

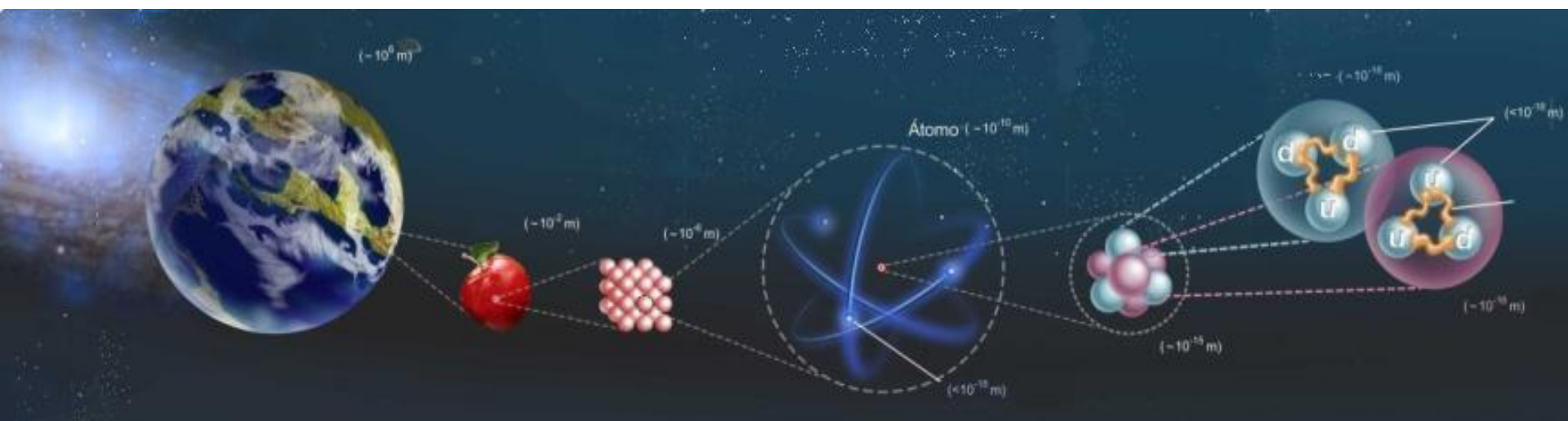


Universidade Federal do ABC

NMA101 - Ciência dos Materiais

<https://meet.google.com/lookup/b75dcqejz2>

Wendel Andrade Alves



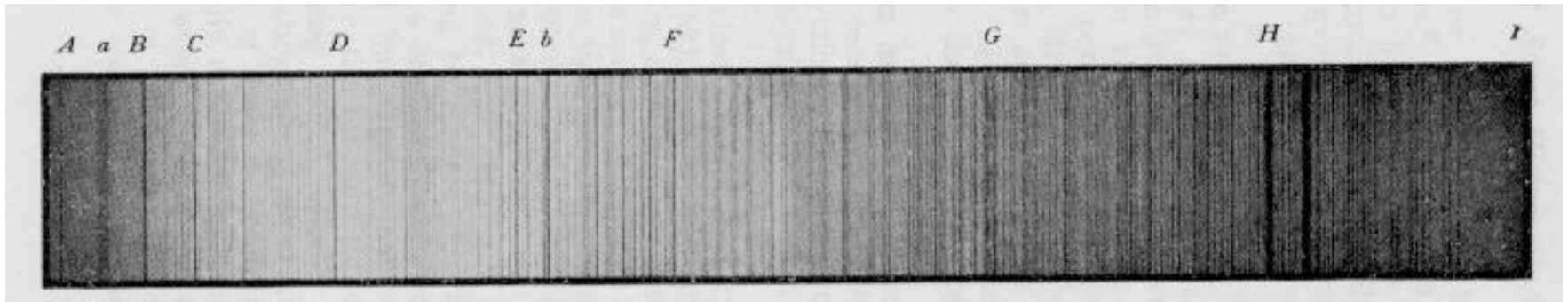
Crédito: Sprace

E-mail: wendel.alves@ufabc.edu.br

Horários: terças-feiras 16-18h
quintas-feiras 15-17h

Histórico

- Issac Newton (1643-1727): Em 1665, demonstrou que a luz branca, como a luz do Sol, ao passar por um prisma se decompõe em luz de diferentes cores, formando um espectro como o arco-íris.
- William Hyde Wollaston (1766-1828): Em 1802, observou que passando a luz por uma fenda, e depois por um prisma, apareciam algumas linhas escuras no espectro, que ele interpretou como o limite das cores.
- Joseph von Fraunhofer (1787-1826): Até 1826, esse fabricante de instrumentos de vidro, já havia contado 574 linhas escuras no espectro solar, chamadas depois de **linhas de Fraunhofer**.

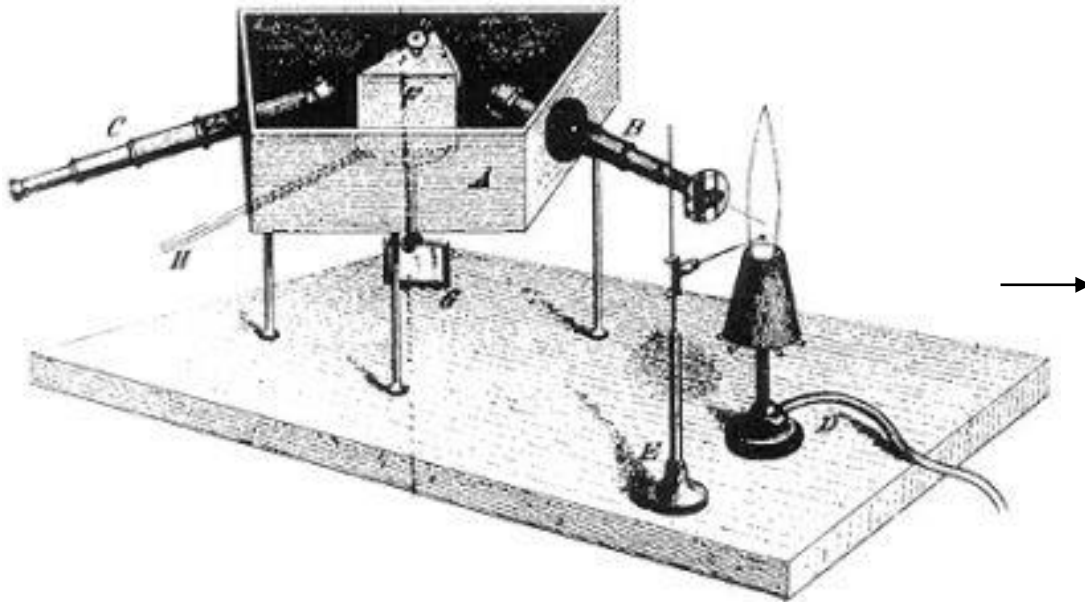


Histórico

- Em 1856, Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) inventou o bico de gás (conhecido hoje como bico de Bunsen), cuja chama apresentava uma característica incolor.

Quando um elemento químico era colocado sobre a chama, a chama adquiria uma certa coloração

- Nesse mesmo ano, Gustav Robert Kirchhoff sugeriu que as cores seriam melhor identificadas se passadas através de um prisma.

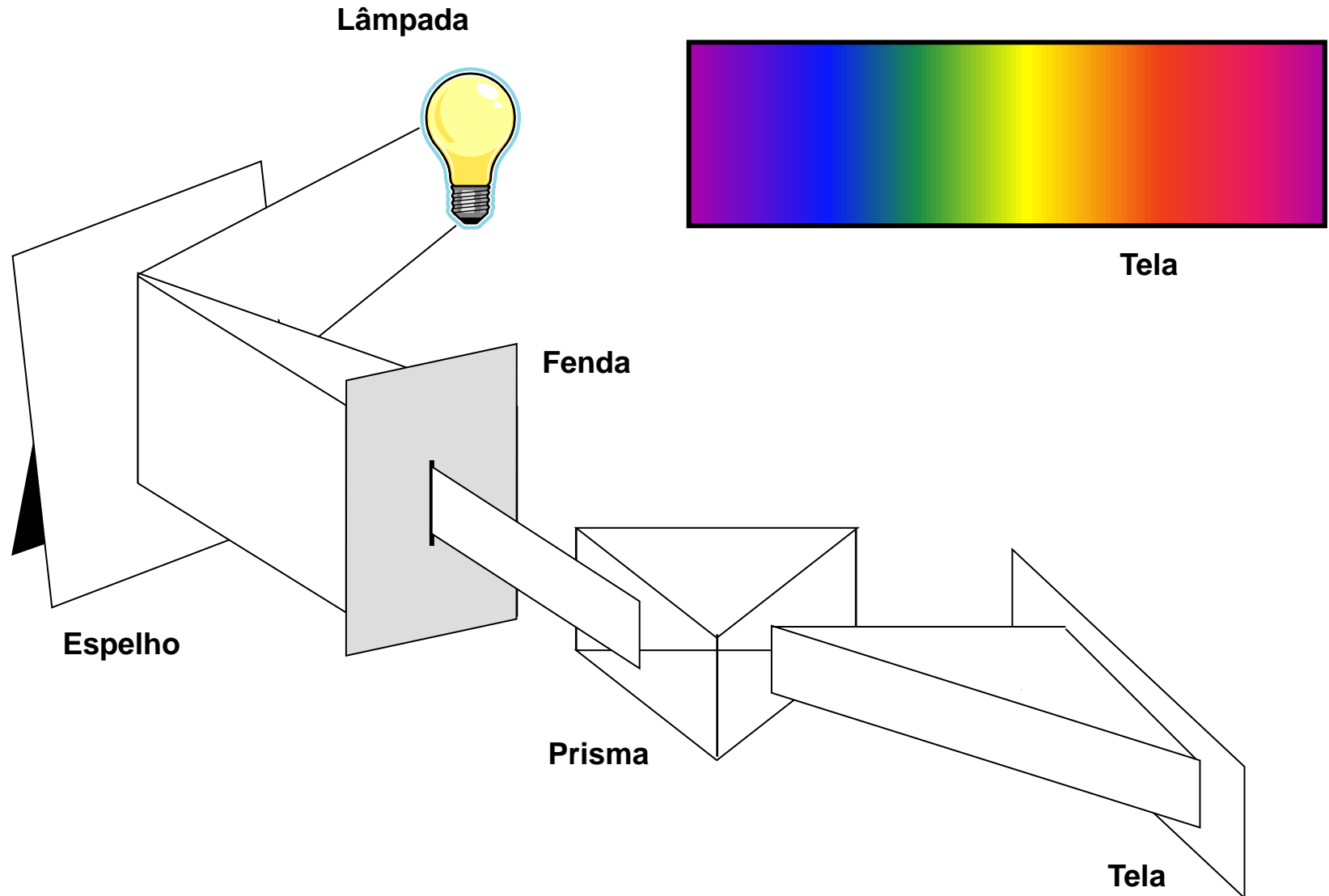


Kirchhoff e Bunsen descobrem que cada elemento apresenta uma série de linhas diferentes.

Exemplos:

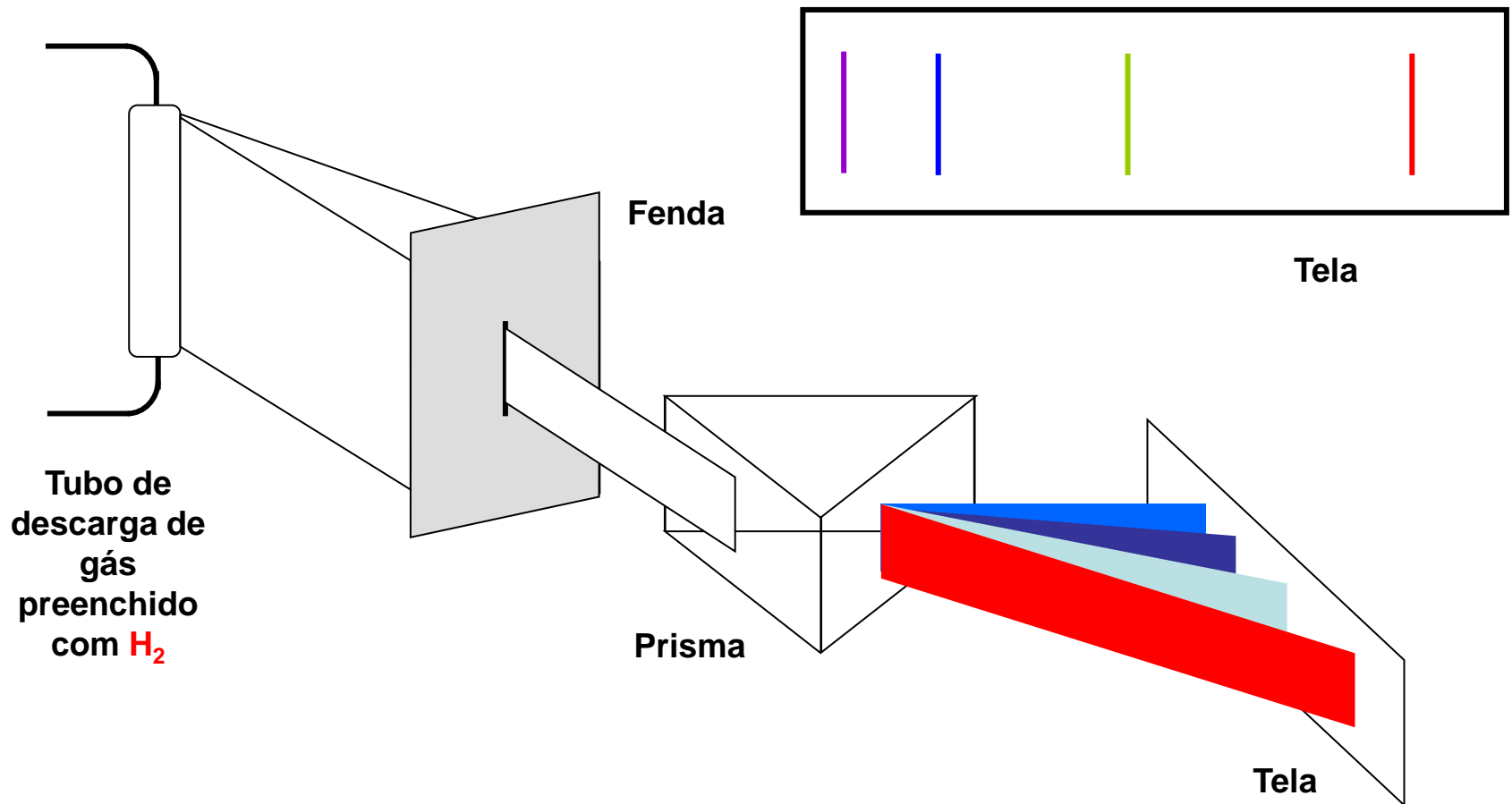
Oxigênio, Vermelho
Sódio, Amarelo
Hidrogênio, Verde
Ferro, Azul
Cálcio, Violeta

Espectro da radiação eletromagnética (Revisão)



