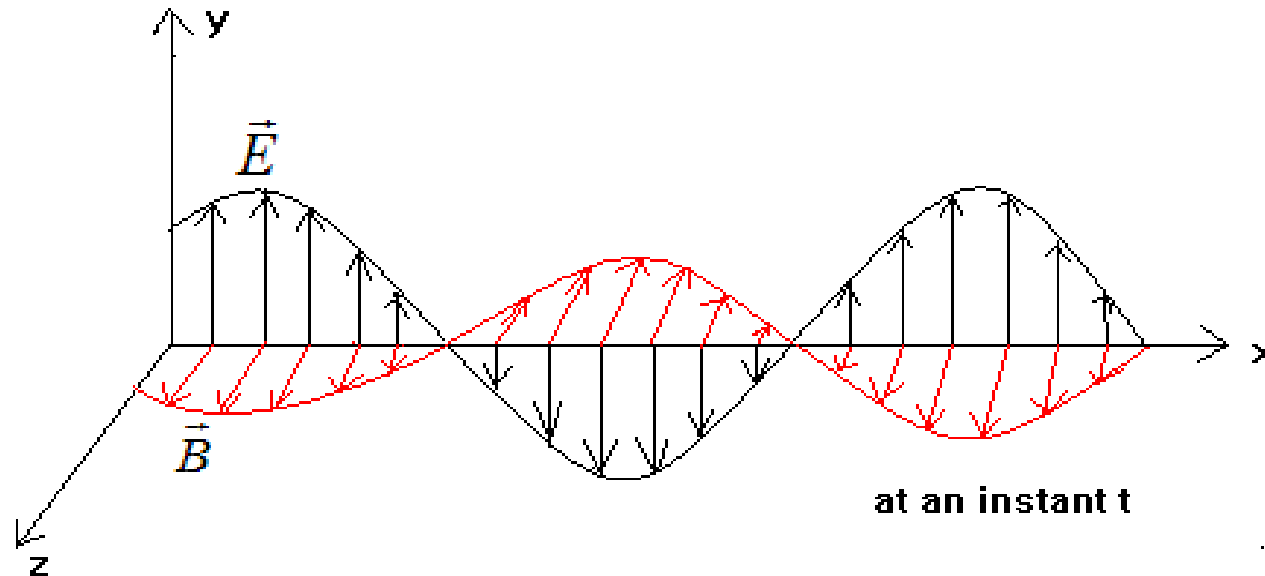


# Luz & Radiação

*Roberto Ortiz*  
EACH - USP

# *A luz é uma onda eletromagnética que se propaga*



No desenho acima a luz se propaga para a direita.

Estão desenhados os campos elétrico ( $E$ ) e magnético ( $B$ ) que compõem a luz

Eles são perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação

# *Histórico*



Em 1665 Isaac Newton mostrou que a luz branca, ao atravessar um prisma, pode ser decomposta nas diversas cores que a compõem: o espectro

Cada “cor” do espectro corresponde a um *comprimento de onda* ou *frequência*

A Frequência da radiação ( $\nu$ ) representa o número de oscilações do campo eletromagnético que ocorrem no intervalo de tempo de 1 segundo.

A unidade de Frequência é o  $s^{-1}$  ou Hertz (Hz)

Exemplos:

*Ondas de rádio AM: 550 – 1600 kHz*

*Ondas de rádio FM: 88 – 108 MHz*

*Luz visível:  $4.0 - 7.5 \times 10^{14}$  Hz*

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) representa a distância entre duas frentes de onda

A unidade de  $\lambda$  no sistema internacional de unidades é o metro. Frequentemente, múltiplos do metro são também utilizados:

$\mu\text{m}$  ( $10^{-6}$  m), nm ( $10^{-9}$  m) e o Angstrom ( $1\text{A} = 10^{-10}$  m)

**Exemplos:**

*Ondas de rádio AM: 190 – 550 m*

*Ondas de rádio FM: 2,8 – 3,4 cm*

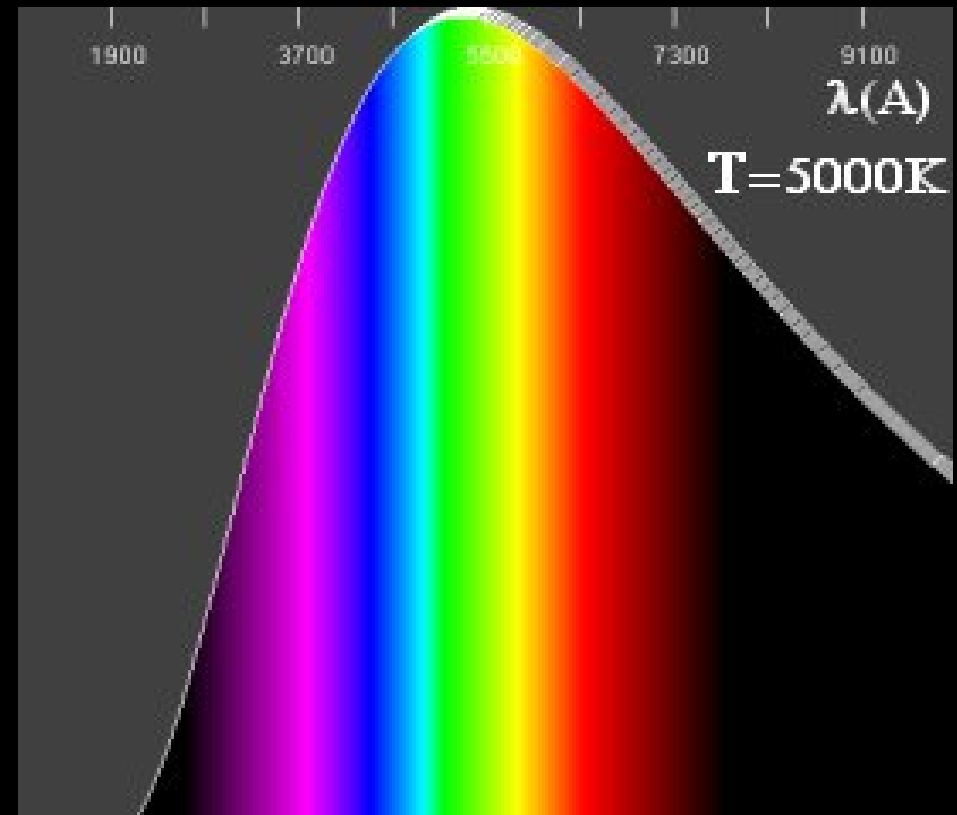
*Luz visível: 400 – 750 nm*

# *O espectro eletromagnético*

Cada cor (ou comprimento de onda ou frequência) da radiação tem uma certa intensidade.

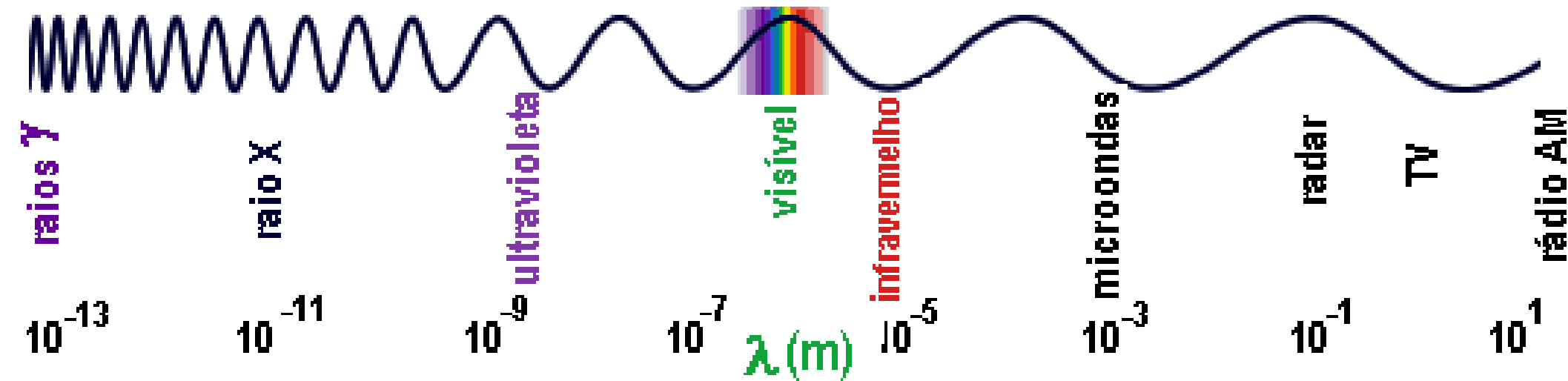
A cor que vemos é o resultado da sensibilidade do olho humano às diversas cores emitidas pelo objeto.

Dá-se o nome de espectro à distribuição de energia (fluxo) irradiada por intervalo de frequência ou comprimento de onda.



O espectro eletromagnético estende-se além da região visível ao olho humano

### O espectro eletromagnético



A velocidade da luz depende do índice de refração do meio, que é uma propriedade intrínseca do material.

