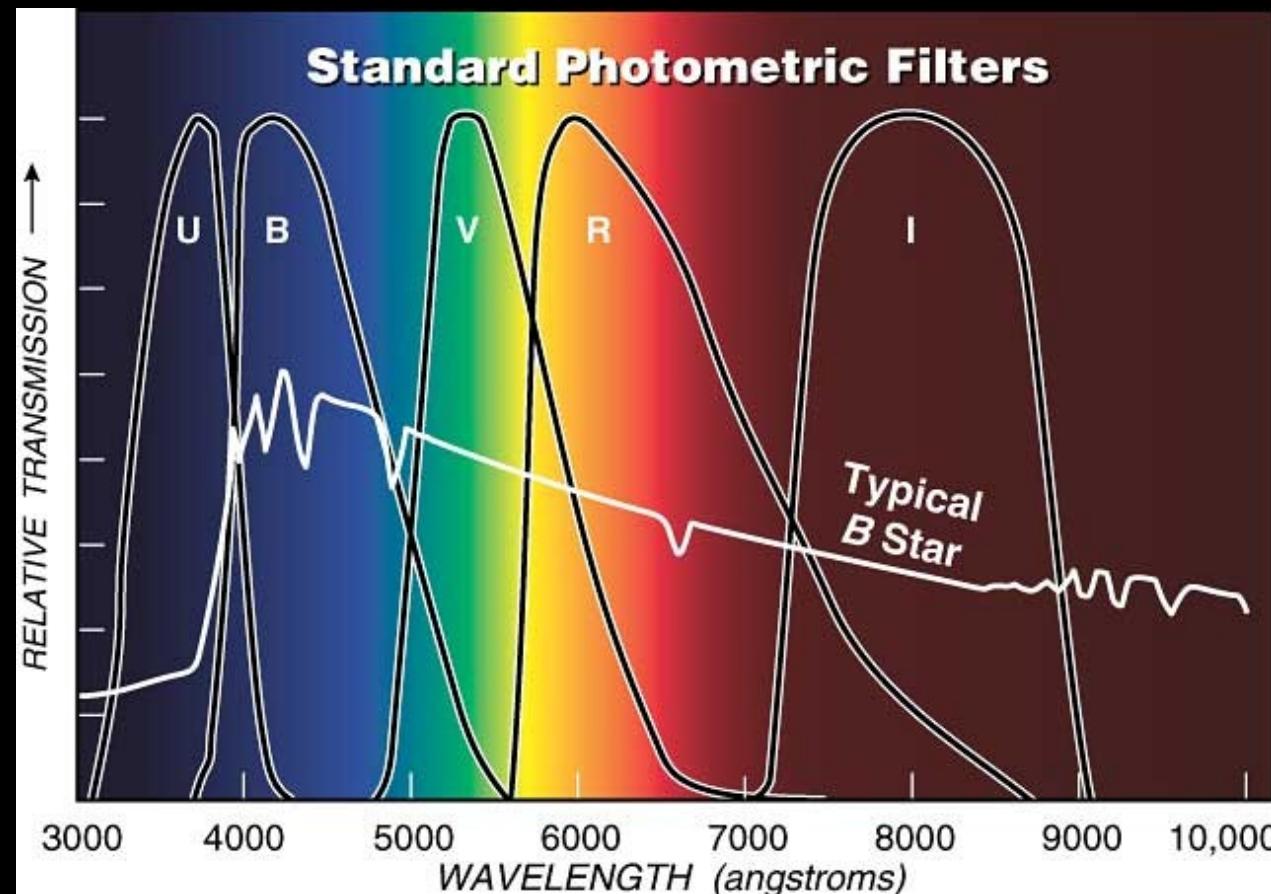
A escala de magnitudes astronômicas descende da escala de “grandezas” introduzida pelo astrônomo grego Hiparcos no séc. II aC. Sua base física reside no fato de que o olho humano é mais sensível a uma progressão geométrica de brilho do que a uma progressão aritmética.



# Sistemas de magnitudes

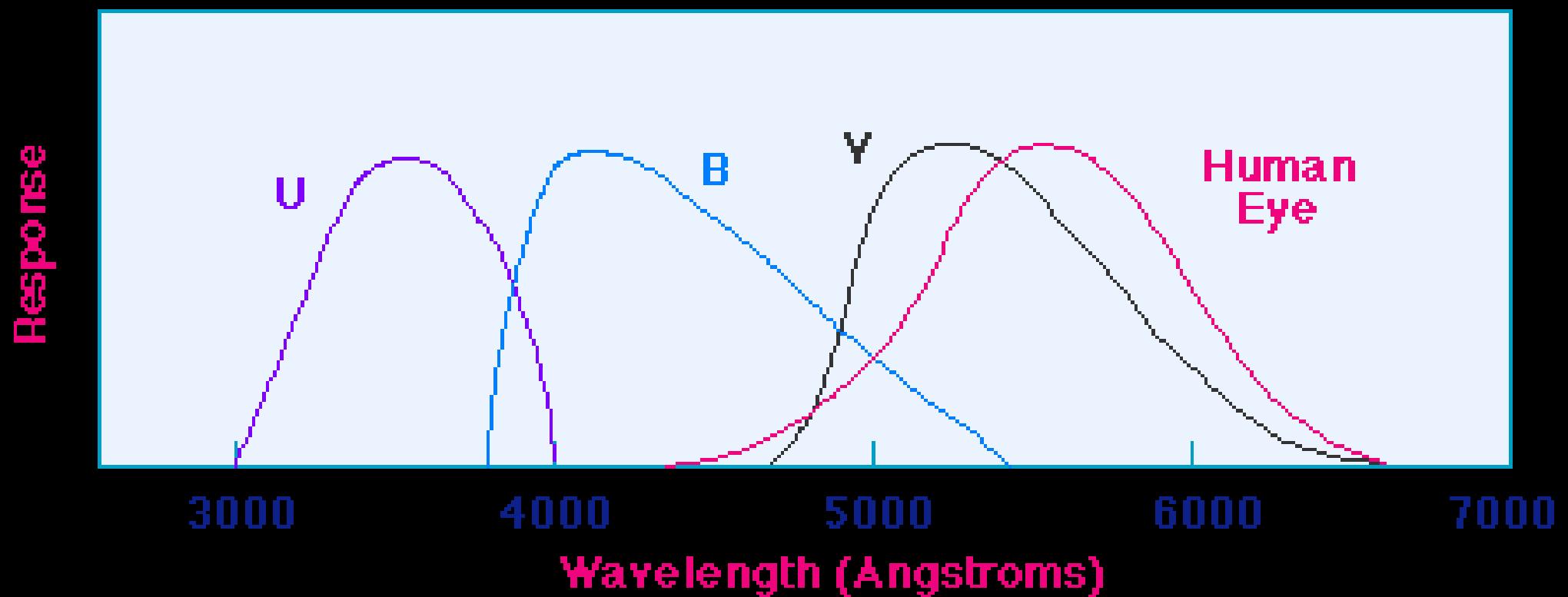
## fotometria UBVRI

O sistema de magnitudes mais importante da Astronomia é chamado UBV, posteriormente estendido pela adição dos filtros R e I.



# Sistemas de magnitudes

## fotometria UBVRI



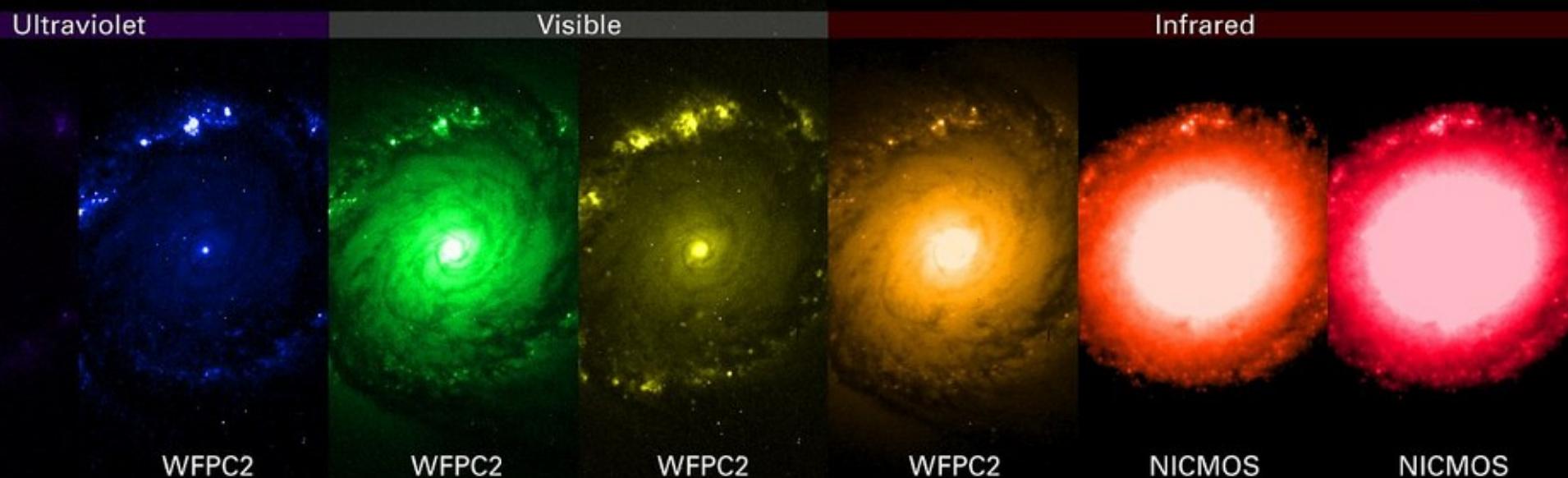
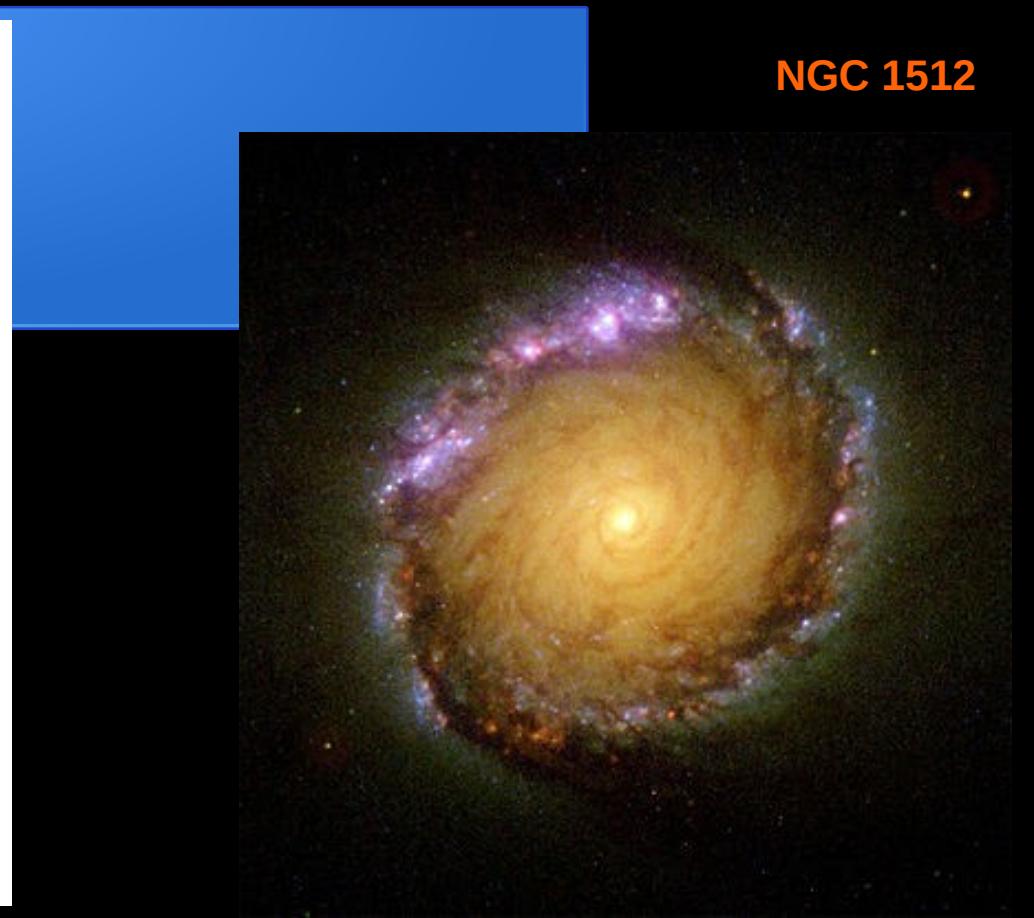
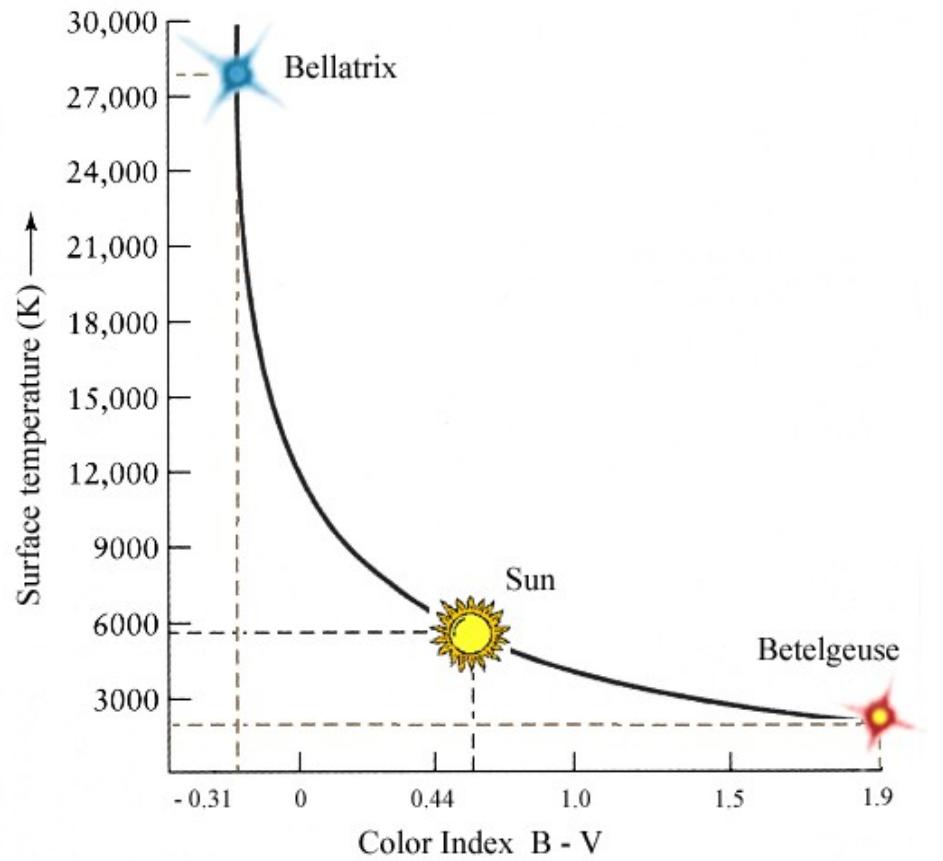
# Sistemas de magnitudes

## Cores

Em Astronomia, **cor** é uma razão relativa de fluxo (brilho) em duas partes distintas do espectro eletromagnético. Dado que uma magnitude é uma medida logarítmica de fluxo, a cor pode ser representada diretamente como uma diferença entre magnitudes.