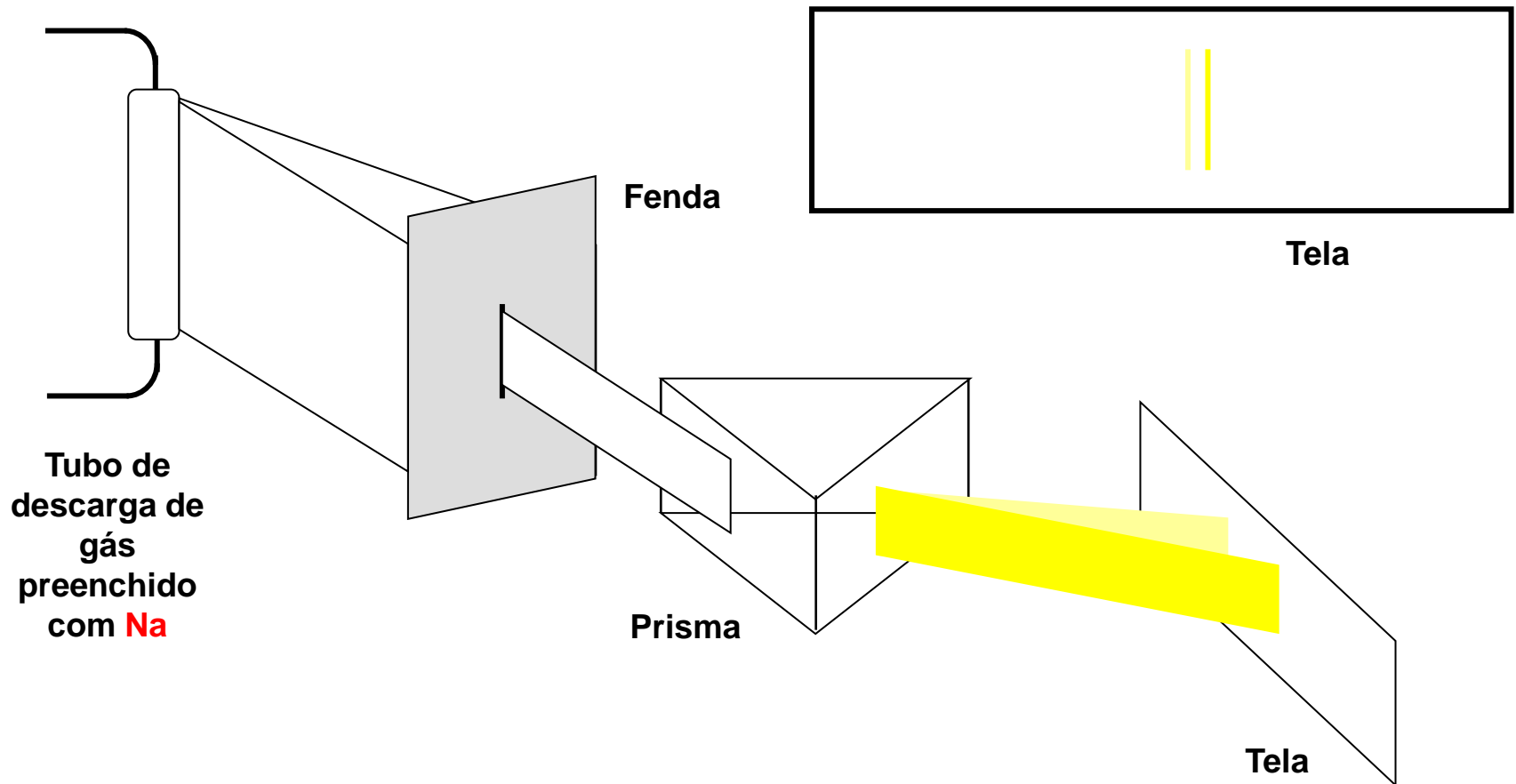
Emissão atômica

- Cada átomo, quando submetido à altas temperaturas ou a uma descarga elétrica, emite radiação eletromagnética em frequências características ou cada átomo apresenta um espectro característico

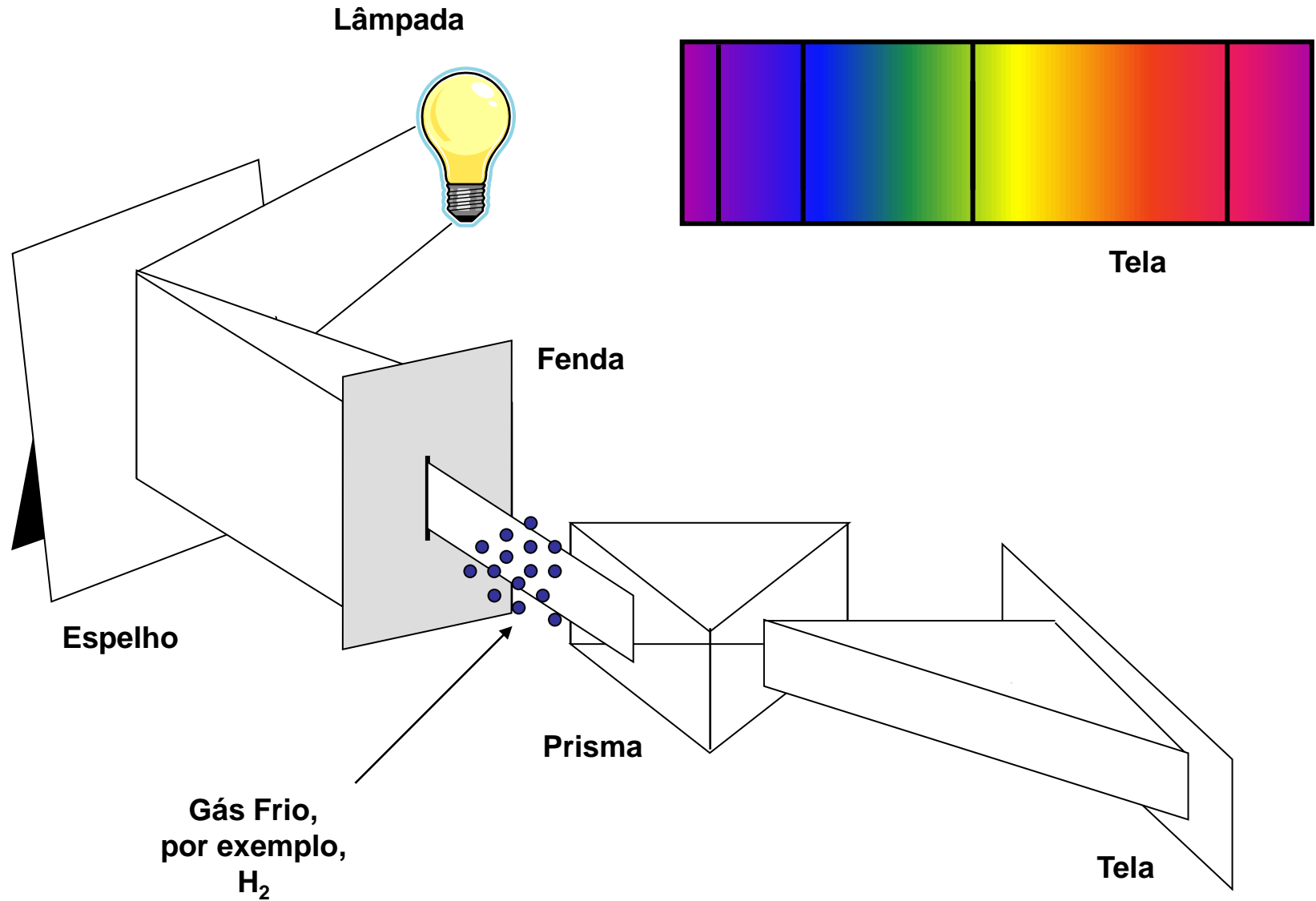


Emissão atômica

- Cada átomo, quando submetido à altas temperaturas ou a uma descarga elétrica, emite radiação eletromagnética em frequências características ou cada átomo apresenta um espectro característico



Emissão atômica

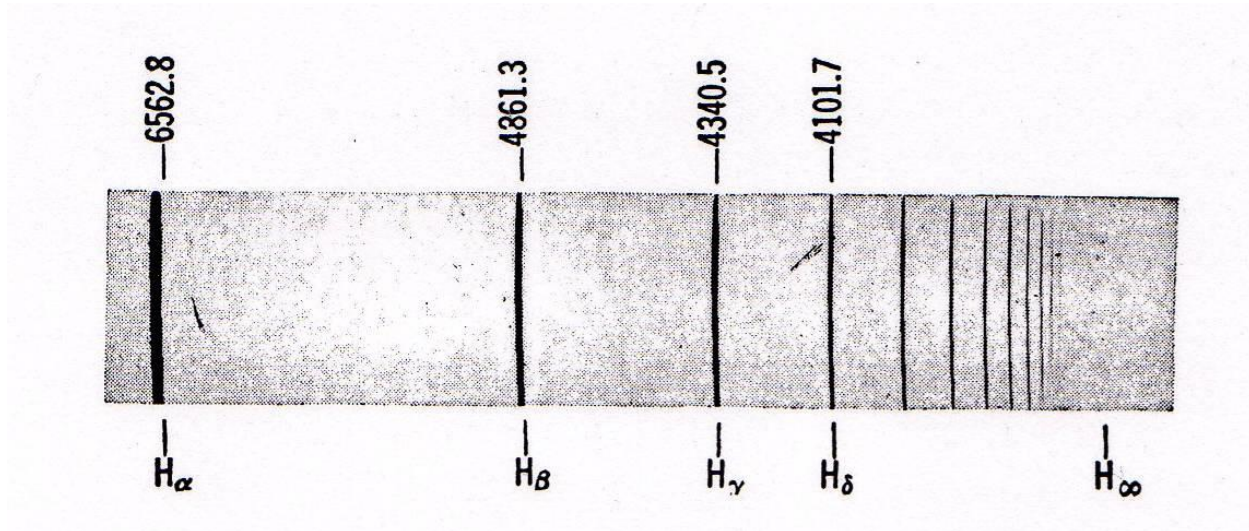


Leis de Kirchhoff

- 1) Um corpo opaco quente, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo.
- 2) Um gás transparente produz um espectro de linhas de emissão. O número e a posição das linhas depende dos elementos químicos presentes no gás.
- 3) Se um espectro contínuo passar por um gás à temperatura mais baixa, o gás frio provoca o aparecimento de linhas escuras na tela. O número e a posição destas linhas depende também dos elementos químicos presentes no gás.

Emissão atômica

- O espectro atômico é característico dos átomos envolvidos. Dessa forma, é razoável suspeitar que o espectro atômico depende da distribuição eletrônica do átomo.
- Cientistas buscavam encontrar um padrão nos comprimento de onda (ou frequência) das linhas atômicas no espectro do hidrogênio.



Espectro de emissão do átomo de hidrogênio na região do visível e ultravioleta próximo. A letra H_x representa a posição da radiação.

Balmer (1885)

- Mostrou que a frequência da radiação emitida pelo átomo de hidrogênio na região do visível / ultravioleta-próximo depende de $1/n^2$.

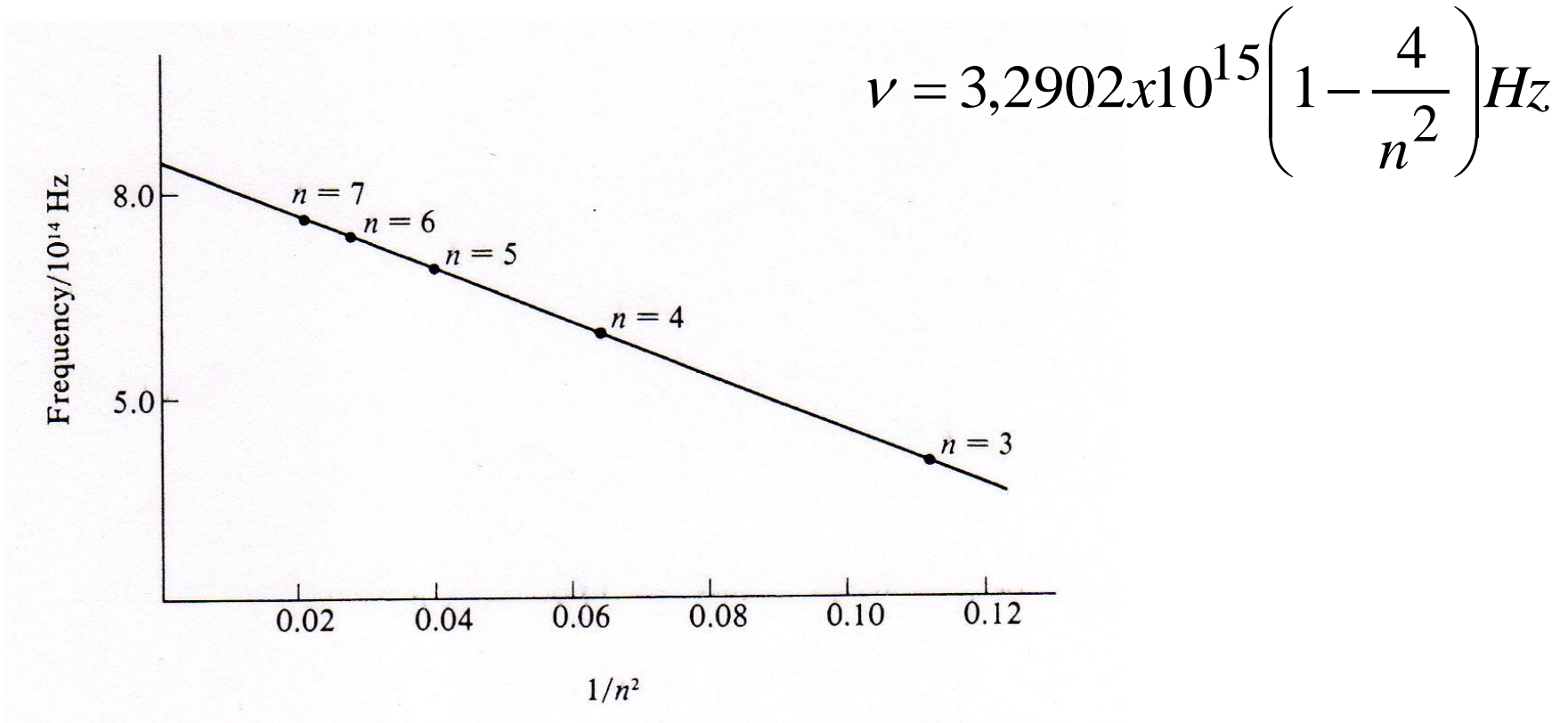


Gráfico da frequência da radiação emitida pelo átomo de hidrogênio contra $1/n^2$ ($n = 3, 4, 5, \dots$).