No vácuo ( $n=1$ ), ela atinge seu valor máximo:

$$c = 300 \text{ mil km/s } (2.998 \times 10^8 \text{ m/s})$$



# Relação entre frequência, comprimento e velocidade da onda:

Essas três grandezas estão correlacionadas através da expressão:

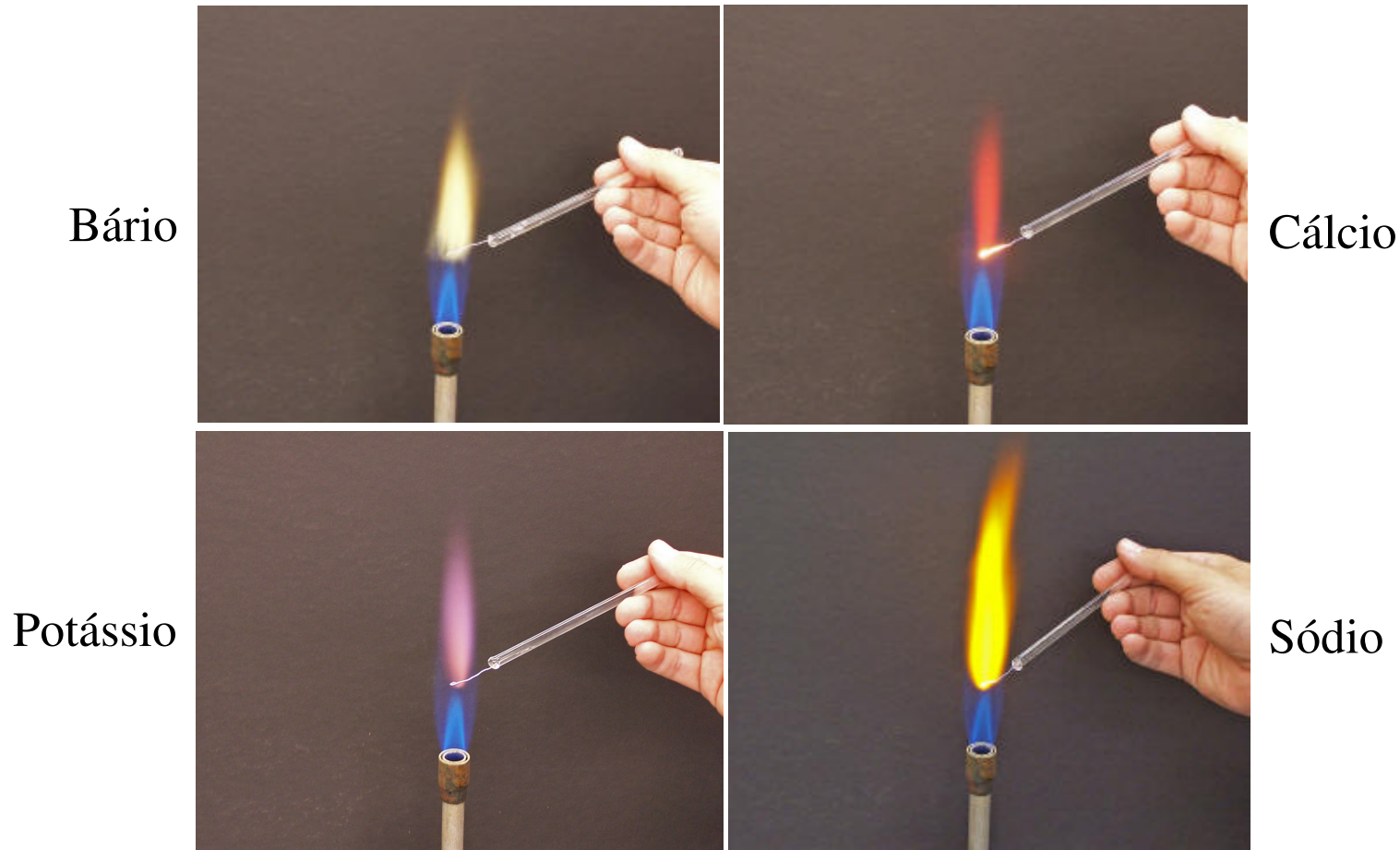
$$\lambda \nu = c$$

$$\lambda = c / \nu$$

$$\nu = c / \lambda$$

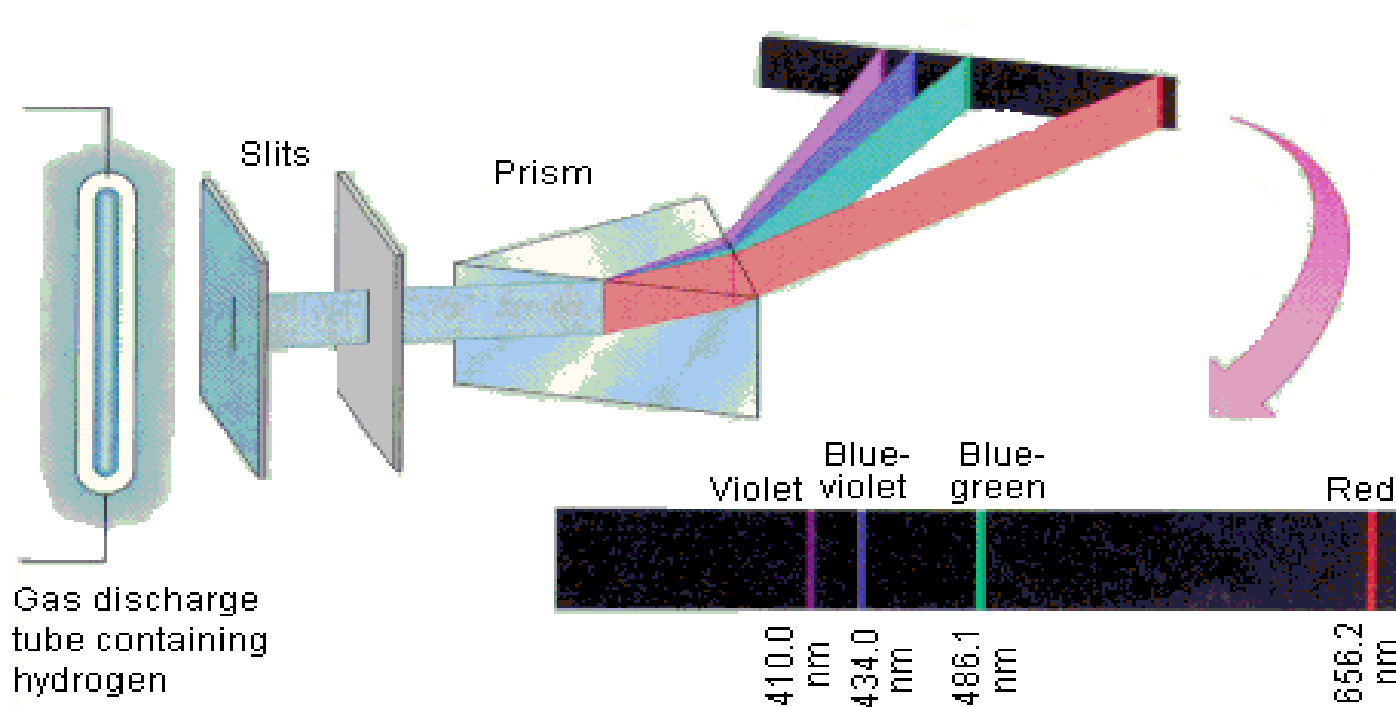
Em 1856, os alemães Robert Bunsen (1811-1899) e Gustav Kirchhoff (1824-1877) analisaram a cor de diversas substâncias quando colocadas numa chama.

Parecia haver uma “cor característica” para cada substância que entrava em combustão.



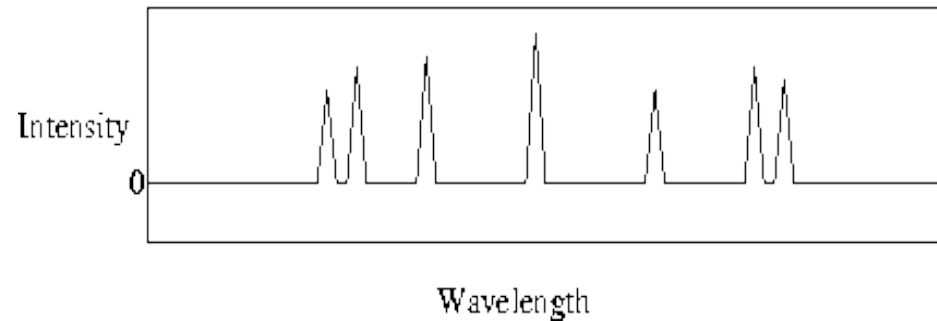
Os espectros observados tinham linhas espectrais brilhantes e cada elemento químico apresentava um conjunto de linhas característico.

Observando-se quais linhas estavam presentes num espectro, era possível identificar a composição química do material.



