

## Capítulo 5

# A interação de luz e matéria

5.1 Linhas espectrais

5.2 Fótons

5.3 O modelo do átomo de Bohr

5.4 Mecânica Quântica e a Dualidade Partícula-onda

# Espectros e estrutura atômica

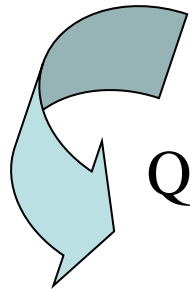
Como as linhas espectrais são formadas?

## Emissão de radiação

Qualquer corpo aquecido a uma dada temperatura  $T$  emite uma quantidade e um tipo (frequência) de radiação em função de  $T$ .

- Ex: barra de ferro ( $T \uparrow$ )  $\Rightarrow$  cores: cinza  $\Rightarrow$  vermelho laranja  $\Rightarrow$  amarelo  $\Rightarrow$  branco

## 5.1 Linhas espectrais



### Emissão de radiação

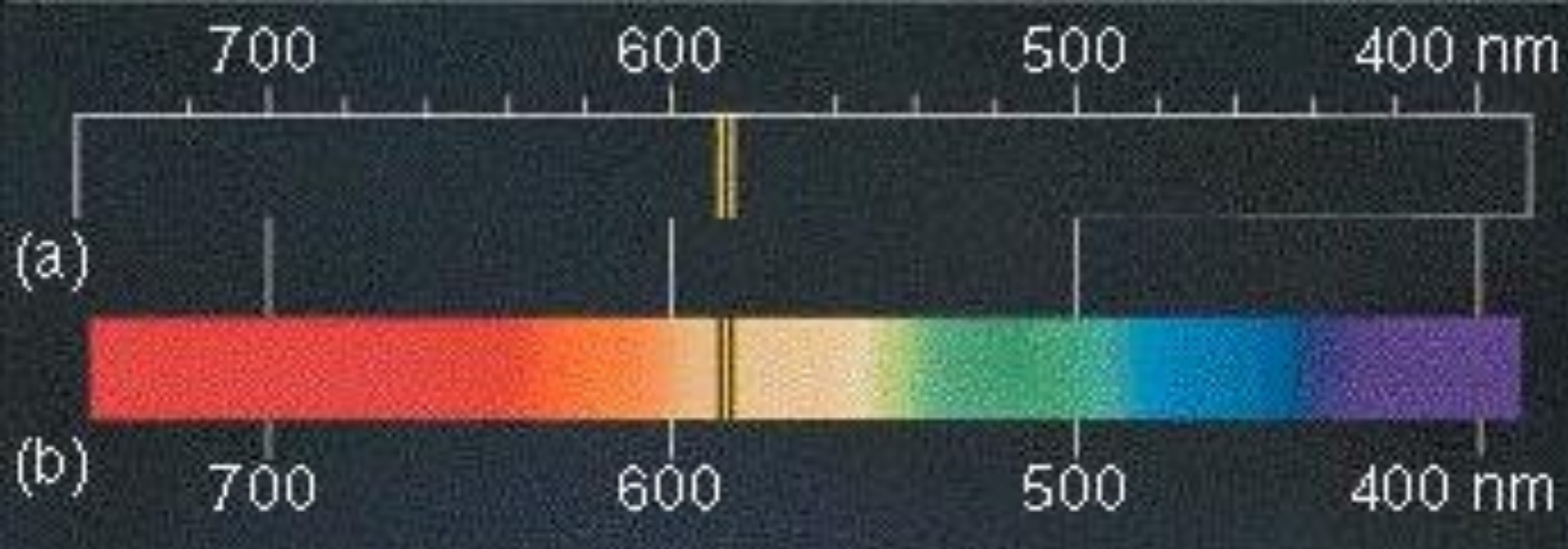
Qualquer corpo aquecido a uma dada temperatura  $T$  emite uma quantidade e um tipo (frequência) de radiação em função de  $T$ .



1802: Wollaston descobriu linhas escuras sobrepostas ao espectro contínuo do Sol.

1814: Fraunhofer catalogou 475 dessas linhas escuras no espectro solar (**linhas de Fraunhofer**)  
→ descobriu a linha de sódio, por comparação com o comprimento de onda da luz amarela emitida por sal espalhado em uma chama.

Joseph von Fraunhofer  
(1787-1826)

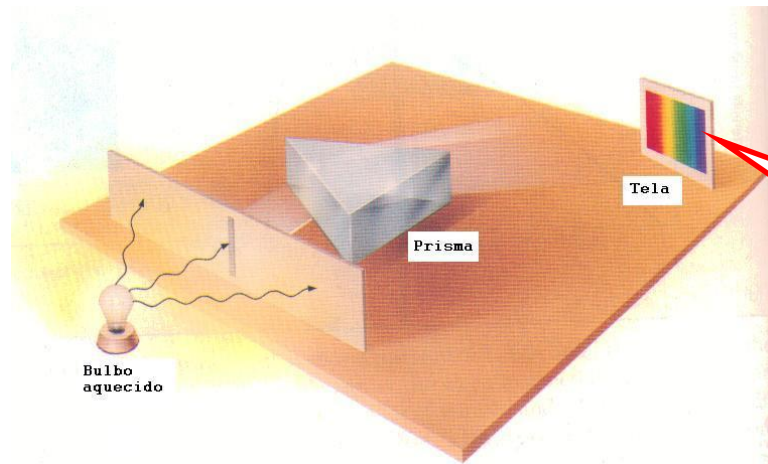


- a) O espectro de **emissão** do sódio ➡ duas linhas brilhantes ➡ amarelas.
- b) Espectro de **absorção** do sódio ➡ duas linhas escuras ➡ na mesma posição correspondente às linhas de emissão.

