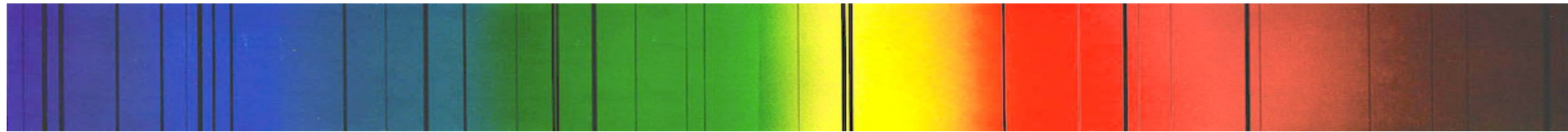


Capítulo 5

**A interação de luz e matéria**

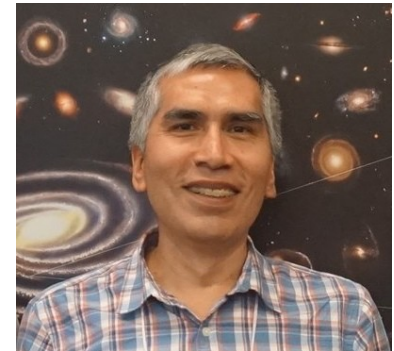


**5.1 Linhas espectrais**

**5.2 Fótons e a Dualidade Partícula-onda**

**5.3 O modelo do átomo de Bohr**

**5.4 Mecânica Quântica**



## 5.1 Linhas espectrais



Em 1835, o filósofo francês Auguste Comte considerou os **limites do conhecimento**. No seu livro “Filosofia Positiva” escreveu:

*“No que diz respeito às estrelas, poderemos determinar suas distâncias, movimentos, [...] mas nunca seremos capazes de determinar a sua composição química”*



Cecilia Payne foi uma das mais brilhantes astrônomas de todos os tempos! Confira a história da mulher que descobriu a composição química das estrelas, inspirando gerações de mulheres depois dela a fazerem ciência 🥰



**CECILIA PAYNE - GAPOSCHKIN**

NASCIDA NA INGLATERRA EM 1900, TORNOU-SE A 1ª CIENTISTA A COMPREENDER A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SOL E AJUDOU A APROFUNDAR O CONHECIMENTO SOBRE AS ESTRELAS.

DESDE JOVEM ELA SE INTERESSAVA POR FÍSICA E ASTRONOMIA, O QUE A LEVOU A FREQUENTAR A UNIVERSIDADE DE CAMBRIDGE E NOS ANOS SEGUINTES DE SUA CARREIRA A SE TORNAR A 1ª MULHER A DIRIGIR O DEPTO DE ASTRONOMIA EM HARVARD.

ANTES DE CECILIA, HAVIA UMA EQUIPE DE MULHERES CONTRATADAS PELO ASTRÔNOMO EDWARD PICKERING, CONHECIDAS COMO "AS COMPUTADORAS DE HARVARD", QUE FEZEM UM TRABALHO BRILHANTE CLASSIFICANDO MUITAS ESTRELAS COM RELAÇÃO ÀS SUAS TEMPERATURAS. A PRINCIPAL CIENTISTA ERA ANNE JUMP CANNON, PORÉM HAVIA OUTRAS, COMO HELENETTA LEAVITT.

CECILIA VIRIA DEPOIS E RESOLVERIA GRANDES QUESTÕES COM O AUXÍLIO DOS TRABALHOS DESSAS MULHERES.

NA INGLATERRA NÃO SE CONTRATAVAM MULHERES COMO PESQUISADORAS, O QUE A LEVOU A DEIXAR O PAÍS E IR PARA OS EUA OBTER SEU DOUTORADO EM 1923. ELA FOI RECEBIDA EM HARVARD E HARLOW SHAPLEY, O DIRETOR DO OBSERVATÓRIO, A INCENTIVOU A ESCREVER SUA TESE, QUE POSTERIORMENTE FOI CONSIDERADA BRILHANTE. SEU TRABALHO SE DESENVOLVEU COM O AUXÍLIO E OS DADOS PRECISOS DAS "COMPUTADORAS DE HARVARD".

CECILIA ENCONTROU UMA NOVA MANEIRA DE LER O ESPECTRO ESTELAR, OU O ARCO IRIS DE CORES, QUE DETERMINA OS COMPONENTES QUÍMICOS DAS ESTRELAS E TAMBÉM COMPREENDEU MELHOR SUAS TEMPERATURAS.

OS RESULTADOS FORAM INCRÍVEIS. O SOL ERA ABUNDANTEMENTE FORMADO POR HIDRÓGENO E HÉLIO, AO CONTRÁRIO DA CREENÇA NA ÉPOCA, DE QUE O SOL POSSUÍA COMPOSIÇÃO QUÍMICA SEMELHANTE A DA TERRA. PORÉM, A COMUNIDADE CIENTÍFICA, PRINCIPALMENTE O RESPEITADO ASTRÔNOMO HENRY RUSSEL, CONCLUÍRAM QUE ERA LOUCURA.

**1925**

SEU TRABALHO TORNOU-SE REFERÊNCIA NA ÁREA E CECILIA TRABALHOU O RESTO DA VIDA, INSPIRANDO GERAÇÕES A DEDICAREM SUAS VIDAS AOS ESTUDOS DAS ESTRELAS.

**STELLAR ATMOSPHERES - A contribution to the observational study of high temperatures in the revolving layers of stars by Cecilia Payne**

por Bruno e Letícia



William Hyde Wollaston  
(1766-1828)

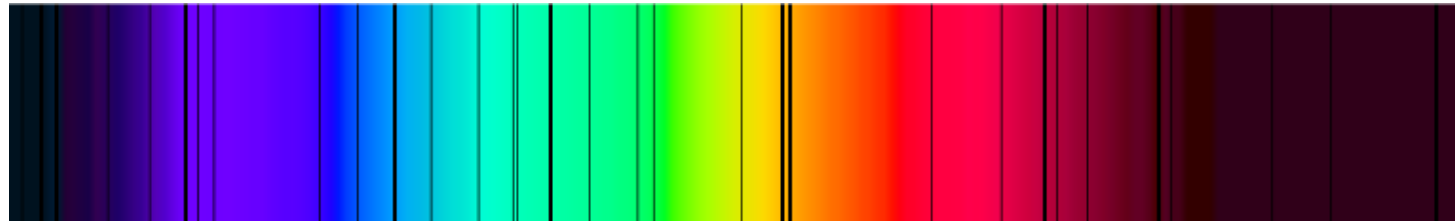
1802: Wollaston descobriu 7 linhas escuras sobrepostas ao espectro contínuo do Sol.

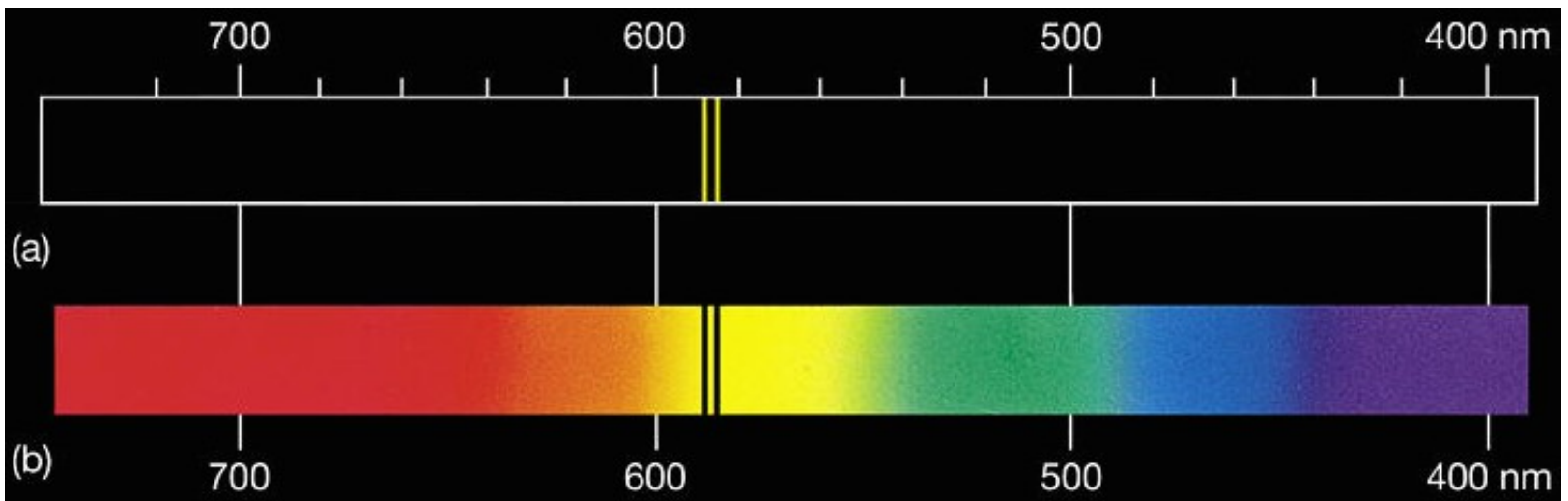
1817: Fraunhofer catalogou 574 dessas linhas escuras no espectro solar (**linhas de Fraunhofer**)

→ descobriu que uma linha proeminente no Sol, tinha a mesma posição que a linha de sódio na Terra (por comparação com o comprimento de onda da luz amarela emitida por sal espalhado em uma chama).