# *Espectros de emissão*

*Cada elemento tem seu conjunto próprio de linhas espectrais*

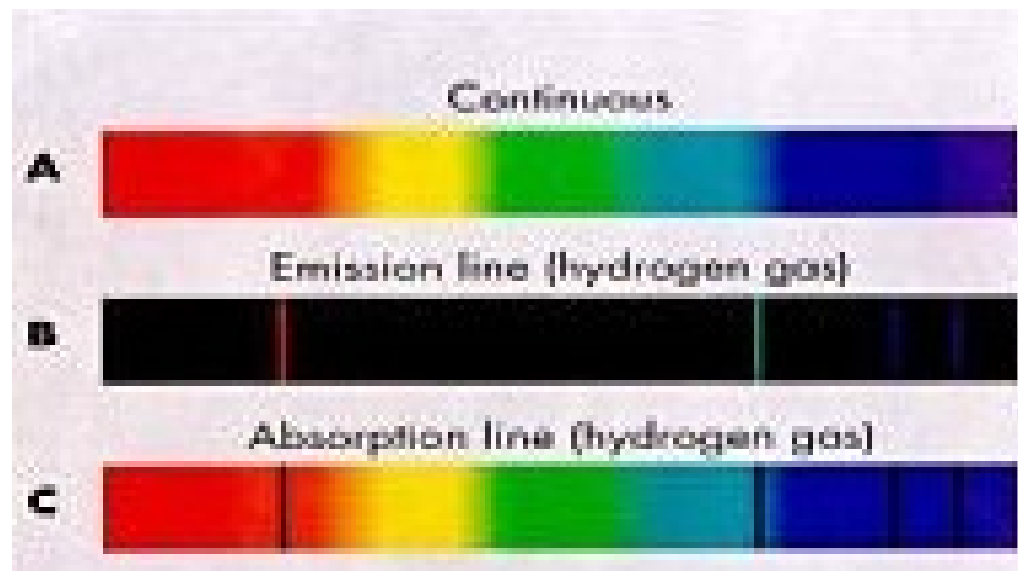


# As leis de Kirchhoff

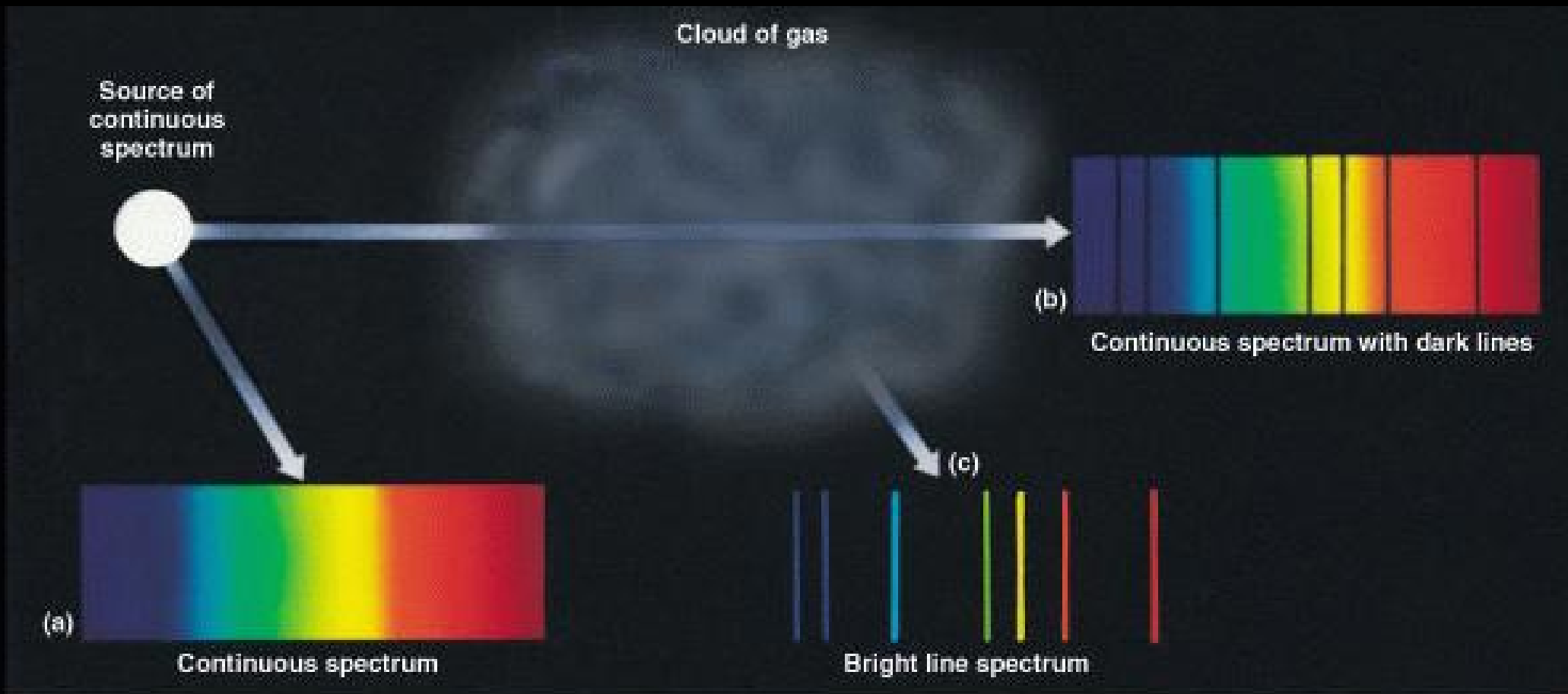
Kirchhoff realizou diversas experiências, analisando o espectro emitido por objetos incandescentes.

Baseando-se em suas observações, ele elaborou um conjunto de 3 leis empíricas que descrevem o tipo de espectro observado.

- 1-) Um sólido, líquido ou gás a alta pressão incandescente emite um espectro contínuo.
- 2-) Um gás a baixa pressão produz um espectro de emissão de linhas, cujos comprimentos de onda dependem da composição química do gás.
- 3-) O espectro contínuo, emitido por um objeto incandescente, ao passar por um gás mais frio apresentará linhas de absorção correspondentes à composição química deste último.

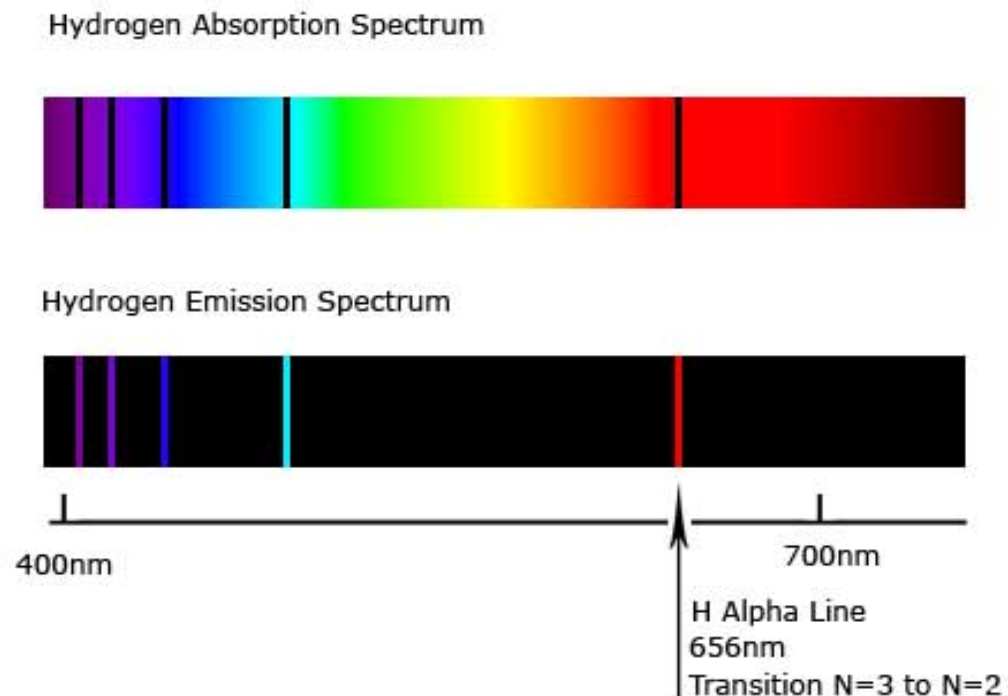


# *Leis de Kirchhoff em resumo:*



A posição (comprimento de onda) das linhas espectrais de emissão ou absorção dependem da composição química do material.

Um material pode ter um espectro de emissão ou absorção, de acordo com as leis de Kirchhoff, mas o comprimento de onda dessas linhas é o mesmo em qualquer lugar do Universo.





# *Espectros contínuos*

São emitidos por substâncias sólidas, líquidas ou por um gás a alta pressão.



# *Espectros de emissão*

São emitidos por um gás incandescente a baixa pressão, cujos átomos foram excitados por algum processo físico.



## *Espectros de absorção*

A radiação, ao passar através de um gás frio passará a ter linhas de absorção características desse gás.

No Sol (e demais estrelas) as camadas externas são mais frias que as internas, o que gera linhas de absorção.



## *As linhas espectrais*

A correta compreensão das linhas espectrais só foi possível com o advento da Moderna Teoria Quântica, por Edwin Schoerendinger e outros, a partir do início do séc. XX.

O conceito de *fóton* está relacionado a uma *partícula de luz*.

Segundo a Teoria Quântica, um feixe de luz é composto por um número muito grande de fótons.