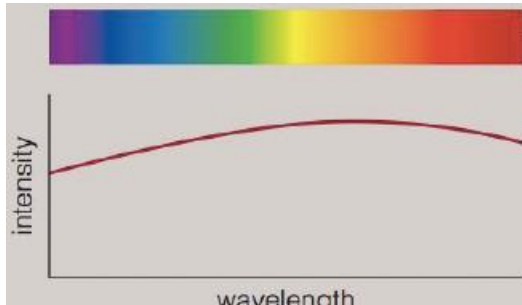
# Leis de Kirchhoff

Regras que estabelecem a emissão e a absorção de radiação (três leis):

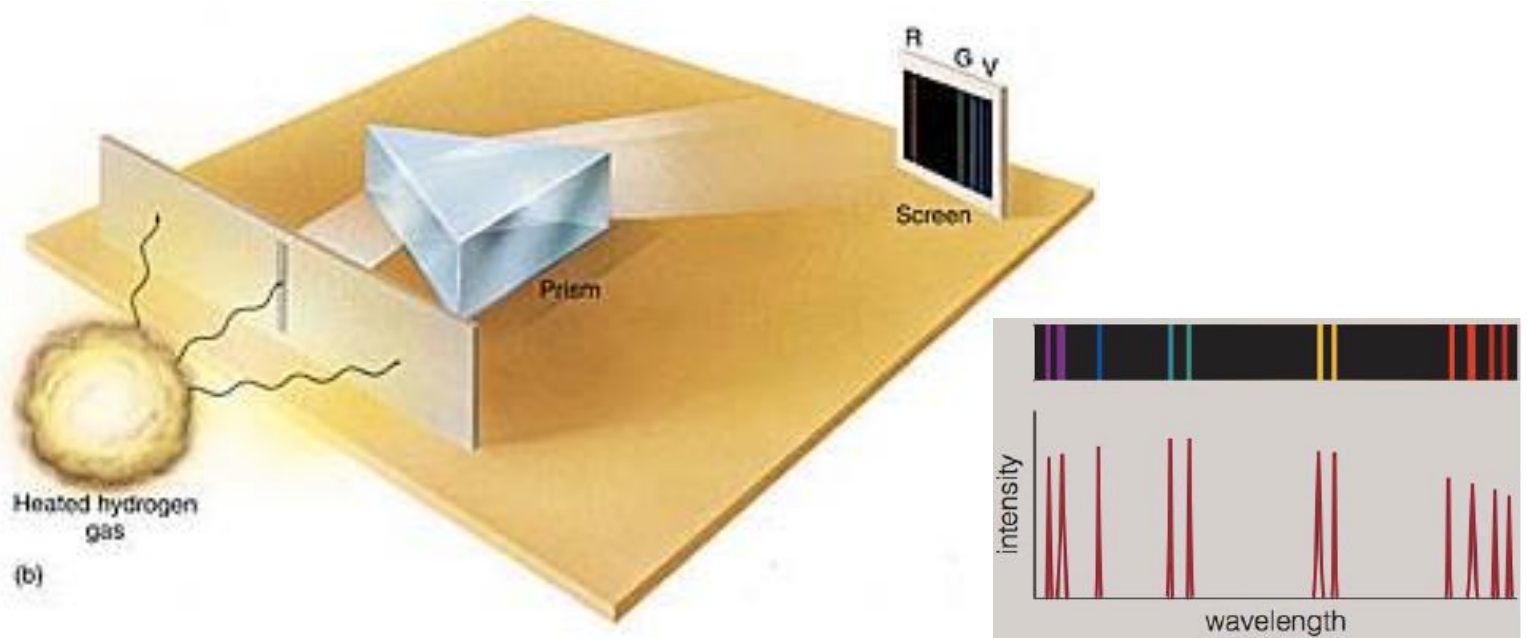
- 1ª: *Um objeto que esteja no estado sólido, líquido ou gasoso, e sob alta pressão, produzirá um espectro contínuo de emissão, quando aquecido.*



Espectro contínuo



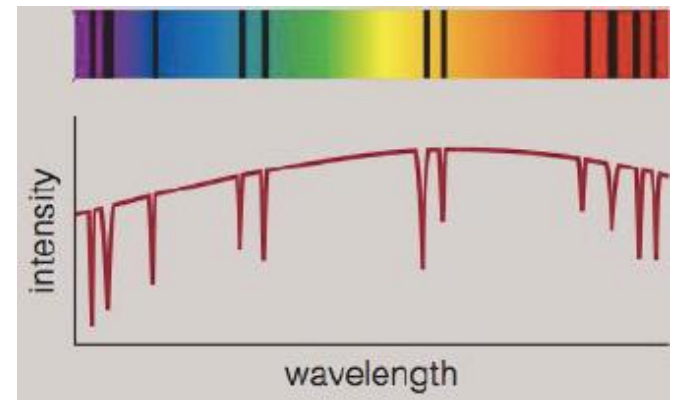
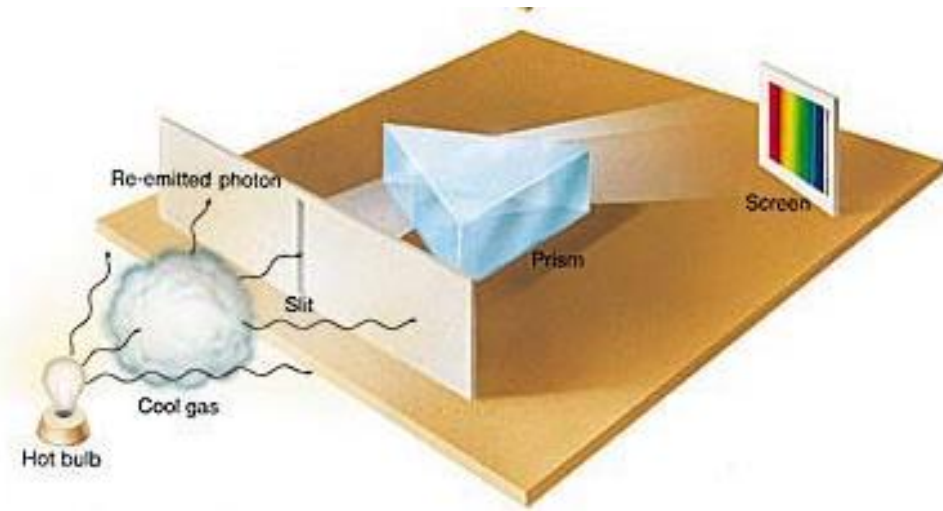
# 2ª Lei de Kirchhoff