Joseph von Fraunhofer  
(1787-1826)

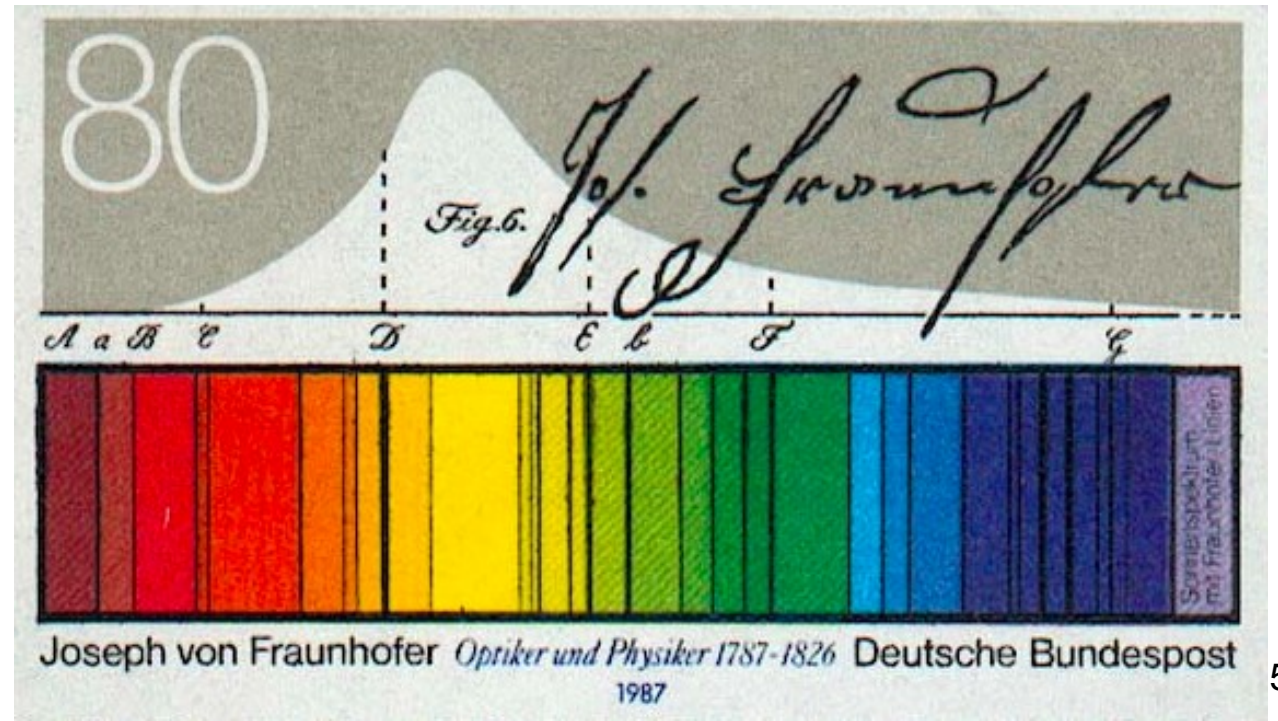




© 2005 Pearson Prentice Hall

- a) O espectro de **emissão** do sódio → 2 linhas brilhantes amarelas.
- b) O espectro de **absorção** do sódio → 2 linhas escuras na mesma posição

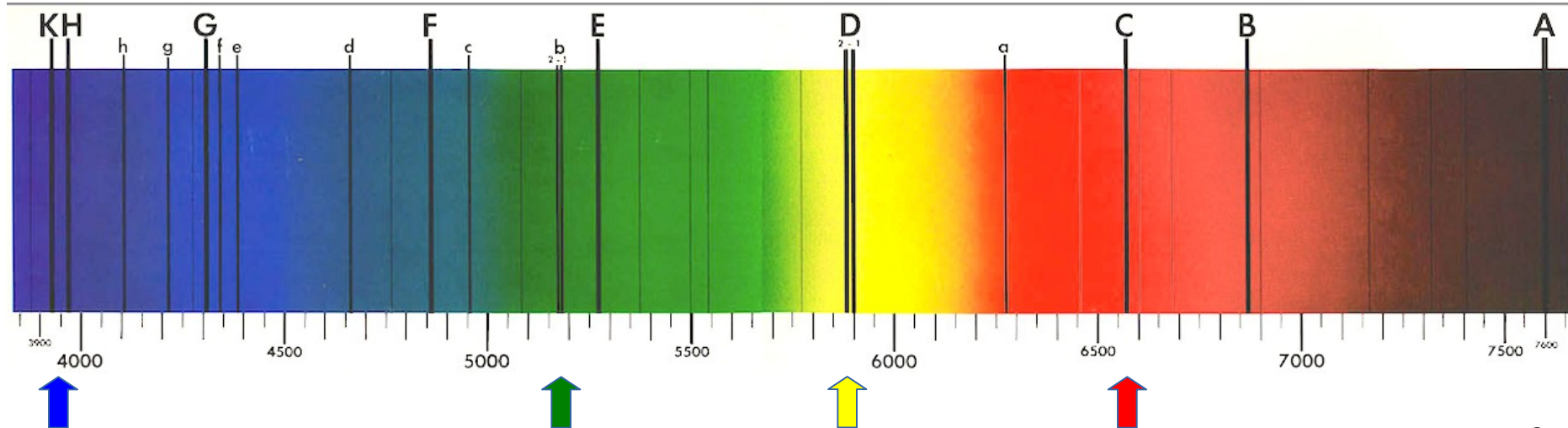
Espectro solar original desenhado por Fraunhofer



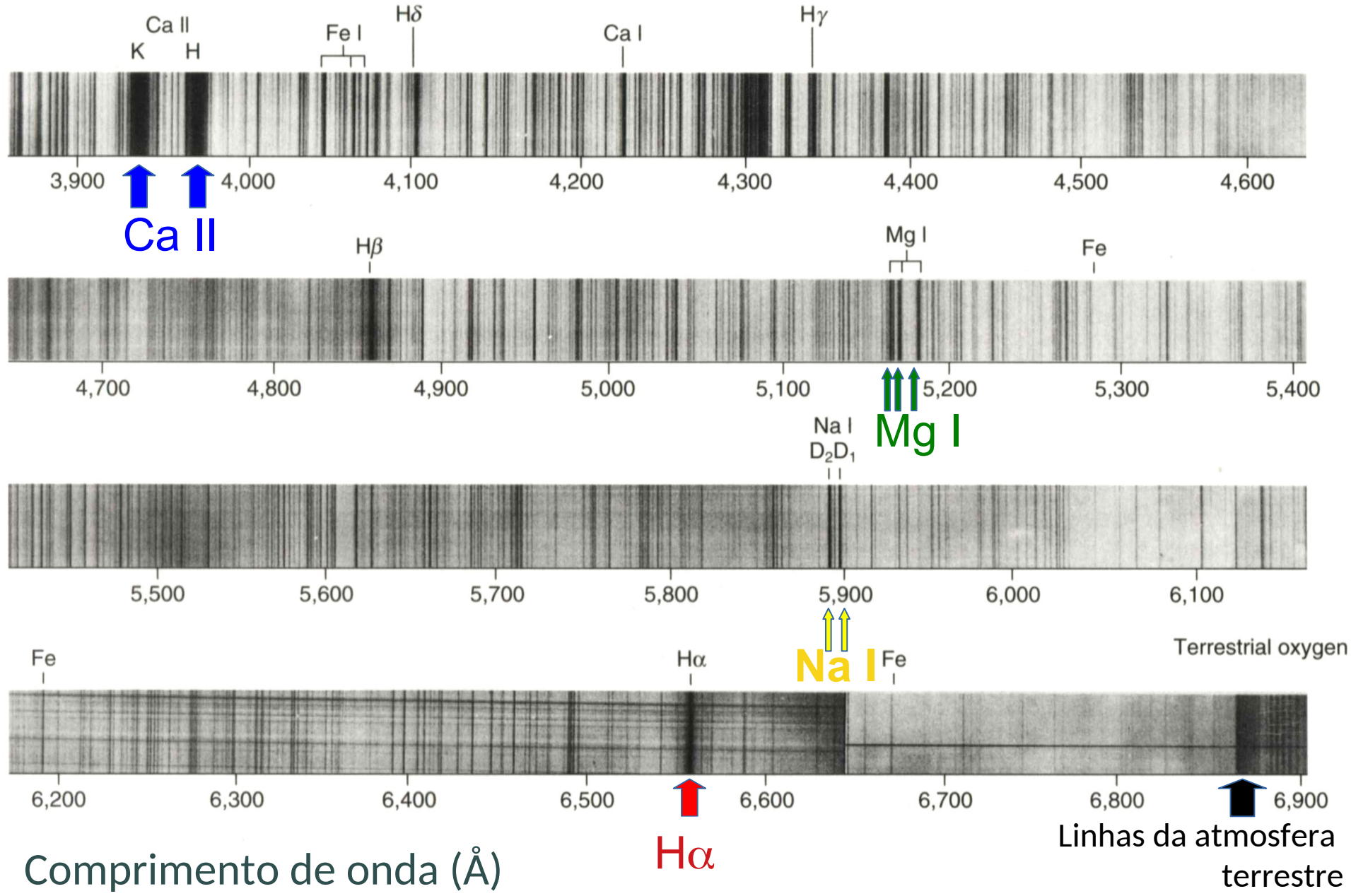
# Exemplo: linhas de Fraunhofer no espectro da fotosfera solar

Wavelength (nm)	Name	Atom	Equivalent Width (nm)
385.992		Fe I	0.155
388.905		H <sub>g</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

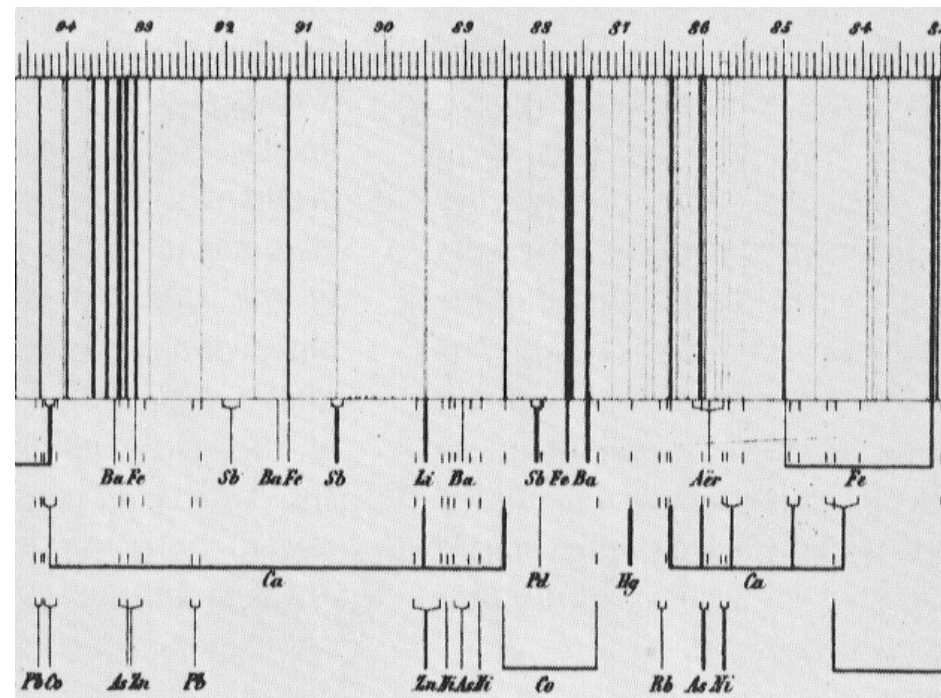
Wavelength (nm)	Name	Atom	Equivalent Width (nm)
422.674	g	Ca I	0.148
434.048	G', H $\gamma$	H I	0.286
438.356	d	Fe I	0.101
486.134	F, H $\beta$	H I	0.368
516.733	b <sub>4</sub>	Mg I	0.065
517.270	b <sub>2</sub>	Mg I	0.126
518.362	b <sub>1</sub>	Mg I	0.158
588.997	D <sub>2</sub>	Na I	0.075
589.594	D 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