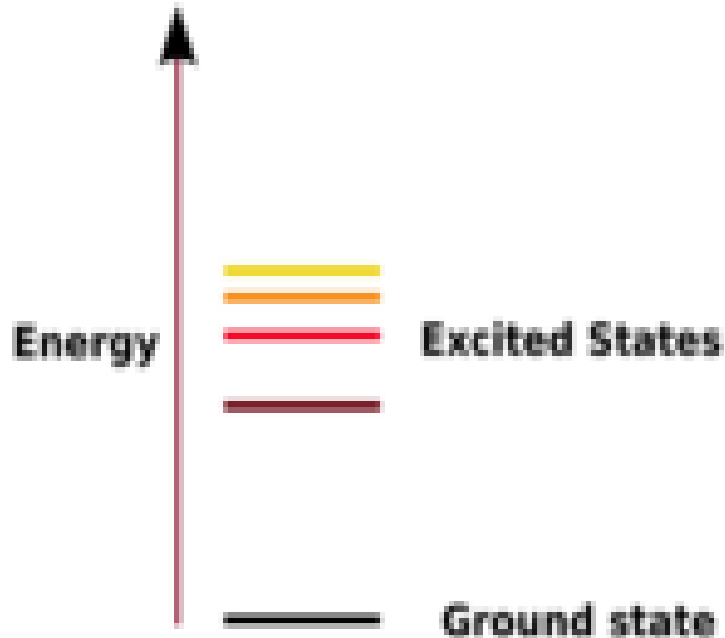
E. Schroedinger

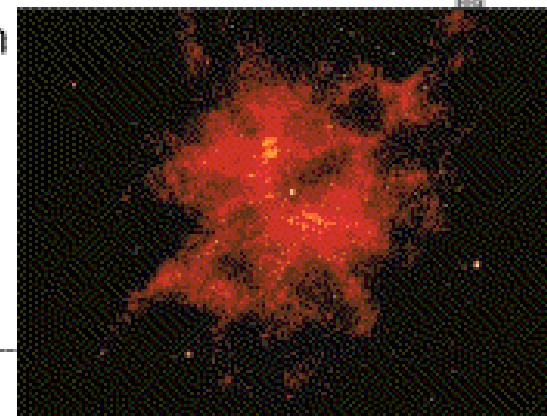
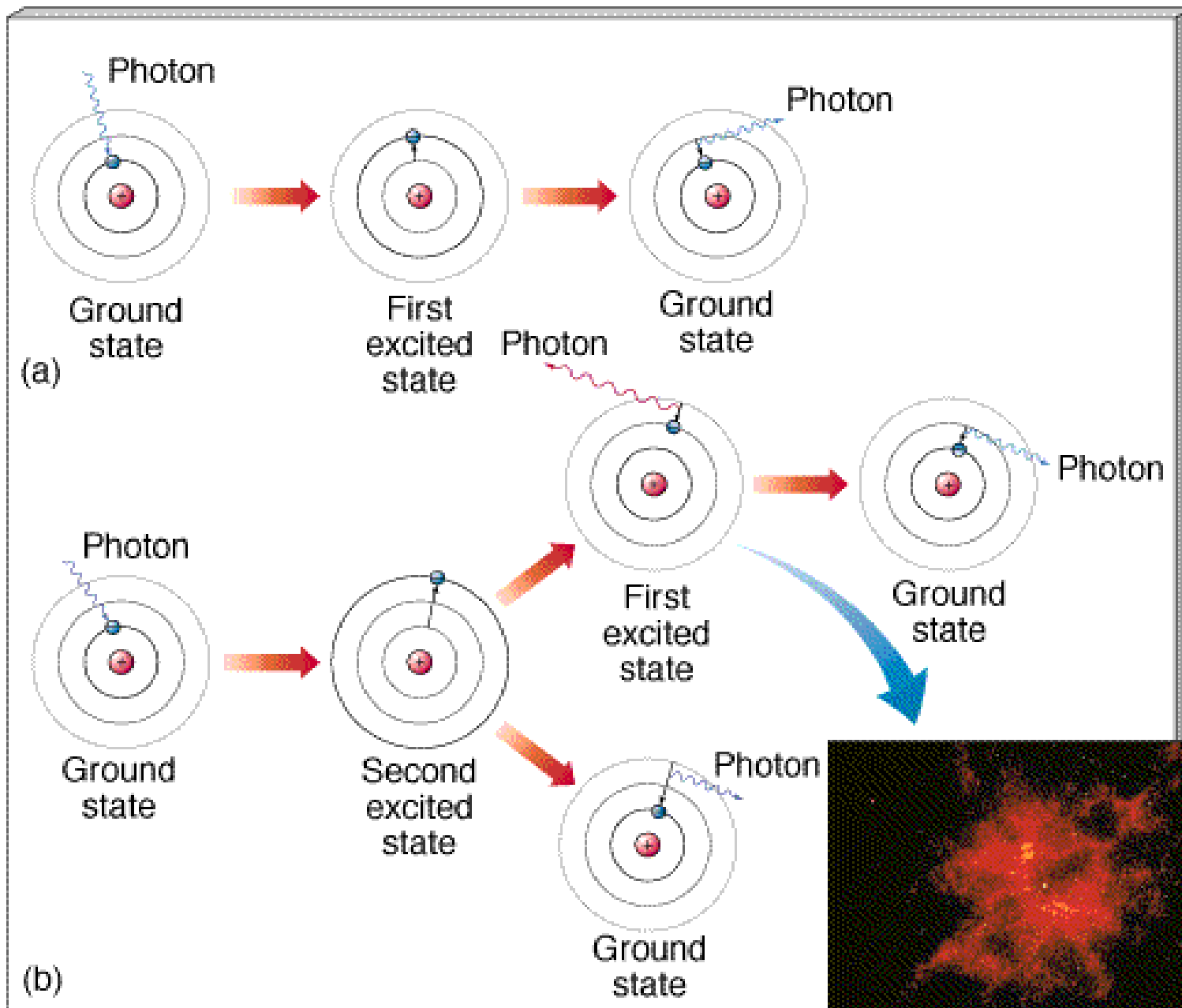
Segundo a teoria quântica, em um átomo apenas alguns estados de energia eletrônicos são permitidos.

Um átomo pode ficar energeticamente excitado ao absorver um fóton ou colidir com outro átomo ou molécula.

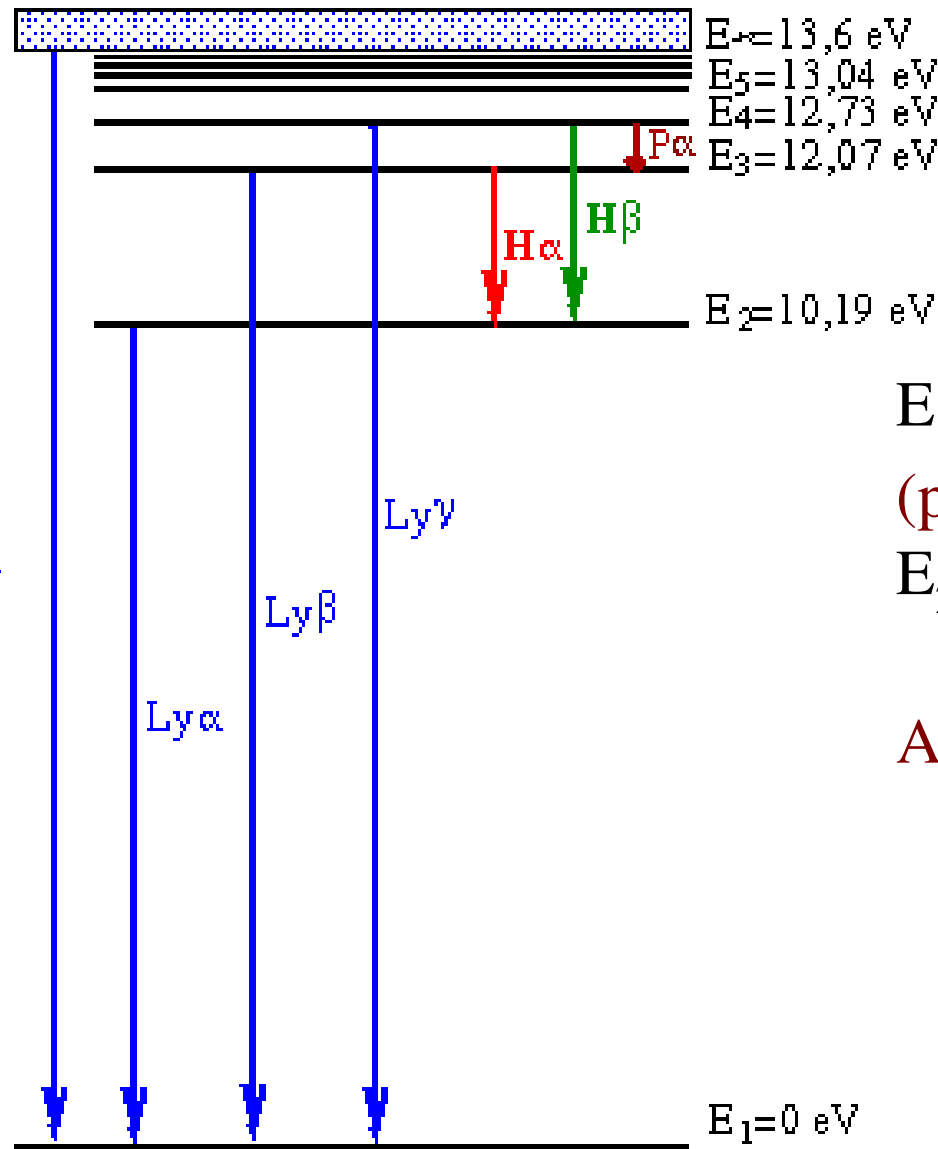
Neste caso um elétron muda seu conjunto de números quânticos.

A energia absorvida deve corresponder exatamente à diferença de energia entre os dois níveis energéticos do átomo,  $\Delta E$ .





# Níveis de energia do hidrogênio:



Obs.:  $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ erg}$

$E_1$  corresponde ao número quântico (principal)  $n=1$   
 $E_2$  corresponde a  $n=2$ , e assim por diante.

A energia do fóton corresponde a:

$$E_{\text{foton}} = |E(n_1) - E(n_2)|$$

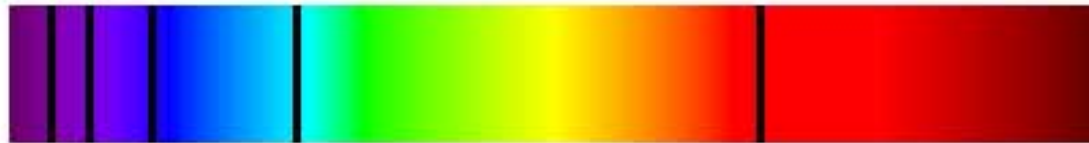
$$E_{\text{foton}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Obs.:  $h = \text{constante de Planck} = 6.626075 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4.13567 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$

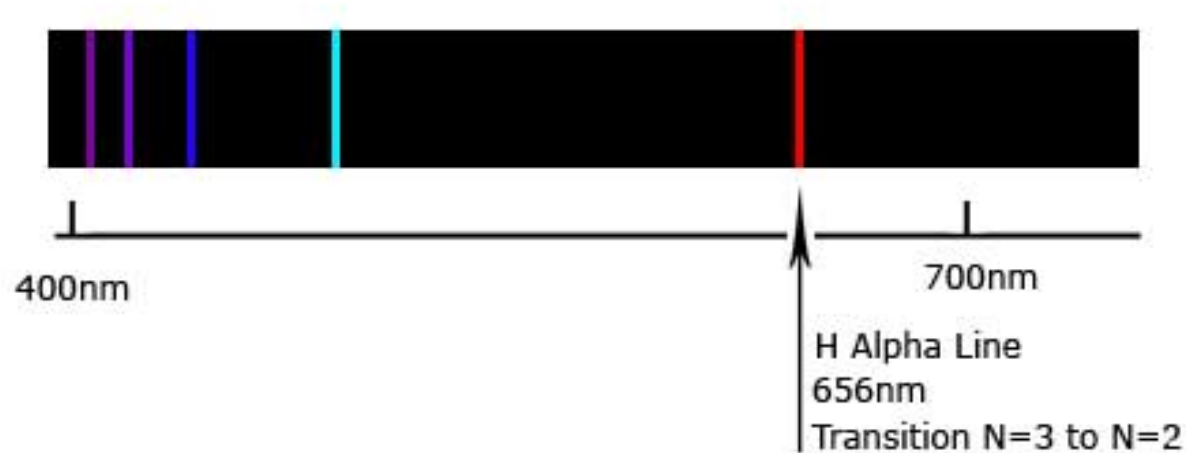
# Exemplo: série de Balmer:

*transições (dos níveis superiores) para o nível  $n=2$*

Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum





## Cálculo do comprimento do fóton da transição H $\alpha$ :

$$E_{\text{foton}} = |E(n_3) - E(n_2)|$$

$$E_{\text{foton}} = |12.07 - 10.19| = 1.88 \text{ eV}$$

$$E_{\text{foton}} = h c / \lambda$$

$$\lambda = h c / E_{\text{foton}} = (4.13567 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}) \times (2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s}) / 1.88 \text{ eV}$$