Balmer (1885)

$$\left(\frac{\text{c}}{\text{Hz}}\right) \quad \nu = 3,2902 \times 10^{15} \left(1 - \frac{4}{n^2}\right) \text{Hz} \quad \left(\frac{\text{c}}{\text{Hz}}\right)$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 109680 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \text{cm}^{-1}$$

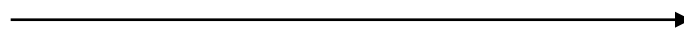
(Número de onda)

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$$

Para valor de n muito altos,

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 109680 \left(\frac{1}{2^2}\right) \text{cm}^{-1} = 2,742 \text{cm}^{-1}$$

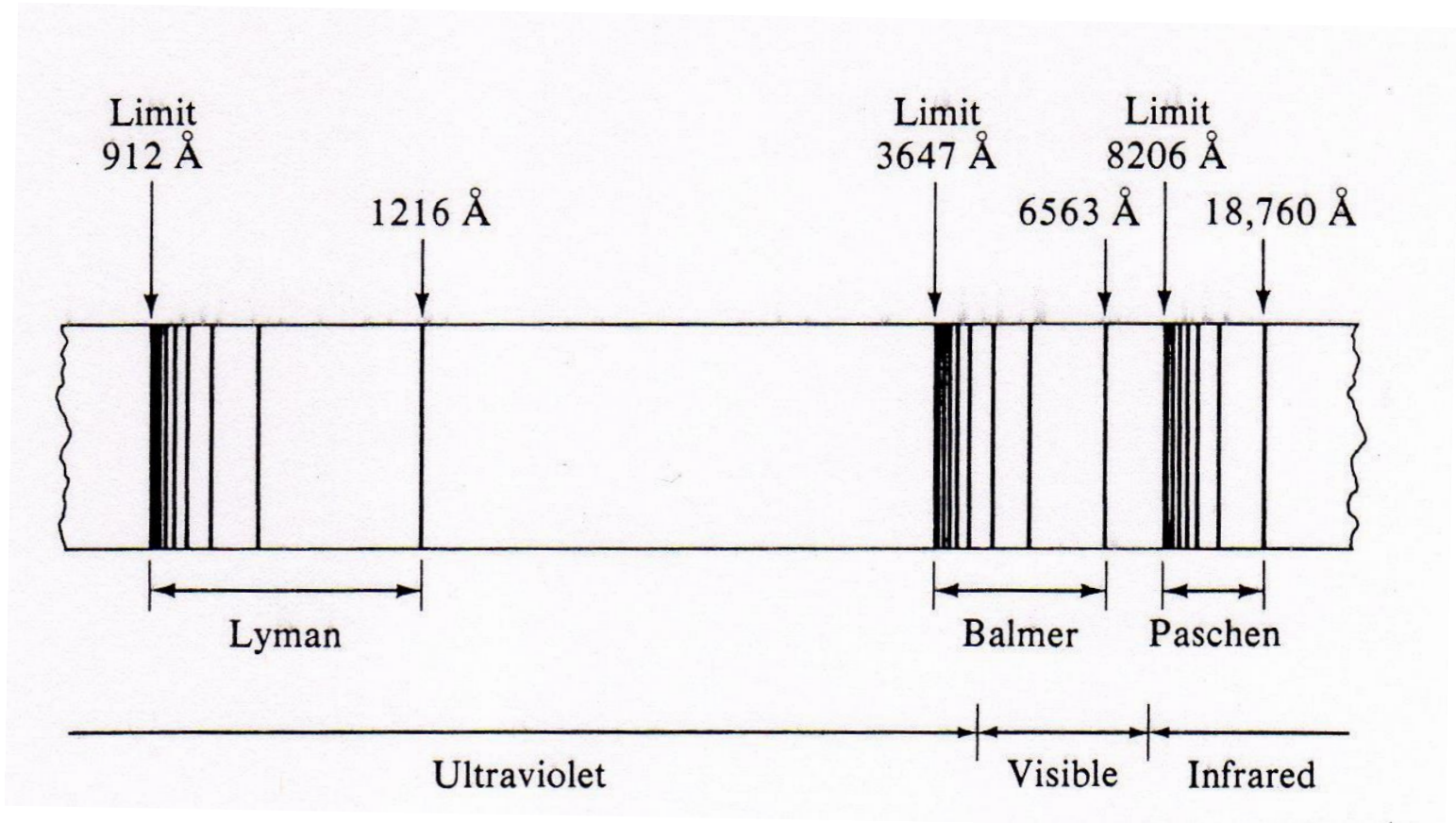
$$\lambda = 3647 \text{ \AA}$$



Limite da Série

Séries de Lyman (1906) e Paschen (1908)

- Entretanto, existem outras linhas no espectro do átomo de hidrogênio em outras regiões (Ultravioleta e Infravermelho)



- Outras séries descobertas: Séries de Bracket (1922), Pfund (1924) e Humphreys (>1924).

Johannes Rydberg (1888)

- Generalizou a fórmula de Balmer para levar em consideração todas as linhas observadas no espectro do hidrogênio pelos outros pesquisadores.

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 109680 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{cm}^{-1} \quad \text{Balmer}$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 109680 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \text{cm}^{-1} \quad (n_2 > n_1)$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \text{cm}^{-1}$$

R_H , constante
de Rydberg,
 109680 cm^{-1} .

Johannes Rydberg (1888)

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \text{cm}^{-1}$$

Nome	n_1	n_2	Região do espectro eletromagnético
Lyman	1	$n = 2, 3, 4, \dots$	Ultravioleta
Balmer	2	$n = 3, 4, 5, \dots$	Visível
Paschen	3	$n = 4, 5, 6, \dots$	Infravermelho
Bracket	4	$n = 5, 6, 7, \dots$	Infravermelho
Pfund	5	$n = 6, 7, 8, \dots$	Infravermelho
Humphreys	6	$n = 7, 8, 9, \dots$	Infravermelho

Relembrando os modelos atômicos

Dalton:
"Bola de bilhar"



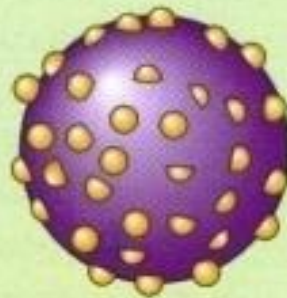
O átomo é uma esfera maciça, indivisível, neutra.

1803



J. Dalton (1766-1844)

Thomson:
"Pudim de passas"



O átomo é uma esfera maciça, positiva com elétrons encravados nela.

1897



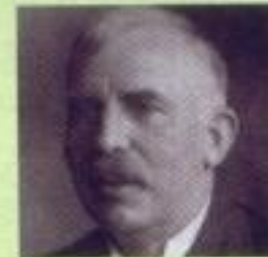
J. J. Thomson (1856-1940)

Rutherford:
"Modelo planetário"



O átomo tem um núcleo positivo e muito pequeno ao redor do qual giram os elétrons.

1911



E. Rutherford (1871-1937)

Linha do tempo

A horizontal orange arrow pointing to the right, indicating the progression of time.

Problemas com a Física Clássica

- Fatos que a Física Clássica não podia explicar
 - Espectro do corpo negro;
 - Efeito fotoelétrico;
 - Observação de linhas nos espectros atômicos;
 - A estrutura nuclear do átomo;
 - A natureza da luz.

Modelo atômico de Rutherford

- Voltemos a experiência de Rutherford
- Experimento onde analisou-se a existência do núcleo atômico.
- O núcleo era muito massivo e sua massa muito maior do que a massa eletrônica.
- Isto foi observado por meio do espalhamento de partículas α , que basicamente são átomos de He com dois prótons e dois nêutrons sem elétrons na eletrosfera.

Inconsistência com a teoria eletromagnética

- Elétrons em órbita circular deveriam irradiar continuamente ondas eletromagnéticas até cair no núcleo.
- Colapso atômico.
- A física clássica não conseguia explicar este fenômeno
- Era necessário uma nova teoria.
- **Modelo atômico de Bohr.**



Modelo Atômico de Bohr (1913)

- Foi desenvolvido visando explicar o elétrons orbitando em torno do núcleo.
- Pode-se fazer uma analogia macroscópica com o movimento dos planetas em torno do sol.
- Também para o sistema solar não há colapso dos planetas, ou seja, eles não caem dentro do Sol.
- Diferença básica: movimento de corpos celestes é regido pela mecânica clássica, e o movimento dos elétrons em torno do núcleo é regido pela mecânica quântica.



Culver Pictures

Niels Bohr (1885-1962)

Postulados de Bohr

- 1-) O elétron move-se em torno do núcleo atômico sob a influência da força eletrostática (Coulombiana) entre o elétron e o núcleo e obedece as leis da mecânica clássica.
- 2-) Ao contrário das infinitas órbitas do regime clássico, só é possível o elétron mover-se em órbitas no qual o momento angular orbital L é um múltiplo inteiro da constante de Planck dividido por 2π

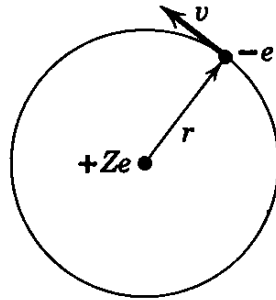
$$L = \frac{n\hbar}{2\pi} = n\hbar$$

- 3-) Um elétron em uma órbita definida não radia energia eletromagnética. Então a energia total E permanece constante
- 4-) Radiação eletromagnética é emitida se um elétron movendo-se inicialmente em uma órbita de energia E_i se move para uma órbita de energia E_f . A energia do fóton emitido é dada por:

$$h\nu = E_i - E_f$$

Energia para os estados estacionários do átomo de hidrogênio

1-) Cenário: movimento do elétron em torno do núcleo.



e – carga elétrica elementar
 v – velocidade do elétron
 r – raio da órbita
 Z – número atômico
 ϵ_0 – permissividade elétrica no vácuo

2-) Temos a força que mantém o elétron 'ligado' ao núcleo que é a força eletrostática e força que mantém o movimento em uma órbita circular que é a força centrípeta. Para manter-se a condição de estabilidade orbital Força eletrostática = força centrípeta.

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} \quad F_c = m \frac{v^2}{r}$$
$$F_c = F_e$$
$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}$$

Energia para os estados estacionários do átomo de hidrogênio

3-) O momento angular clássico

$$L = mrv$$

4-) Considerando o momento quantizado=momento angular clássico, pode-se determinar a velocidade do elétron na órbita, a qual dependerá do valor de n .

$$mrv = n\hbar \quad v = \frac{n\hbar}{mr}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

5-) Da equação de igualdade entre a força centrípeta e a força elétrica, temos que

$$Ze^2 = 4\pi\epsilon_0 mv^2 r = 4\pi\epsilon_0 mr \left(\frac{n\hbar}{mr} \right)^2 = 4\pi\epsilon_0 \frac{n^2 \hbar^2}{mr}$$

Energia para os estados estacionários do átomo de hidrogênio

- Pode-se então obter o raio da órbita do elétron em torno do núcleo

$$r = 4\pi\epsilon_0 \frac{n^2 \hbar^2}{mZe^2}$$

- Fazendo o cálculo para a primeira órbita eletrônica do átomo de hidrogênio (estado fundamental), $Z=1$ e $n=1$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} C^2 / N.m$$

$$\hbar = 1,054 \times 10^{-34} J.s$$

$$m = 9,11 \times 10^{-31} kg$$

$$e = 1,60 \times 10^{-19} C$$

$$r = 5,29 \times 10^{-11} m \approx 0,53A$$

raio de Bohr

Energia para os estados estacionários do átomo de hidrogênio

- A energia total é dada pela soma da energia cinética + energia potencial (eletrostática)

$$E = K + V$$

- A energia cinética é dada por:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 2r}$$

- A energia potencial eletrostática é dada por:

$$V = - \int_r^\infty \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Energia para os estados estacionários do átomo de hidrogênio

- A energia total é dada por:

$$E = K + V = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 2r} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 2r} = -K$$

- Usando $r = 4\pi\epsilon_0 \frac{n^2 \hbar^2}{mZe^2}$

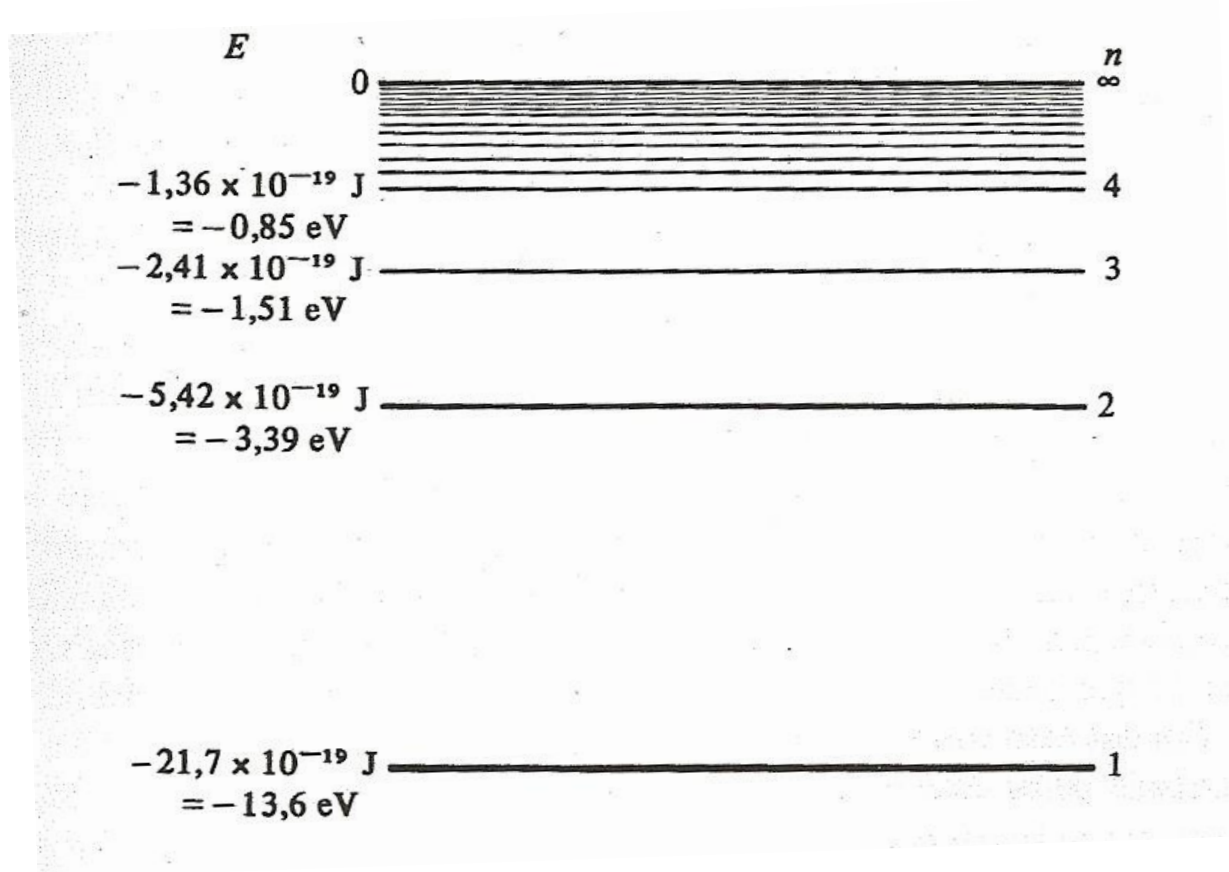
- Temos finalmente que

$$E = -\frac{mZ^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

A quantização no momento angular orbital do elétron implica na quantização de sua energia total

Níveis de energia do átomo de hidrogênio

- Pode-se a partir a equação para os níveis de energia um diagrama e energias para o átomo de hidrogênio



Frequência da radiação emitida

- Voltando a equação de energia para o átomo de hidrogênio

$$E = -\frac{mZ^2e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Temos pelo quarto postulado de Bohr

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{mZ^2e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Frequência de emissão do fóton quando o elétron transita de um estado de maior para outro de menor energia

Determinação do vetor de onda

- Definindo o número de onda

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

- Obtém-se então a equação para o número de onda

$$\bar{\nu} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{4\pi\hbar^3 c} Z^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$$\bar{\nu} = R_\infty Z^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$



R_∞ é uma constante (será posteriormente discutida)

Aspectos principais do modelo de Bohr

1-) As previsões essenciais do modelo de Bohr estão contidas nas equações de energia e do número de onda.

$$E = -\frac{mZ^2e^4}{(4\pi\epsilon_0)^22\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \bar{\nu} = R_\infty Z^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

2-) O estado normal de um átomo é quando o elétron tem menor energia ou $n=1$ (estado fundamental).