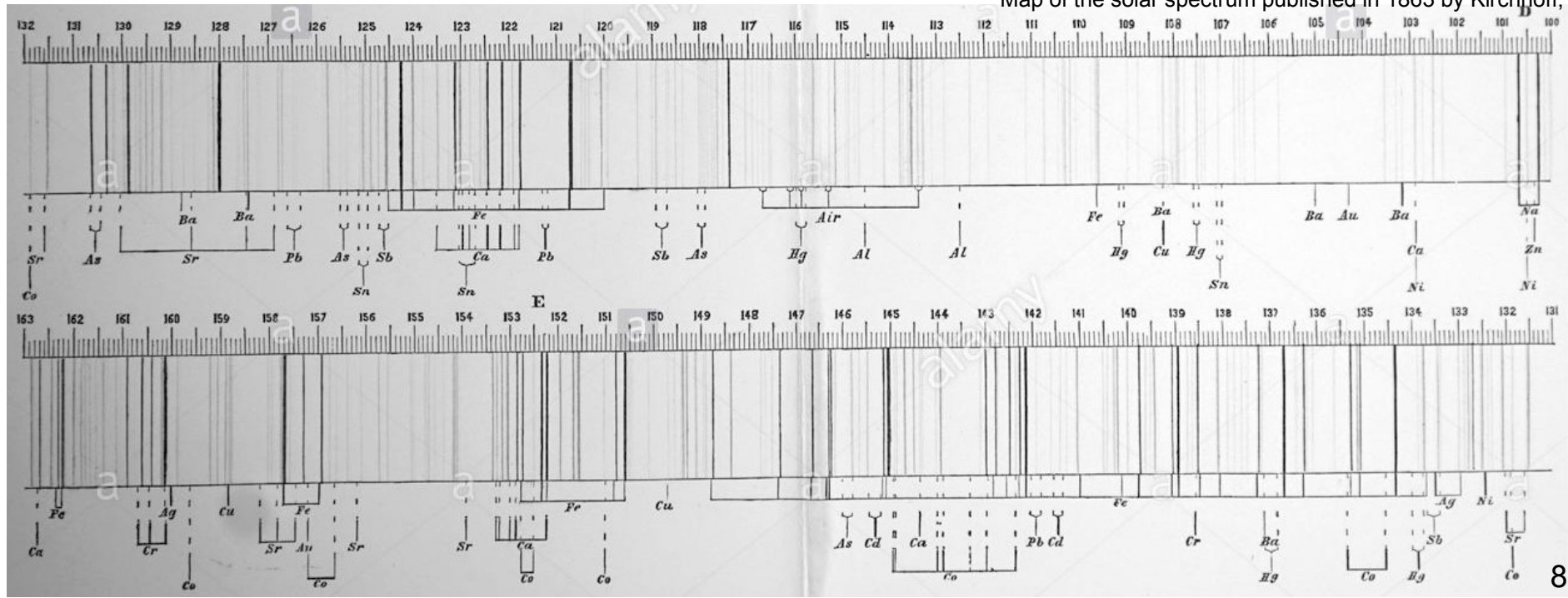
# Espectro da fotosfera solar



Através de uma comparação cuidadosa do espectro solar com espectros de laboratório, Kirchhoff (1863) desvendou a origem de muitas das linhas no espectro solar. Por ex., ele identificou 70 linhas de Fe



Map of the solar spectrum published in 1863 by Kirchhoff,





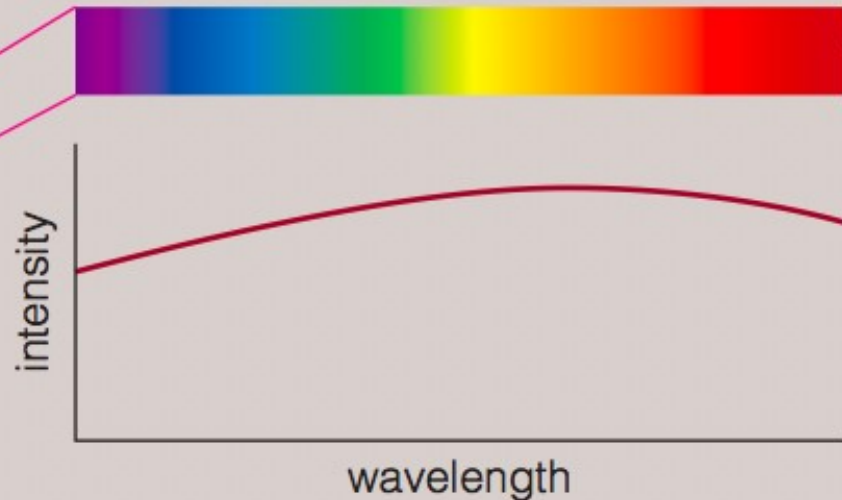
# Três leis de Kirchhoff (~1860)

Regras que estabelecem a emissão e a absorção de radiação

1<sup>a</sup>: Um objeto denso no estado sólido ou gasoso, produzirá um espectro contínuo, quando aquecido.

Espectro contínuo (sem linhas)

The light bulb produces light of all visible wavelengths (colors).

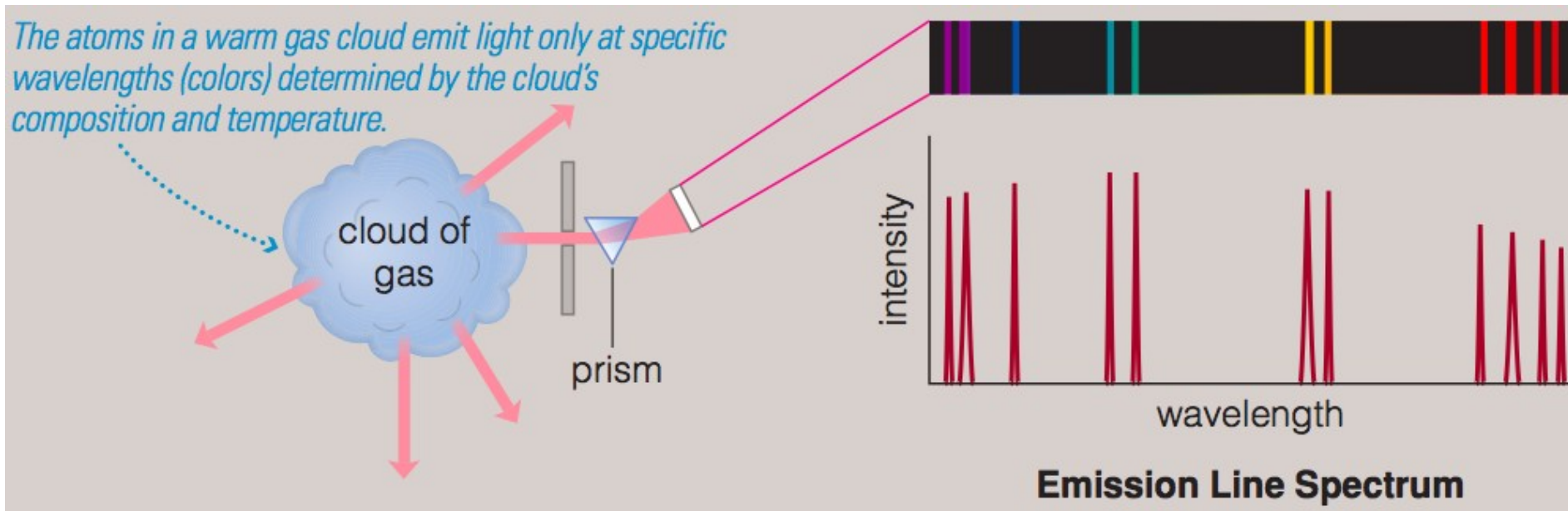


**Continuous Spectrum**

# 2ª Lei de Kirchhoff

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

Espectro de linhas de emissão



# 3ª Lei de Kirchhoff

Um *gás a baixa pressão e temperatura*, entre uma fonte de radiação contínua e um observador, produzirá um espectro de *linhas de absorção*

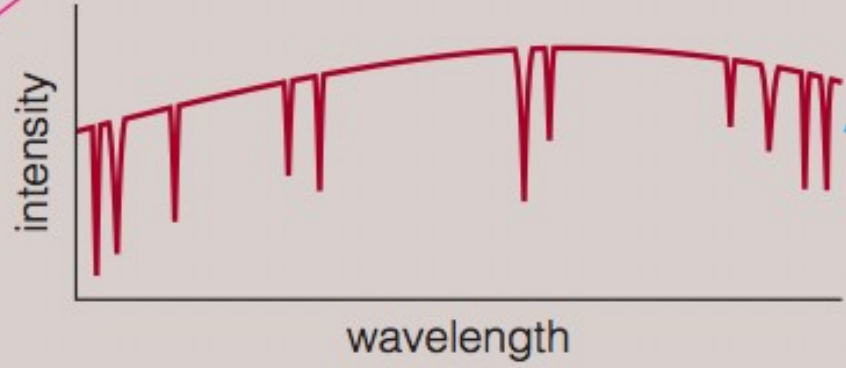
Espectro de linhas de absorção

*If light from a hot source passes through a cooler gas cloud, atoms in the cloud absorb light at wavelengths determined by the cloud's composition and temperature.*

hot light source

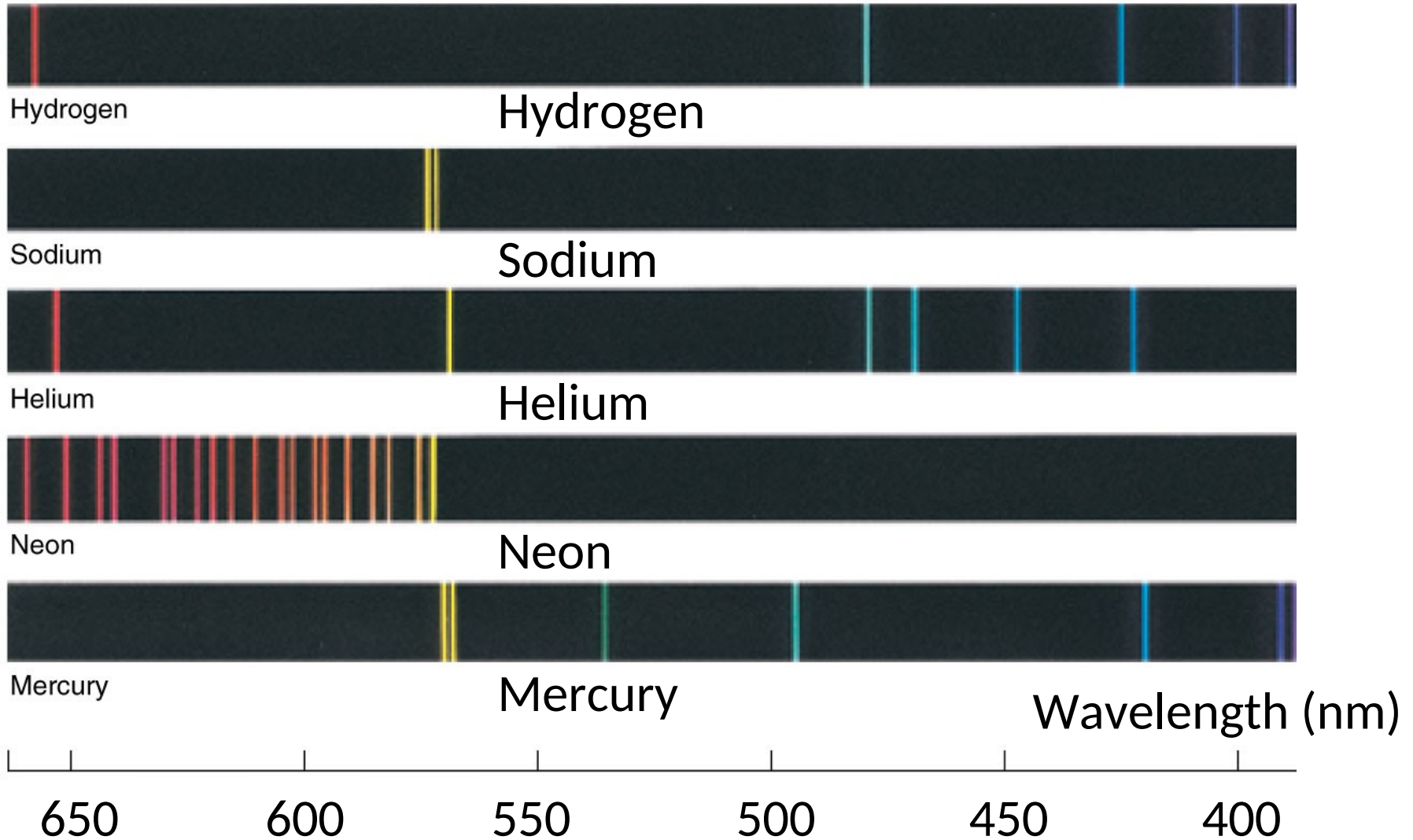
cloud of gas

prism



**Absorption Line Spectrum**

# Aplicação: Espectros de elementos químicos no laboratório



© 2011 Pearson Education, Inc.