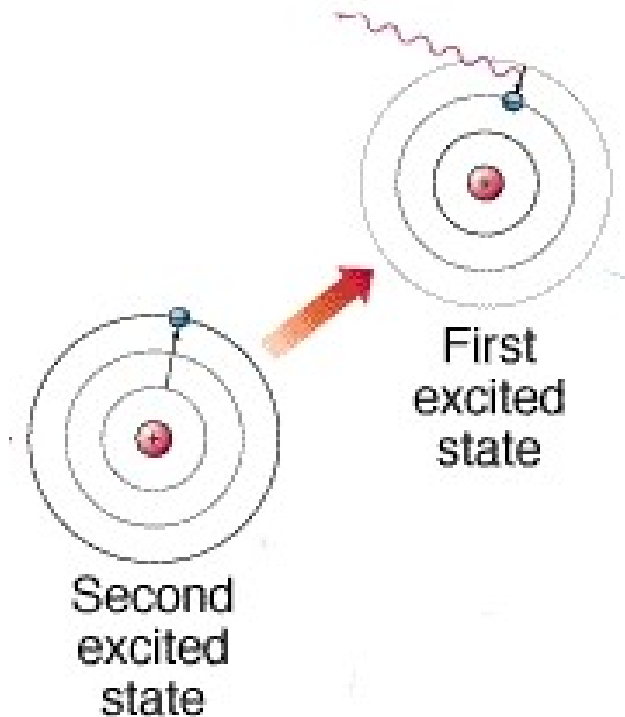
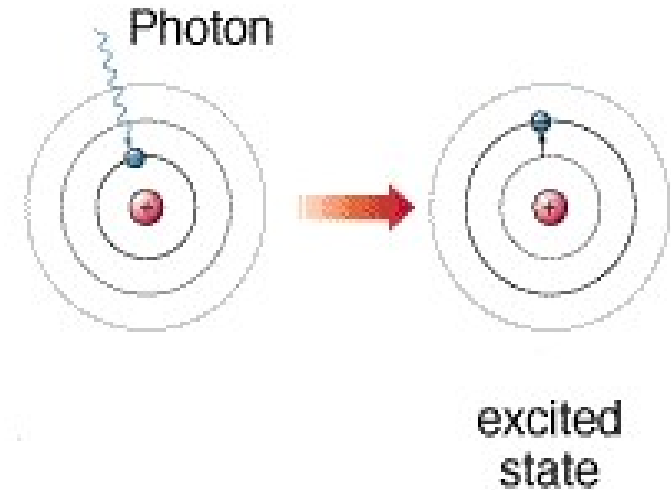
$$\lambda = 6.57 \times 10^{-5} \text{ cm} = 657 \text{ nm} \quad (\text{cor vermelha})$$

## *Portanto, nesse exemplo:*

Se fizermos incidir sobre um átomo de hidrogênio no estado  $n=2$  um fóton cujo comprimento de onda é de  $\lambda = 657$  nm ele absorverá este fóton e será excitado para o nível  $n=3$ .

Se fizermos incidir sobre um átomo de hidrogênio um fóton cuja energia não corresponde a nenhuma transição atômica, ele não absorverá esse fóton.

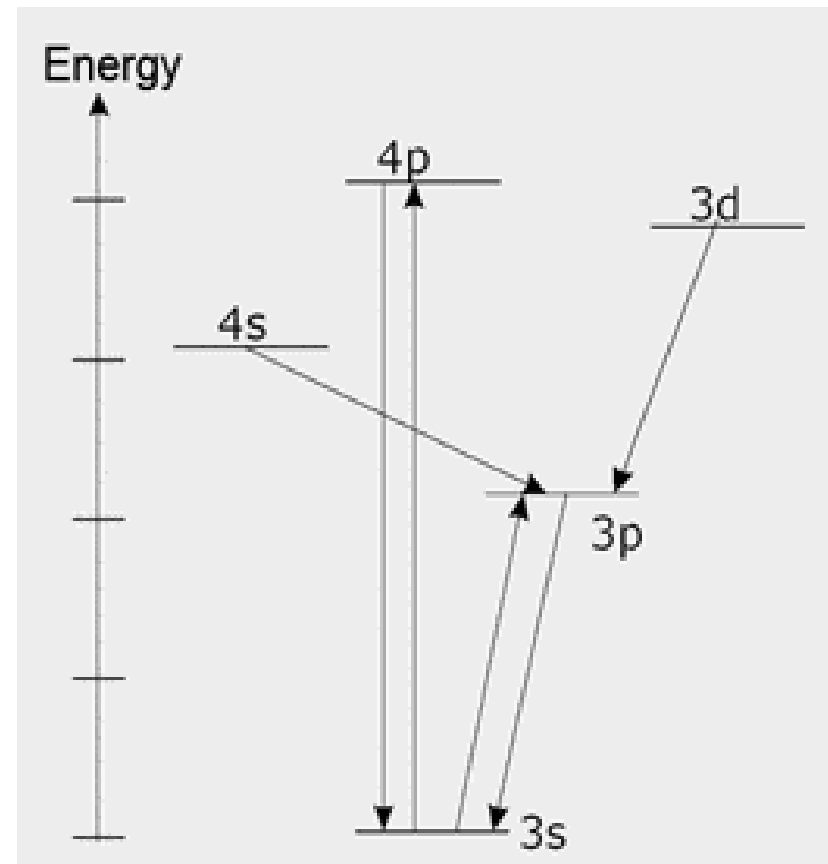
Se um átomo decair espontaneamente do nível  $n=3$  para o nível  $n=2$ , ele emitirá um fóton de comprimento de onda  $\lambda = 657$  nm.



## *Resumindo:*

Um átomo geralmente tem muitas transições possíveis pois possui muitos níveis atômicos.

Cada transição entre 2 níveis atômicos gera (ou absorve) um fóton.



Exemplo: nível fundamental e níveis excitados do sódio ( $Z=11$ :  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1$ )

# *Emissão de radiação de um corpo em equilíbrio termodinâmico*

Um corpo em **equilíbrio termodinâmico**: suas variáveis termodinâmicas (temperatura, densidade, pressão, etc.) são constantes em toda a sua extensão e não se alteram ao longo do tempo.

O que você acha das situações abaixo? Esses sistemas estão em equilíbrio termodinâmico? Por quê?



Uma xícara de café



Sua mesa de trabalho

Todo corpo (com temperatura acima de 0 K) emite radiação própria, chamada radiação térmica.

Se ele estiver em **equilíbrio termodinâmico** sua distribuição de brilho (seu espectro, contínuo) seguirá a **Distribuição de Planck**, que é dada pela teoria quântica moderna:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2/\lambda^5}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Na prática, é muito difícil que um corpo esteja em equilíbrio termodinâmico porque:

Qualquer corpo  
emite radiação  
térmica

→

Emissão de  
radiação leva  
ao resfriamento

→

O resfriamento  
viola o equilíbrio  
termodinâmico

Portanto um corpo próximo ao equilíbrio termodinâmico é aquele que deixa “vazar” uma quantidade muito pequena de radiação, de modo que suas variáveis termodinâmicas (temperatura, pressão, densidade, etc.) permaneçam constantes.

Um corpo que não emite radiação deveria ser um “corpo negro”

Na prática, um “corpo negro” é uma aproximação para um corpo que está próximo do equilíbrio termodinâmico.

### **Atenção:**

**Em Física Quântica, um “corpo negro” não aparenta ser negro!**

**Ele apenas emite uma quantidade de radiação incapaz de afetar suas propriedades físicas!**

A integral da distribuição de Planck em comprimento de onda ou frequência fornece a intensidade da radiação (em todas as frequências) emitida por unidade de área da superfície do corpo.

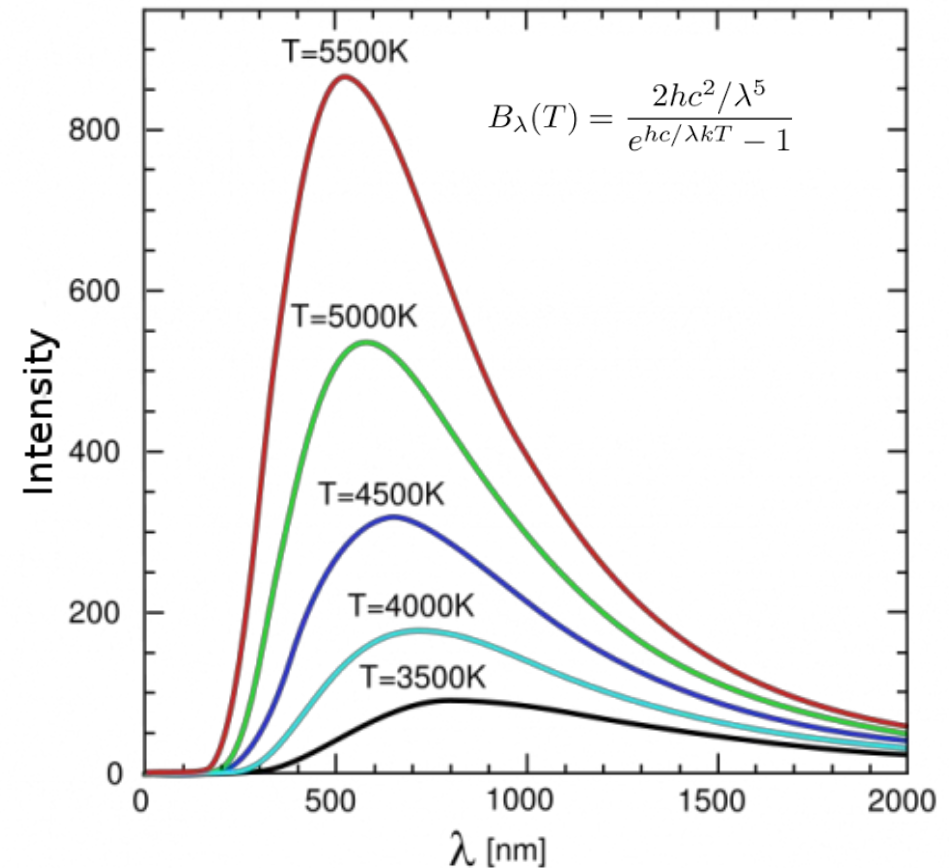
A *lei de Stefan* dá a potência irradiada por unidade de área:

$$B(T) = \sigma T^4$$

em  $W/m^2$  ou  $erg.s^{-1}.cm^{-2}$ , onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ no S.I.}$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1} \\ \text{(C.G.S.)}$$



# Determinação da temperatura de um corpo em equilíbrio termodinâmico

Ao derivar-se a distribuição de Planck e igualando o resultado a zero, determina-se o comprimento de onda onde a emissão de radiação é máxima.