3-) Em uma descarga elétrica, ou algum outro processo, o átomo recebe energia devido a colisões, etc. O elétron deve sofrer uma transição para um estado de maior energia, ou estado excitado $n>1$.

4-) Obedecendo a lei natural dos sistemas físicos, o átomo tenderá a voltar ao seu estado de menor energia (estado fundamental).

5-) Em um grande número de processos de excitação e desexcitação, todas as possíveis transições ocorrem sendo emitido o espectro completo.

Descrição das séries do espectrais do átomo de hidrogênio

- Para o hidrogênio $Z=1$.

$$\bar{\nu} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

- Supondo $n_f = 2$ e $n_i > n_f$.

$$\bar{\nu} = R_{\infty} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

- Comparando com a série de Balmer estudada anteriormente

$$\bar{\nu} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

As duas fórmulas são
idênticas se $R_H = R_{\infty}$

Determinação da Constante de Rydberg

- Pelas Fórmulas espectrais: Lyman, Paschen, Balmer, etc.

$$R_H = 1,09680 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

- Pelo modelo de Bohr

$$R_\infty \approx 1,09680 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

- O modelo de Bohr concorda com a série de Balmer, e com todas as outras séries espectroscópicas para o átomo de hidrogênio (o que será mostrado na sequência)

Descrição das séries espectroscópicas do hidrogênio pelo modelo de Bohr

- Fórmula geral para o número de onda dada pelo modelo de Bohr

$$\bar{\nu} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Séries Espectroscópicas

Lyman $n_f = 1, n_i = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$

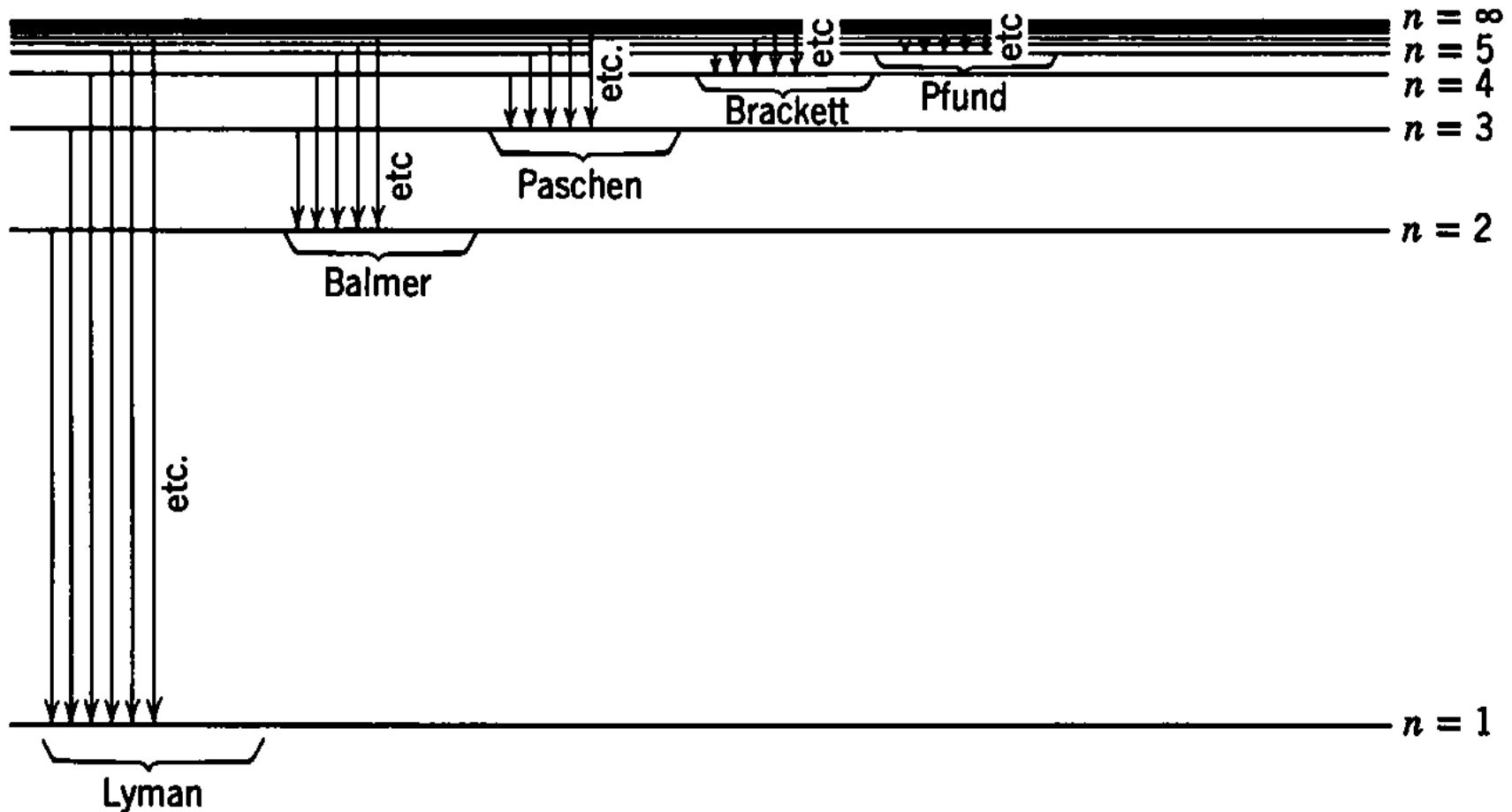
Balmer $n_f = 2, n_i = 3, 4, 5, 6, 7, \dots$

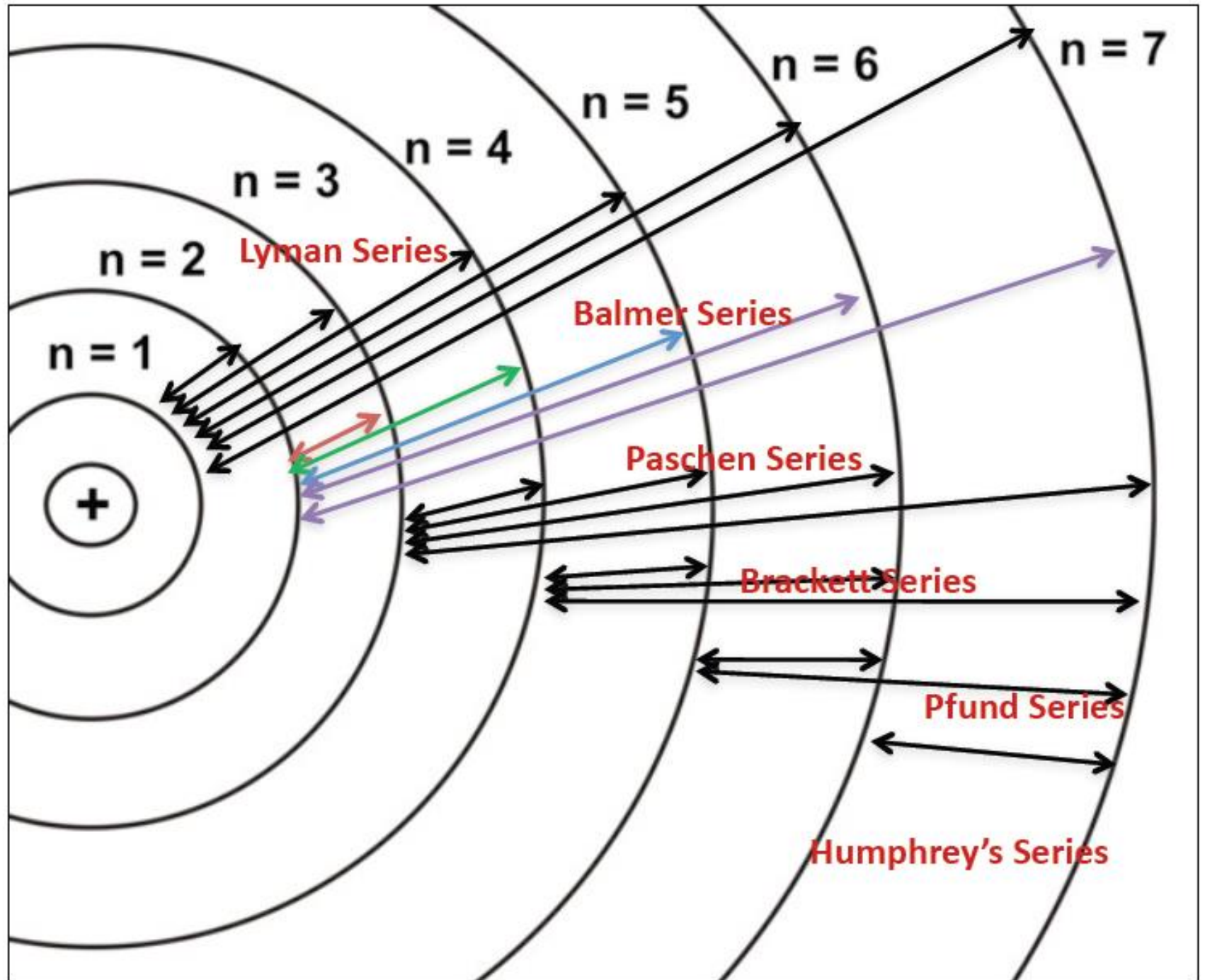
Paschen $n_f = 3, n_i = 4, 5, 6, 7, 8, \dots$

Brackett $n_f = 4, n_i = 5, 6, 7, 8, 9, \dots$

Pfund $n_f = 5, n_i = 6, 7, 8, 9, 10, \dots$

Transições energéticas para as séries espectroscópicas





Considerações sobre o modelo de Bohr

- Sucesso na descrição das linhas espectroscópicas do átomo de hidrogênio.
- Raio da órbita do hidrogênio $0,53 \text{ \AA}$, concorda com o valor previsto para o diâmetro da molécula de hidrogênio $2,2 \text{ \AA}$.
- Falhas da teoria de Bohr, não conseguia explicar a intensidades relativas das linhas espectrais, não conseguia explicar as linhas espectrais de átomos mais complexos (velha mecânica quântica).
- Aqui ainda utilizou-se algumas considerações clássicas, como a lei de Coulomb (eletrostática) e as leis de Newton que foram usadas para valores discretos do momento angular.
- Dificuldades começaram a ser superadas na década de 20 do século passado com de Broglie, Schroedinger, Heisenberg, Pauli, Dirac e vários outros cientistas.

Problemas com a Física Clássica

- **Fatos que a Física Clássica não podia explicar**
- **Observação de linhas nos espectros atômicos;**
 - **Espectro do corpo negro;**
 - **Efeito fotoelétrico;**
 - **A estrutura nuclear do átomo;**
 - **A natureza da luz.**

Modelos Atômicos- experimentos

Radiação Térmica

Radiação emitida por um corpo;

A temperaturas muito altas os corpos tem luminosidade própria;

90% da radiação térmica é invisível para nós;

Está na região do infravermelho do espectro eletromagnético;

Exemplo: aquecimento de uma barra de ferro.

Modelos Atômicos- experimentos

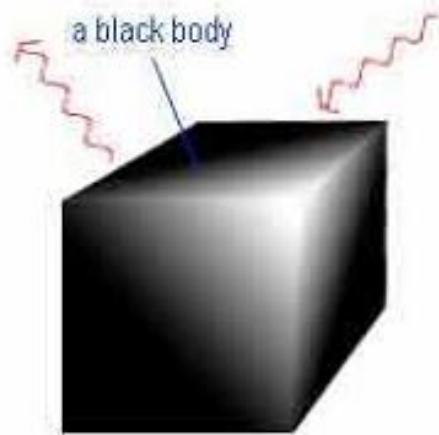
Radiação Térmica

- A forma detalhada do espectro da radiação térmica emitida por um corpo quente depende de algum modo da composição desse corpo;
- No entanto, a experiência nos mostra que há um tipo de corpo quente que emite espectros térmicos de caráter universal;
- Esses corpos são chamados corpos negros, isto é, corpos cujas superfícies absorvem toda a radiação térmica incidente sobre eles. Esses corpos não refletem luz e são negros.

Modelos Atômicos- experimentos

Radiação do corpo negro

O que é um corpo negro?

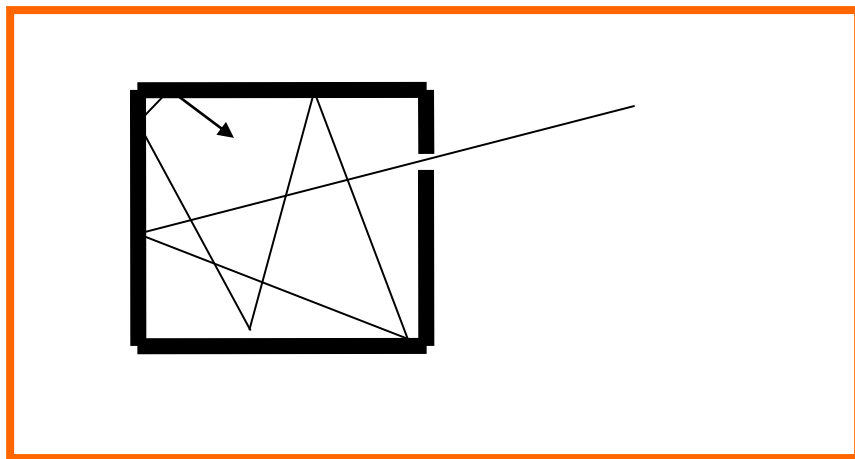


Created by team C007571, ThinkQuest 1 2000

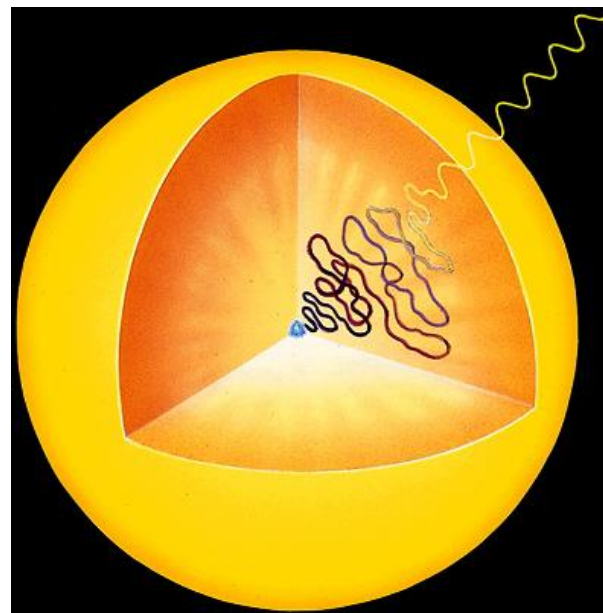


Corpo que absorve toda radiação que incide sobre ele.