*Um gás a baixa pressão e a uma temperatura suficientemente alta produzirá um espectro de linhas brilhantes de emissão.*

# 3ª Lei de Kirchhoff

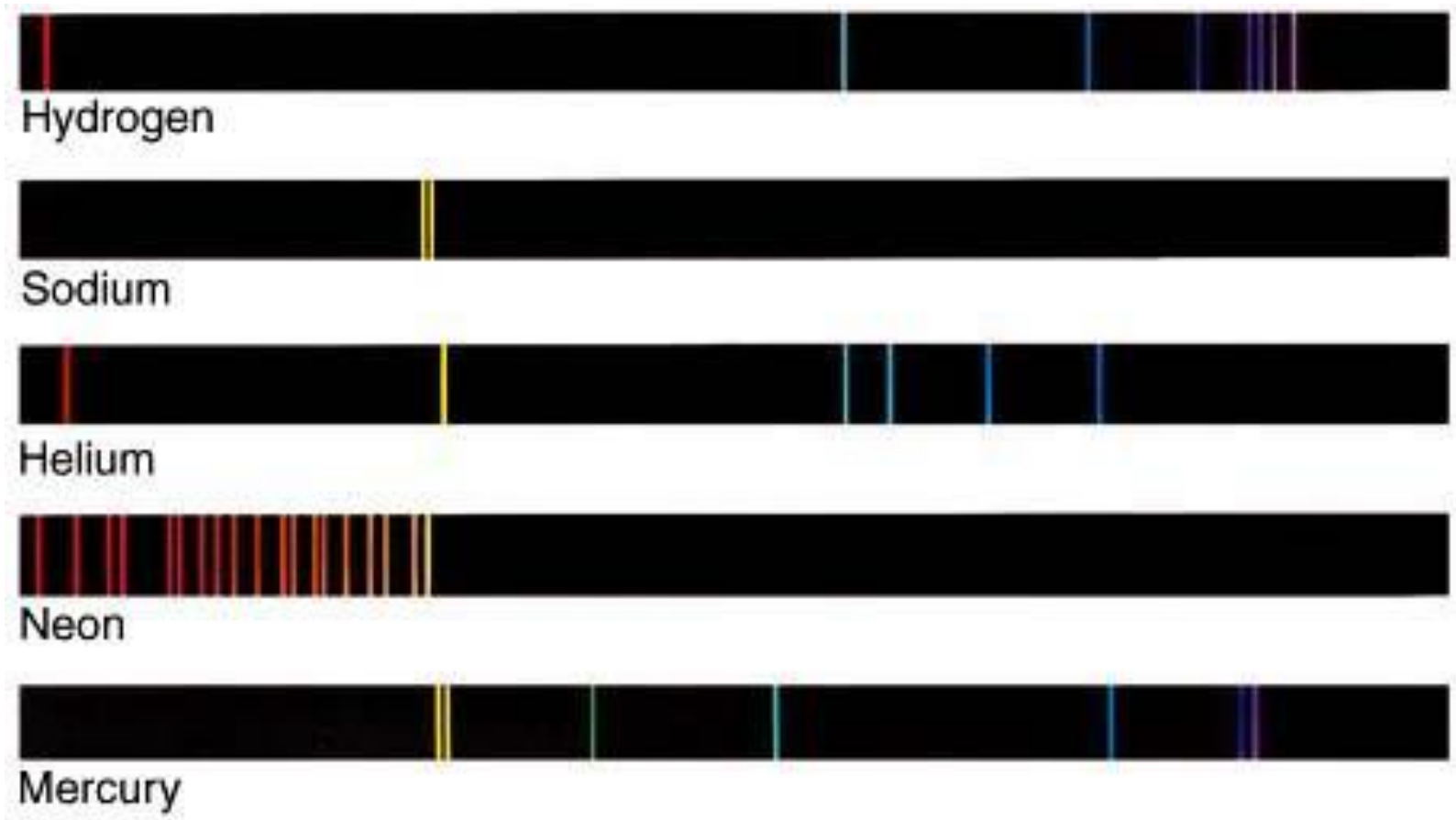
Um *gás a baixas pressão e temperatura*, que se localize entre uma fonte de radiação contínua e um observador, produzirá um espectro de *linhas de absorção*, ou seja, um conjunto de linhas escuras superpostas ao espectro contínuo.





## Exemplos de aplicação da espectroscopia:

→ 1868 descoberta do elemento He no Sol, só encontrado na Terra em 1895.