Hélio descoberto no Sol em 1868, só encontrado na Terra em 1895

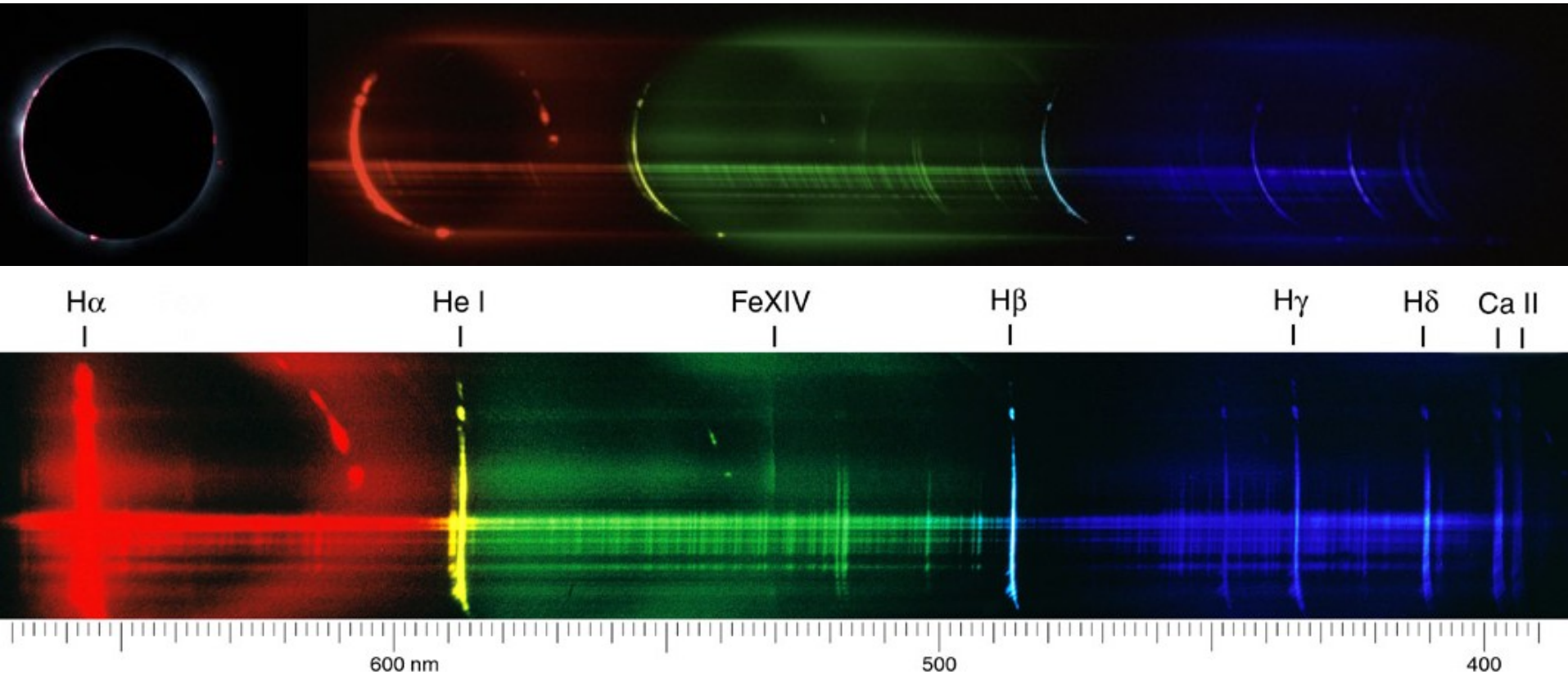
# Cromosfera solar e anel de diamante, instantes antes da totalidade



(c) Alson Wong, 3/nov/2013, Uganda

# Espectro da cromosfera solar, eclipse de 1999, Hungria

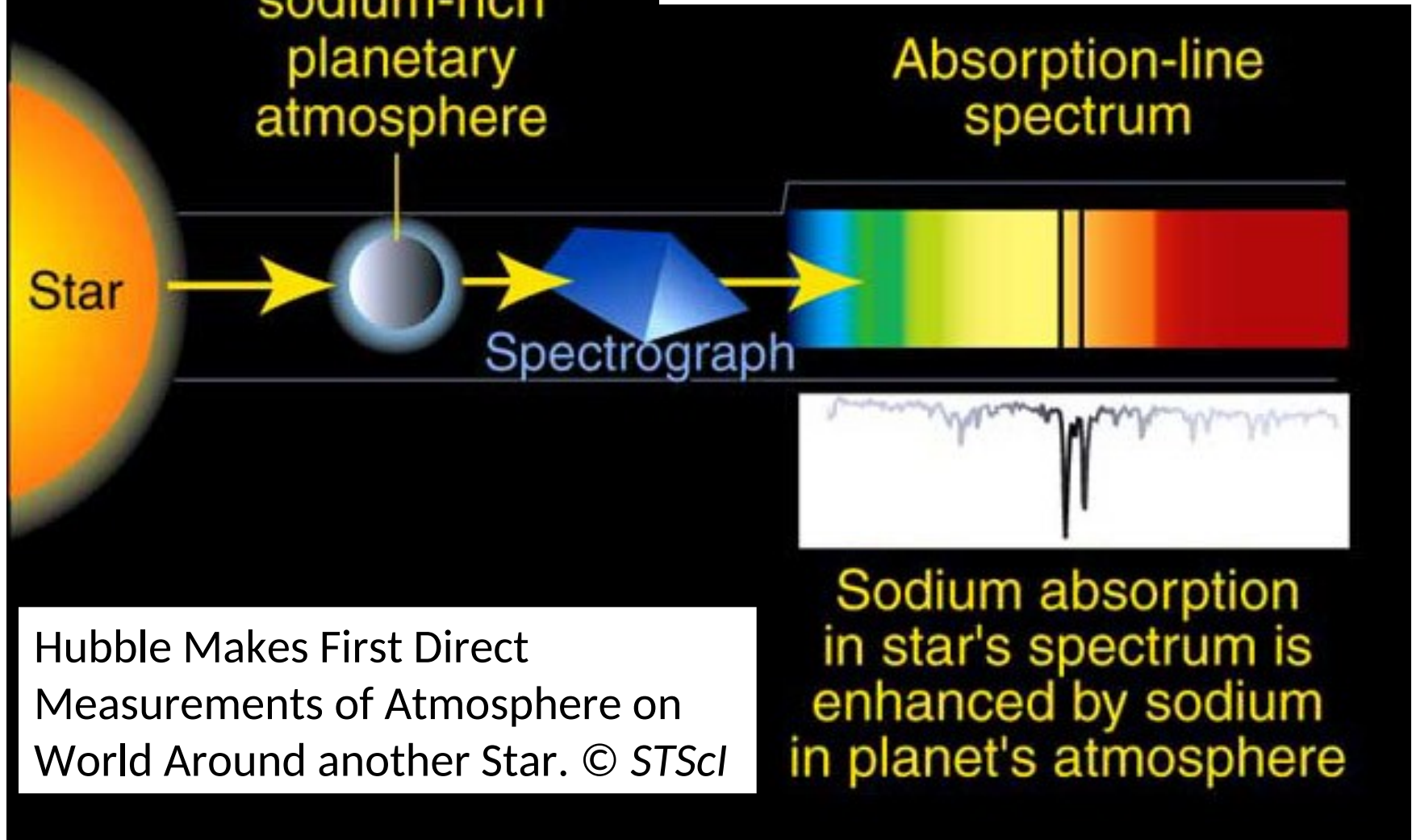
É chamado espectro *flash* pois as linhas de emissão aparecem por apenas alguns segundos



<http://www.eurastro.de/webpages/MRSPECT.HTM>

O hélio foi descoberto primeiro no Sol, usando espectros do eclipse solar de 18/8/1868.

The star HD209458, the exoplanet HD209458b, the spectrograph STIS on Hubble, and the resulting spectral signature of sodium





**Astronomia USP Brasil**

@AstroUSP

Seguindo



## Na NASA, paraibana Raissa Estrela vai pesquisar planetas fora do Sistema Solar!



### **Na Nasa, paraibana vai pesquisar planetas fora do Sistema Solar**

Raissa Estrela começou a fazer ecologia, mas, após conhecer um professor, decidiu mudar de curso.