Radiação de Corpo Negro



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

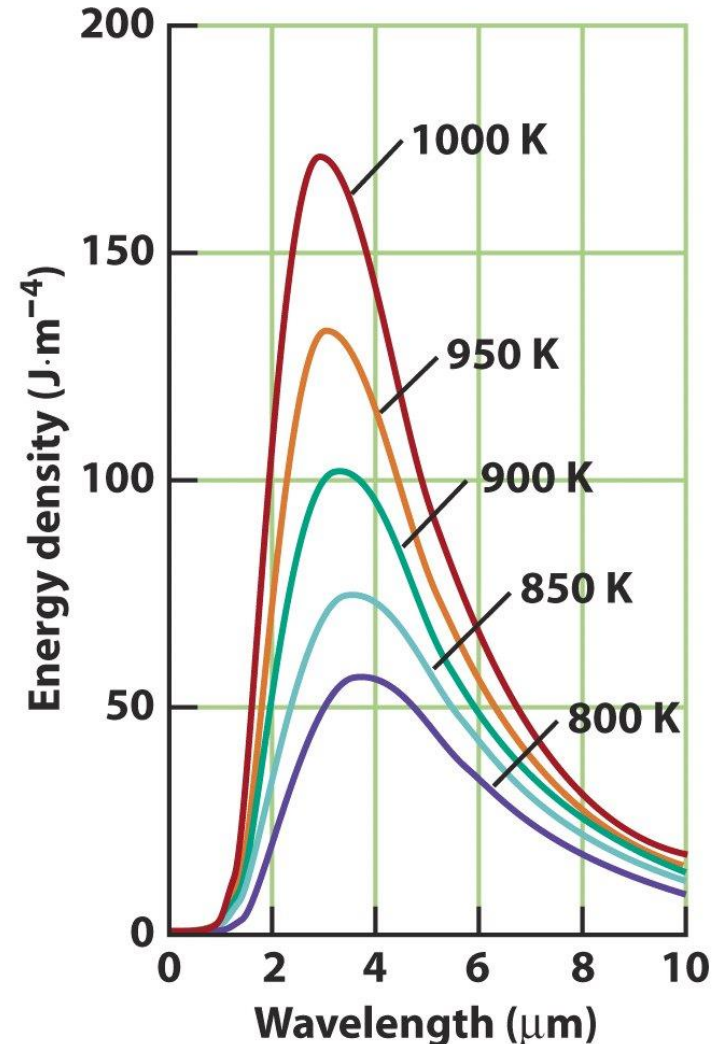


Aprisionamento de fótons numa atmosfera estelar.
© 1996 W. H. Freeman and Co., Discovering the Universe, 4th. Ed.

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.



Radiação de Corpo Negro

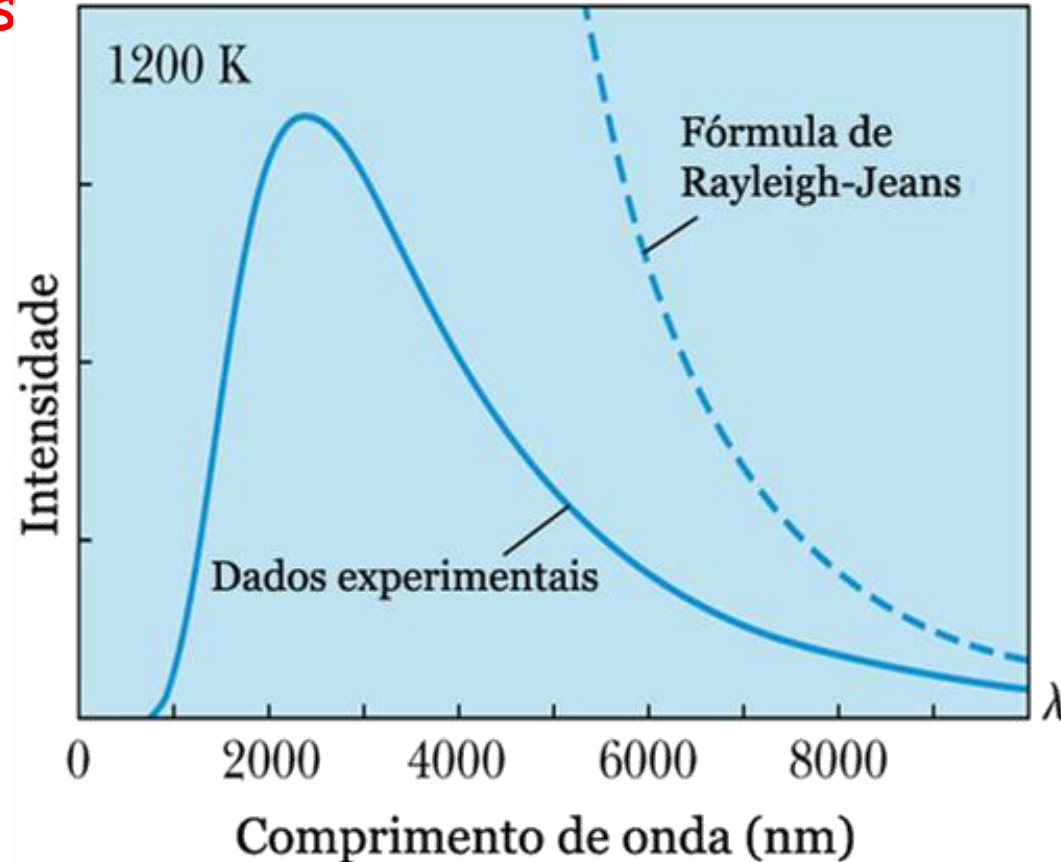
- O que realmente ocorre quando um objeto é aquecido a temperaturas cada vez mais altas é que, em princípio, a maior parte da energia é irradiada como infravermelho, em comprimentos de onda demasiadamente longos para que possamos enxergar. Após um determinado aquecimento o corpo começa a brilhar em vermelho visível incandescente e se o aquecimento continuar, teremos laranja, e azul esbranquiçado. Quanto mais quente o corpo, menor é o comprimento de onda que a maior parte de sua energia é irradiada.
- Ainda que um pouquinho da energia seja irradiada em comprimentos de onda maiores e menores, o pico de emissão de um corpo negro é centrado em uma faixa estreita de comprimento de onda, que depende apenas da temperatura.

Catástrofe do ultravioleta

Fórmula de Rayleigh-Jeans

Lord Rayleigh usou as teorias clássicas do eletromagnetismo e da termodinâmica para mostrar que a distribuição espectral de um corpo negro deveria ser:

$$I = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$



Para comprimentos de ondas grandes esta equação se ajusta aos resultados experimentais, mas para os comprimentos de onda curtos há uma discordância muito grande entre esta teoria e a experiência. Esta discordância é chamada de **catástrofe do ultravioleta**.

Lei de Stefan-Boltzmann

A potência total da radiação emitida (a área da curva) aumenta com a temperatura

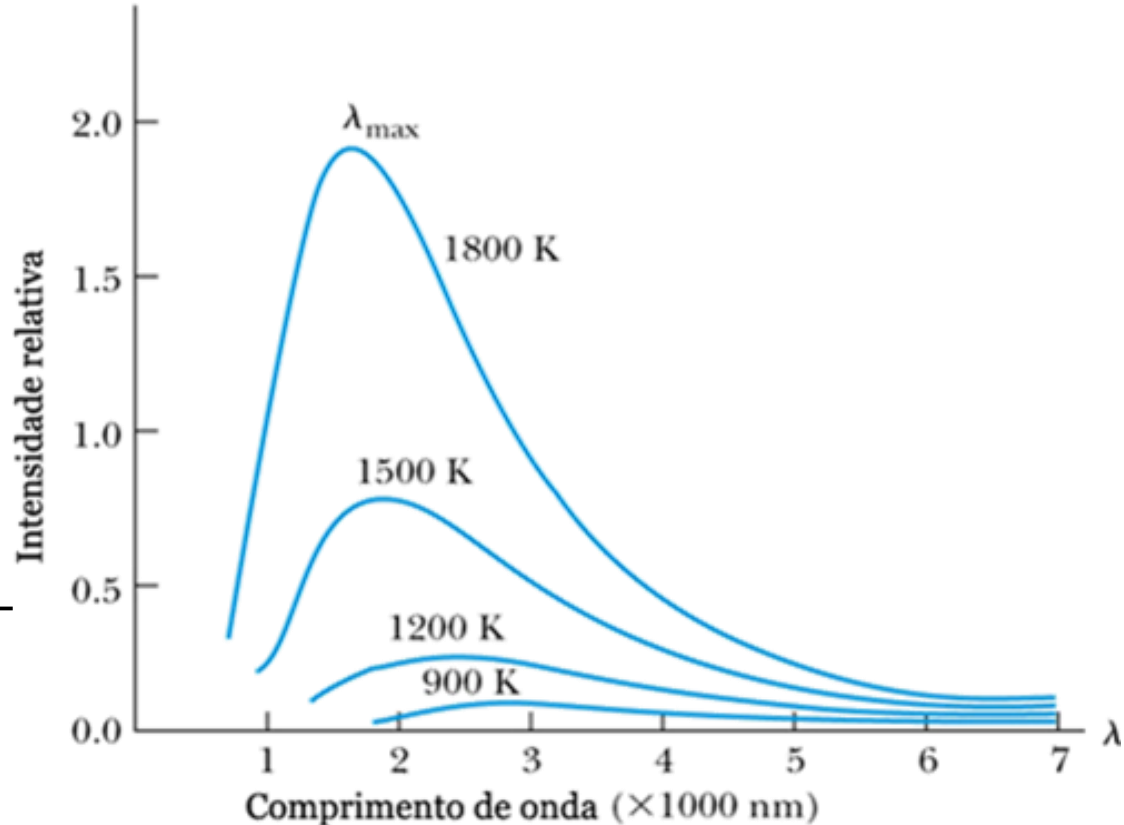
Emitância espectral

$I = \text{Potência} / \text{Área} \text{ (W/m}^2\text{)}$

$$I = \varepsilon \sigma T^4$$

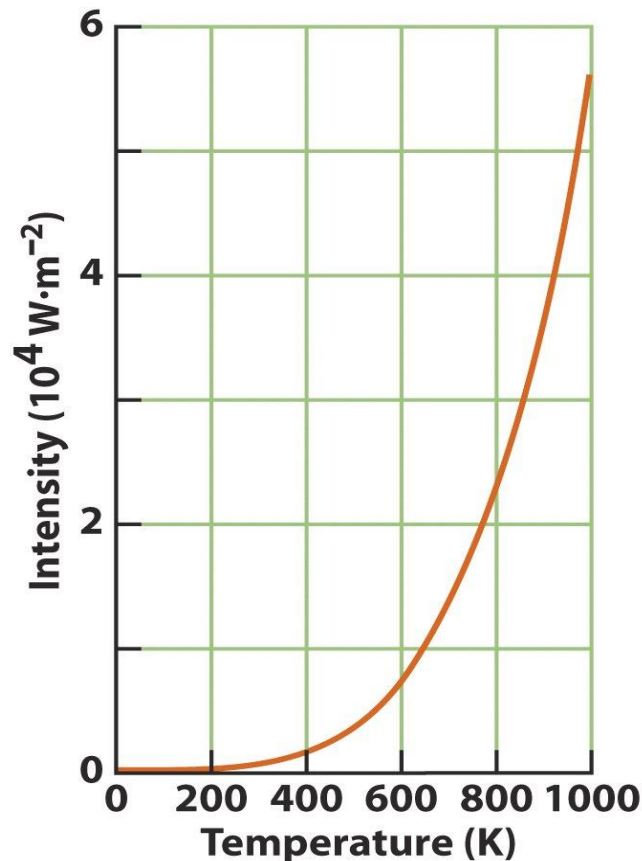
$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$\varepsilon = 1$, corpo negro



Lei de Stefan-Boltzmann

A potência total da radiação emitida (a área da curva) aumenta com a temperatura.