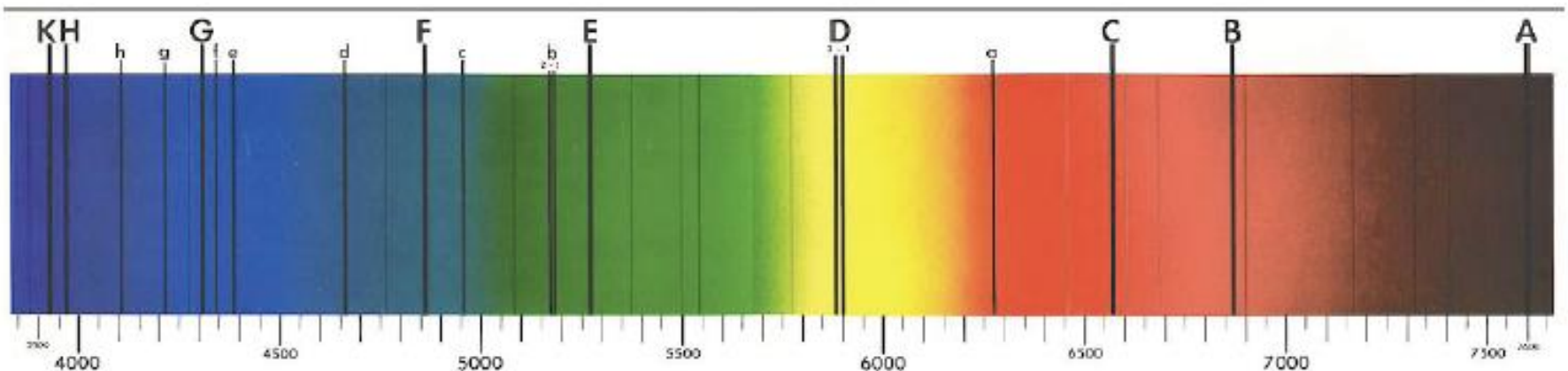




## Exemplos de aplicação: linhas de Fraunhofer

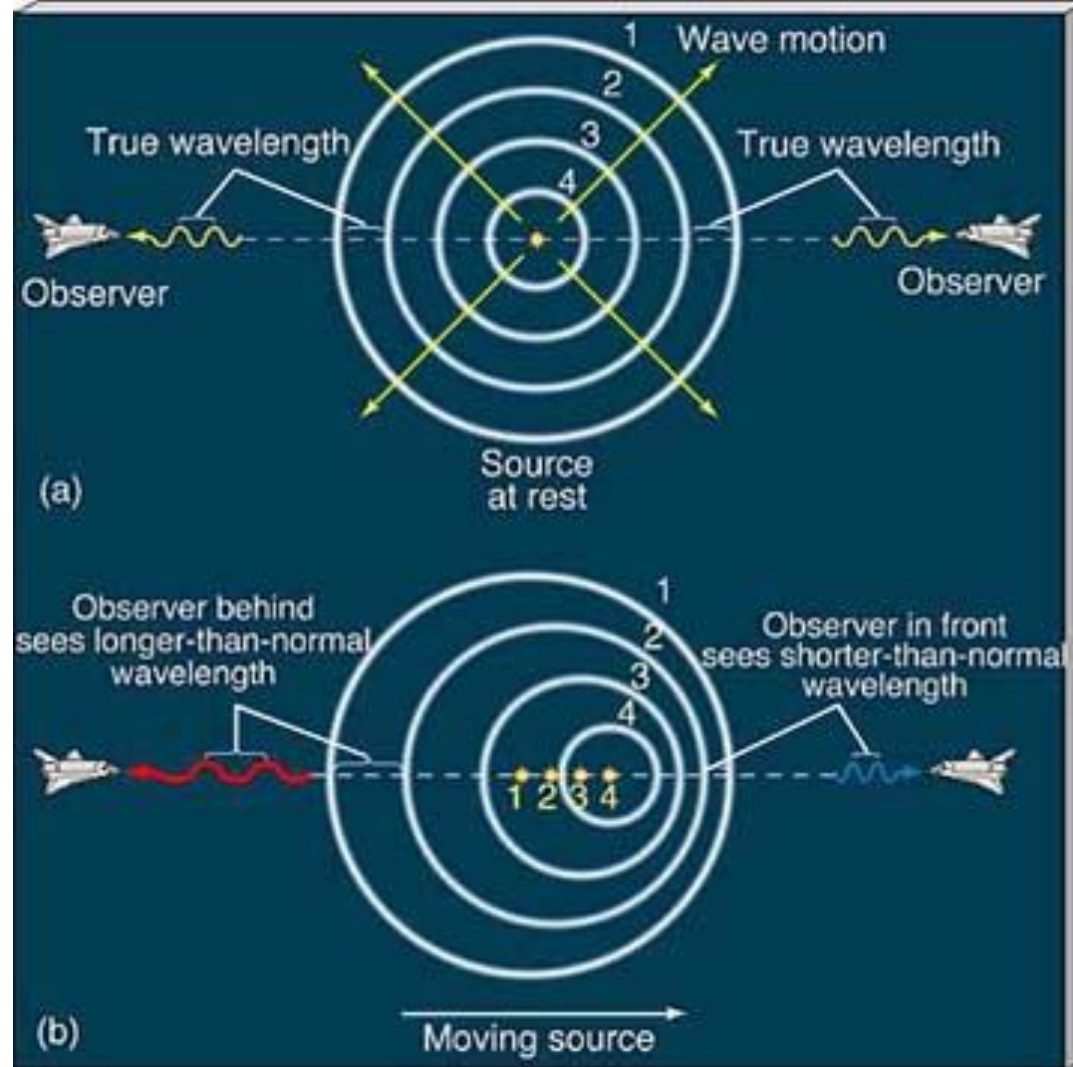
Wavelength (nm)	Name	Atom	Equivalent Width (nm)
385.992		Fe I	0.155
388.905		H <sub>8</sub>	0.235
393.368	K	Ca II	2.025
396.849	H	Ca II	1.547
404.582		Fe I	0.117
410.175	h, H $\delta$	H I	0.313