[g1.globo.com](http://g1.globo.com)

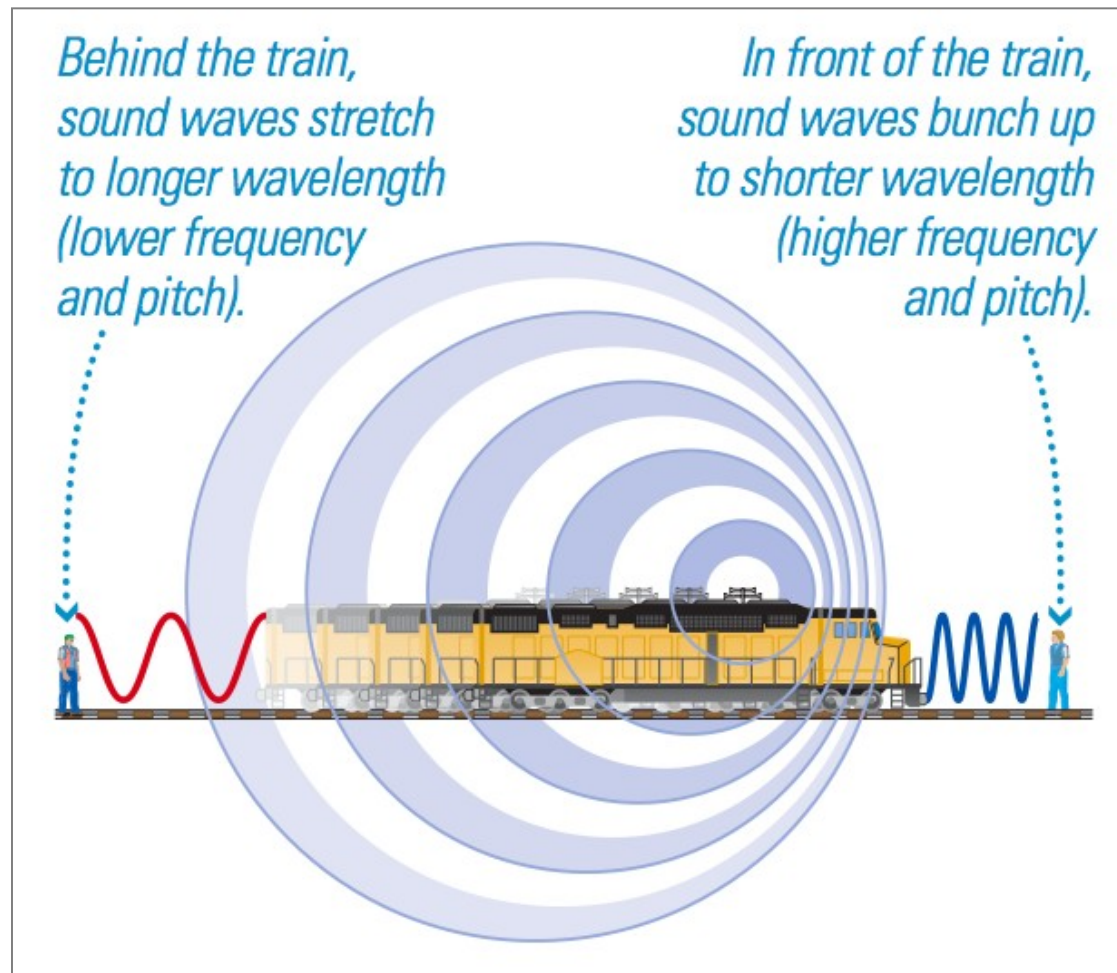


# Exemplo de aplicação: Efeito Doppler

Fonte **afasta-se** do observador  
⇒ comprimento de onda  
observado aumenta ( $\lambda_2 > \lambda_0$ )

Fonte **aproxima-se** ⇒  
comprimento de onda  
observado diminui ( $\lambda_1 < \lambda_0$ )

$\lambda_0$  é o  
comprimento  
de onda em  
repouso



# Efeito Doppler

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



$\lambda$ : observado (estrela)  
 $\lambda_0$ : em repouso (terra)

Estrela se afasta  
( $\lambda > \lambda_0$ ):  
velocidade positiva

Estrela se aproxima ( $\lambda < \lambda_0$ ):  
velocidade negativa

# Exemplo

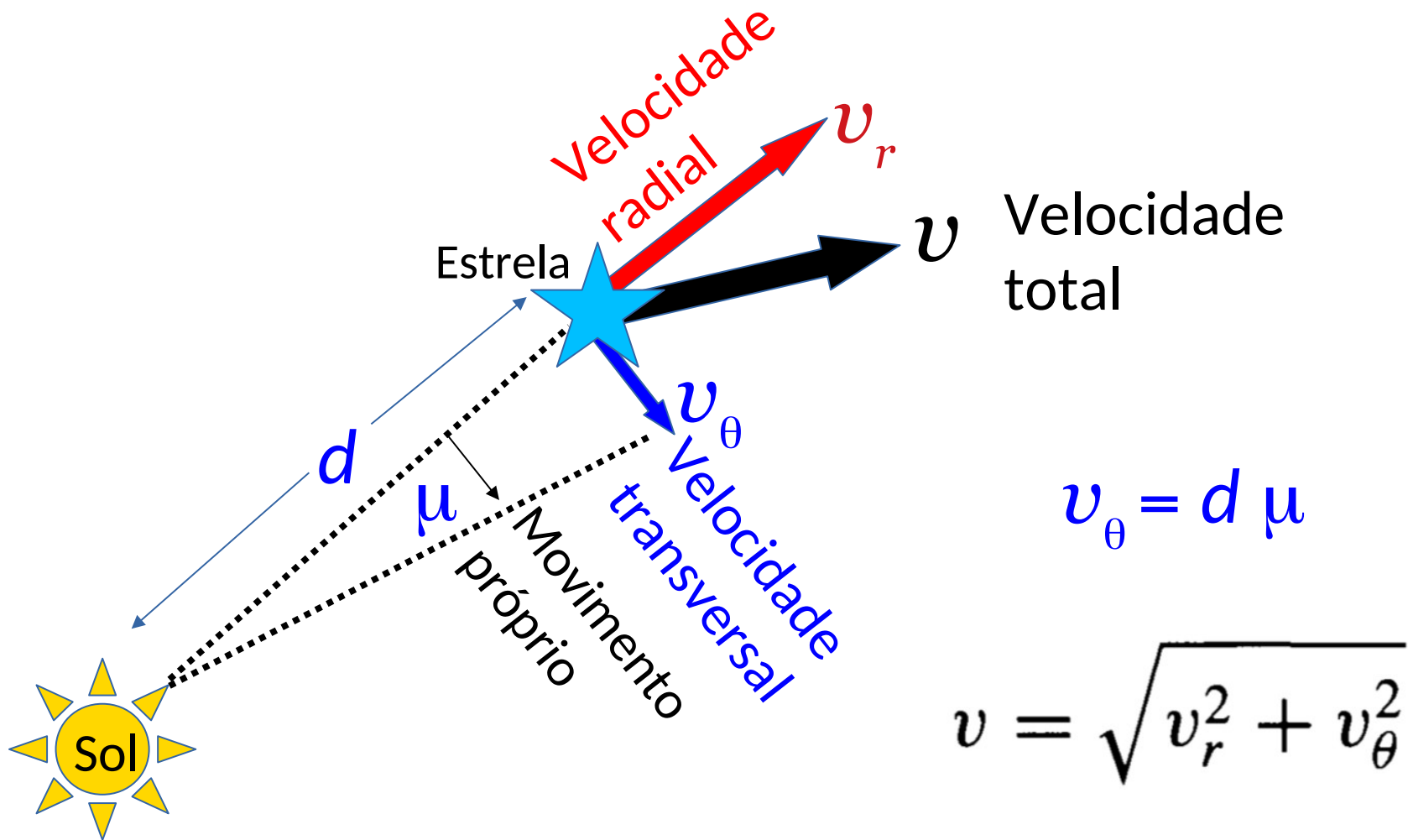
Uma das mais importantes linhas de hidrogênio é a linha de H $\alpha$  em **656,281 nm**, medida no **laboratório**.

A estrela **Vega** tem a linha de H $\alpha$  em **656,251 nm**.

Qual a velocidade *radial* da estrela?

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

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



A velocidade da estrela  $v$  pode ser decomposta em uma componente radial ( $v_r$ ; medida através do efeito Doppler) e uma transversal ( $v_\theta$ ; obtida da distância  $d$  e ângulo de movimento próprio  $\mu$ )

# Exemplo

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

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

Movimento próprio de Vega:  $\mu = 0,35077'' \text{ yr}^{-1}$

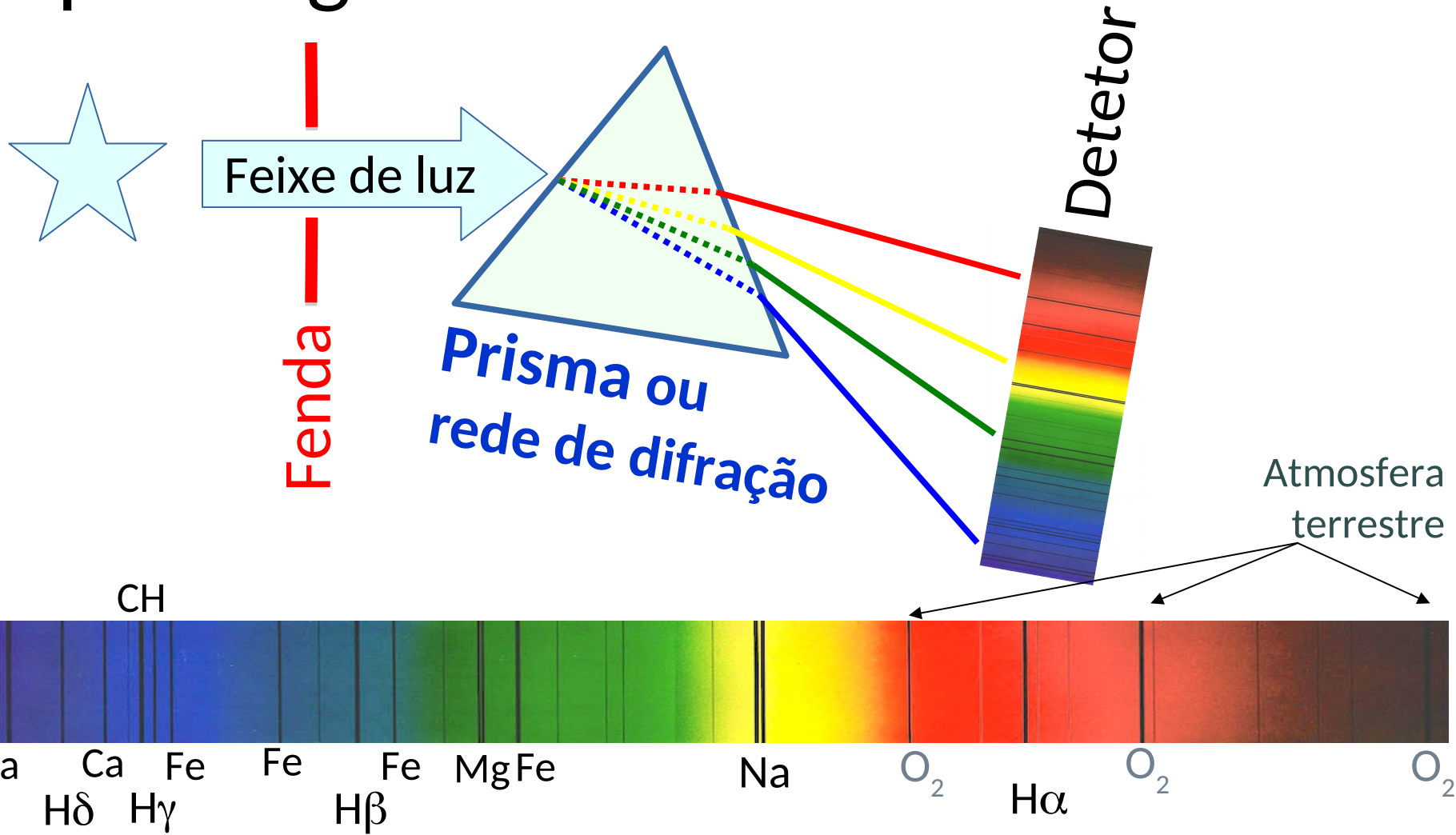
$$\mu \equiv \frac{d\theta}{dt} = \frac{v_\theta}{r} \quad (1.15) \quad \rightarrow \quad v_\theta = r\mu$$

$$r = 7,76 \text{ pc} \quad \rightarrow \quad v_\theta = 12,9 \text{ km/s}$$

Velocidade total  
relativa ao Sol:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\theta^2} = 19.0 \text{ km s}^{-1}$$