Suponha que  $B$  seja a magnitude na faixa azul do espectro, correspondente a um fluxo  $f_B$ , e que  $V$  seja a magnitude na faixa visível, correspondente a um fluxo  $f_V$ . Assim:

$$(B-V) = -2,5 \log \frac{f_B}{f_V} + constante$$



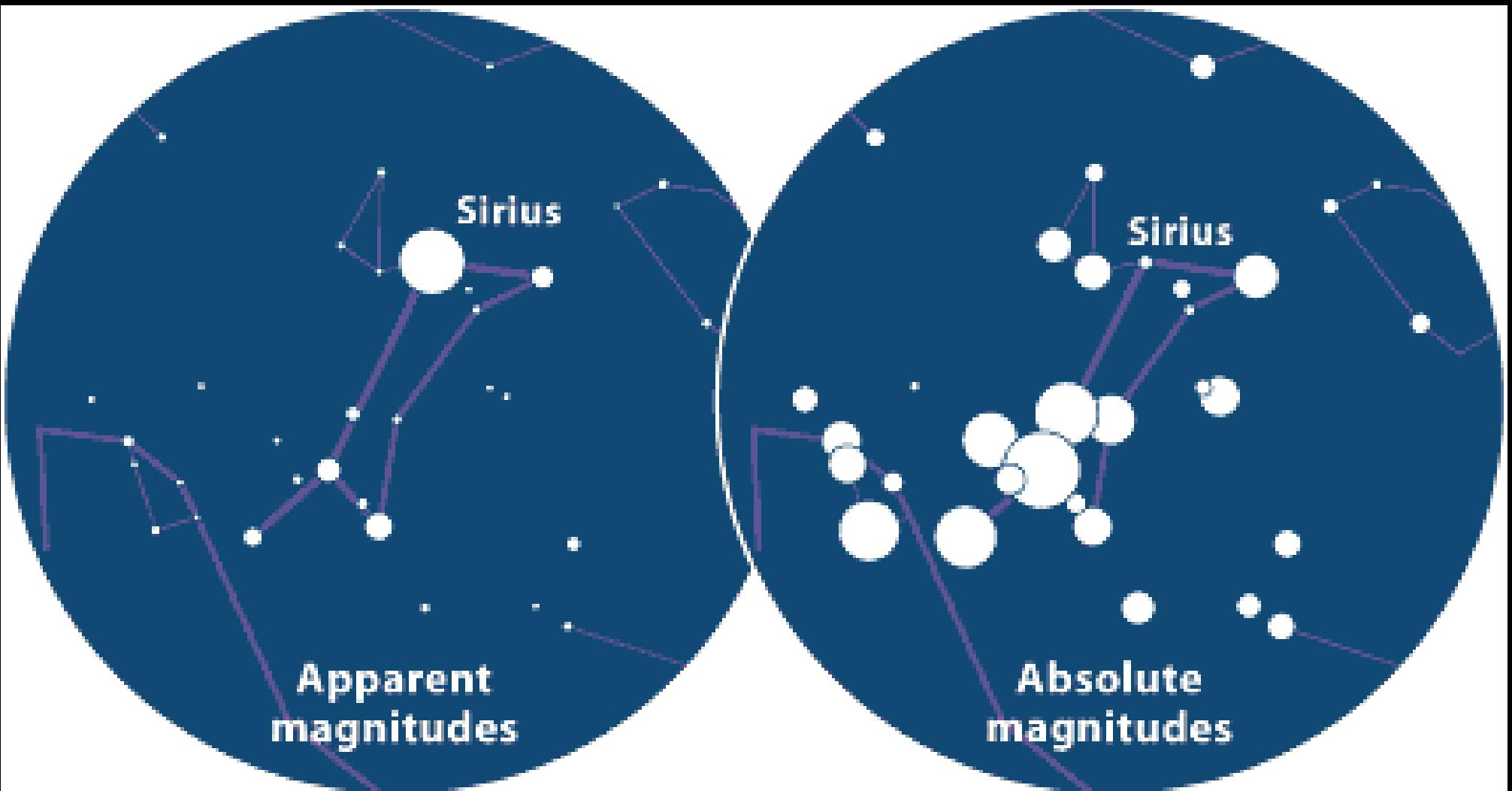
# Magnitude absoluta

As magnitudes medidas em diferentes filtros referem-se ao fluxo de radiação incidente sobre a Terra. Uma vez que o fluxo depende da distância à fonte, essas medidas são chamadas de **magnitudes aparentes**. Para comparar o brilho intrínseco dos objetos entre si, calculamos qual seria a magnitude aparente de cada objeto se este estivesse a 10 pc de distância de nós. Essa é chamada de **magnitude absoluta** do objeto.

Sabendo que o fluxo cai com o quadrado da distância, podemos comparar a magnitude aparente da estrela com aquela que ela teria se estivesse a 10 pc de nós:

$$(m - M) = 5 \log d - 5 \longrightarrow \text{Eq. do Módulo de distância}$$

# Magnitudes aparente e absoluta



medida de brilho que independe da distância

# Fontes de informação astronômica

## Radiação eletromagnética:

corresponde a mais antiga e, ainda hoje, principal fonte de informação acerca dos corpos celestes. As maiores bases de dados astronômicos lidam justamente com observações no visível e em rádio.

## Neutrinos:

devido à pequena seção de choque de interação, só são observados de fontes próximas ou no caso de fluxos excepcionalmente altos

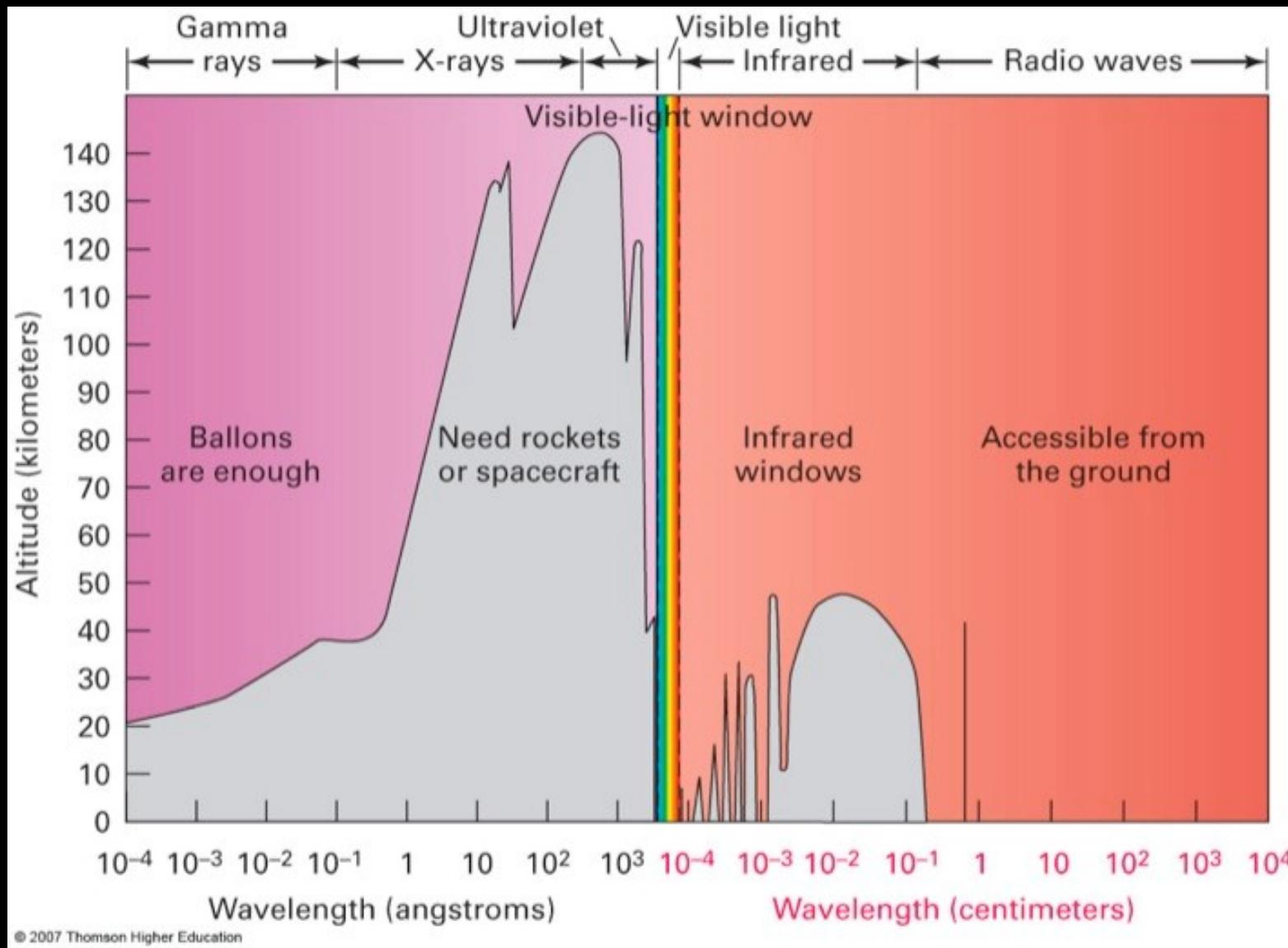
## Radiação gravitacional:

Recentemente observada.

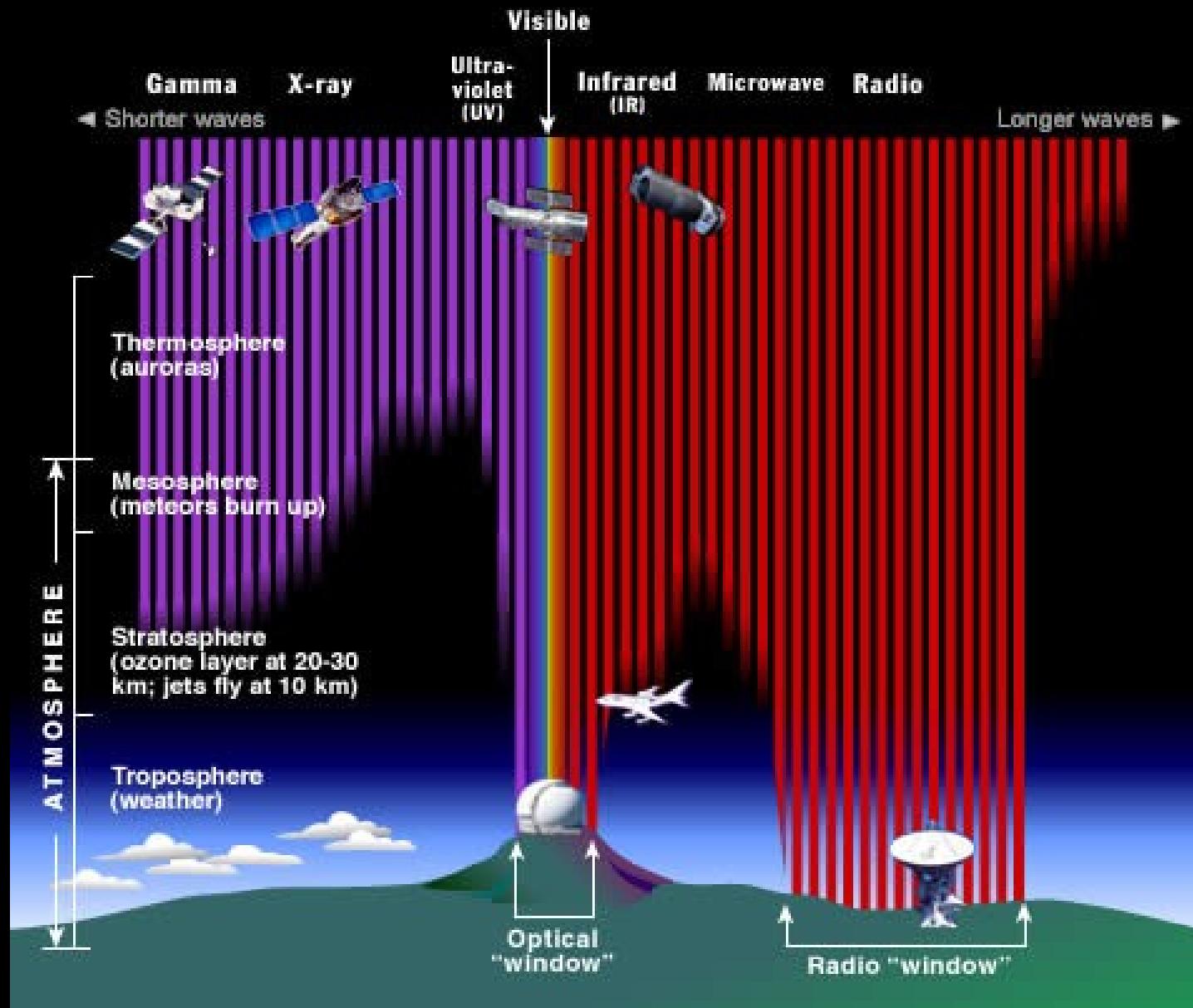
## Raios cósmicos:

Elétrons, prótons e núcleos mais pesados provenientes de diversas fontes.