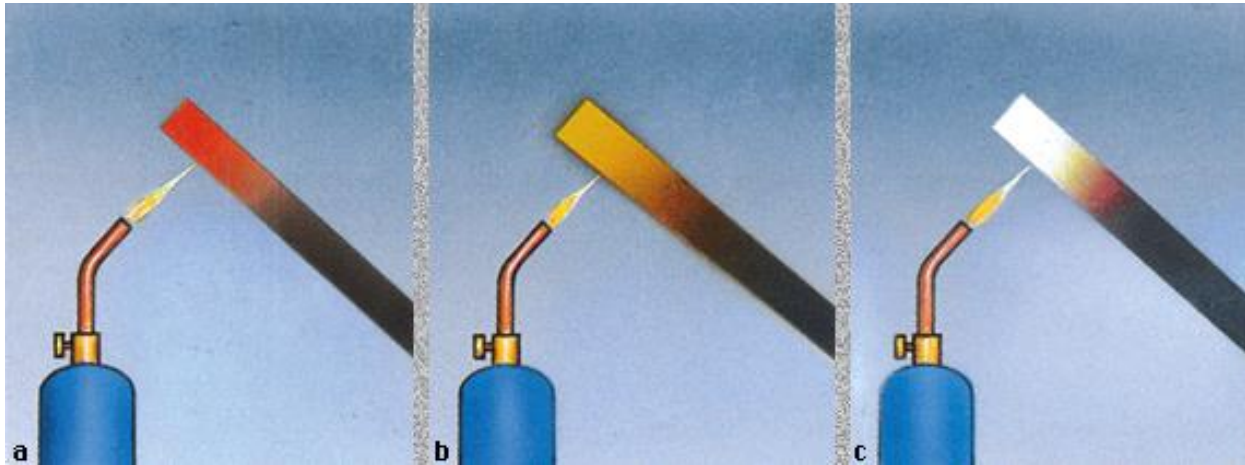
Potência emitida (watts)/
Área superficial (m²) =

$$= \sigma \times T^4$$

$$P = \sigma T^4 .$$

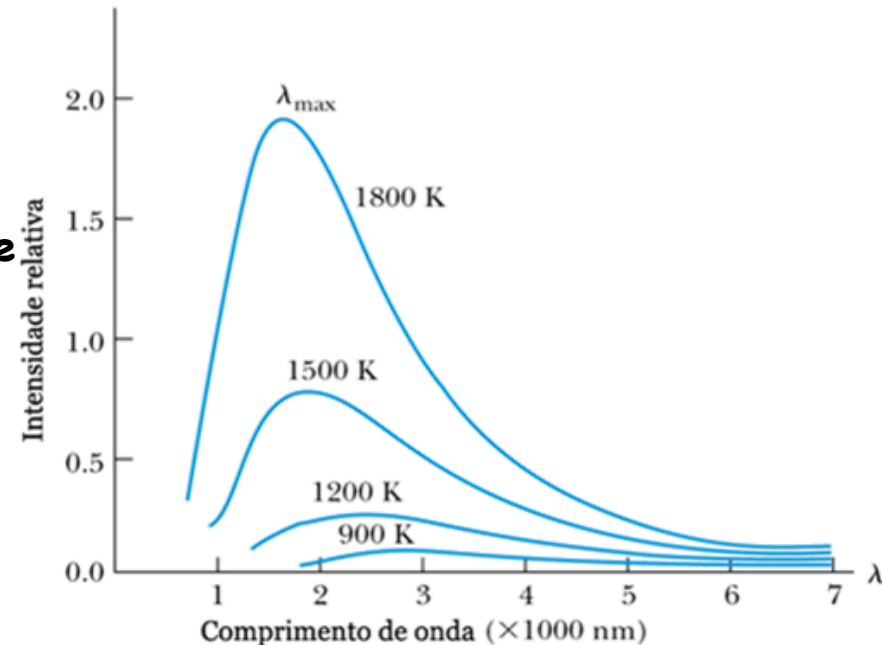
$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} .$$

Lei dos deslocamentos de Wien



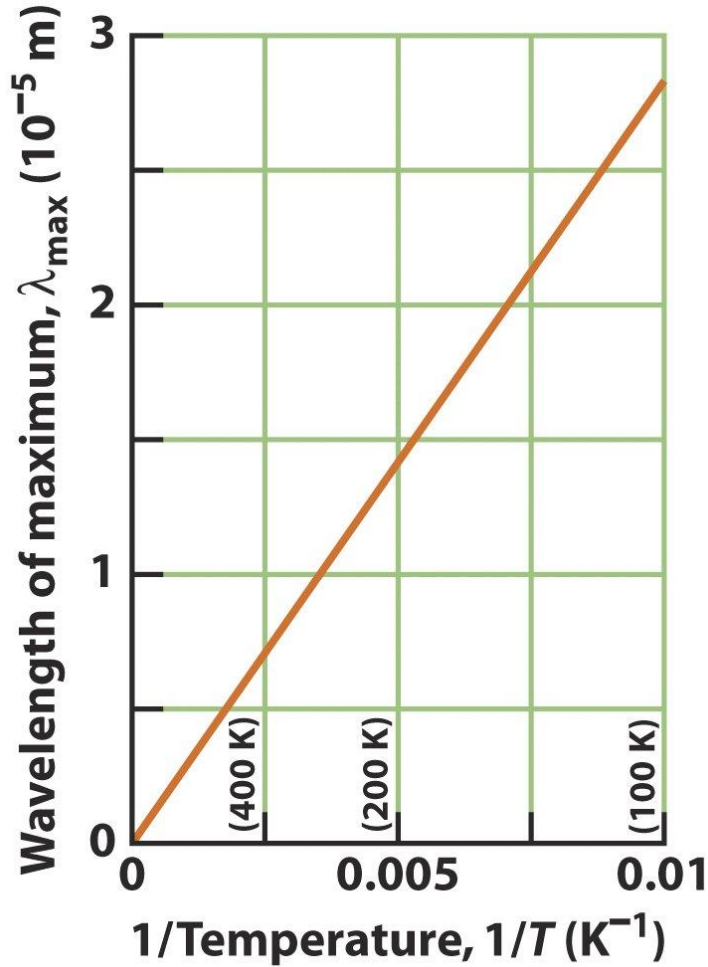
Wien (1864-1928) descobriu que a intensidade máxima da radiação de corpo negro desloca-se para comprimentos de onda menores (e frequências maiores) à medida que o corpo é aquecido. Essa lei pode ser expressa matematicamente como:

$$\lambda_{\max} T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$



Radiação de Corpo Negro

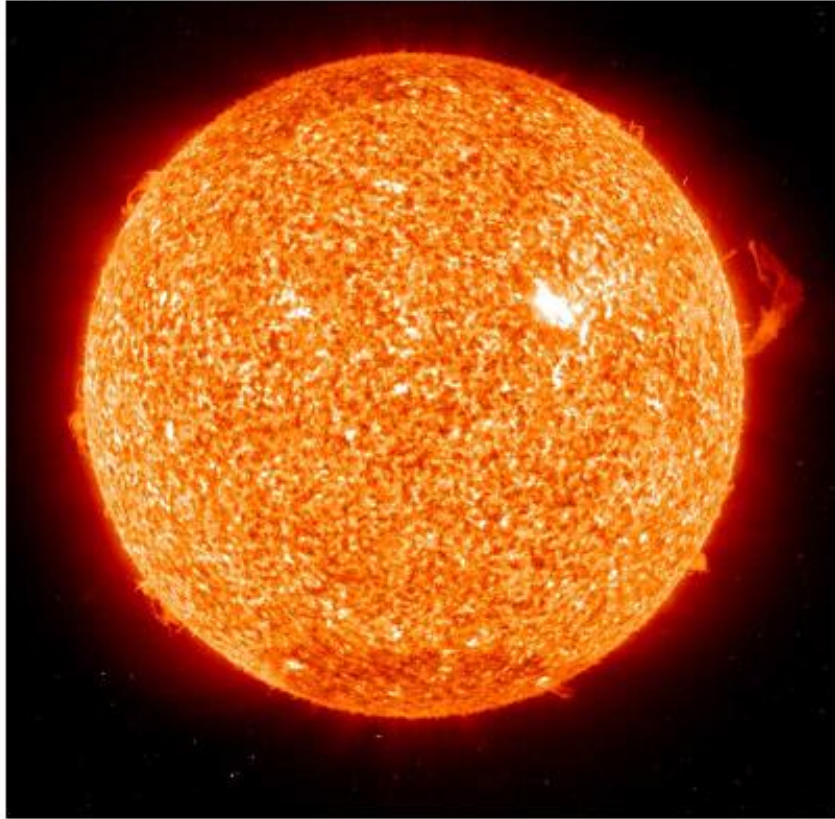
Lei de Wien



$$T \cdot \lambda_{\text{máx}} = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Radiação de Corpo Negro

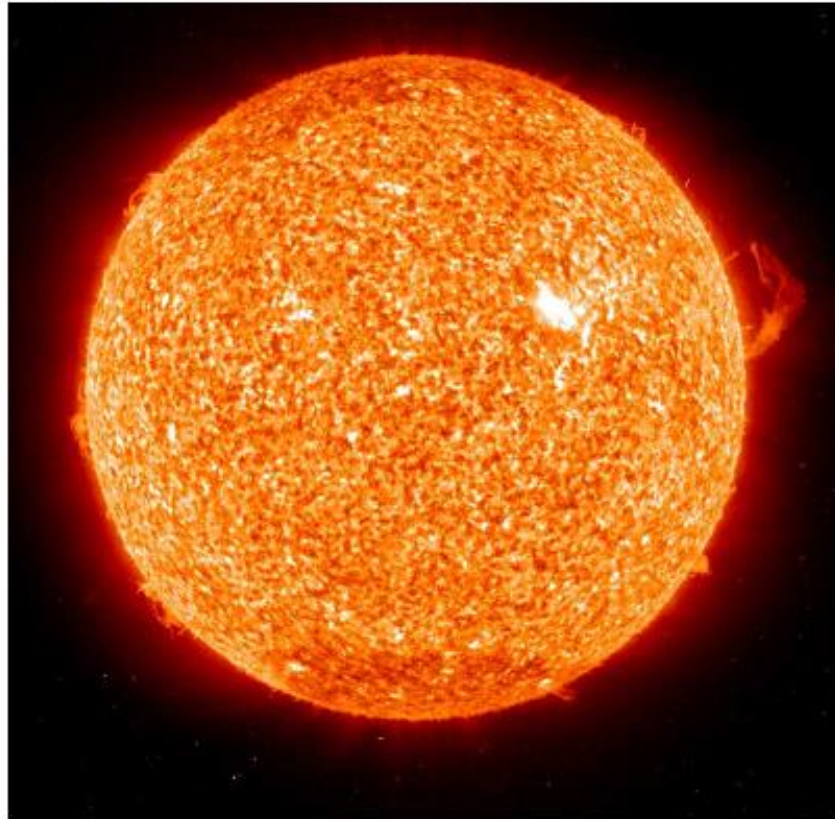
Aplique a lei de Wien para diferentes situações de corpos negros:



O sol tem uma temperatura superficial de 5800 K. Encontre o pico de seu espectro.

Radiação de Corpo Negro

Aplique a lei de Wien para diferentes situações de corpos negros:



O sol tem uma temperatura superficial de 5800 K. Encontre o pico de seu espectro.

$$\lambda_{max} = \frac{2.88 \times 10^6 \text{ nm K}}{5800 \text{ K}} = 500 \text{ nm} \quad (\text{luz visível})$$

Exercícios

- 1- Descobriu-se, em 1965, que o universo é atravessado por radiação eletromagnética com o máximo em 1.05 mm (na região das microondas). Qual é a temperatura do universo no "vácuo"?
- 2- Uma Gigante vermelha é uma estrela que está nos estágios finais de evolução. O comprimento de onda máximo médio da radiação é 700 nm, o que mostra que estão esfriando quando estão morrendo. Qual é a temperatura média da superfície das gigantes vermelhas?

Teoria de Planck

Foi Planck, em 1900 (prêmio Nobel em 1918), que resolveu o problema

-A resposta a esse problema foi dada por Max Planck, em 1900. Planck percebeu que o problema poderia ser resolvido se os objetos radiantes (átomos) só pudessem emitir (ou absorver) energia em determinadas quantidades fixas, que ele chamou de *quanta* (plural de *quantum*)

- A teoria de Planck resolveu o problema. Objetos frios não têm energia suficiente para produzir muitos quanta de alta frequência. Eles só conseguem irradiar energia na faixa de frequência em que a energia disponível em cada átomo seja comparável à dos quanta envolvidos na radiação

- Ele utilizou a estatística de Boltzmann para obter uma equação teórica que concordava com os resultados experimentais para todos os comprimentos de onda

-Se sentiu mal, pois utilizou apenas um artifício para resolver o problema! Mas sem embasamento físico!

Radiação de Corpo Negro

Quanta e Fótons

$$E = h\nu$$

h = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s)

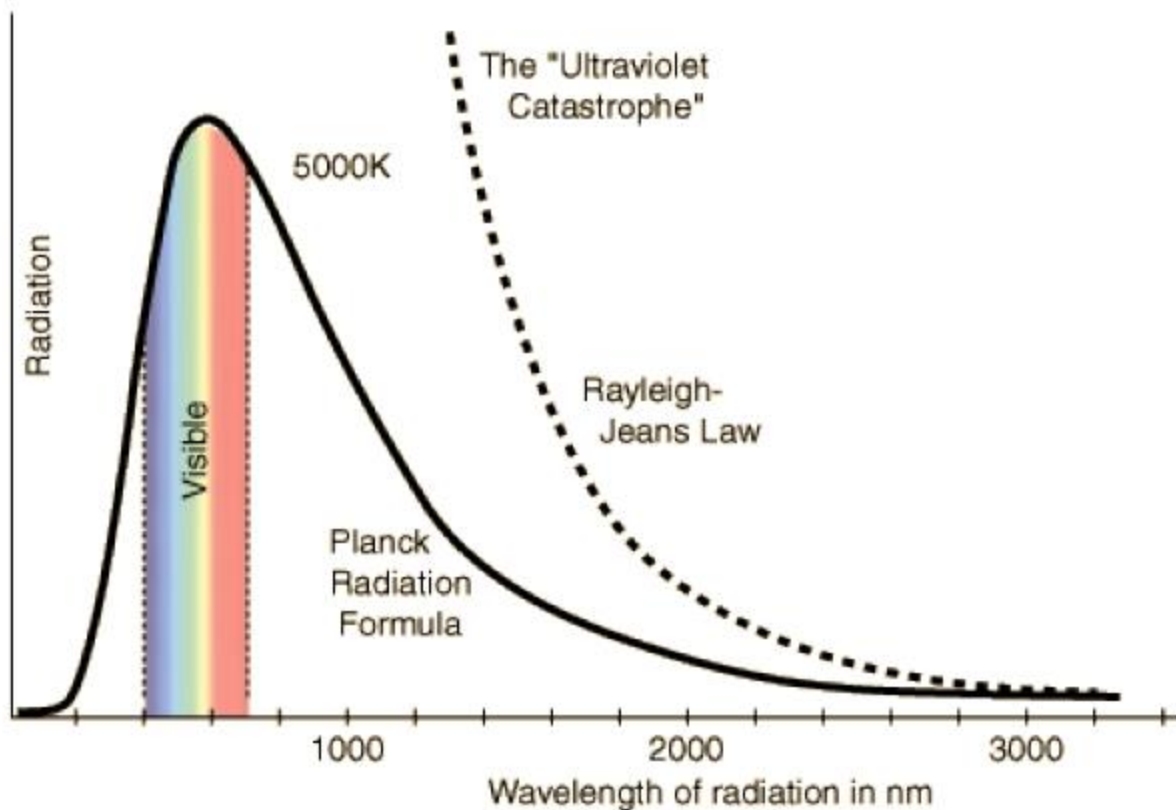
Hipótese de Planck: Ele propôs descrever a transferência de energia em termos de pacotes discretos. Planck teve de descartar a física clássica, que não restringe a quantidade de energia em termos de pacotes discretos.

Lei da Radiação de Planck:

$$d\rho = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) d\lambda$$

Radiação de Corpo Negro

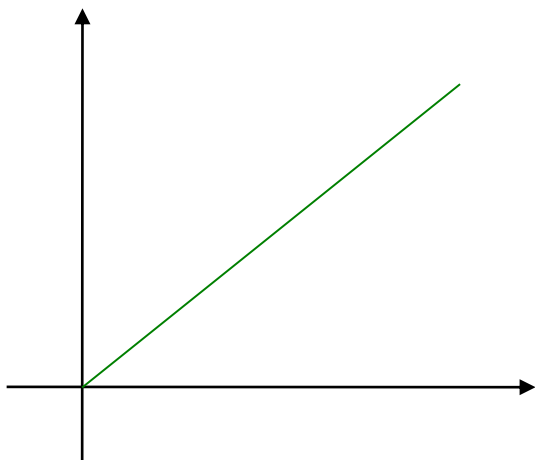
Fórmula de Planck



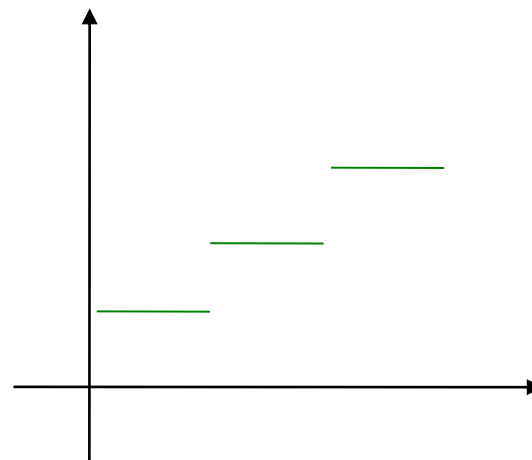
Radiação de Corpo Negro

Teoria de Planck (1900)

A energia de um sistema não é uma variável contínua. A energia somente pode assumir alguns valores específicos, ou seja, ela é quantizada.