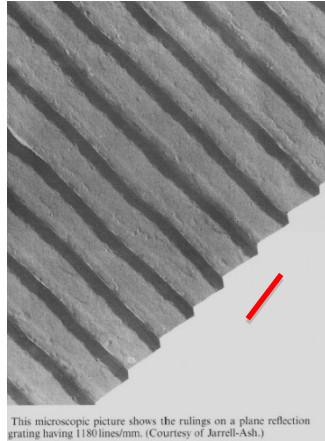
# Espectrógrafo



Jorge Meléndez, Astrofísica Estelar, AGA0293, IAG-USP

# Elemento dispersor da luz: prisma ou rede

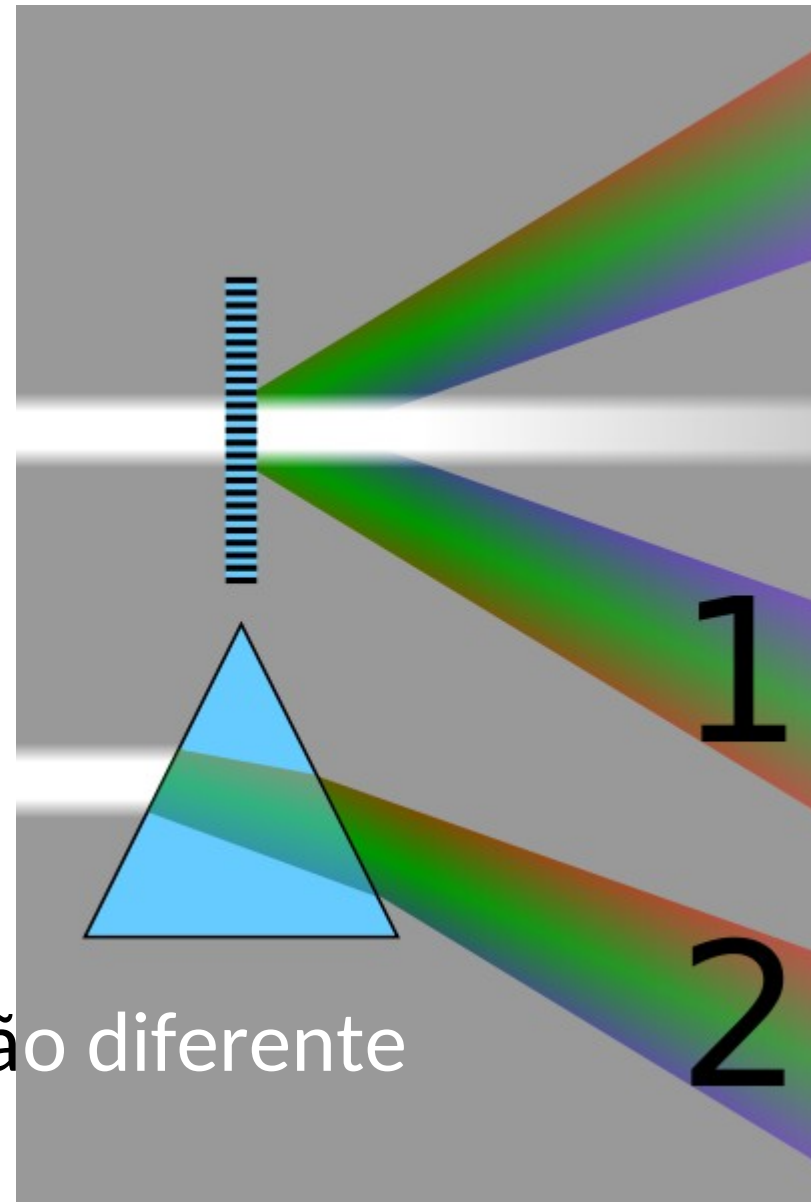
- Rede de difração:  
difração + interferência



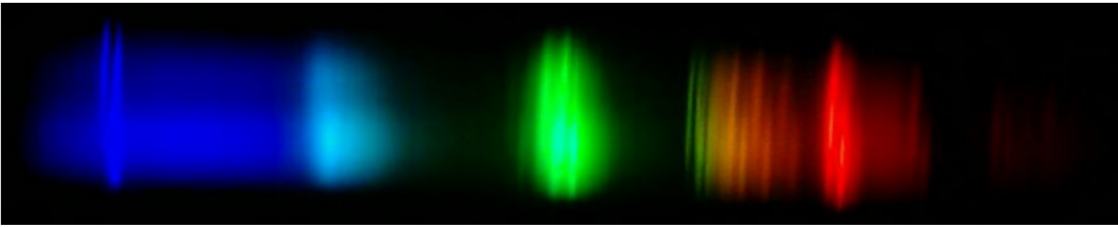
$$\underline{d} \sin \theta = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

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

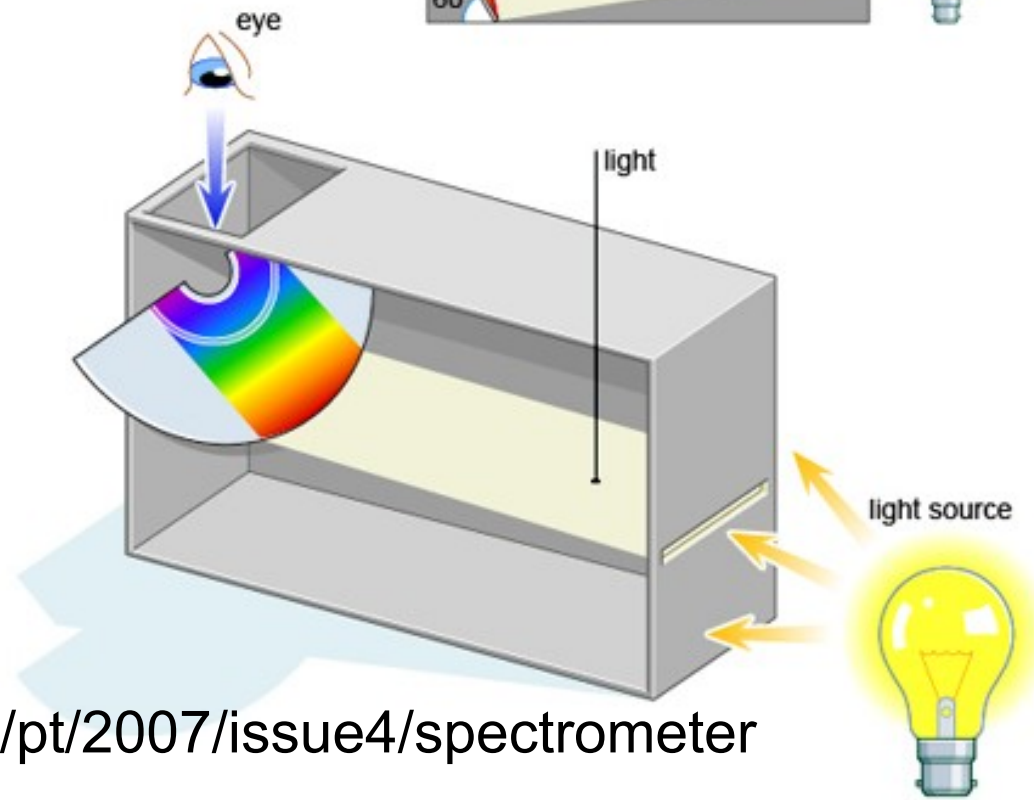
- Prisma: cada cor tem refração diferente



# Espectrógrafo caseiro usando um CD como rede de difração



Espectro de lâmpada fluorescente observado com espectrógrafo caseiro por aluna de AGA0293



<http://www.scienceinschool.org/pt/2007/issue4/spectrometer>

<https://www.exploratorium.edu/snacks/cd-spectroscope>

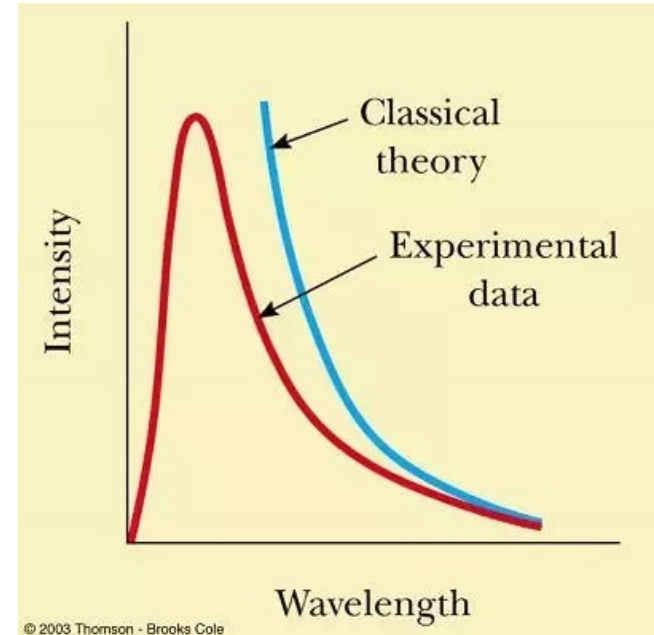


## 5.2 Fótons

A constante  $h$  foi introduzida por Planck em 1900 para explicar a radiação de corpo negro



$$E = h\nu$$

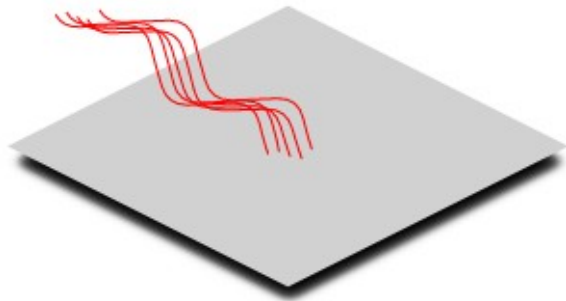


A constante de Planck é uma constante fundamental da natureza e foi a base para desenvolver a **Mecânica Quântica**. Einstein deu o seguinte passo que mostrou a realidade da quantização de Planck

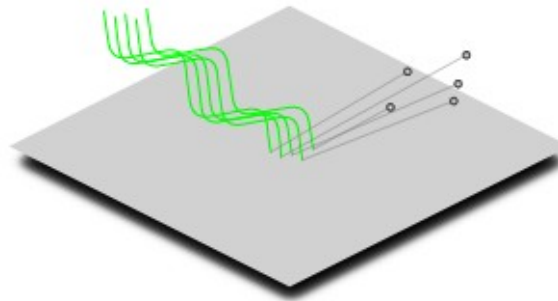
**Efeito fotoelétrico:** ejeção de elétrons numa superfície metálica, pela incidência de luz. Os fótons que incidem na superfície, ejetam elétrons com energia cinética  $K_{\max}$ , que não depende da intensidade da luz, porém  $K_{\max}$  varia em função da frequência  $\nu$  (ou  $\lambda$ ) da luz incidente.