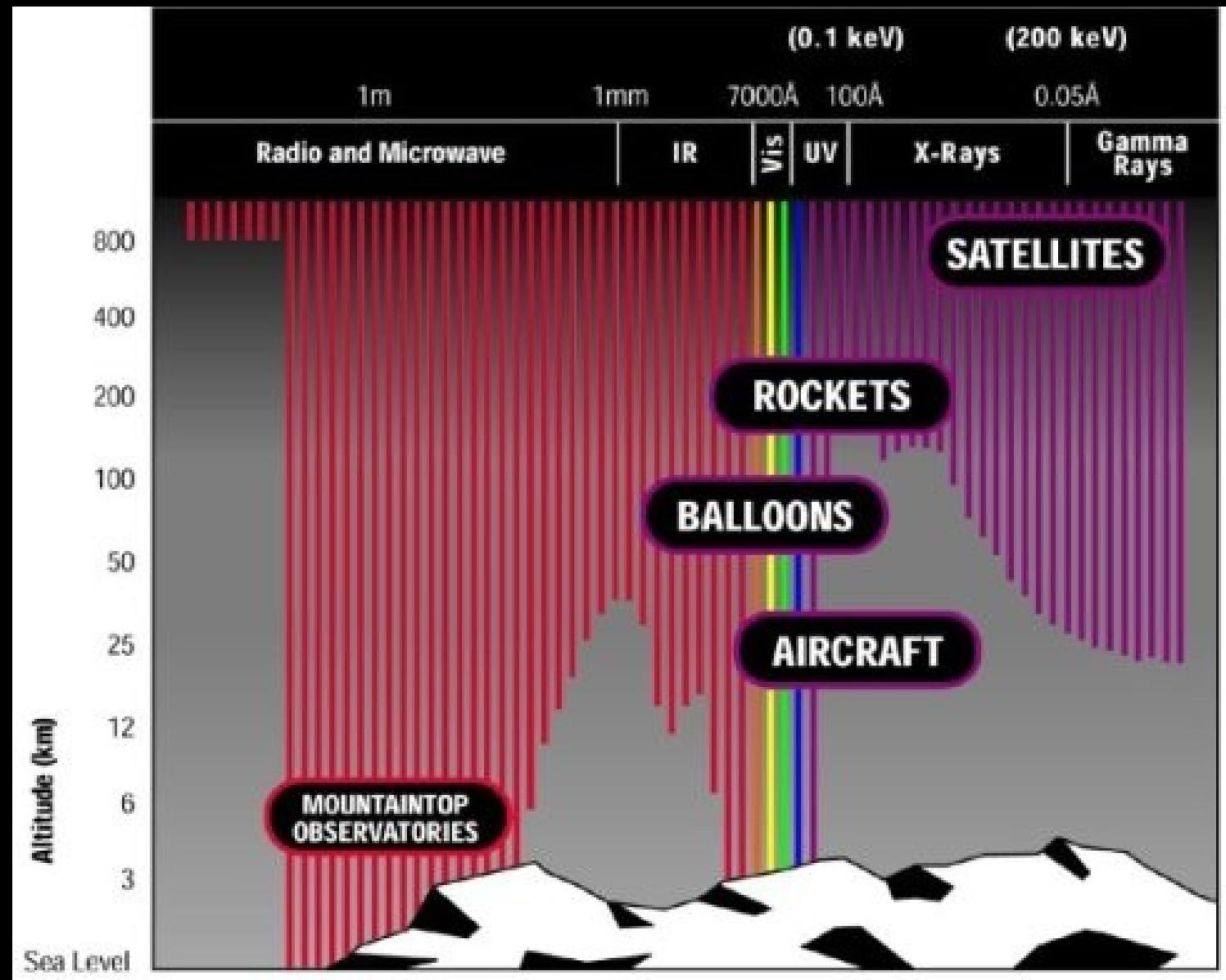
# Astronomia em diferentes bandas



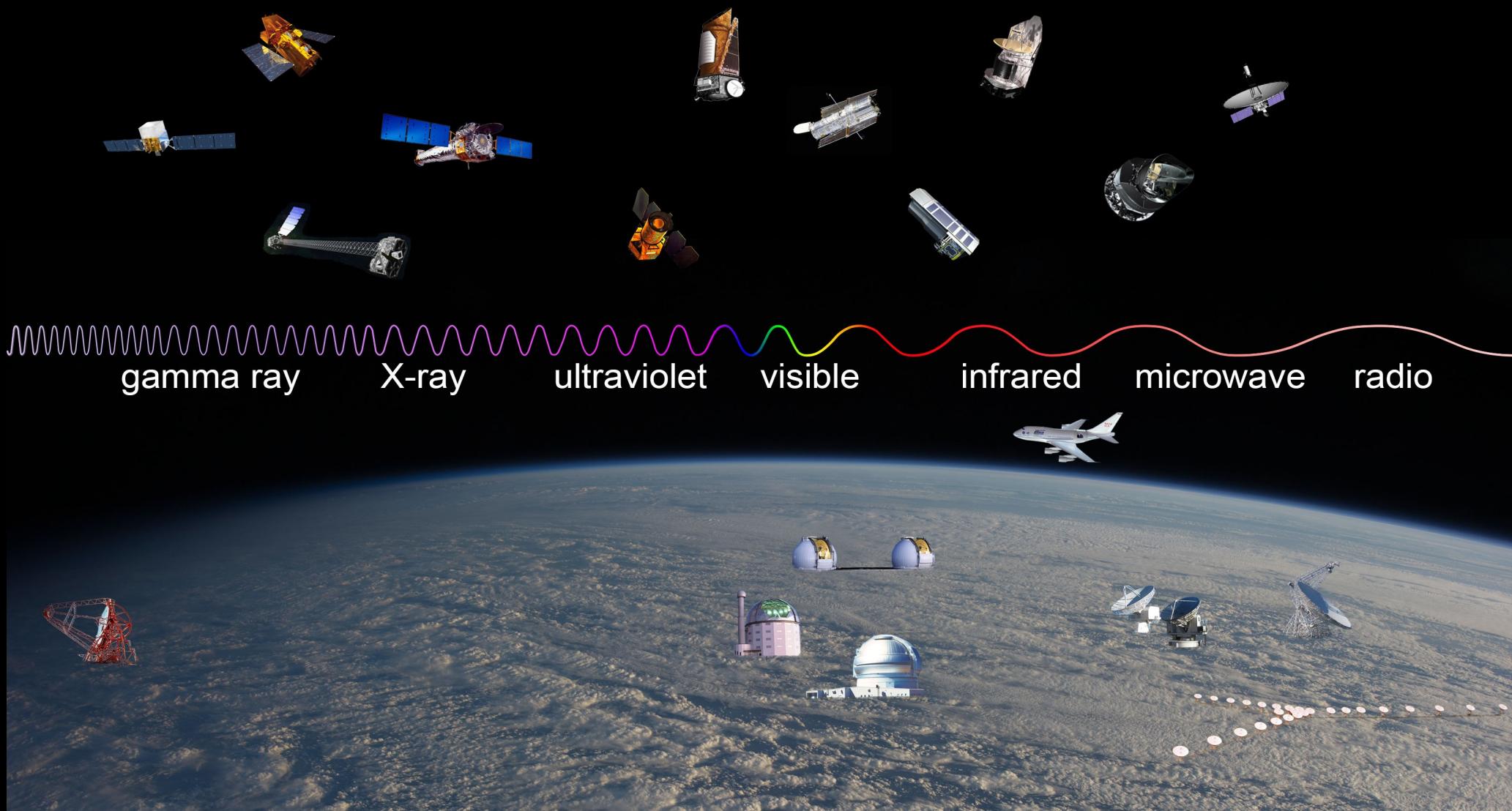
# Astronomia em diferentes bandas



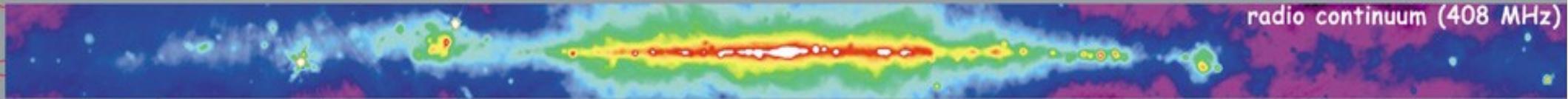
# Astronomia em diferentes bandas



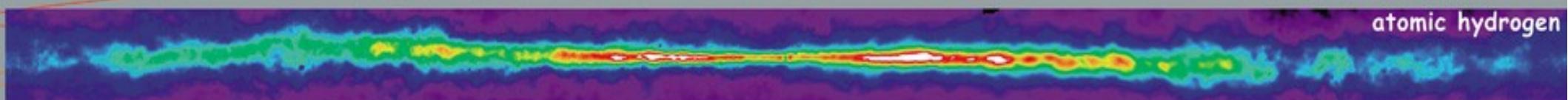
# Astronomia em diferentes bandas



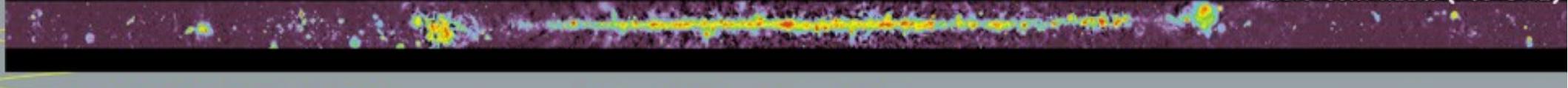
radio continuum (408 MHz)



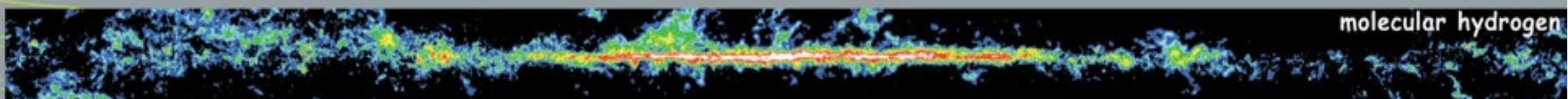
atomic hydrogen



radio continuum (2.5 GHz)



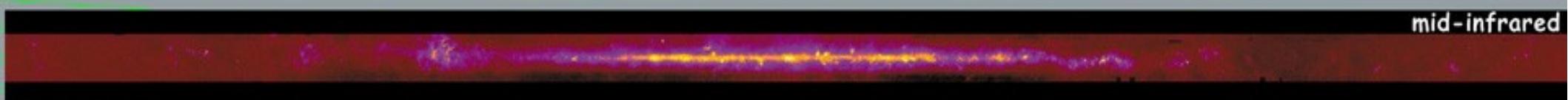
molecular hydrogen



infrared



mid-infrared



near infrared



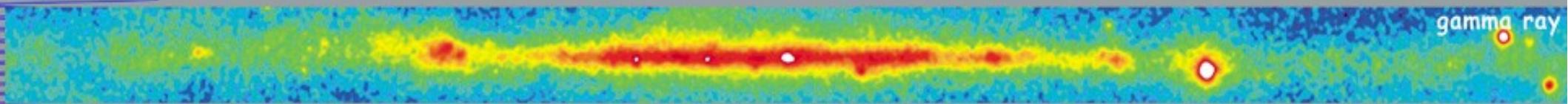
optical



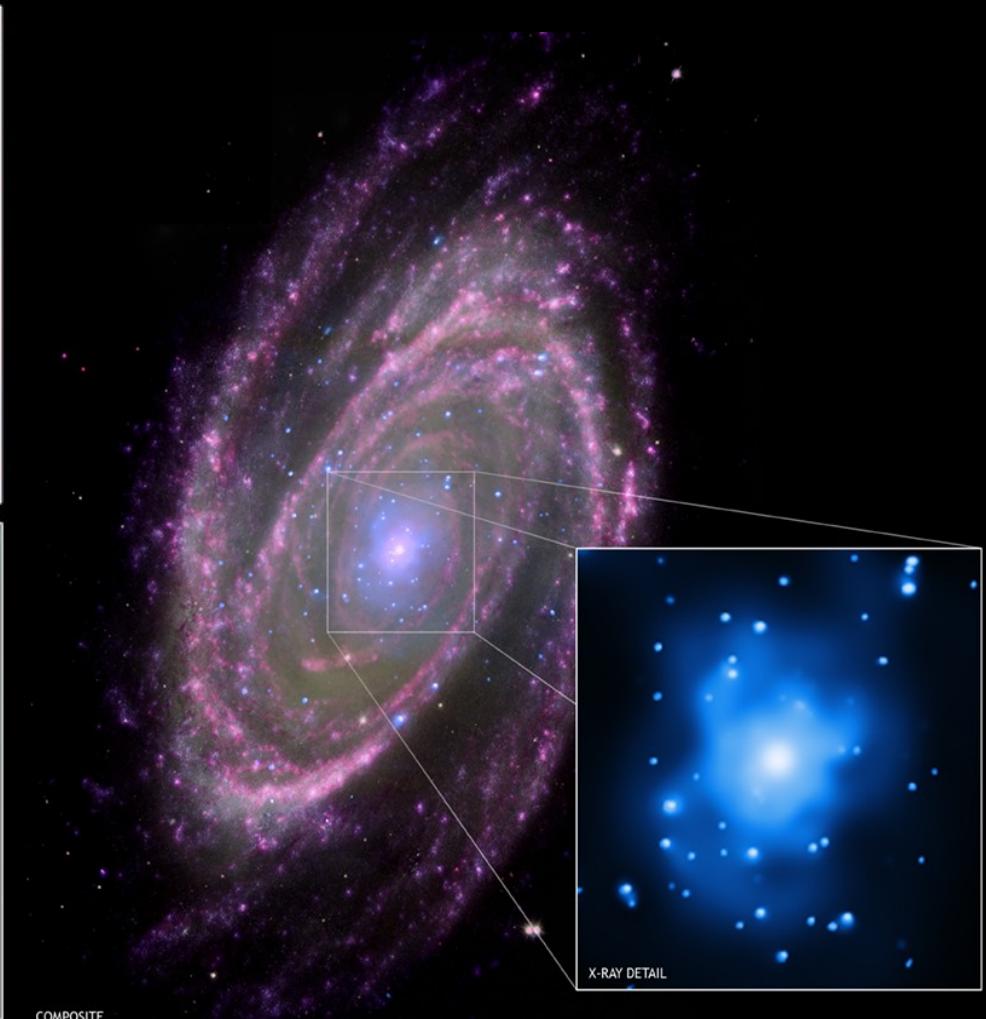
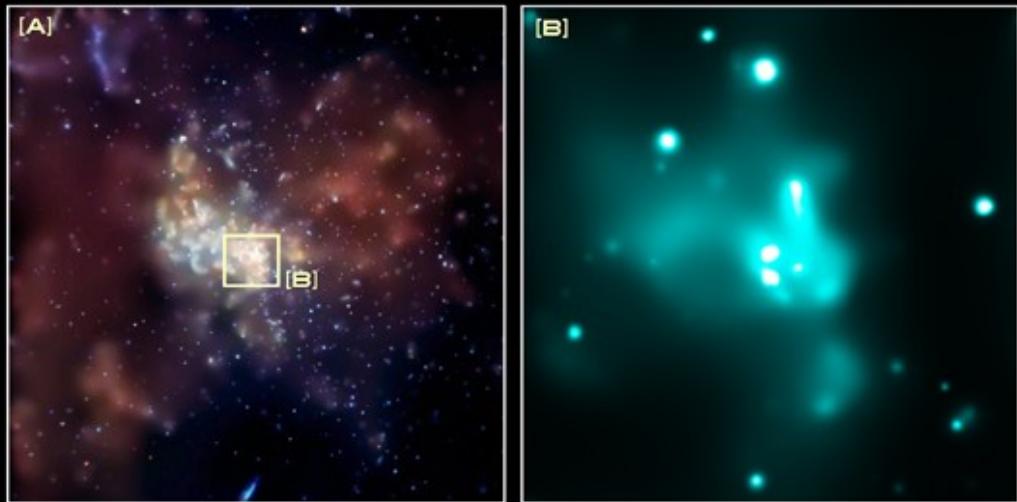
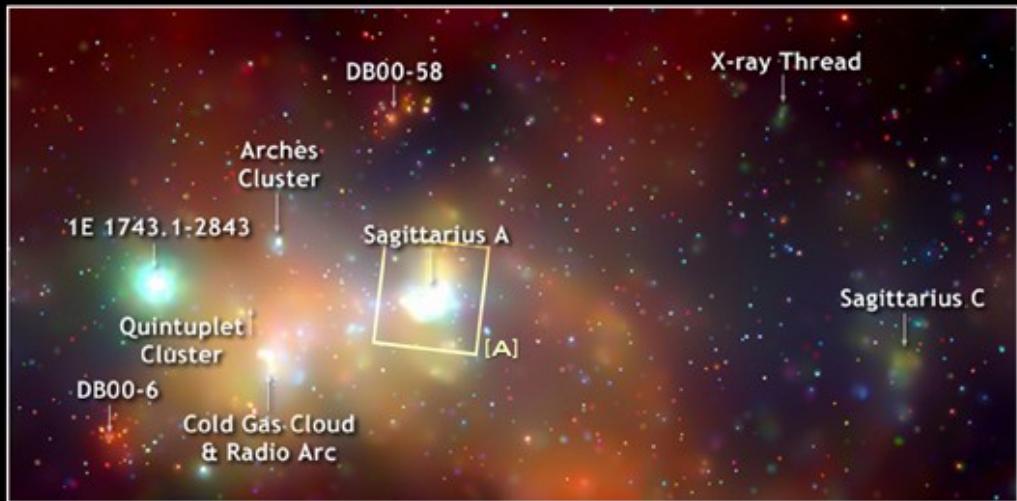
x-ray



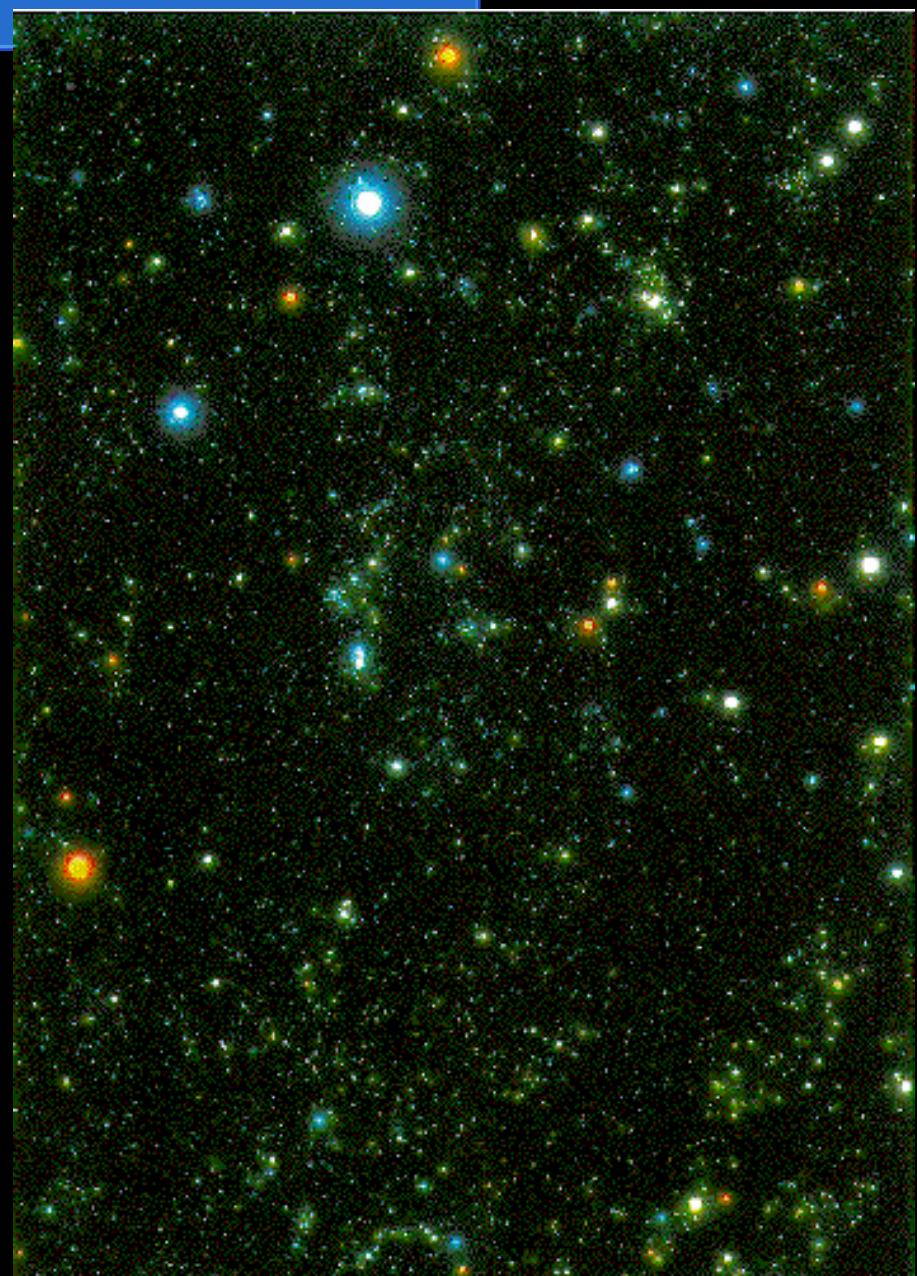
gamma ray



As principais fontes astronômicas de raios X são gases muito quentes: coroas de estrelas, gases em torno de binárias cerradas, binárias cataclísmicas e buracos negros, remanescentes de supernova, aglomerados de galáxias, etc.