Wavelength (nm)	Name	Atom	Equivalent Width (nm)
422.674	g	Ca I	0.148
434.048	G', H $\gamma$	H I	0.286
438.356	d	Fe I	0.101
486.134	F, H $\beta$	H I	0.368
516.733	b <sub>4</sub>	Mg I	0.065
517.270	b <sub>2</sub>	Mg I	0.126
518.362	b <sub>1</sub>	Mg I	0.158
588.997	D <sub>2</sub>	Na I	0.075
589.594	D <sub>1</sub>	Na I	0.056
656.281	C, H $\alpha$	H I	0.402



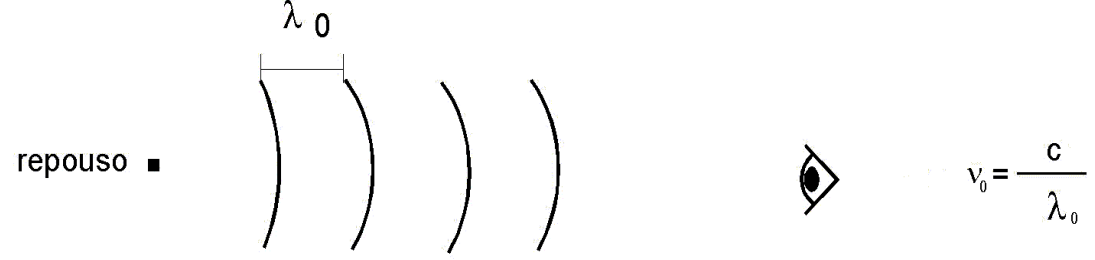
## Exemplos de aplicação da espectroscopia: Efeito Doppler

Como medimos a  
velocidade radial dos  
astros (afastamento  
ou aproximação)?

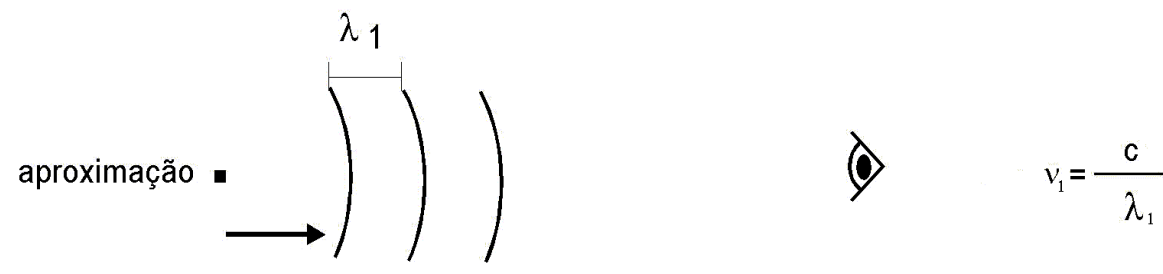


Fonte emissora desloca-se em  
relação ao observador.

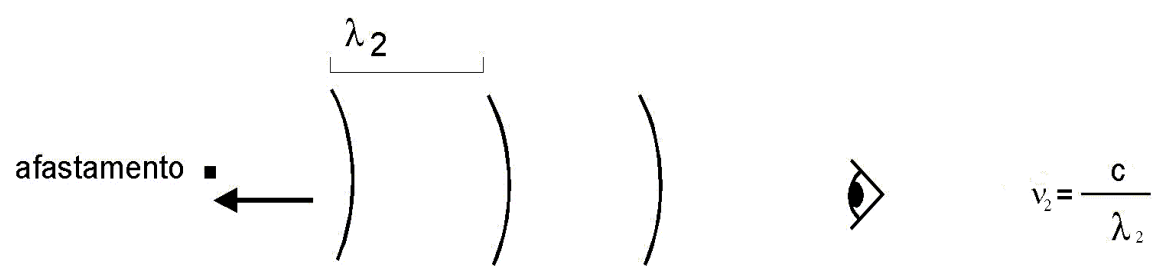
- Fonte em repouso, emitindo luz a um comprimento de onda  $\lambda_0$ .



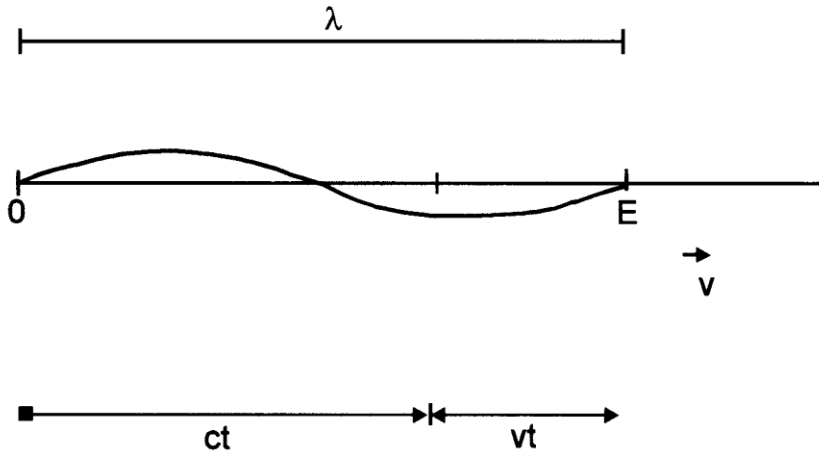
- Fonte aproxima-se do observador  $\Rightarrow$  comprimento de onda observado será menor ( $\lambda_1 < \lambda_0$ ).



- Fonte afasta-se comprimento de onda observado será maior ( $\lambda_2 > \lambda_0$ ).