A posição do máximo do espectro de um corpo negro é dado pela **Lei de Wien**:

$$\lambda_{\max} T = 0,29 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

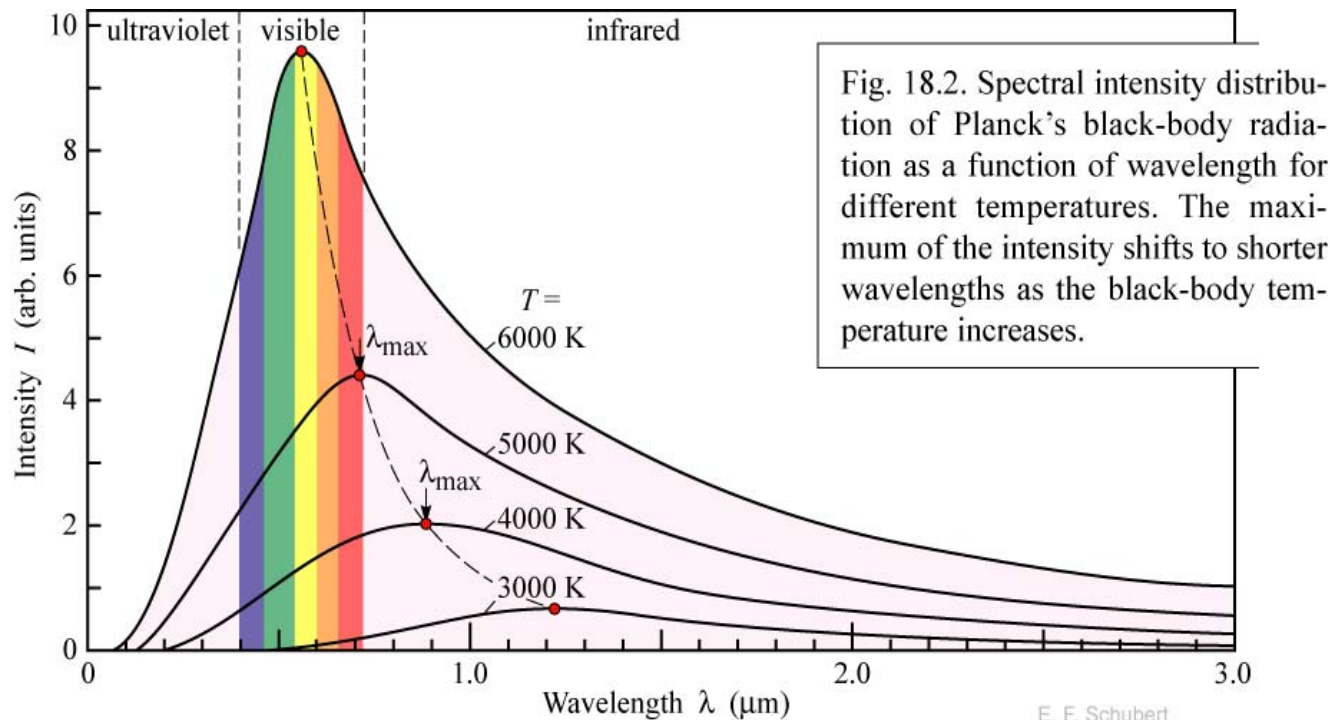


Fig. 18.2. Spectral intensity distribution of Planck's black-body radiation as a function of wavelength for different temperatures. The maximum of the intensity shifts to shorter wavelengths as the black-body temperature increases.



## *Exemplos:*

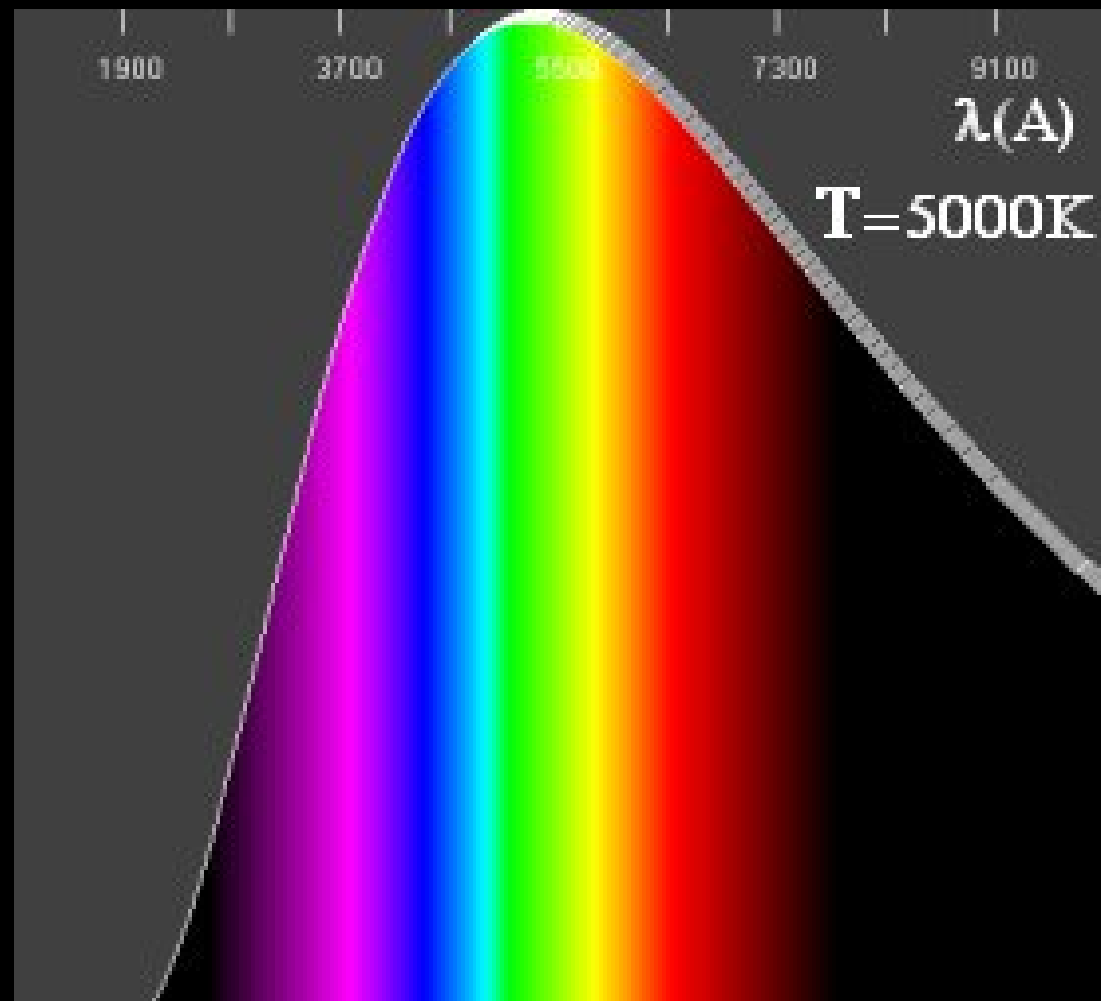
Qual o máximo de emissão do espectro (contínuo) de um corpo incandescente, à temperatura de:

(a)  $T=27^{\circ}\text{C} = 300 \text{ K} \Rightarrow \lambda_{\text{max}}=0,29/300 \text{ (cm)} = 0.00097\text{cm} = 9,7 \mu\text{m}$

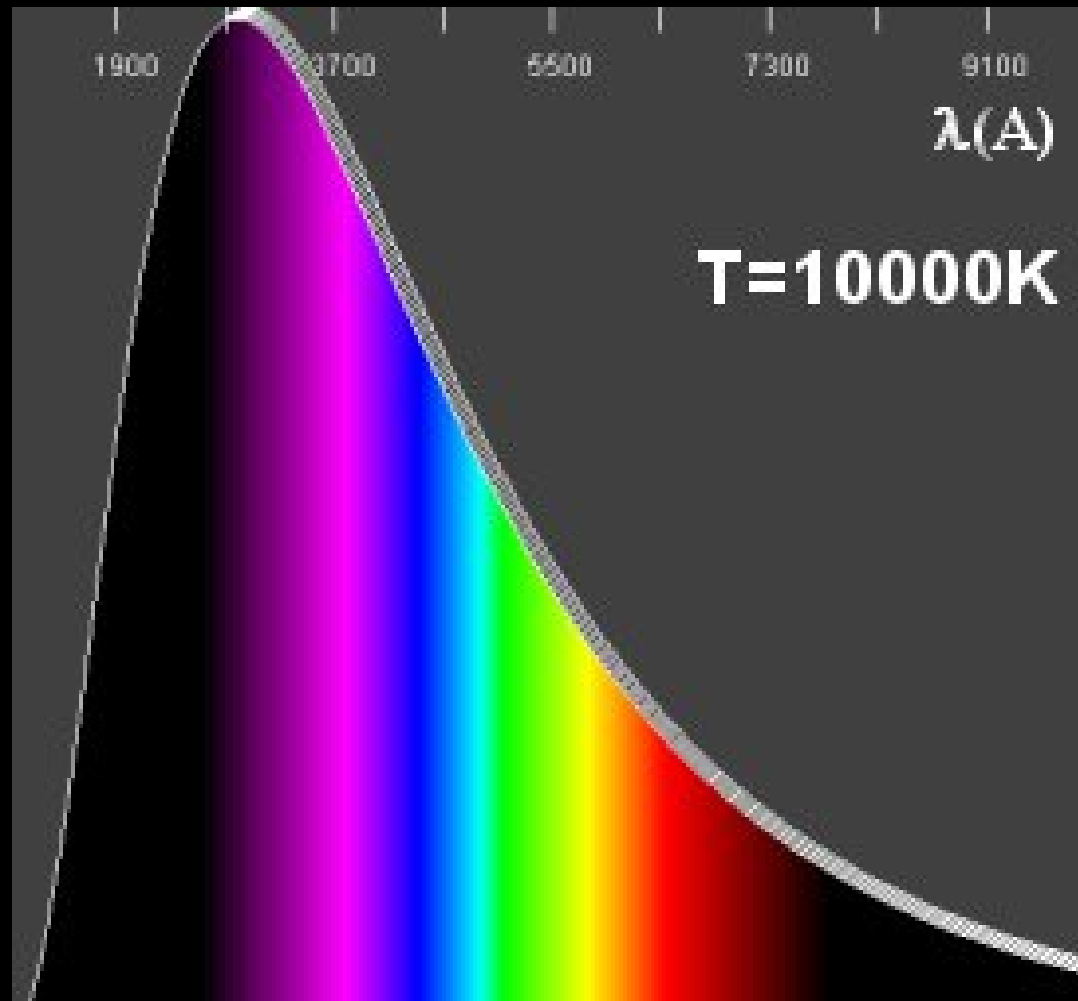
(b)  $T=5800 \text{ K} \Rightarrow \lambda_{\text{max}}=0,29/5800\text{(cm)} =0,00005\text{cm} = 0,5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$