Orion observado no óptico (esq.) e em raios-X (direita)



# Outras novas astronomias

**Infravermelho próximo:** estrelas vermelhas, capacidade de observar além da camada de poeira do disco galáctico

**Infravermelho médio e distante:** regiões de formação estelar, discos circunstelares

**Ultravioleta:** quasares, anãs brancas, estrelas de grande massa, fenômenos de altas energias

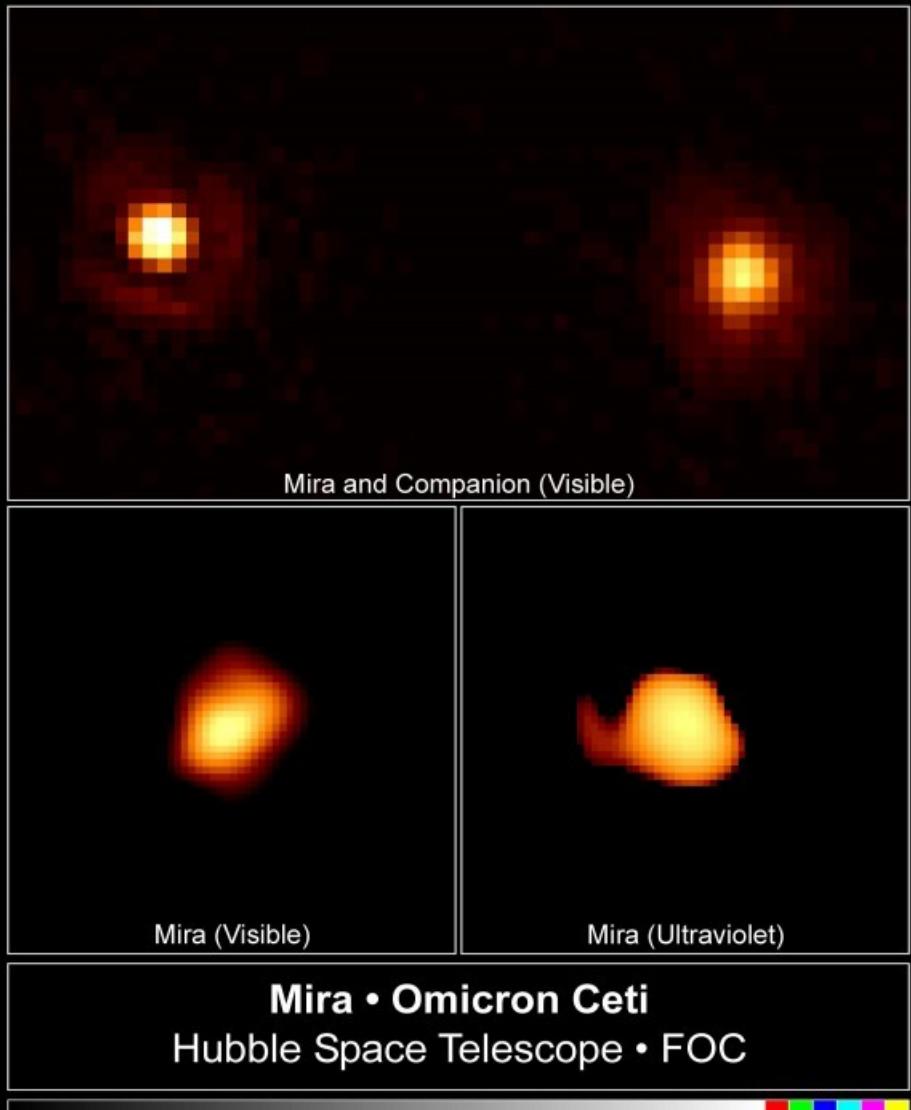
**Raios gama:** pulsares binários, variáveis cataclísmicas, emissões de gás quente em torno de buracos negros, explosões de supernovas.

Observações no ultravioleta distante mostram que muitas galáxias são maiores do que parecem ser quando observadas no visível. Abaixo, temos o exemplo de NGC 1512



Estrelas gigantes perdem massa através de ventos estelares.

A imagem de Mira Ceti no UV, ao lado, mostra isso de forma bem clara.



# Corpos negros

- Todo corpo macroscópico emite radiação térmica sob a forma de ondas eletromagnéticas. Quanto maior é a temperatura do corpo, mais radiação é por ele emitida.
- Corpos também absorvem, refletem ou espalham radiação que sobre eles incide.

# Corpos negros

- Se um corpo receber radiação isotrópica e constante durante tempo suficiente para que se acostume a esse ambiente, ele entra num estado chamado equilíbrio termodinâmico.

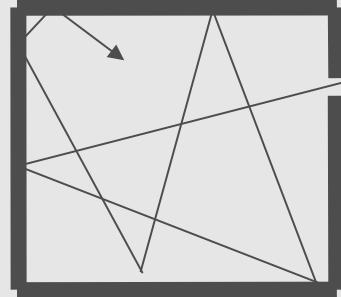
Nenhum objeto está jamais em equilíbrio termodinâmico perfeito. Porém, é possível usar esse estado como aproximação a estados de quase-equilíbrio encontrados na natureza e no laboratório.

# Corpos negros

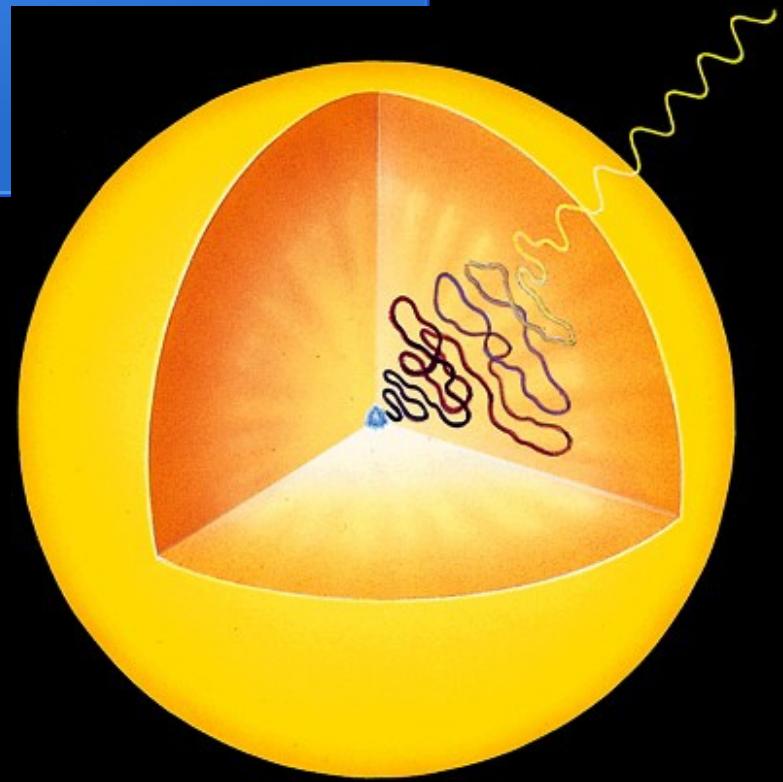
- O equilíbrio termodinâmico implica que toda energia absorvida por um corpo seja, em seguida, irradiada; do contrário, o corpo se aqueceria ou se resfriaria.
- A intensidade da radiação emitida por um corpo em equilíbrio termodinâmico depende somente da temperatura do objeto e do comprimento de onda da radiação emitida.
- Um corpo que absorve grande parte da energia que sobre ele incide emite como se estivesse em equilíbrio termodinâmico, i.e., a intensidade de sua radiação depende somente da temperatura do corpo e do comprimento de onda. Como tais corpos são escuros, se sua temperatura não for muito alta, foram chamados de corpos negros.

# Corpos negros

- Um corpo negro é um objeto que absorve toda a radiação que recebe. Ou seja, não reflete nenhuma luz, nem deixa parte da radiação atravessar para o outro lado. A energia absorvida pelo corpo negro aquece-o, de forma que ele emitirá sua própria radiação (térmica). **O único parâmetro** que determina quanta luz o corpo negro irradiará (em quais comprimentos de onda) é sua **temperatura**.
- Não existe corpo negro ideal, mas vários objetos (como estrelas) tem comportamento aproximado de corpo negro. Outros exemplos são o filamento de uma luz incandescente ou uma barra aquecida (por exemplo, num forno elétrico).



Representação de um corpo negro usualmente usado em laboratório, que consiste de uma caixa de paredes adiabáticas numa das quais há um orifício estreito.

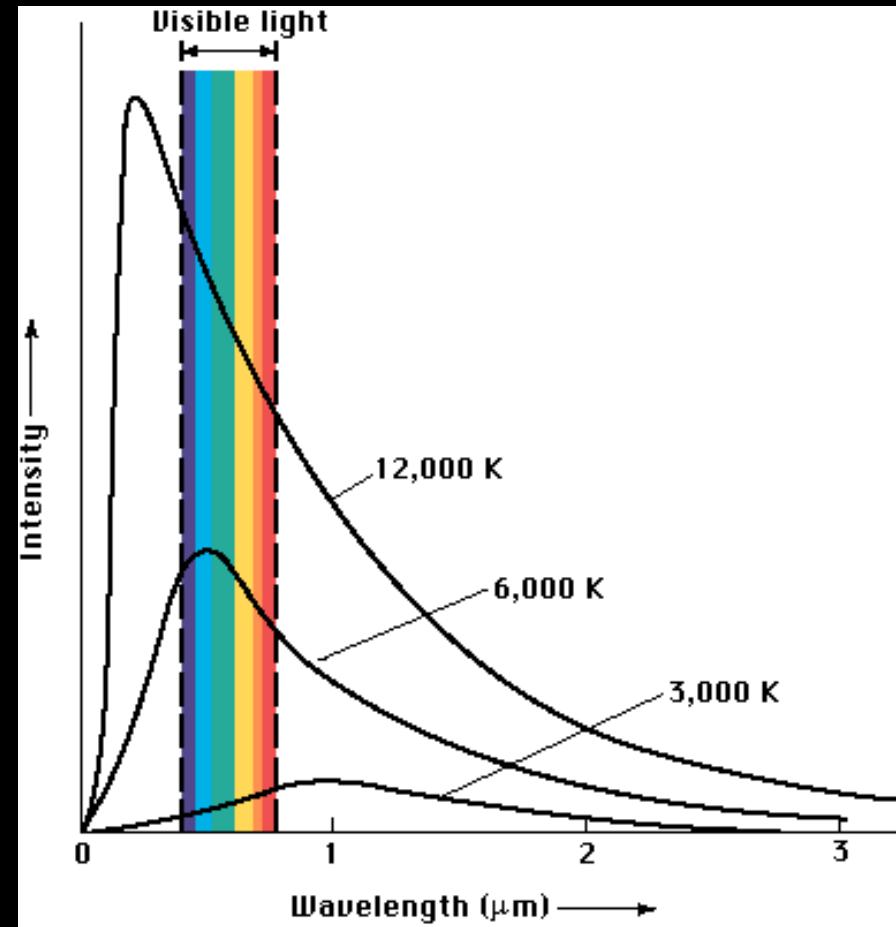


Aprisionamento de fótons numa atmosfera estelar.  
© 1996 W. H. Freeman and Co., Discovering the Universe, 4th. Ed.

Corpos negros interessam à Astronomia porque as estrelas podem ser aproximadas como corpos negros. Uma pequena parte da radiação emitida pela estrela escapa ao espaço circunstelar, de forma que o astro fica próximo ao equilíbrio termodinâmico.

# Radiação de corpo negro

- Muitos pesquisadores dedicaram-se a medir e descrever a distribuição de energia emitida por corpos negros em diferentes temperaturas.
- Embora as principais propriedades destas curvas fossem conhecidas, a física clássica não oferece meios de descrever a distribuição por inteiro.



Distribuições de energia emitida por corpos negros a diferentes temperaturas

© 1996 W. H. Freeman and Co., Discovering the Universe, 4th. Ed.

# Espectroscopia

Objetivos:

- (a) Classificação Espectral
- (b) Análise Espectral

Aplicações

# História da classificação estelar

- A primeira tentativa de classificar estrelas foi empreendida pelos gregos e fazia uso da única informação disponível à época:
  - brilho aparente dos astros.
- As estrelas eram classificadas dentro de seis ‘grandezas’, das mais brilhantes às mais débeis dentre as observáveis a olho nu.
- Esta classificação forma a base do sistema atual de magnitudes estelares.
- A base da moderna classificação estelar, contudo, são os **espectros**

# (a) Classificação Espectral

- Harvard, 1890: Pickering & Flemming
  - Intensidade da linha do H: A, B, C,...
- 1901: Cannon : O B A F G K M =>  
sub-divisões : ex. A0-A9

TEMPERATURA

# As computadoras de Harvard



- Grupo de Harvard que criou as bases da classificação estelar.
- As computadoras mais famosas: Wilhelmina **Fleming**, Antonia Mauri, Annie **Canon**, Cecilia **Payne**