$$\nu = c/\lambda$$

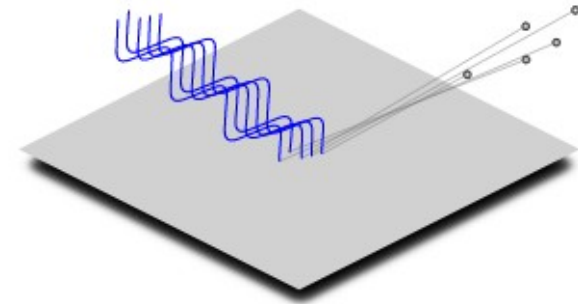
$\lambda$  vermelho:  
 $\nu$  baixa (não ejeta  $e^-$ )



$\lambda$  verde:  
 $\nu$  adequada para ejetar  $e^-$

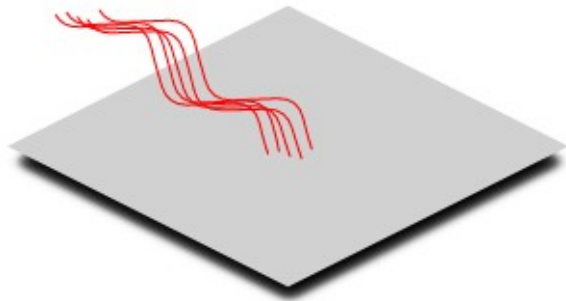


$\lambda$  azul:  $\nu$  alta:  $e^-$  mais energéticos são ejetados

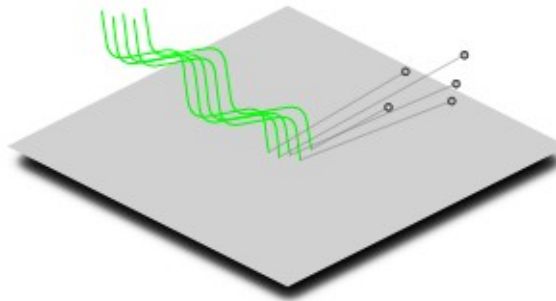


**Efeito fotoelétrico:** ejeção de elétrons numa superfície metálica, pela incidência de luz. Os fótons que incidem na superfície, ejetam elétrons com energia cinética  $K_{\max}$ , que não depende da intensidade da luz, porém  $K_{\max}$  varia em função da frequência  $\nu$  (ou  $\lambda$ ) da luz incidente.  $\nu = c/\lambda$

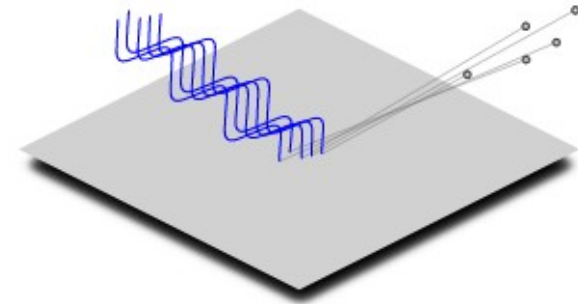
$\lambda$  vermelho:  
 $\nu$  baixa (não ejeta  $e^-$ )



$\lambda$  verde:  
 $\nu$  adequada para ejetar  $e^-$



$\lambda$  azul:  $\nu$  alta:  $e^-$  mais energéticos são ejetados



$$E = h\nu$$

# Efeito fotoelétrico



Einstein (1905) explicou o efeito fotoelétrico como sendo devido a um “feixe de partículas sem massa”, **fótons**, com energia:

$$E_{\text{fóton}} = h\nu = hc/\lambda$$

A energia do fóton é transferida para um elétron da superfície, superando sua energia de ligação ( $\phi$ , chamada de “função de trabalho”)  $\rightarrow$  elétron ejetado

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

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

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

$$E_{\text{fóton}} = h\nu = hc/\lambda$$

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

$\lambda$  visível  $E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \approx \frac{1240 \text{ eV nm}}{500 \text{ nm}} = 2.48 \text{ eV}$

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

**Exemplo de Aplicação** Quantos fótons visíveis ( $\lambda = 500 \text{ nm}$ ) são emitidos por uma lâmpada de 100 Watts?

Lembrar que  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \simeq \frac{1240 \text{ eV nm}}{500 \text{ nm}} = 2.48 \text{ eV}$$

$$E_{500 \text{ nm}} = 2,48 \text{ eV} \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ J} / \text{eV}) = 4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

**Exemplo de Aplicação** Quantos fótons visíveis ( $\lambda = 500 \text{ nm}$ ) são emitidos por uma lâmpada de 100 Watts?

Lembrar que  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \simeq \frac{1240 \text{ eV nm}}{500 \text{ nm}} = 2.48 \text{ eV}$$

$$E_{500 \text{ nm}} = 2,48 \text{ eV} \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ J / eV}) = 4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Potência da lâmpada = 100 Watts = 100 J/s

**Exemplo de Aplicação** Quantos fótons visíveis ( $\lambda = 500 \text{ nm}$ ) são emitidos por uma lâmpada de 100 Watts?

Lembrar que  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \simeq \frac{1240 \text{ eV nm}}{500 \text{ nm}} = 2.48 \text{ eV}$$

$$E_{500 \text{ nm}} = 2,48 \text{ eV} \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ J / eV}) = 4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Potência da lâmpada = 100 Watts = 100 J/s

Número de fótons =  $100 \text{ J/s} / 4 \times 10^{-19} \text{ J}$



**Exemplo de Aplicação** Quantos fótons visíveis ( $\lambda = 500 \text{ nm}$ ) são emitidos por uma lâmpada de 100 Watts?

Lembrar que  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \simeq \frac{1240 \text{ eV nm}}{500 \text{ nm}} = 2.48 \text{ eV}$$

$$E_{500 \text{ nm}} = 2,48 \text{ eV} \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ J / eV}) = 4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Potência da lâmpada = 100 Watts = 100 J/s

Número de fótons =  $100 \text{ J/s} / 4 \times 10^{-19} \text{ J}$

**Rpta:  $2,5 \times 10^{20}$  fótons/s**

## Exemplo de Aplicação

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

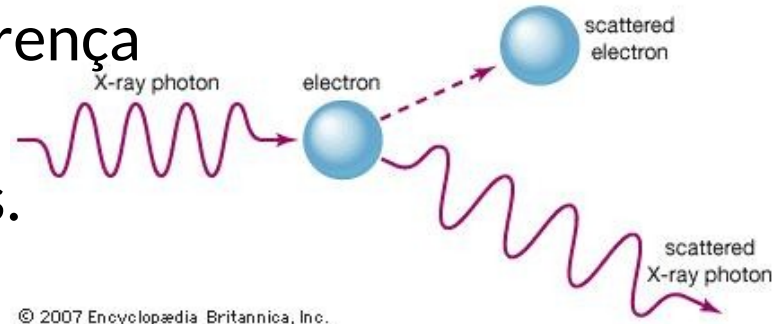
Região	$\lambda$	$\nu$ (Hz)	E (eV)
Raios-X	10 Å	$3 \times 10^{17}$	$1,24 \times 10^3$
Ultravioleta	1216 Å	$2,47 \times 10^{15}$	10,2
Visível	5000 Å		
Infravermelho	25 $\mu\text{m}$		
Rádio	15 m		

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

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

**Efeito Compton** (evidência de que a luz tem natureza de partícula).

Compton (1922) mediu a diferença em  $\lambda$  de “fótons” de raios-X espalhados por elétrons livres.



Arthur Compton (1892-1962)

No Cap. 4, a energia total de uma partícula:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Como fótons não tem massa:  $E = p c$

→ A energia do fóton está relacionada com o momento  $p$ :

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

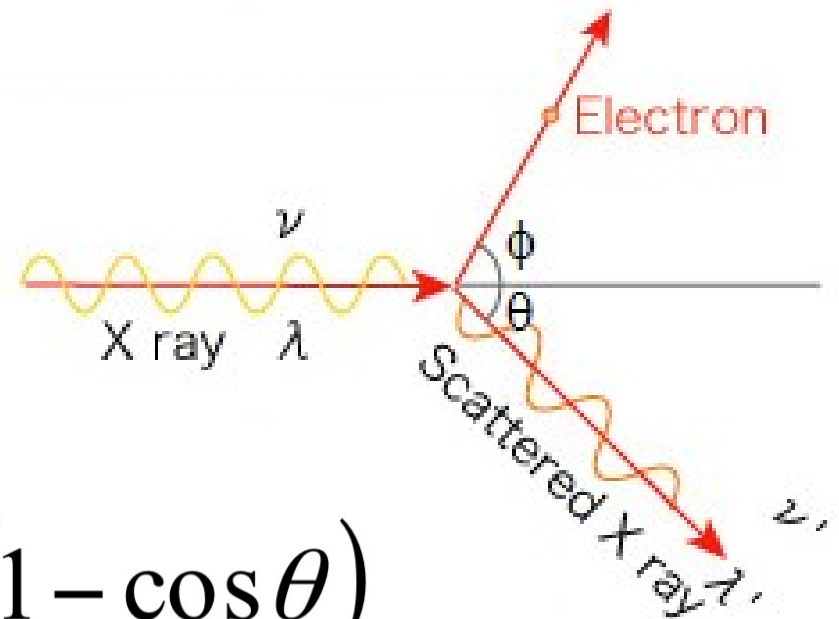
## Efeito Compton

Compton (1922) mediu a diferença em  $\lambda$  de “fótons” de raios-X espalhados por elétrons livres.