CONTÍNUO



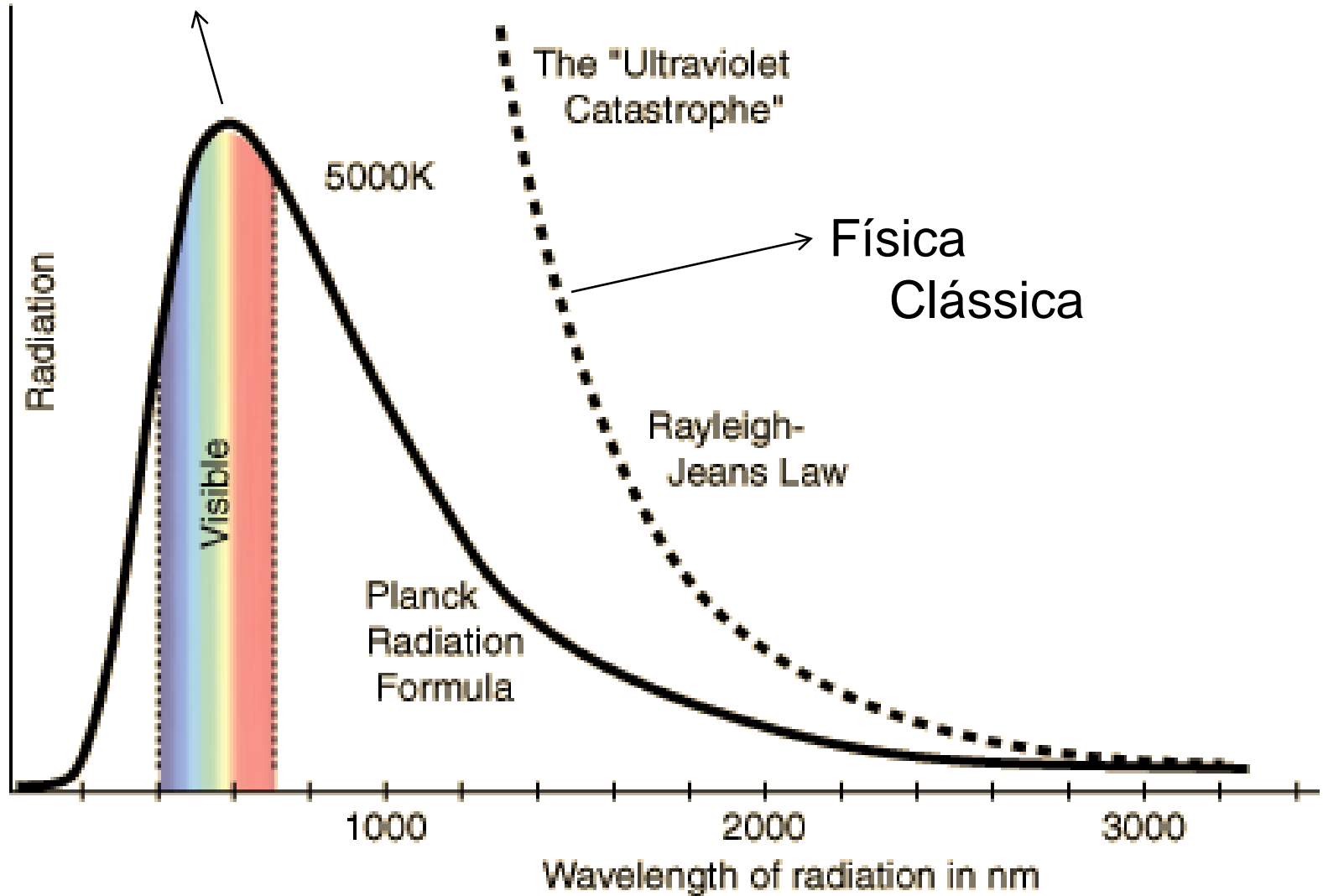
DISCRETO

Exercícios

1. Qual é a energia de um *quantum* de luz que tem um comprimento de onda de 11,592 Å?
2. Qual é a energia de um *quantum* de luz, cuja frequência é 20552 cm⁻¹?
3. (a) Quanta energia radiante é liberada, em watt/cm², por um forno elétrico com uma temperatura de 1000 K? (b) Se a área do forno for 250 cm², que potência, em watts, será emitida?
4. A temperatura do ferro derretido pode ser estimada pela lei de Wien. Se o ponto de fusão do ferro é 1540 °C, qual será o comprimento de onda (em nanômetros) que corresponde à intensidade máxima da radiação quando uma peça de ferro funde?
5. Descobriu-se, em 1965, que o universo é atravessado por radiação eletromagnética com o máximo em 1,05 nm (na região das microondas). Qual é a temperatura do universo?

Espectro da Radiação de Corpo Negro

Equação de Planck (abordagem quântica)

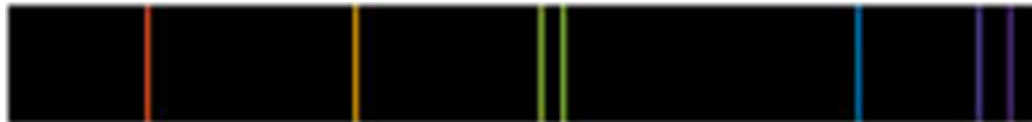


Fatos que a Física Clássica não podia explicar

–A estrutura do átomo (por que o elétron não “cai” no núcleo?)



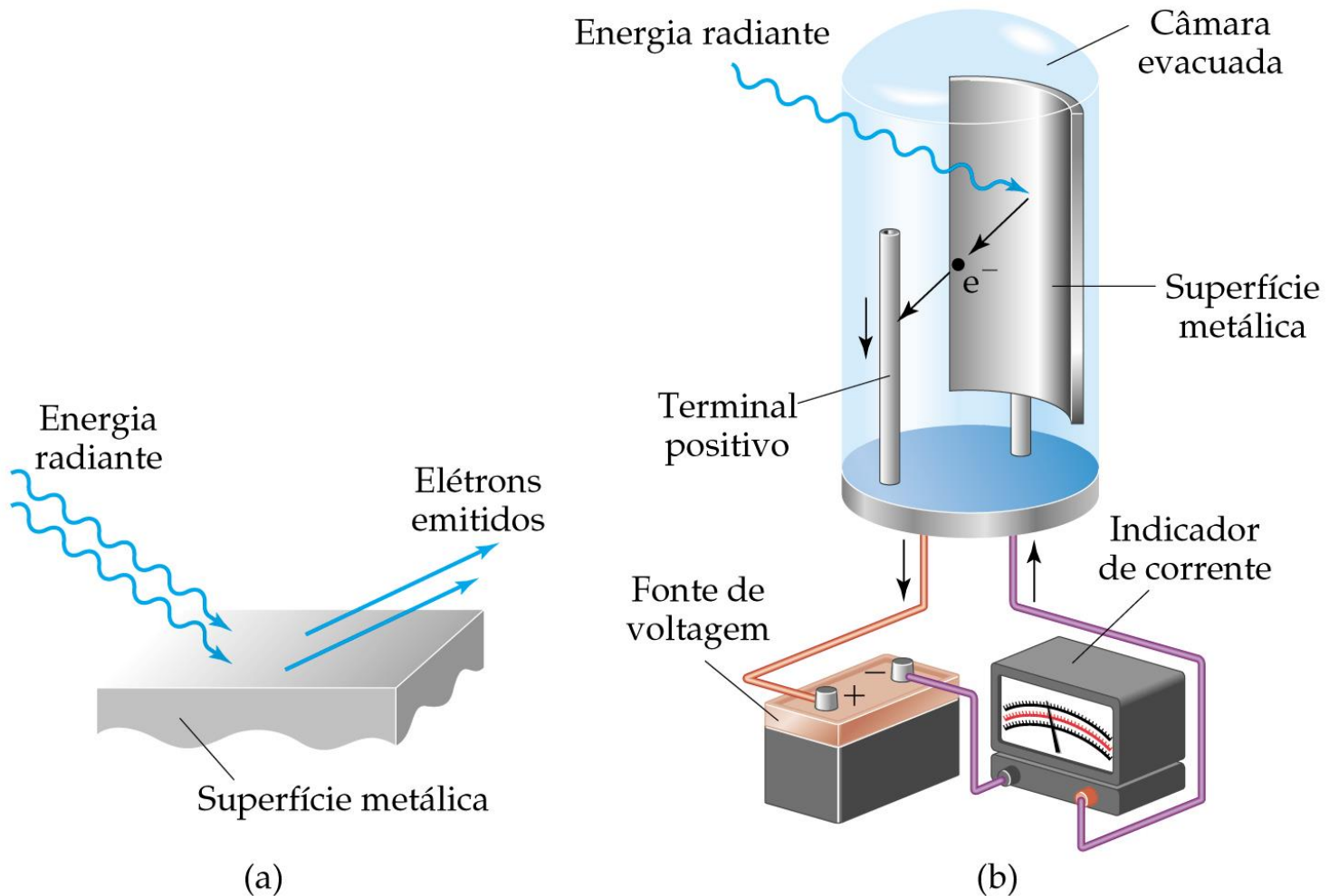
–Observação de linhas nos espectros atômicos



–Espectro do corpo negro

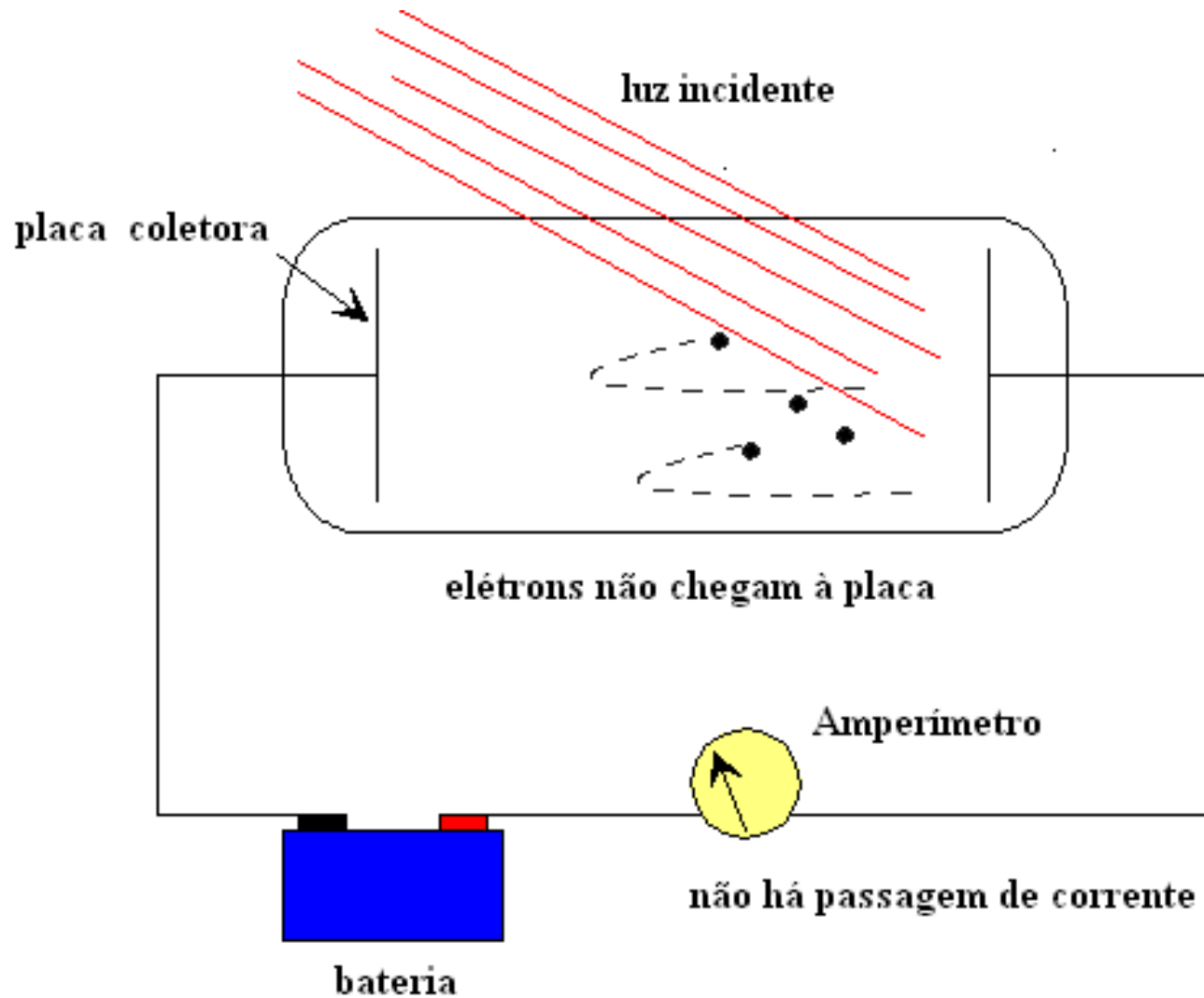
–Efeito fotoelétrico

O Efeito Fotoelétrico



Superfície emite elétrons devido à incidência de radiação eletromagnética.

O Efeito Fotoelétrico



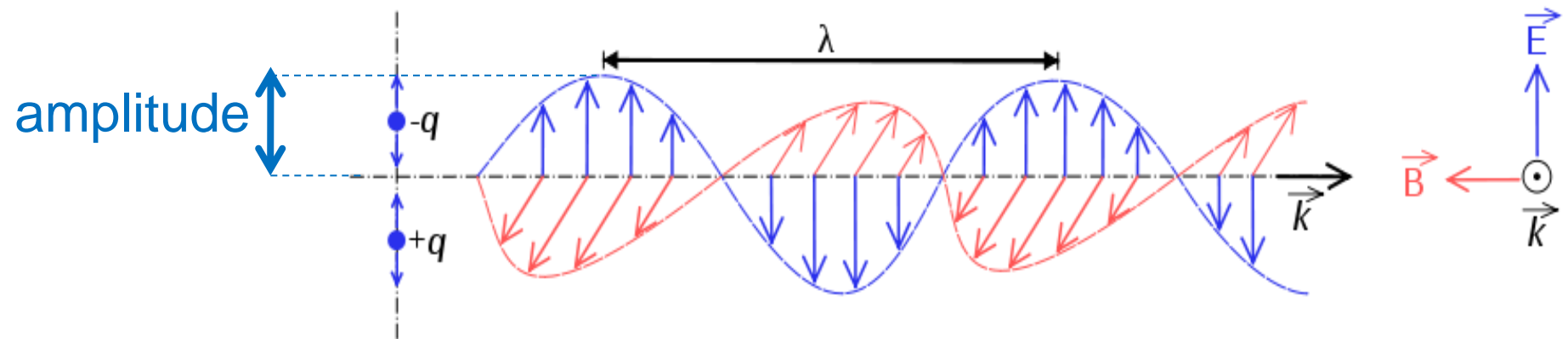
Ver aplicativo:

http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Photoelectric_Effect

Há três aspectos principais do efeito fotoelétrico que **NÃO podem ser explicados em termos da teoria ondulatória clássica da luz...**

... Primeiro Aspecto:

Previsão da teoria clássica: a energia cinética dos elétrons emitidos deveria aumentar com a intensidade da luz (ou seja, em função da amplitude do campo elétrico oscilante).