Para velocidades não-relativísticas  
(fonte Emissora com  $v \ll c$ )



$$\lambda = (c + v) t$$

Período de oscilação  $t = \frac{1}{\nu_0}$

$$\lambda = c \left[ 1 + \frac{v}{c} \right] t \quad \longleftrightarrow \quad \lambda = c \left[ 1 + \frac{v}{c} \right] \frac{1}{\nu_0} \quad \rightarrow \quad \lambda = \lambda_0 \left[ 1 + \frac{v}{c} \right]$$

$$\lambda = \lambda_0 \left[ 1 + \frac{v}{c} \right]$$

- Quanto o comprimento de onda observado ( $\lambda$ ) desviou-se do emitido ( $\lambda_0$ )?

- Calculamos  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left( \frac{v}{c} \right)$

- resultando na expressão que define o deslocamento Doppler:

$$\boxed{\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}}$$

Objetos em afastamento, observa-se  $\lambda > \lambda_0 \Rightarrow$  desvio para o vermelho (*redshift*)  $\Rightarrow$  **VELOCIDADES POSITIVAS**

No caso em que  $\lambda < \lambda_0$ , temos o desvio para o azul (*blueshift*), que corresponde à aproximação do objeto  $\Rightarrow$  **VELOCIDADES NEGATIVAS**

# Exemplo

Uma das mais importantes linhas de hidrogênio é a linha de  $H\alpha$  em 656.281 nm, medida no laboratório.

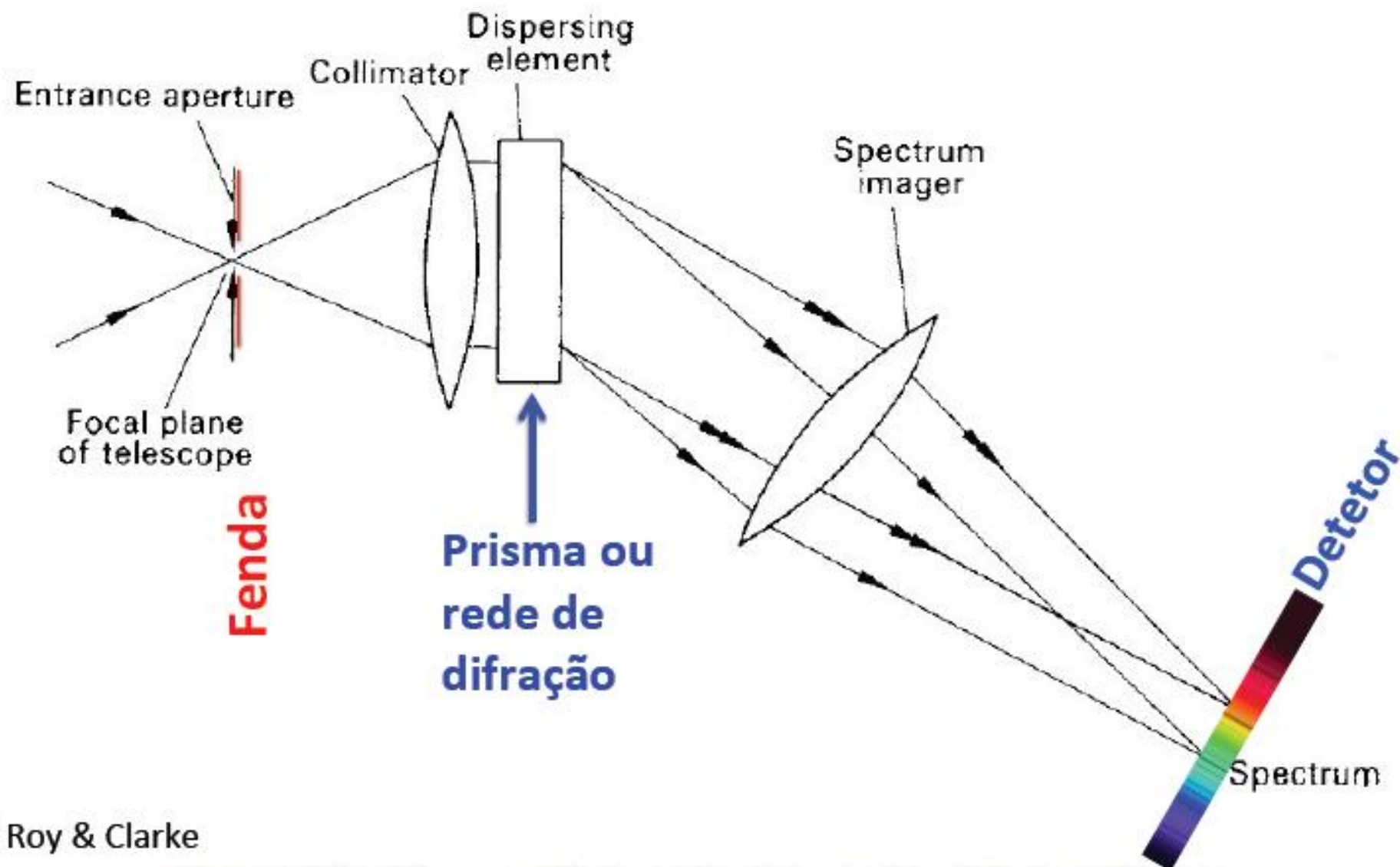
A estrela Vega tem a linha de  $H\alpha$  em 656.251 nm.  
Qual a velocidade *radial* da estrela?