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

Fóton é espalhado no ângulo  $\theta$  e elétron no ângulo  $\phi$ . Com a perda de energia, o  $\lambda$  do fóton aumenta:

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

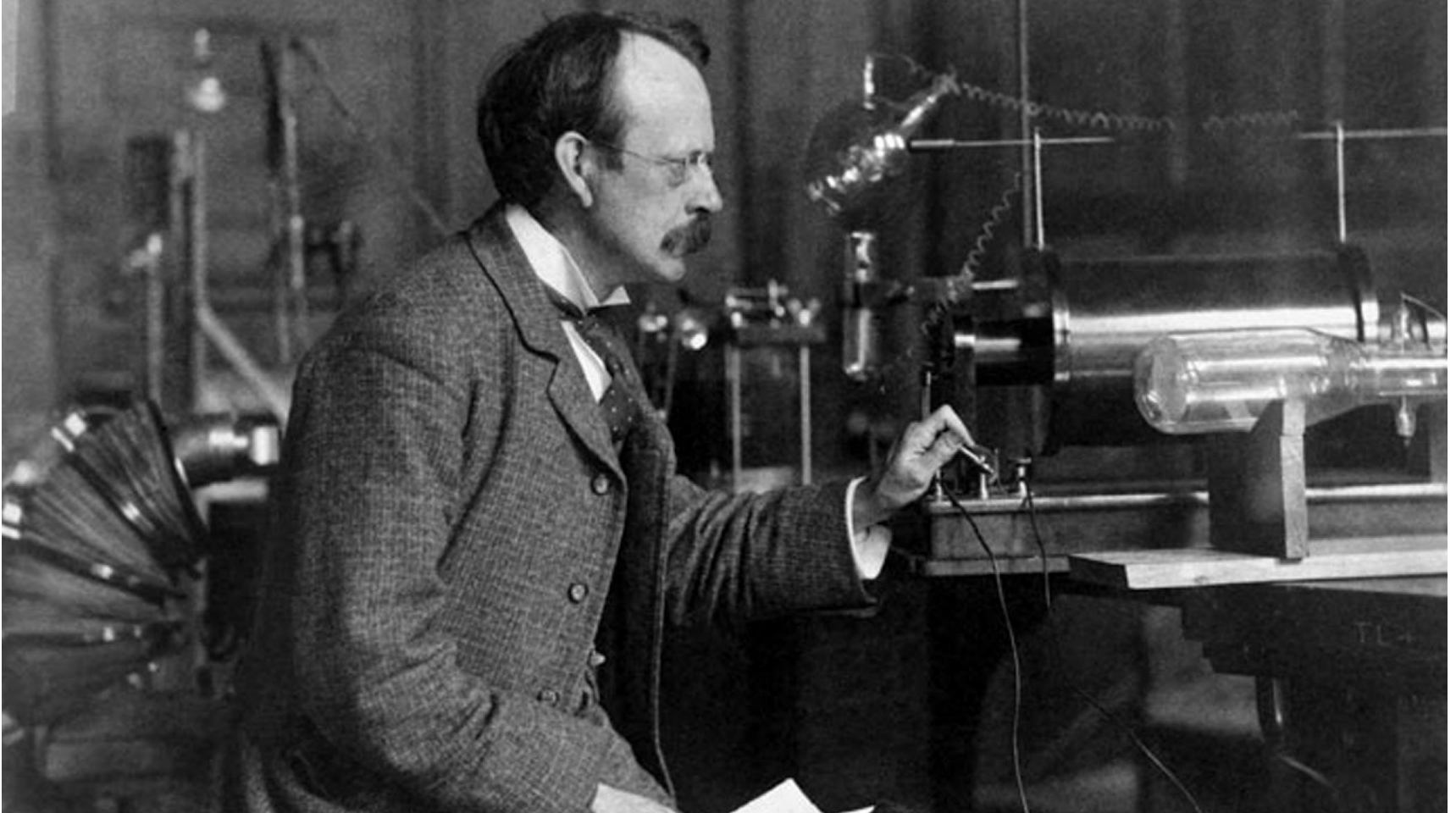


$m_e$  : massa do elétron

$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 0,00243 \text{ nm}$  ← Comprimento de onda de Compton

# Descoberta do elétron

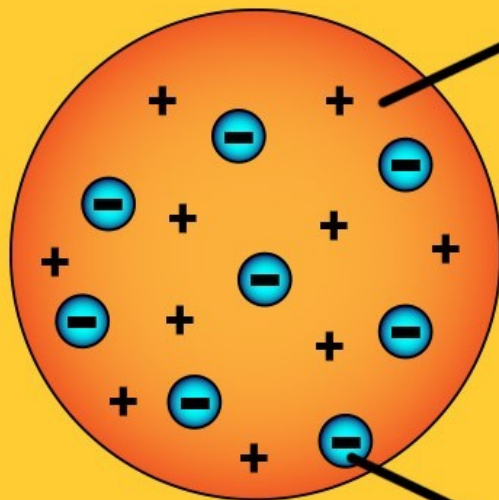
Joseph John Thomson (1897) descobriu que átomos têm partículas com carga negativa (elétrons).



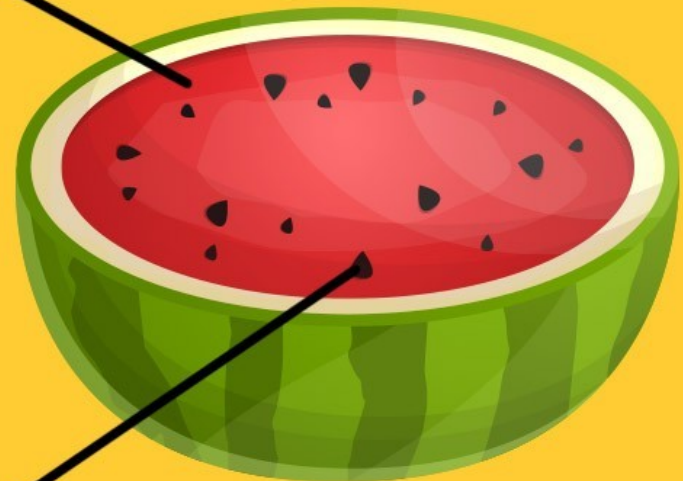
Como o átomo é eletricamente neutro → deve existir também carga positiva dentro do átomo

## Thomson's atomic model

Atom Model

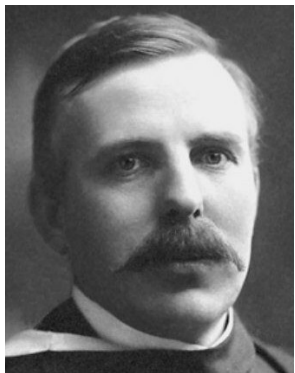


Watermelon



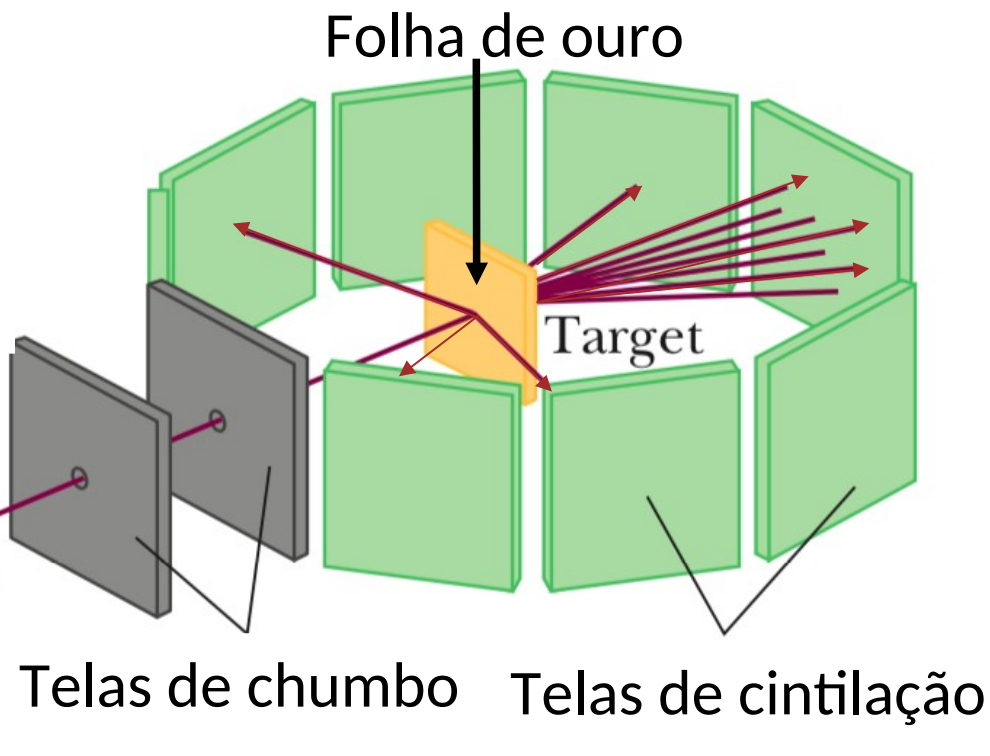
Positive charge

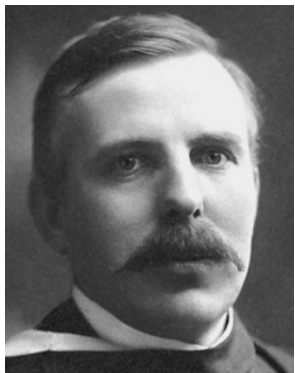
Electron



Partículas alfa  
(núcleo de hélio,  
carga +2)

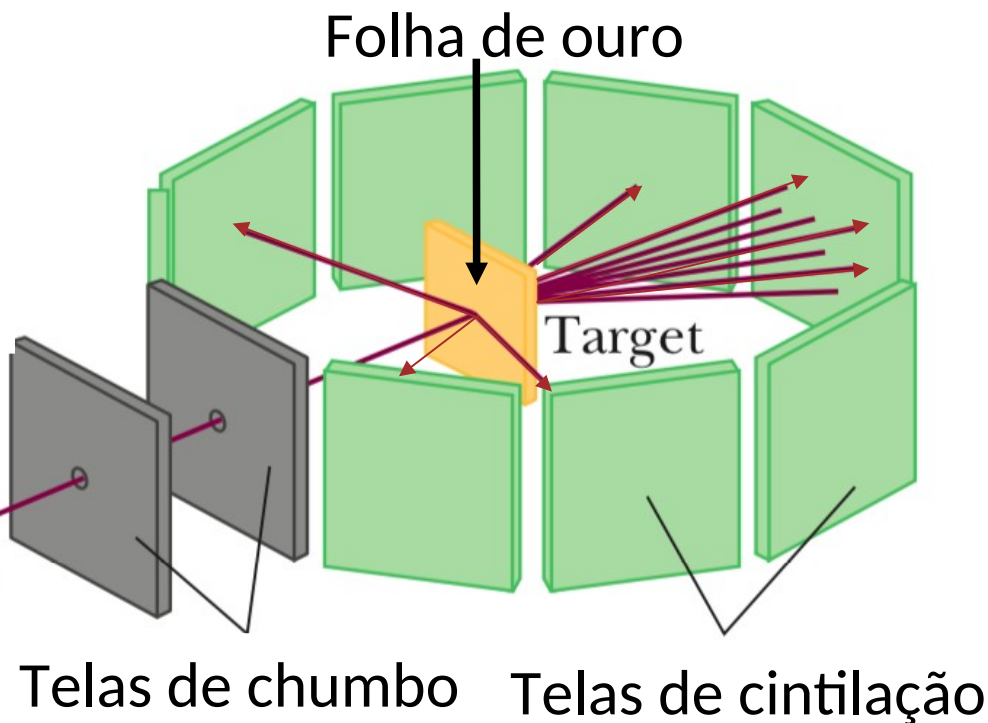
Experimento  
de Rutherford  
(1909)





Partículas alfa  
(núcleo de hélio,  
carga +2)

## Experimento de Rutherford (1909)



Rutherford (1911): Átomo não é esfera maciça de carga positiva com elétrons incrustados, mas um pequeno núcleo de carga positiva, rodeado por elétrons de carga negativa.