# Classificação Espectral

O:  $T_{\text{ef}} \sim 30000\text{K}$

He II, SII, OII

F:  $T_{\text{ef}} \sim 8000\text{K}$

Call , Balmer

B:  $T_{\text{ef}} \sim 20000\text{K}$

HeI, Balmer

G:  $T_{\text{ef}} \sim 6000\text{K}$

Call intenso, FeI

A:  $T_{\text{ef}} \sim 10000\text{K}$

Balmer max. em A0

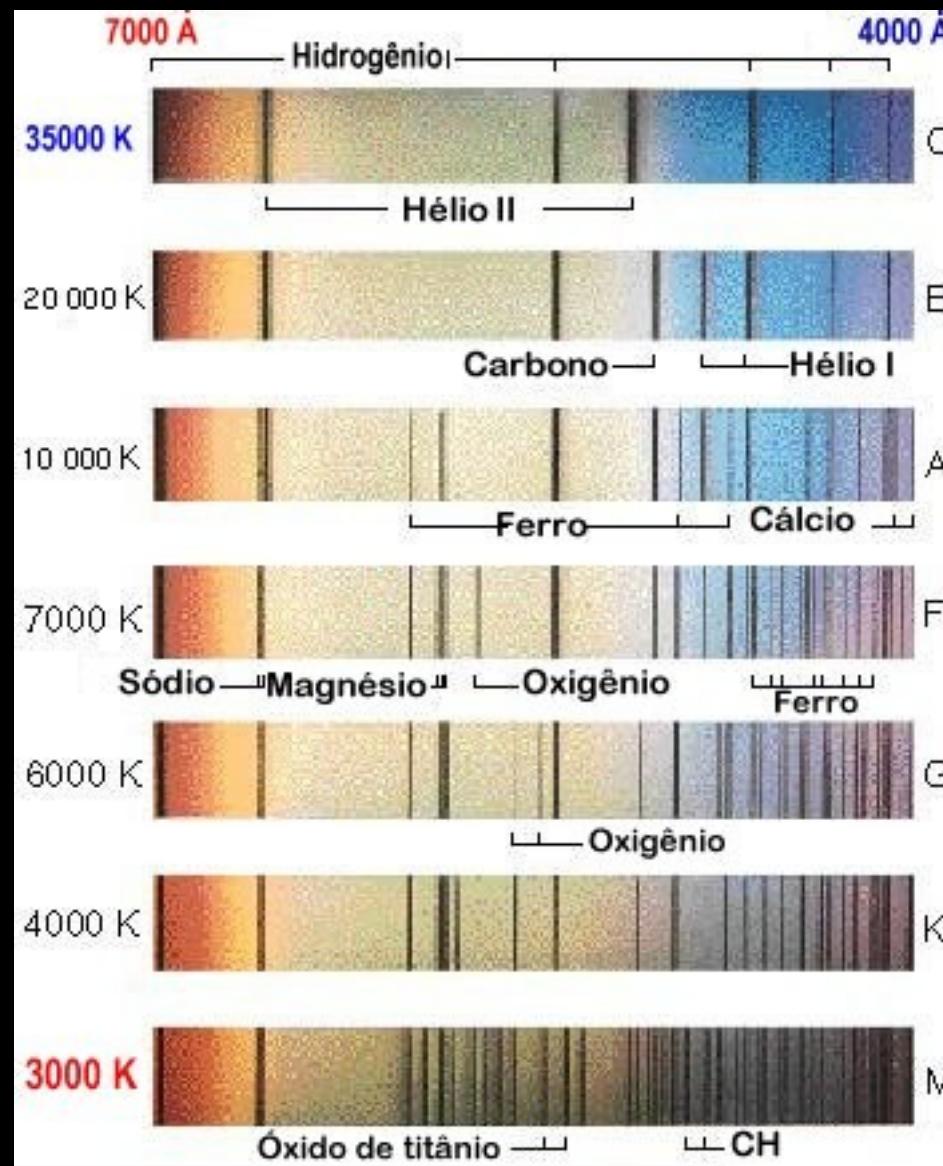
Call

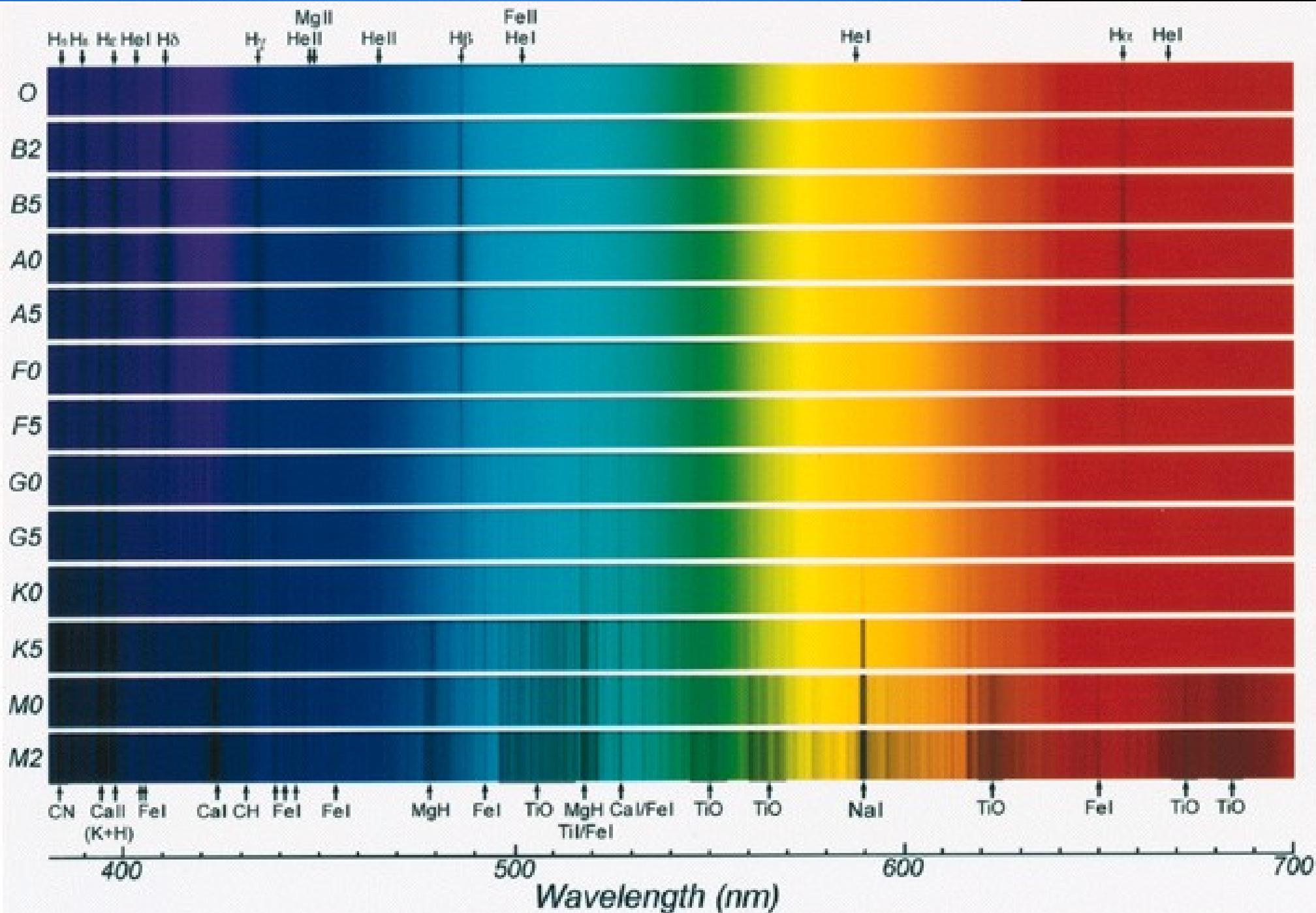
K:  $T_{\text{ef}} \sim 5000\text{K}$

Call, He I e K max em K0

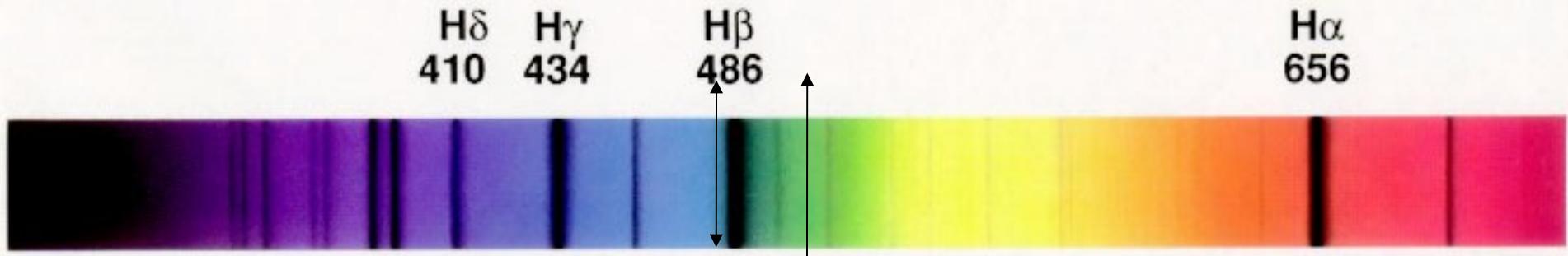
M:  $T_{\text{ef}} \sim 3000\text{K}$ , molec.