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad \rightarrow \quad v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad \rightarrow \quad v = -13,7 \text{ km/s}$$

$$c = 299\,792 \text{ km/s}$$

Espectrógrafos modernos podem medir velocidades radiais com precisão de 1 m/s

# Espectrógrafo



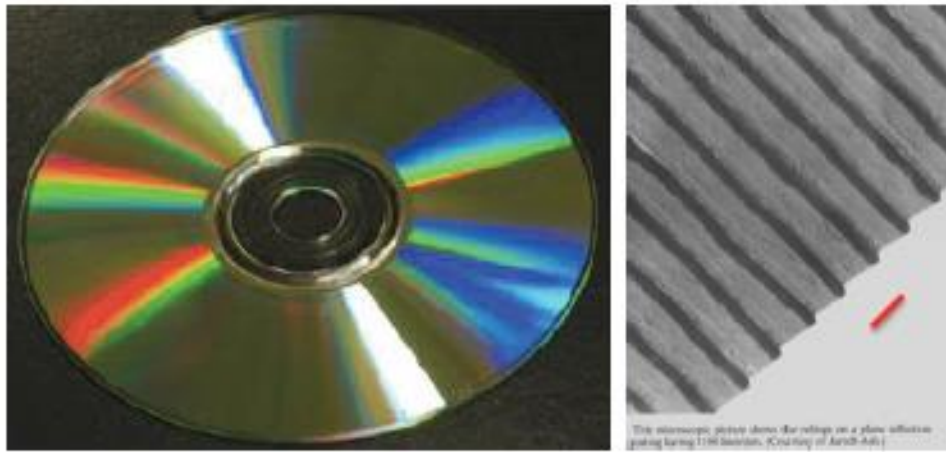
© Roy & Clarke

**Figure 19.12.** The essential elements of an astronomical spectrometer.



# Elemento dispersor da luz: prisma ou rede

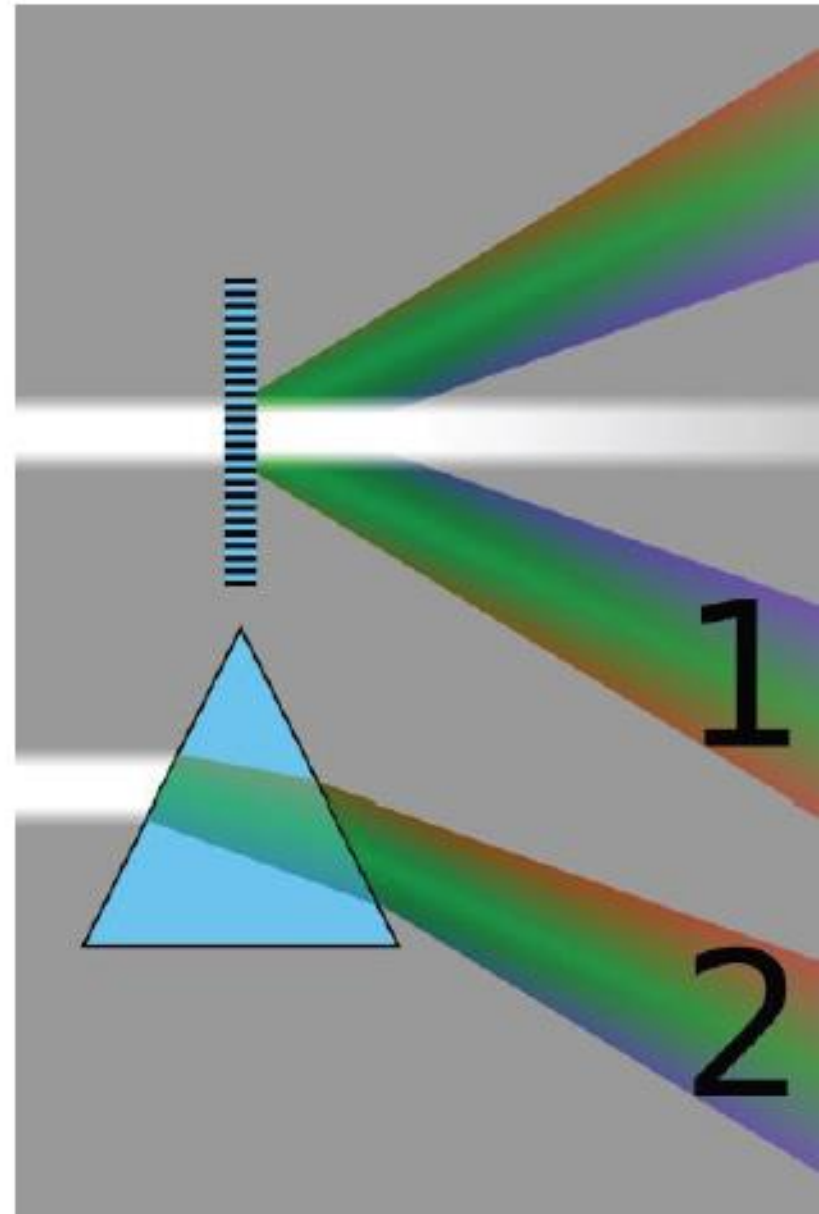
- Rede de difração:  
difração + interferência



$$\underline{d} \sin \theta = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{nN}$$

- Prisma: refração diferencial



## 5.2 Fótons

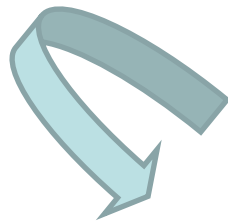
A constante de Planck ( $h$ ) definida no Cap.3.5 é a base da descrição moderna da matéria e energia → **Mecânica Quântica**

**Efeito fotoelétrico** → na incidência de fótons em uma dada superfície, elétrons são ejetados com uma energia cinética  $K_{\max}$ , que não depende da intensidade da luz.

$K_{\max}$  varia em função da **frequência** da luz incidente.



## Efeito fotoelétrico



$K_{\max}$  varia em função da **frequência** da luz incidente.