(c)  $T=10\ 000\text{K} \Rightarrow \lambda_{\text{max}}= 0,29/10\ 000 = 290 \text{ nm (UV)}$

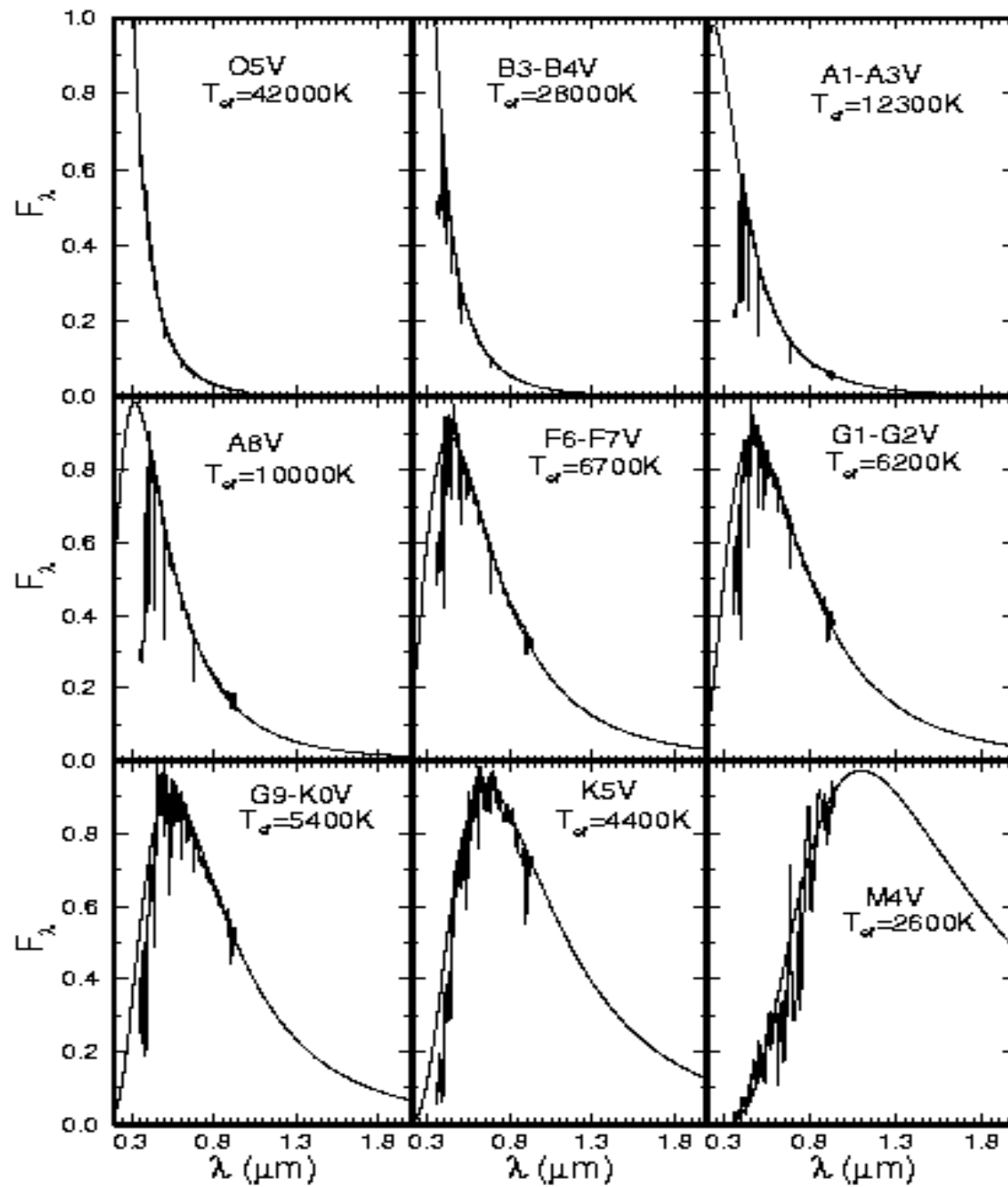
*Espectro (contínuo) de um corpo à temperatura de 5000K*



*Espectro (contínuo) de um corpo à temperatura de 10000K*



# Alguns espectros estelares

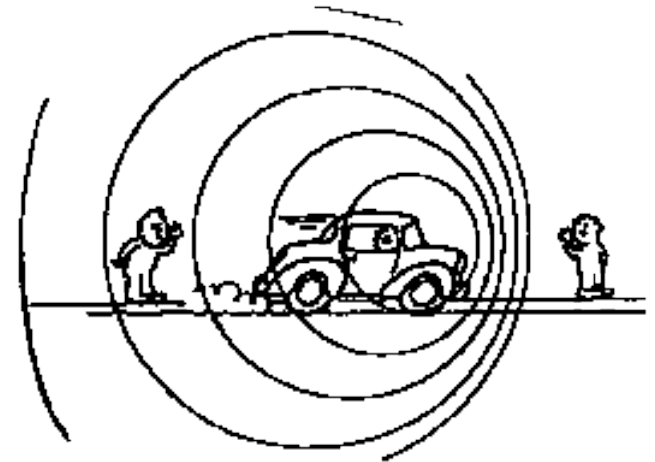


# *Efeito Doppler*

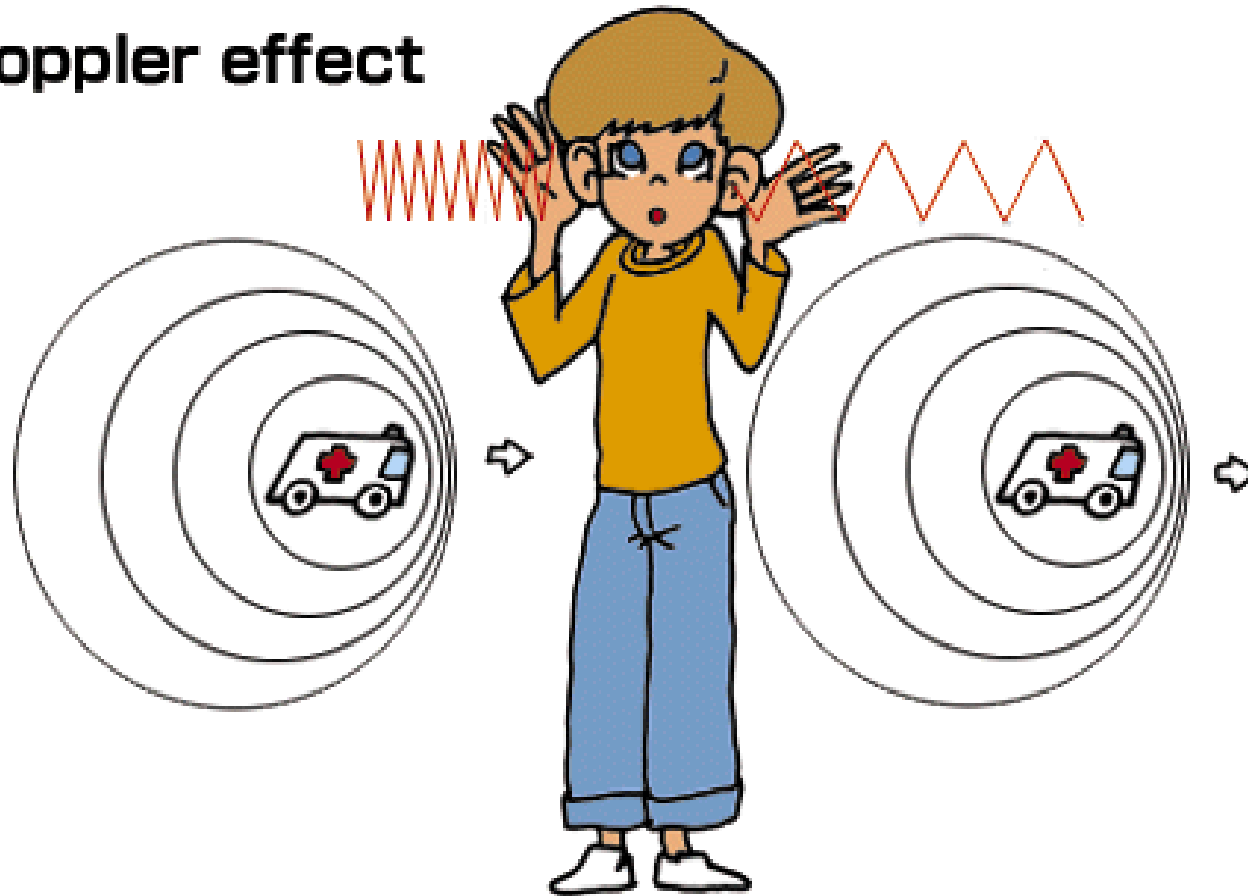
Quando uma fonte de ondas se aproxima ou se afasta de um observador as ondas atingem-no com uma frequência diferente.