# Classes Espectrais



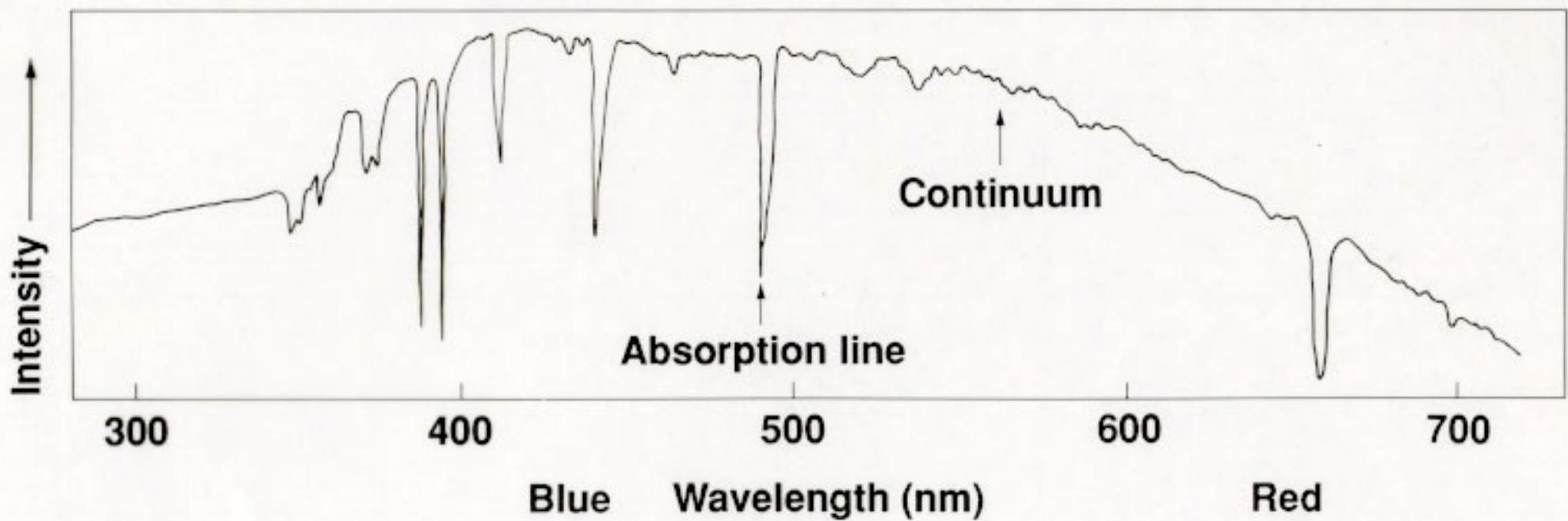


# Espectro típico de uma estrela



Linha fraca

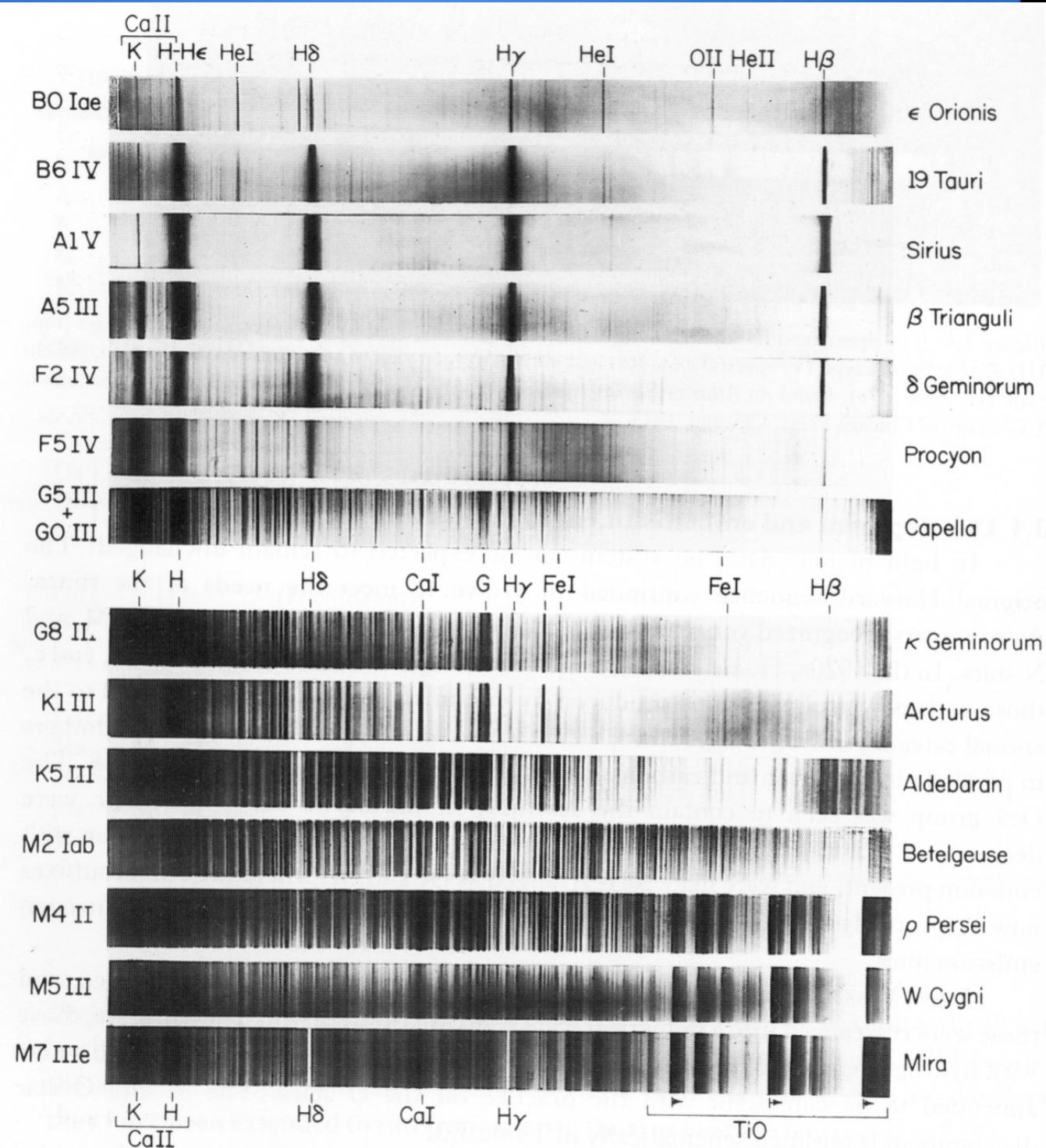
Linha forte



# As subdivisões

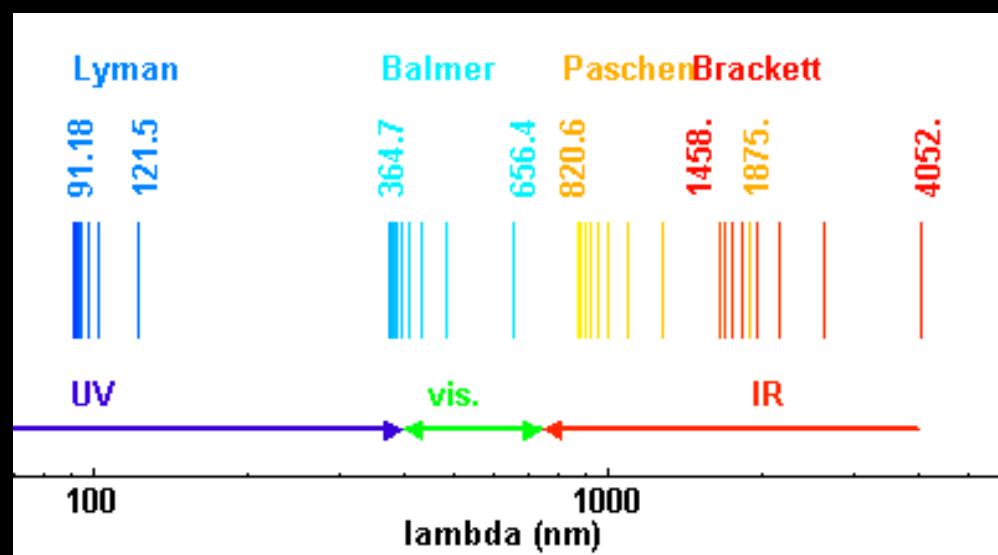
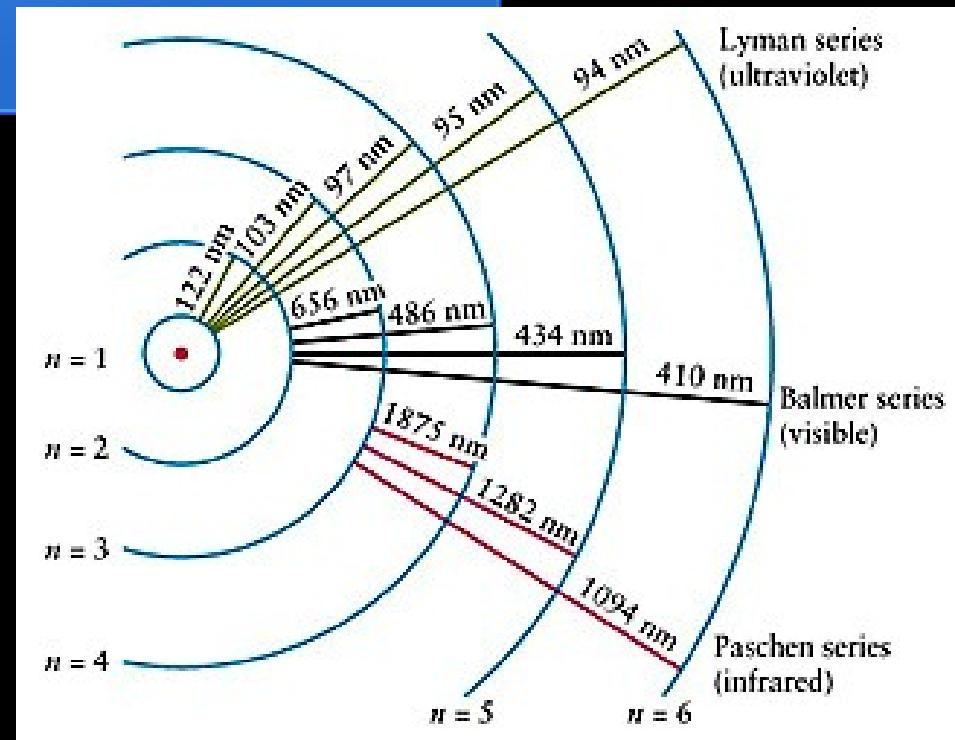
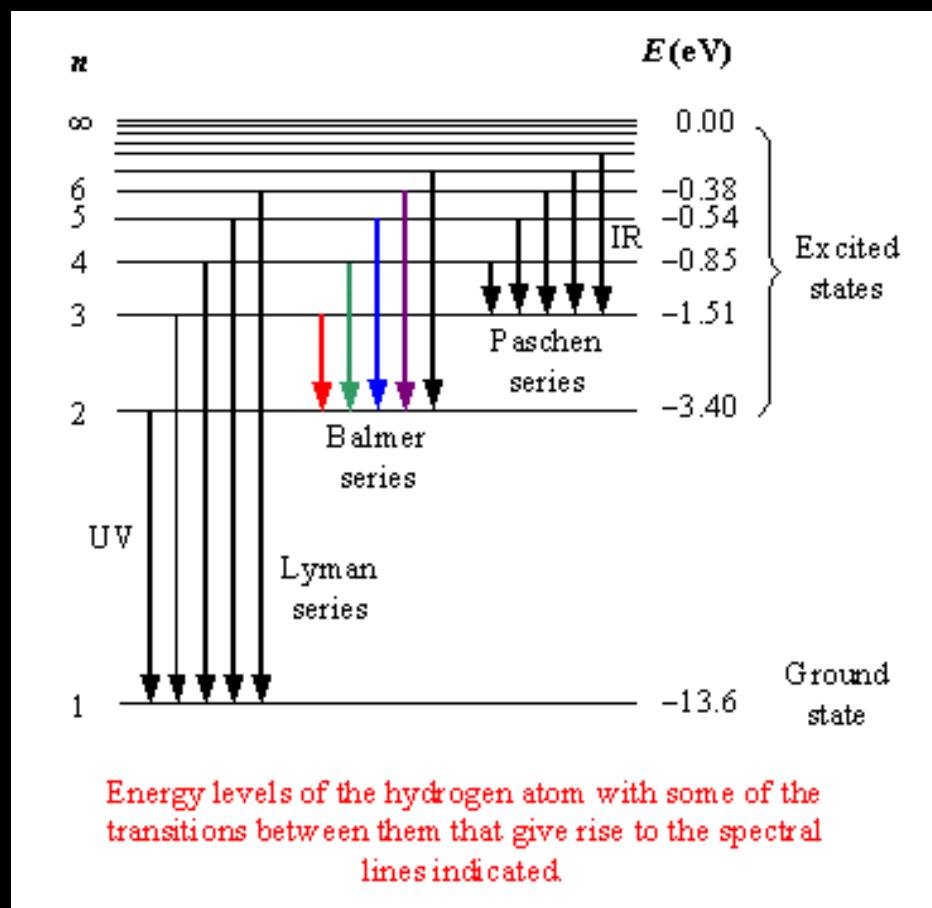
As subdivisões decimais foram propostas por Annie Canon, para dar conta da diversidade de espectros dentro de uma mesma classe.

À cada classe espectral, apende-se a subdivisão (de 0 a 9). Há subdivisões intermediárias (0.5, 6.5, etc).

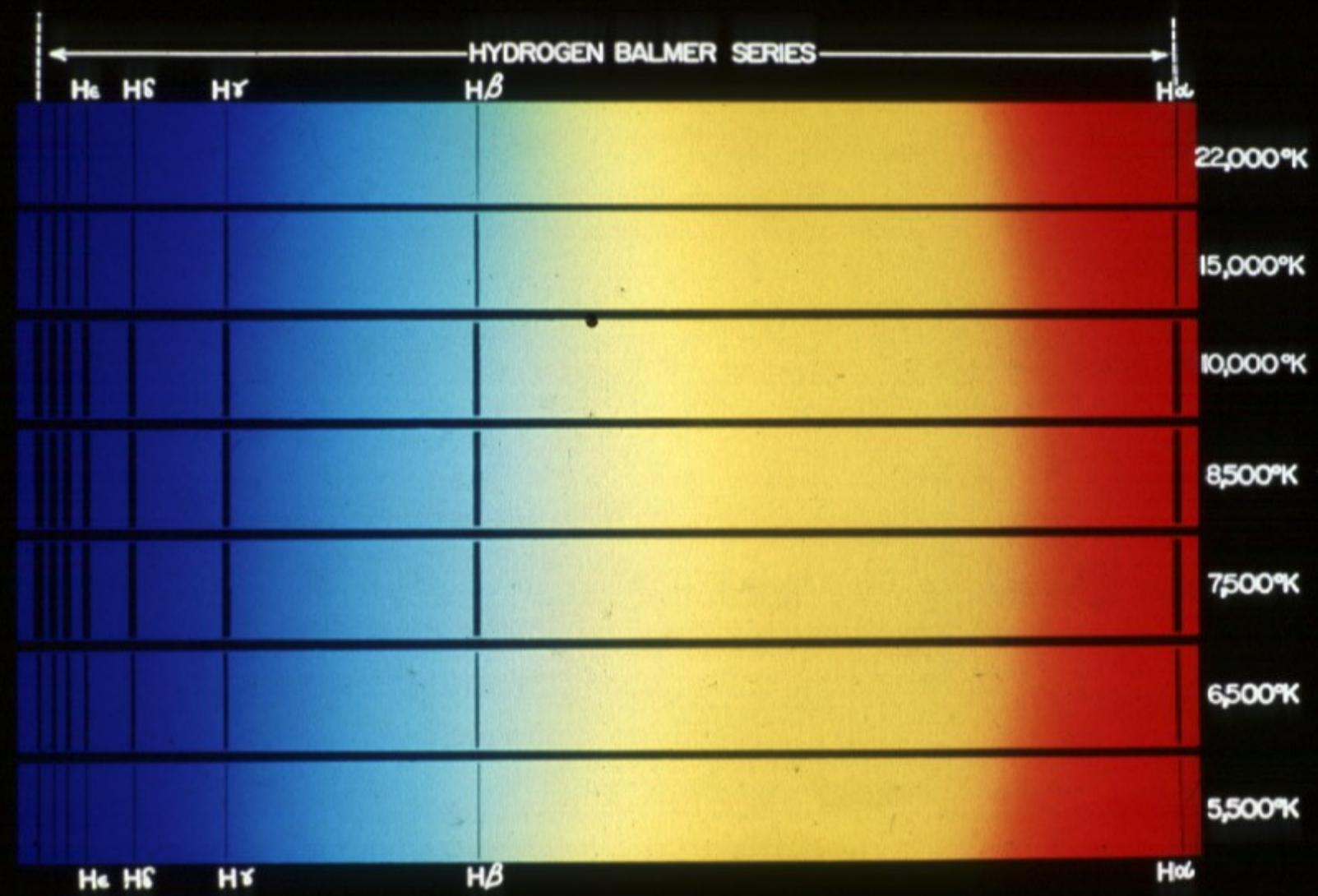


# Transições $\Rightarrow$ Linhas

## A Série de Balmer



# A Série de Balmer



# Principais causas do Espectro estelar

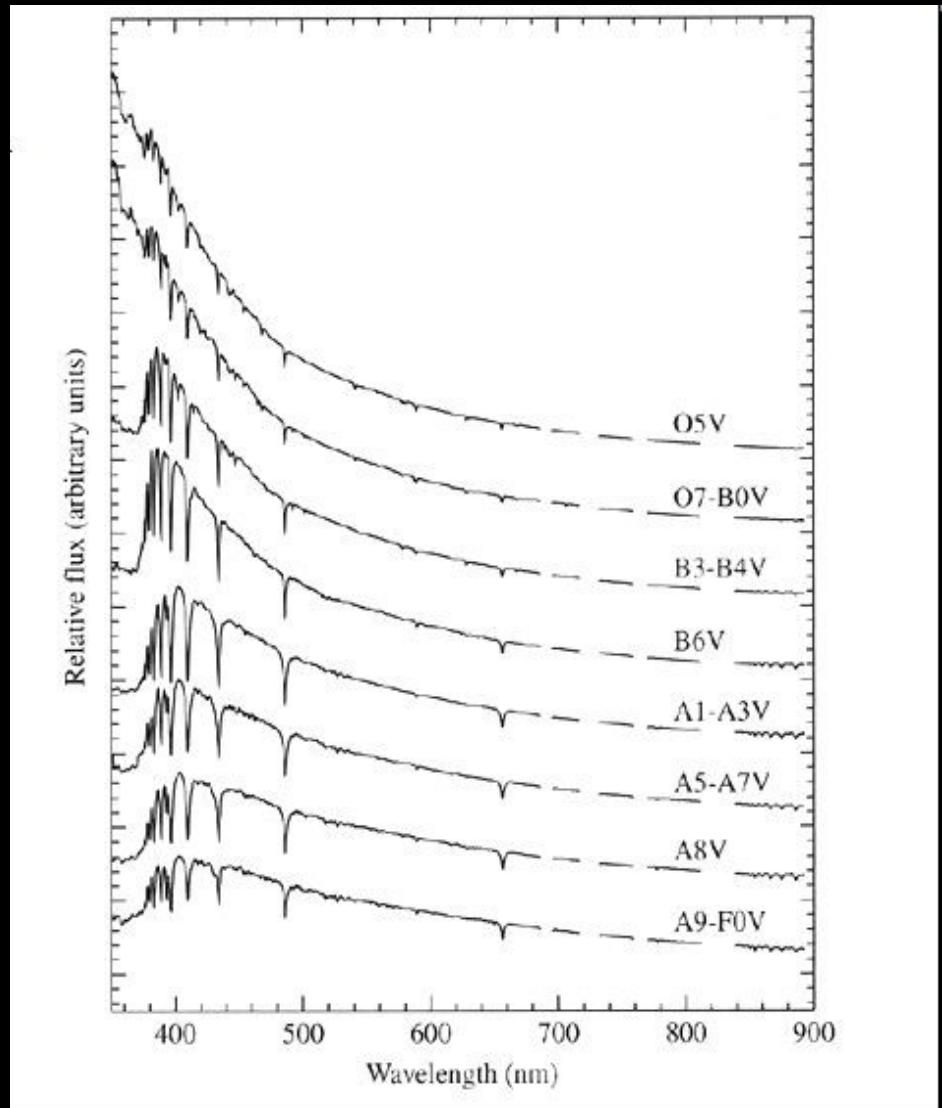
- Padrão de linhas → Composição Química
- Contínuo e Intensidade das linhas → Temperatura



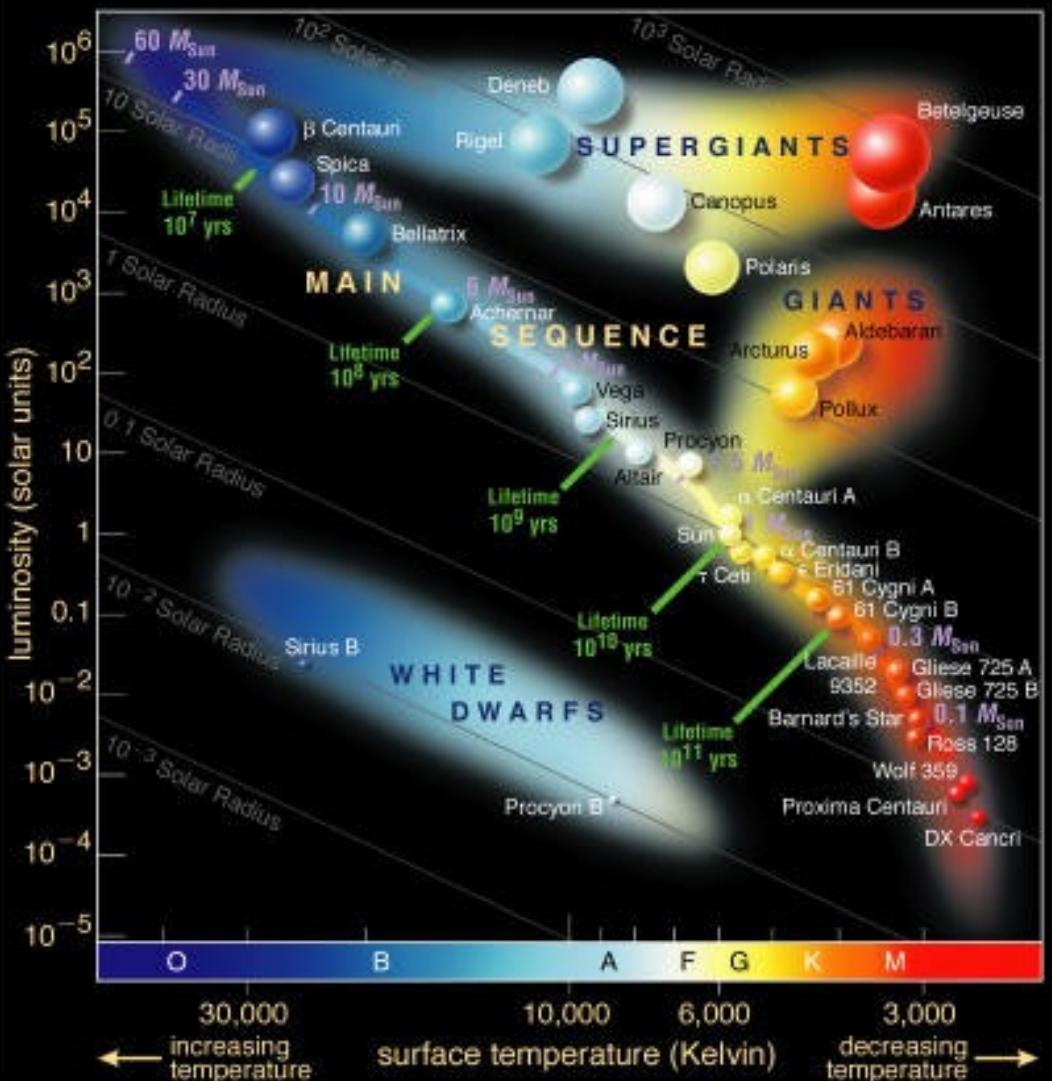
*A temperatura é o que mais afeta a aparência do espectro de uma estrela já que todas as estrelas são, majoritariamente, constituídas de hidrogênio.*

# Espectros estelares

- Compare a inclinação dos espectros com curvas de corpo negro.
- As linhas (ou raias) são 'desvios' à distribuição de corpo negro.