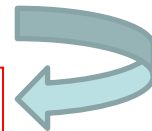
Einstein explicou o efeito fotoelétrico como sendo devido a um “feixe de partículas sem massa” → **fótons**



cuja energia é dada por  $E_{\text{fóton}} = h\nu = hc/\lambda$

A energia do fóton é transferida para um elétron da superfície, superando sua energia de ligação ( $\phi$ ) → elétron ejetado

$$K_{\max} = E_{\text{foton}} - \phi = h\nu - \phi$$



## Exemplo de Aplicação

Calcule a energia de um fóton de luz azul (400 nm), visível (500 nm) e vermelho (700 nm)

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \simeq \frac{1240 \text{ eV nm}}{400 \text{ nm}} = 3.10 \text{ eV}$$

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \simeq \frac{1240 \text{ eV nm}}{500 \text{ nm}} = 2.48 \text{ eV} \quad \sim 4 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \simeq \frac{1240 \text{ eV nm}}{700 \text{ nm}} = 1.77 \text{ eV}$$

$$hc = 1240 \text{ eV nm}$$

Quantos fótons visíveis (500 nm) são emitidos por uma lâmpada de 100 Watts?

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

$$1 \text{ Watt} = 10^7 \text{ erg s}^{-1}$$

## Exemplo de Aplicação

Calcule a frequência (em Hz) e a energia (em eV) para cada comprimento de onda, referente a diferentes regiões espectrais

Região	$\lambda$	$\nu$ (Hz)	E (eV)
Raios-X	10 Å	$3 \cdot 10^{17}$	$1,24 \cdot 10^3$
Ultravioleta	1216 Å	$2.47 \cdot 10^{15}$	10.2
Visível	5000 Å		
Infravermelho	25 $\mu\text{m}$		
Rádio	15 m		

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}; h = 6,63 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}, 1 \text{ Å} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-8} \text{ cm}$$

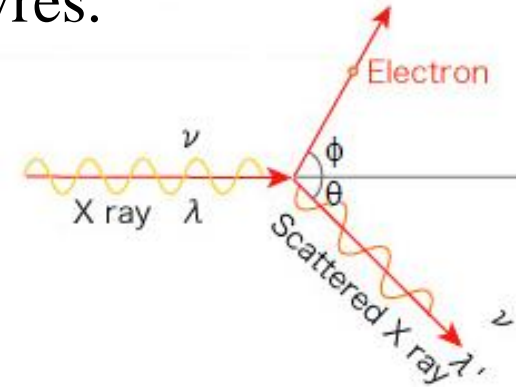
$$1 \text{ eV} = 1,60184 \cdot 10^{-12} \text{ erg} = 1,60184 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

## Efeito Compton: *Evidência de que a luz tem natureza de partícula*

Compton mediu a diferença em  $\lambda$  de “fótons” de raios-X espalhados por elétrons livres.



Arthur Compton  
(1892-1962)



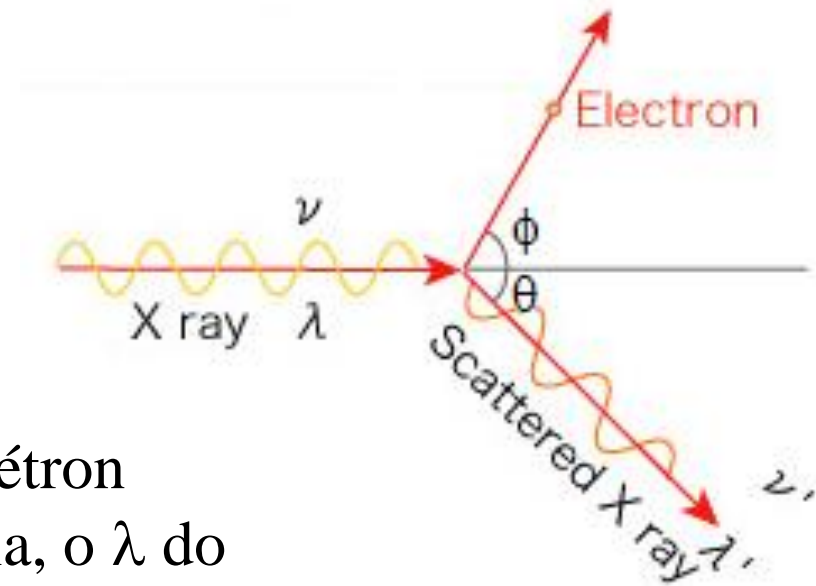
Substituindo  $m_{\text{foton}} = 0$  na equação de energia relativística (Eq. 4.48), temos a energia do fóton relacionada com o momento ( $p$ )

$$\text{Curved Arrow} \quad E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad \text{Straight Arrow} \quad E_{\text{foton}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = pc$$

## Efeito Compton:

$$E_{\text{foton}} = \frac{hc}{\lambda} = pc$$

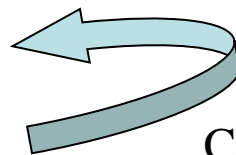
O fóton é espalhado na direção  $\theta$  e o elétron com o ângulo  $\phi$ . Com a perda de energia, o  $\lambda$  do fóton aumenta:



$$\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

$m_e$  = massa do elétron

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 0,00243 \text{ nm}$$



Comprimento de onda de Compton



# Aplicações de Espectroscopia & Fotometria

<b>Característica observada</b>	<b>Informação fornecida</b>
Máximo do contínuo ( $\lambda_{\text{max}}$ )	Temperatura (lei de Wien)
Presença de linhas	Composição química
Intensidade de linhas	Composição, temperatura
Largura de linhas	Temperatura, turbulência, rotação, densidade, campo magnético
Desvio Doppler	Velocidade radial
Fluxo aparente	Distância, cor (temperatura)
Mapeamento	Morfologia

# BIBLIOGRAFIA

- Carrel & Ostlie (2007, Cap. 5)
- Karttunen et al. (1997, Cap. 5)
- “Astronomia: Uma Visão Geral” (EDUSP) Cap. 2