Se a fonte **se aproxima** do observador, a frequência detectada por este é **maior** do que a frequência original, emitida pela fonte.

Se a fonte **se afasta** do observador, a frequência detectada é **menor** que a frequência emitida.



## Doppler effect



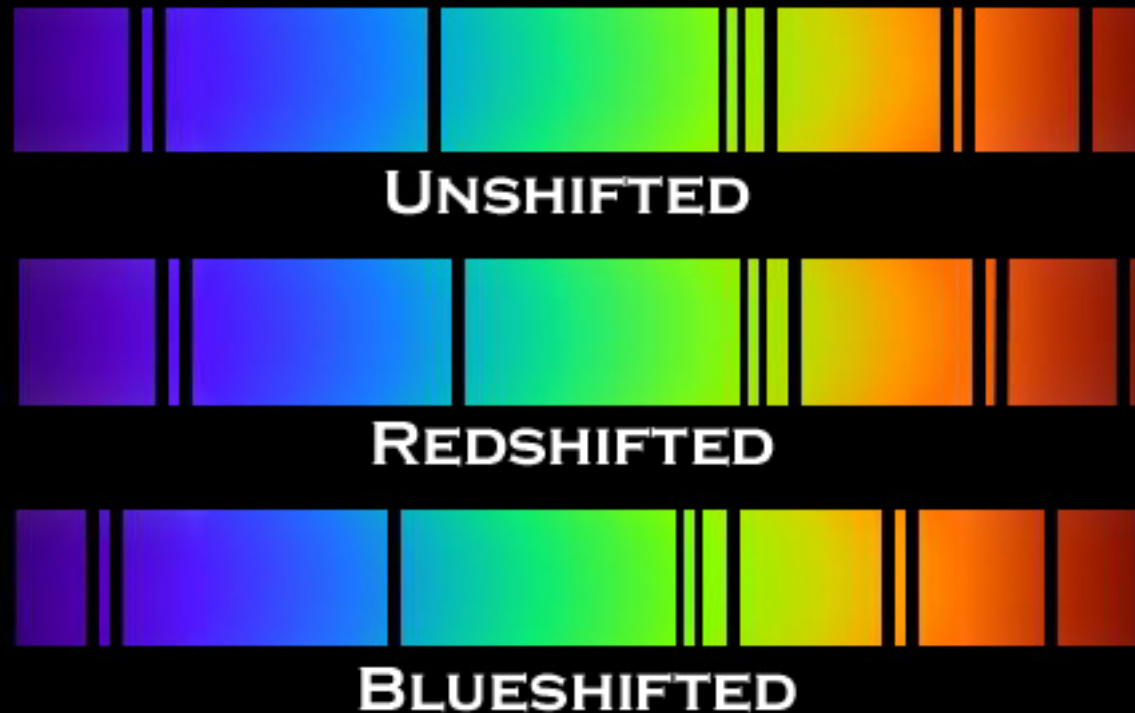
Fonte aproximando-se: comprimento de onda ( $\lambda$ ) **menor**

Fonte afastando-se: comprimento de onda ( $\lambda$ ) **maior**

As **linhas espectrais** também têm seu comprimento de onda alterado pelo efeito Doppler

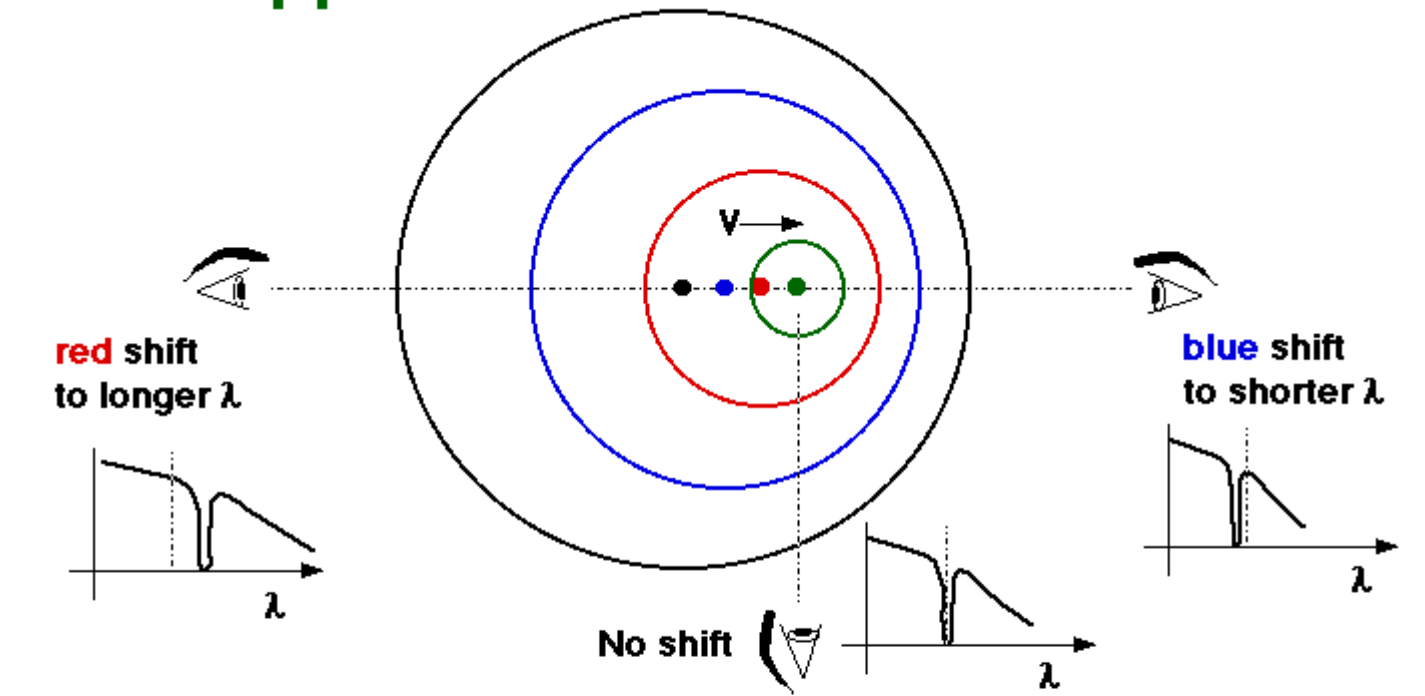
Fonte se **aproxima** do observador: desvio para o azul (blueshift)

Fonte se **afasta** do observador: desvio para o vermelho (redshift)



# Resumo:

## The Doppler Effect:

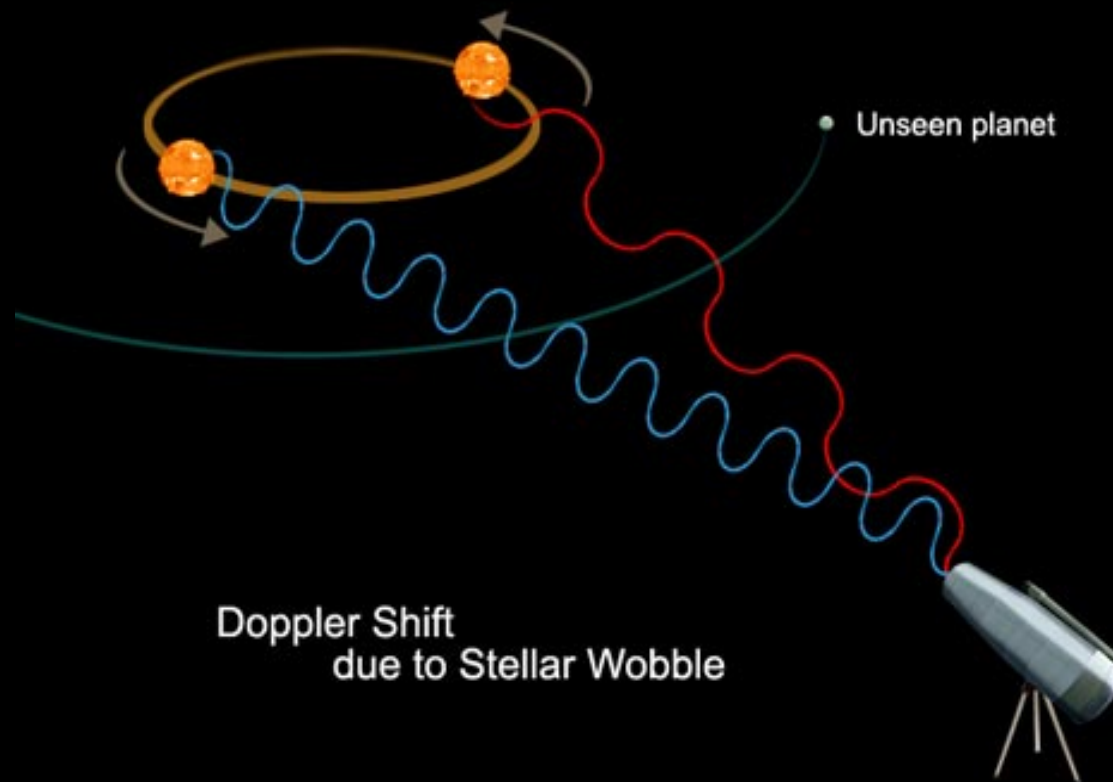


$$\frac{\text{wavelength shift}}{\text{rest wavelength}} = \frac{\text{speed in line-of-sight}}{\text{speed of wave}}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



# Exemplo: detecção de exo-planetas através do efeito Doppler



# Para saber mais...

*“Novas janelas para o Universo”*

Maria C. B. Abdalla & Thyrso Villela Neto

Capítulo 1

*“À luz das estrelas”*

Lilia Irmely Arany-Prado

pp. 52-67

*“Física Conceitual”*

Paul G. Hewitt

pp. 440-443