# Diagrama de Hertzsprung-Russell (HR)



Relaciona:

Luminosidade vs. Temperatura

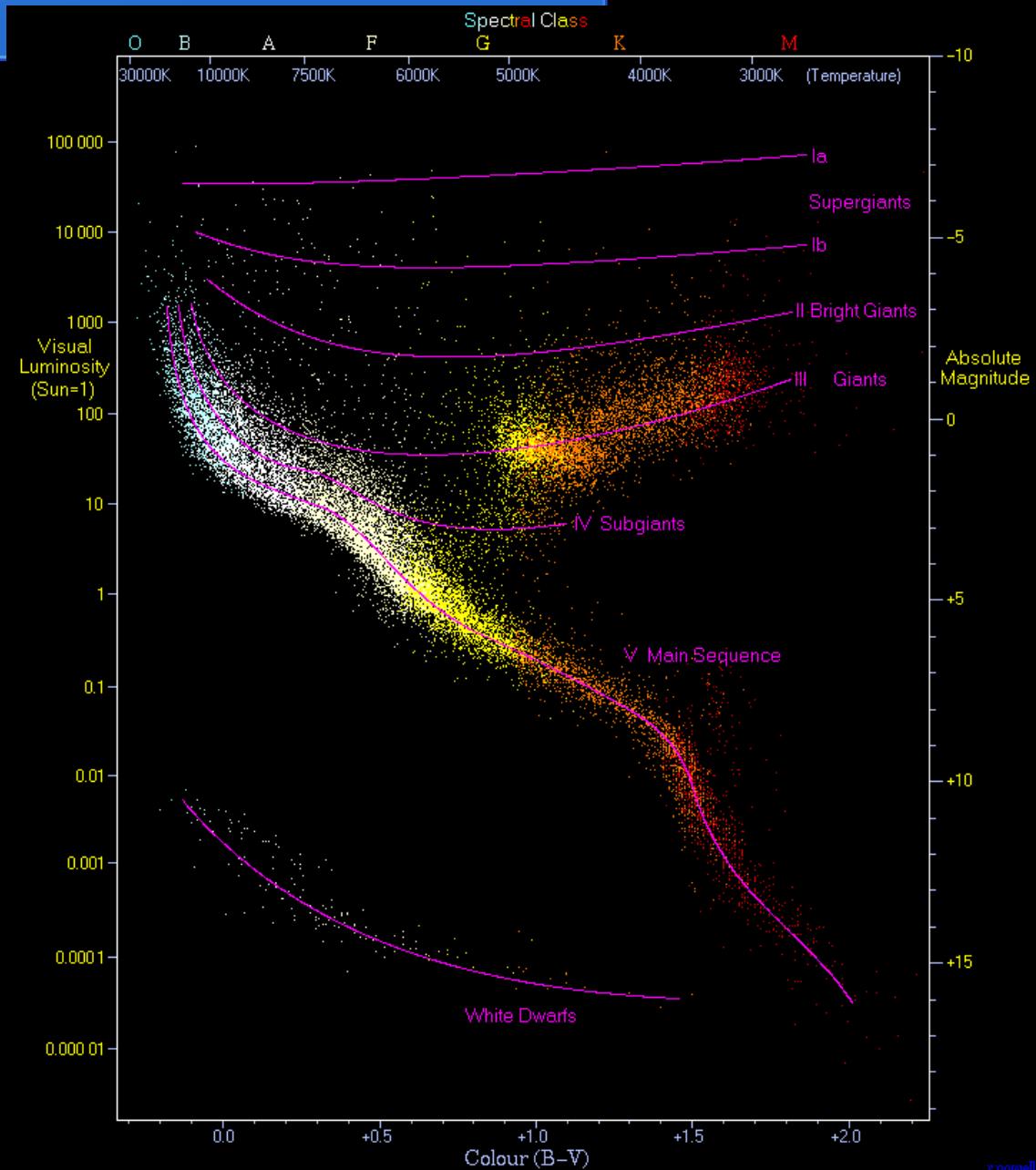
Magnitude vs. Tipo Espectral  
(diagrama HR “original”)

Magnitude vs. Cor (comumente  
chamado “diagrama cor-magnitude”)

É uma das principais  
ferramentas dos astrônomos  
para o diagnóstico de  
populações e grupos estelares

# Classes de Luminosidade

- As classes de luminosidade são sequências estelares no diagrama HR, que indicam a posição relativa da estrela em termos de sua luminosidade.



# Classes de anãs vermelhas



- Final 1980- meio 1990
- L (1988) – 403 até 2005 (algumas subestelares)
  - H<sub>2</sub>O, FeH, CO<sub>2</sub>
  - T: 1300–2400 K
- T (1995) – 62 até 2005 (anãs marrons frias)
  - CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O
  - T: ~500–1300 K
- Y (2011) - 17 – até 2013 (anãs marrons)
  - Amonia (1.55μm)
  - T < 600 K

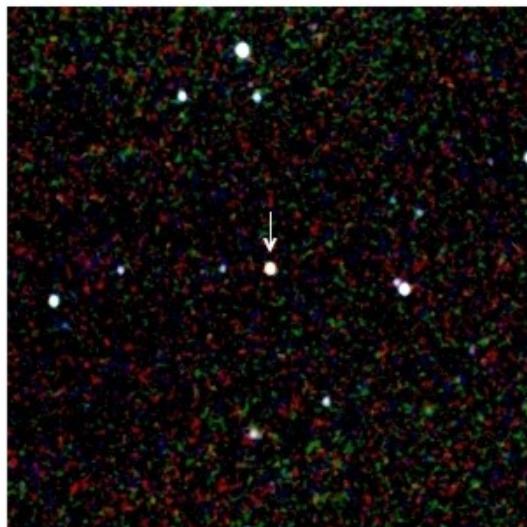
# Classes de anãs vermelhas

## As invisíveis anãs L

**2MASS J1146+2230**

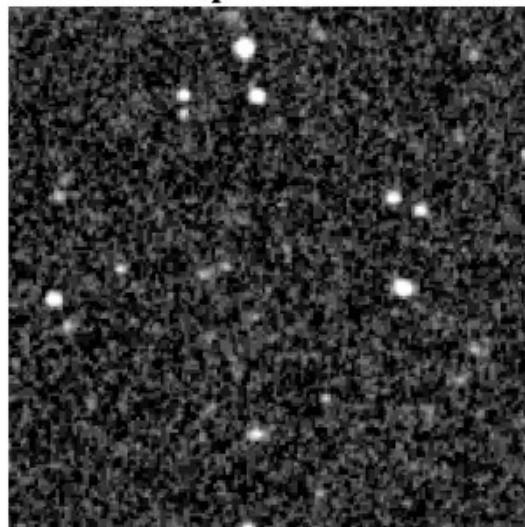
**An L-type dwarf in the constellation Leo**

The near-infrared view



2MASS Atlas JHK<sub>s</sub> Composite Image

The optical view



Palomar Digitized Sky Survey



J.D. Kirkpatrick (IPAC/Caltech), I.N. Reid (Caltech), R.M. Cutri (IPAC/Caltech),  
C.A. Beichman (IPAC/JPL/Caltech), J. Liebert (U of A), M.F. Skrutskie (UMass)

The 2MASS project is a collaboration between the University of Massachusetts and IPAC

# As mais-do-que-invisíveis anãs T



Acredite se quiser:  
anãs T devem ter  
coloração magenta.

## 2MASSW J1217-03

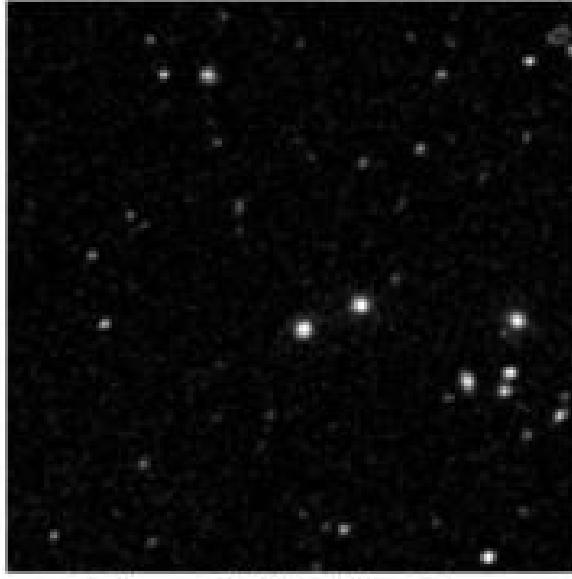
A methane (T-type) dwarf in the constellation Virgo

The near-infrared view



2MASS Composite JHK<sub>s</sub> Atlas Image

The optical view



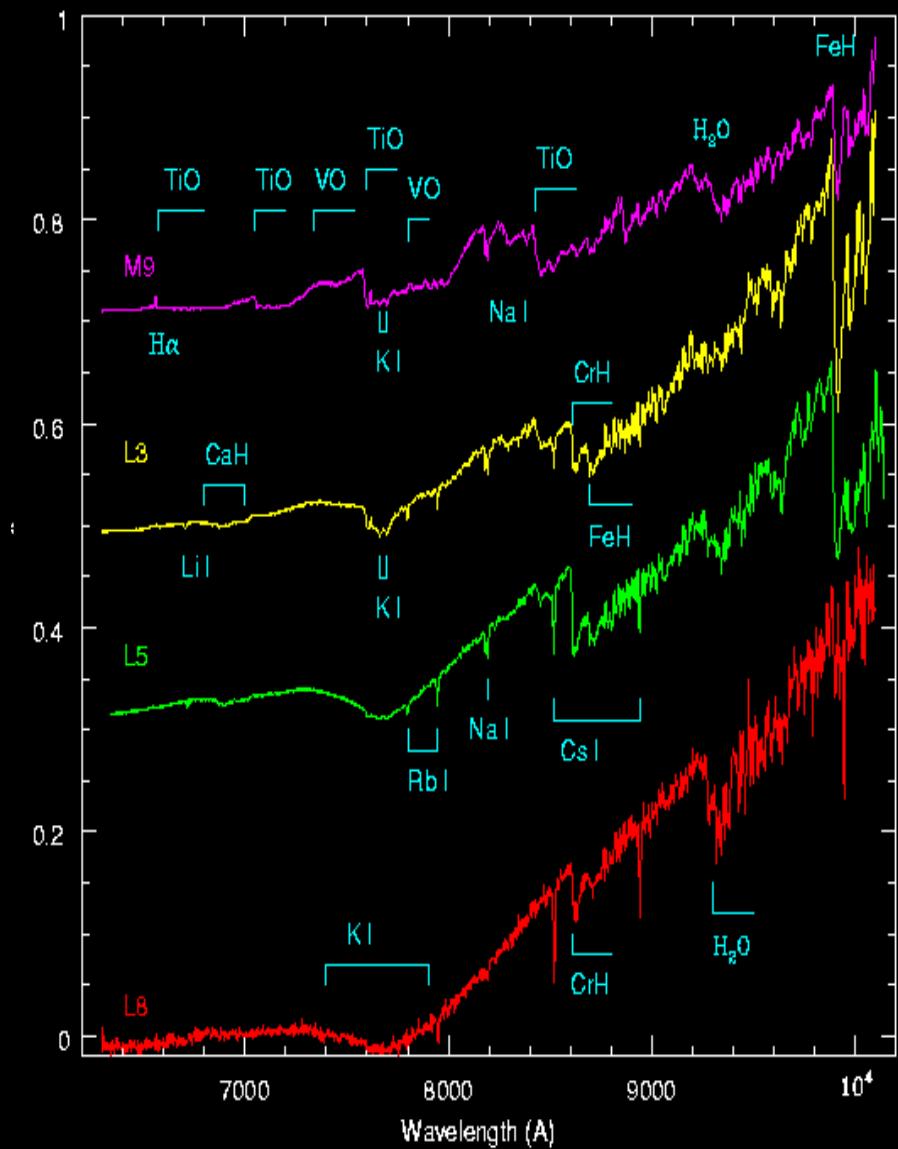
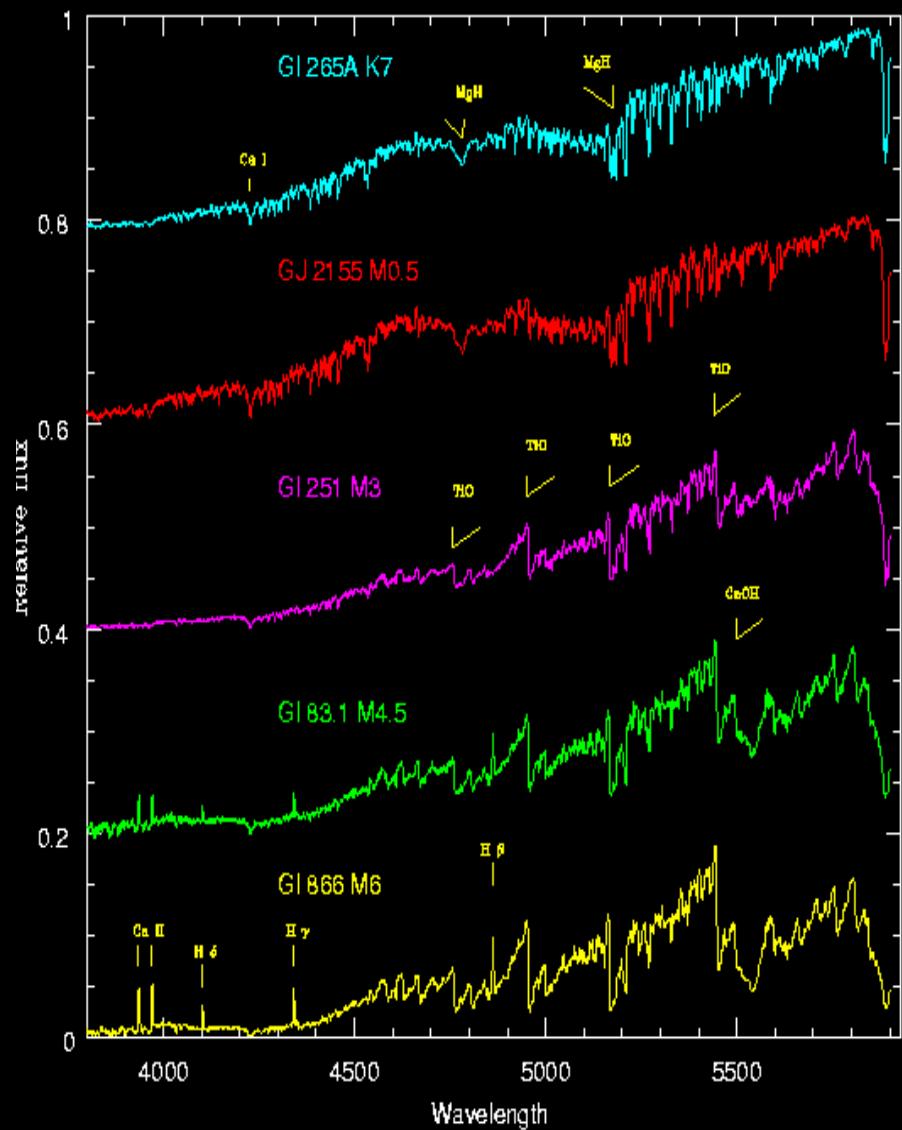
Palomar Digitized Sky Survey



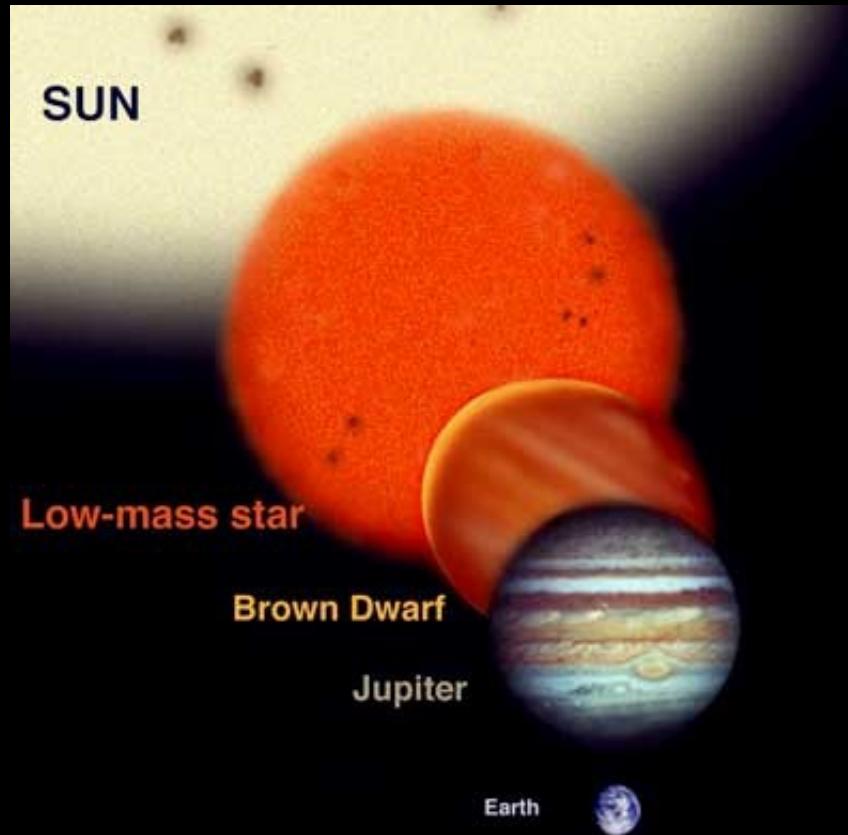
A.J.Burgasser (Caltech), J.D.Kirkpatrick (IPAC/Caltech), M.L.Brown (Caltech),  
L.N.Reid (U.Penn), J.E.Gizis (U.Mass), C.C.Dahn & D.G.Massey (USNO/Flagstaff),  
C.A.Behrman (IPAC), J.Liebert (Arizona), R.M.Cutri (IPAC/Caltech), M.F.Skrutskie (U.Mass)

The 2MASS Project is a collaboration between the University of Massachusetts and IPAC

# Transição espectral M e L



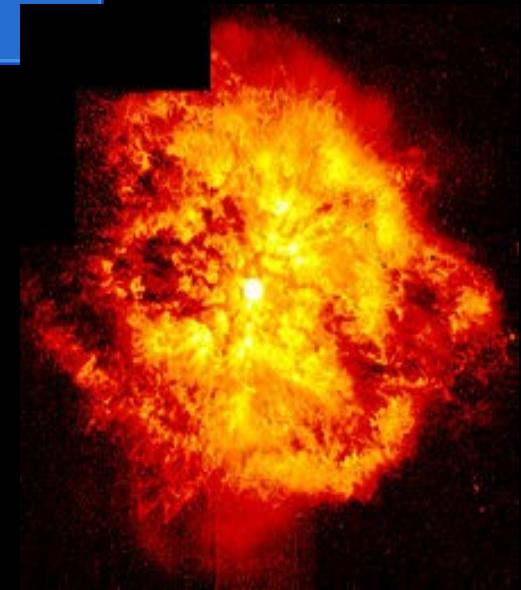
# Tamanho das anãs marrons



- As anãs marrons têm tamanho similar a Júpiter, ou são um pouco maior do que este. São, todavia, objetos diferentes: foram formadas por colapso gravitacional (por isso, não tem núcleo de rocha ou gelo).

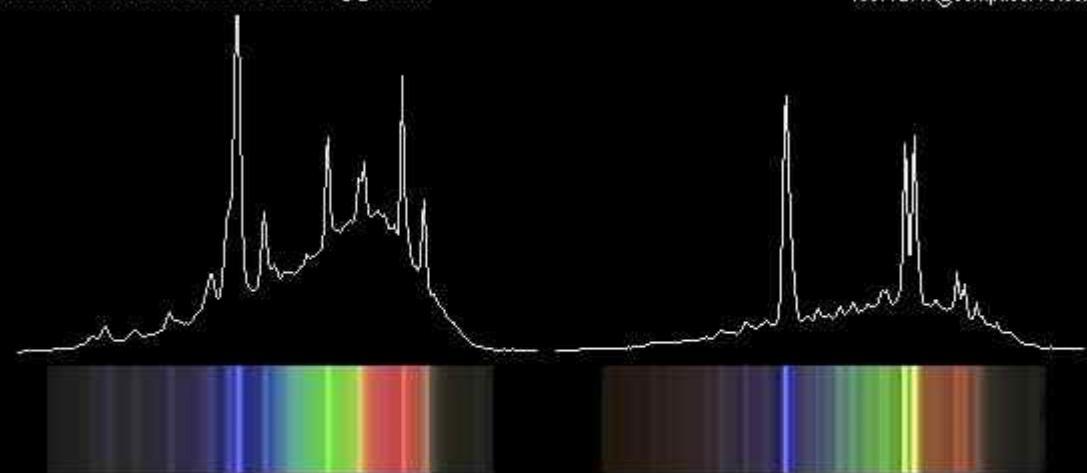
# As Wolf-Rayet

- São estrelas com massa acima de 60 massas solares.
- Nasceram como estrelas O, na sequência principal, mas sua evolução as fez perder muita massa (através dos ventos) que fica ao redor na forma de envoltórios, gerando as linhas de emissão.



Colorful emission line stars in Cygnus...

100772.47@compuserve.com



WR 136 - spec type WN6b(h) = nitrogen star

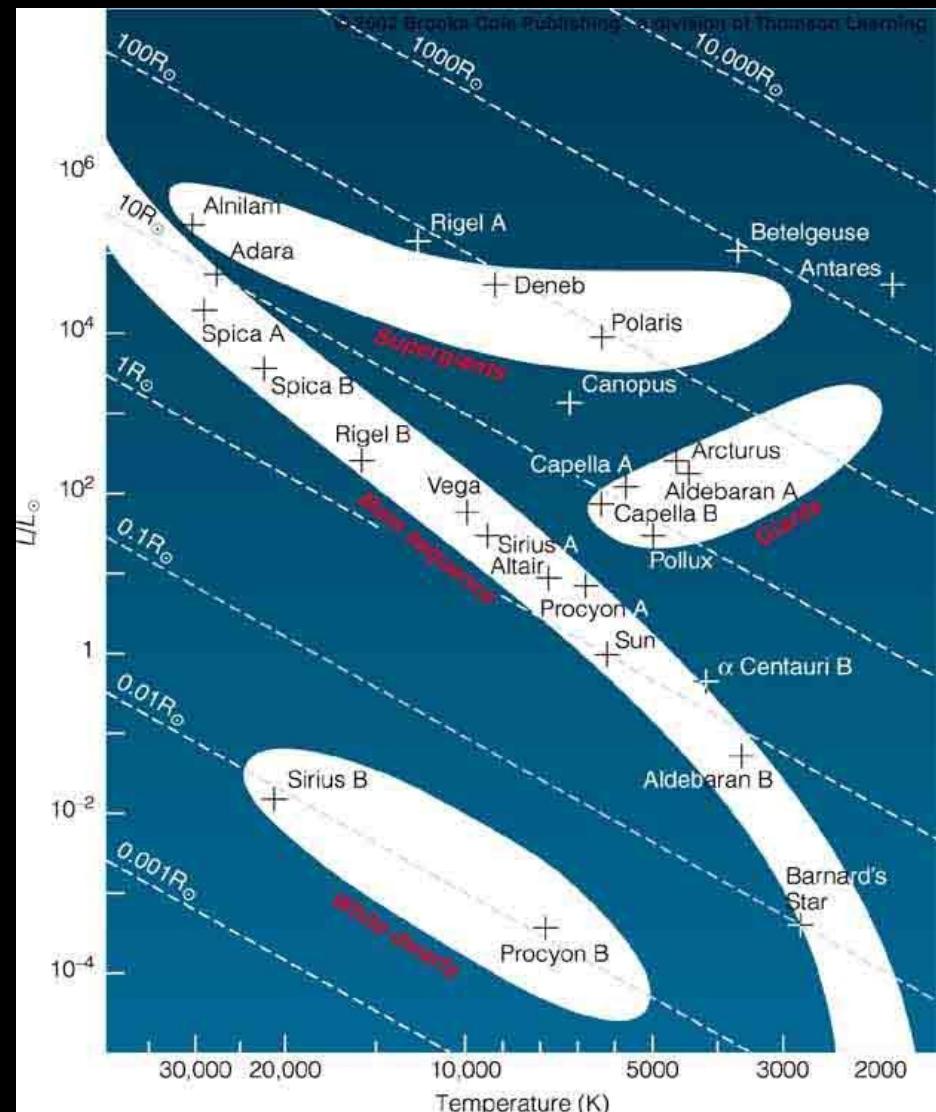
WR 135 - spec type WC8 = carbon star

# Raios, temperaturas e luminosidades

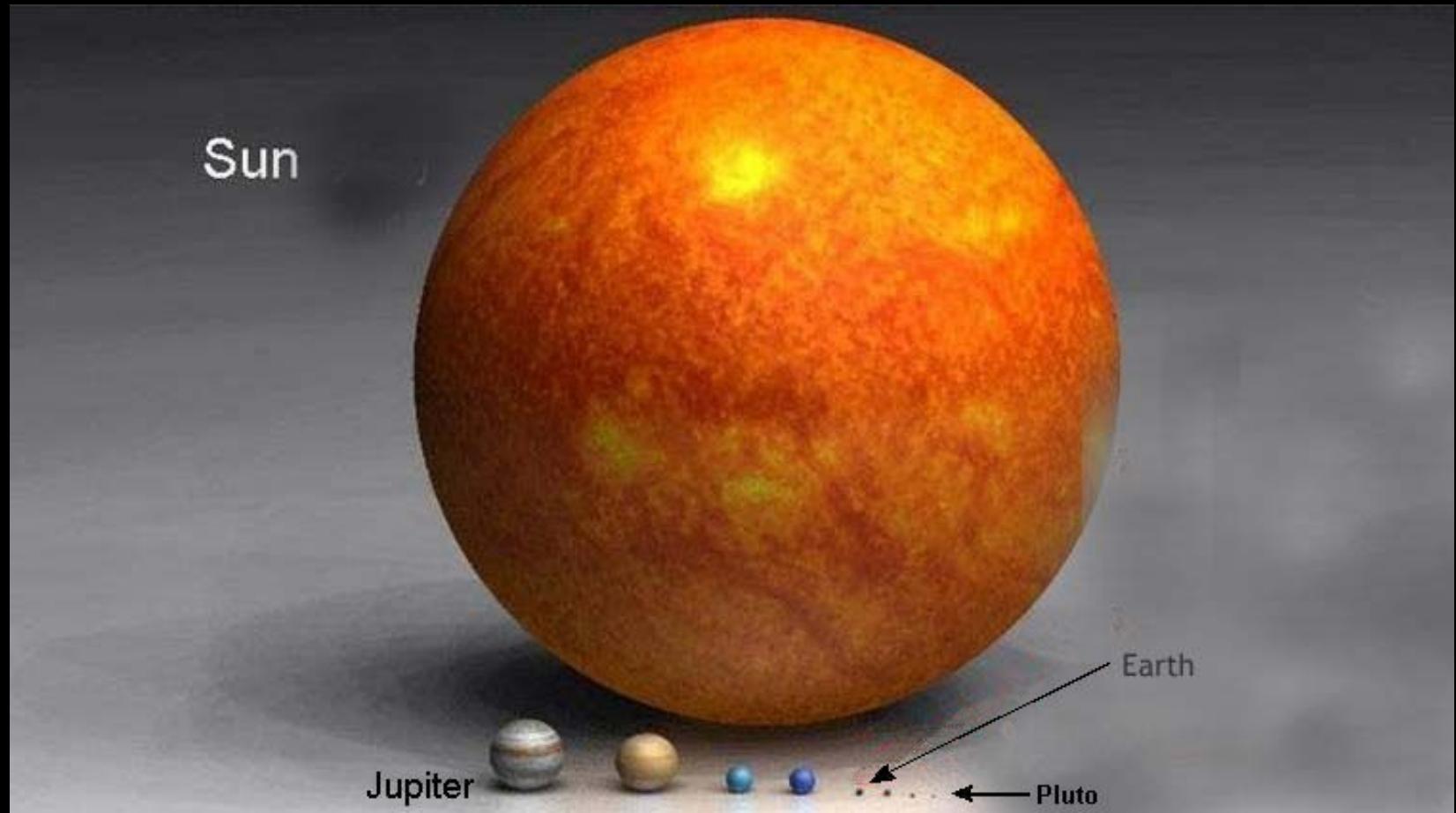
- Existe uma relação teórica entre a temperatura superficial, a luminosidade e o raio das estrelas:

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

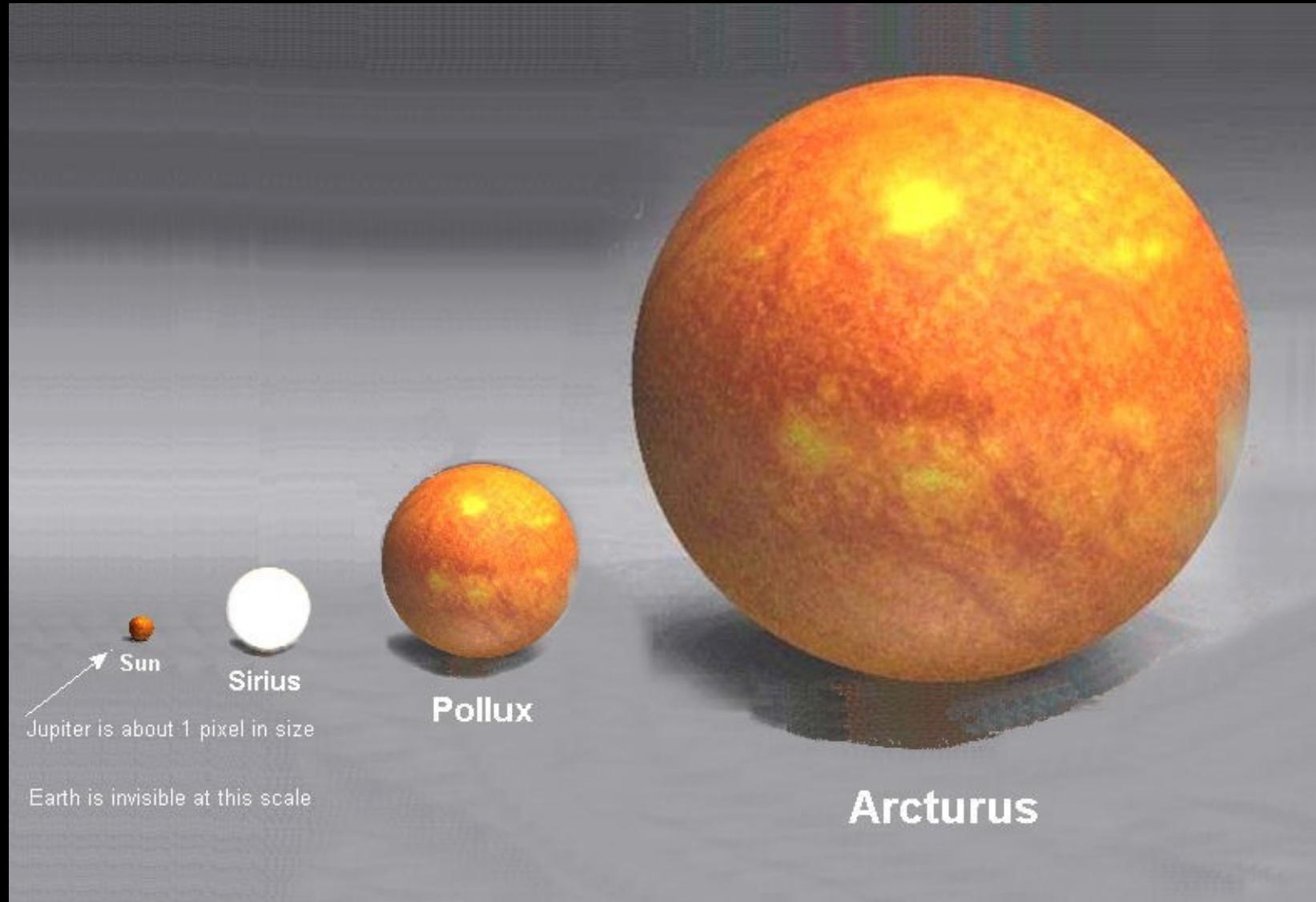
- que nos permite traçar linhas de **mesmo raio** sobre o diagrama HR.



# Escalas de Tamanho (raios) de Estrelas



# Escalas de Tamanho (raios) de Estrelas



# Escalas de Tamanho (raios) de Estrelas