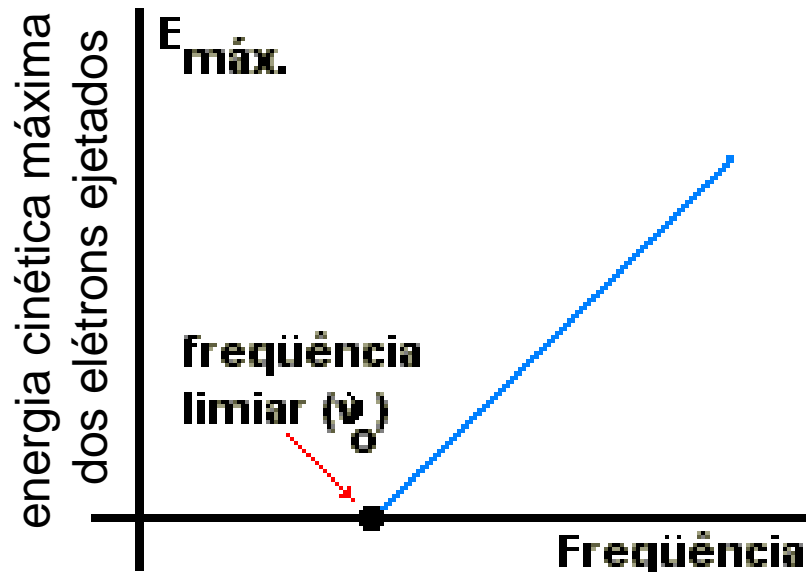


Observação experimental: o contrário: a energia cinética máxima dos elétrons emitidos não depende da intensidade da luz!

... Segundo Aspecto:

Previsão da teoria clássica: o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência da luz, desde que ela fosse intensa o suficiente para fornecer a energia necessária para ejetar elétrons.

Observação experimental: o contrário: para cada material, existe uma frequência mínima ν_0 abaixo da qual o efeito fotoelétrico não acontece, independente da intensidade da luz.



... Terceiro Aspecto:

Previsão da teoria clássica: se a intensidade da luz incidente é baixa, deve haver um intervalo de tempo mensurável durante o qual o elétron “acumula” a energia recebida até atingir o valor da energia necessária para ser ejetado.

Observação experimental: o contrário: nenhum retardamento detectável jamais foi medido, a emissão do elétron é praticamente instantânea mediante incidência de radiação luminosa.

Interpretação de Einstein: Primórdios da Física Quântica

- A luz é formada por um conjunto de pequenas partículas chamadas “**fótons**”.
- Cada fóton carrega uma quantidade definida de energia que é diretamente proporcional à frequência da luz. A energia é transportada em “pacotes”, ou seja, em **quantidades discretas**.

$$E = h\nu$$

(h é a constante de Planck)

- A energia transportada por um fóton individualmente não depende da intensidade e sim da frequência. A intensidade está relacionada apenas ao número total de fótons.

Constante de Planck

$$E = h\nu$$

(h é a constante de Planck)

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$h = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$



elétron volt

Um elétron-volt é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo.

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

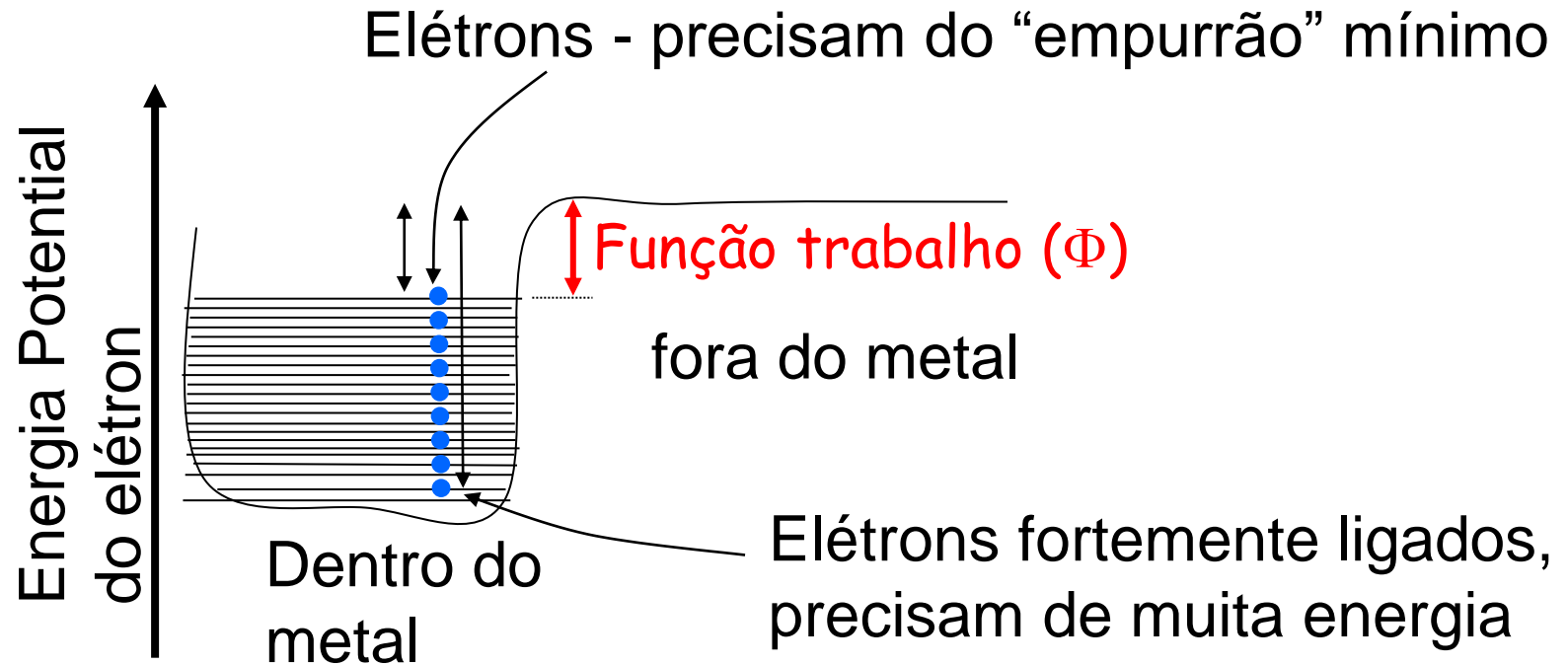
Interpretação de Einstein

A energia absorvida por um elétron individual no metal provém da colisão com um fóton. O elétron será ejetado apenas se o pacote de energia transportado pelo fóton ($h\nu$) for superior à energia necessária para ejetar o elétron, a chamada função trabalho (w_0). A diferença entre os dois valores é convertida em energia cinética dos elétrons ejetados (K).

$$K_{\max} = h\nu - w_0$$

$$h\nu_0 = w_0$$

No metal temos



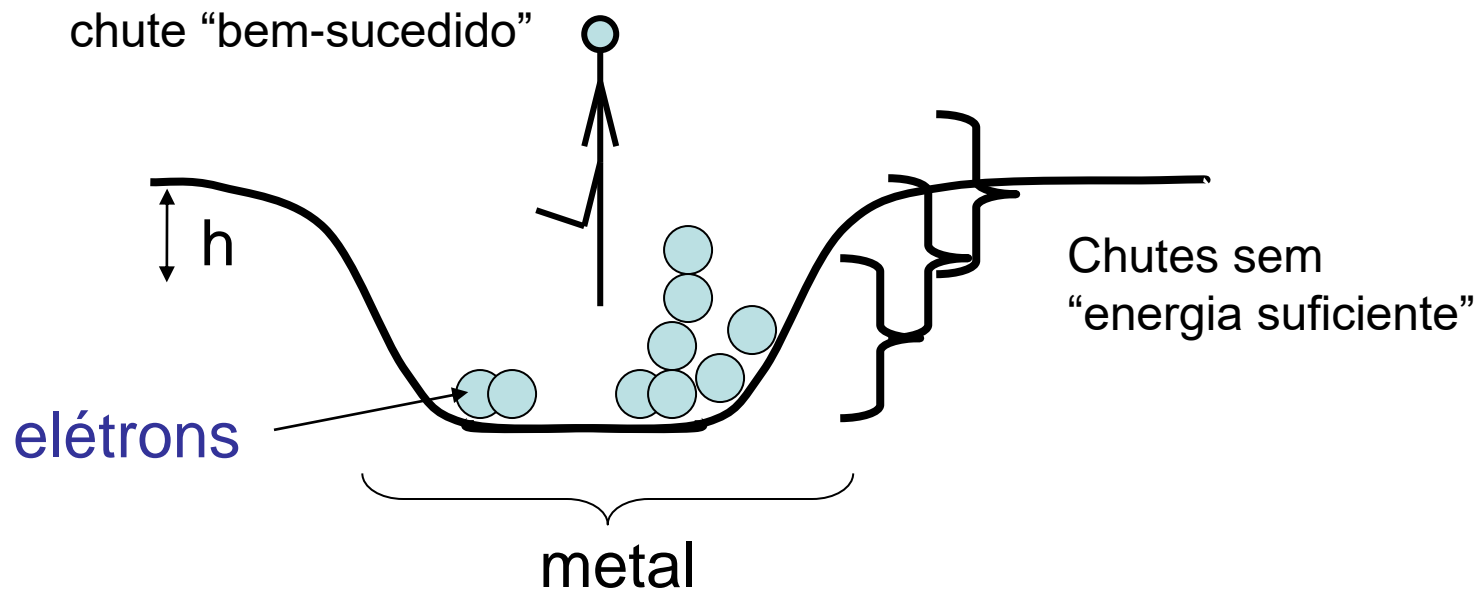
Efeito fotoelétrico: **considerações de Einstein (Nobel 1921)**

Analogia: bola em um buraco

Energia Cinética da Bola = Energia do chute – mgh

Quanto mais forte o chute, maior a probabilidade da bola sair

O chute deve ter uma energia mínima para que a bola saia!



Efeito fotoelétrico: **considerações de Einstein (Nobel 1921)**

•Equação de Einstein

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = eV_0 = h\nu - \phi$$

Potencial de frenamento

Energia cinética do elétron

“chute”

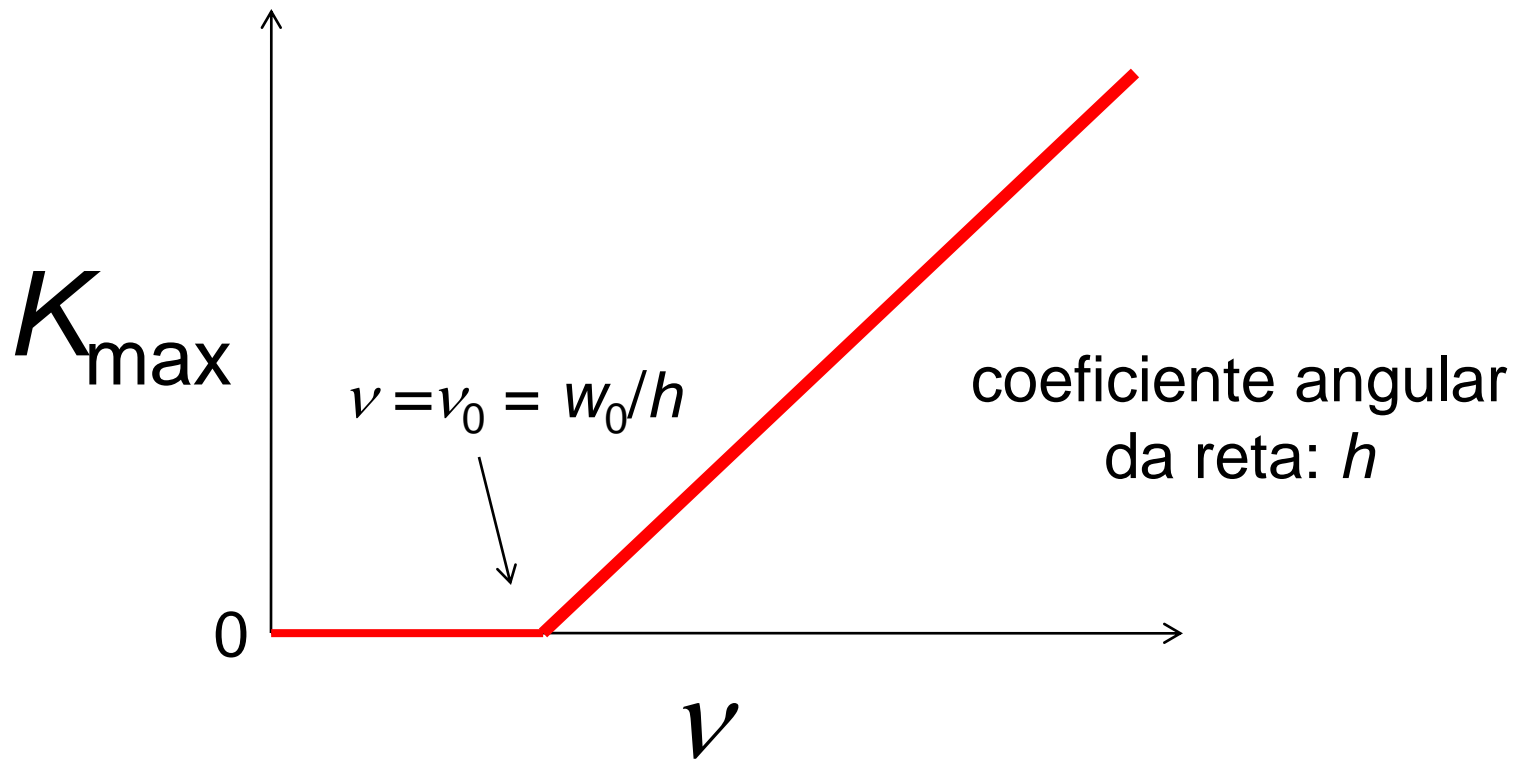
Φ = função trabalho (energia necessária para “arrancar” o elétron) característica do material

The diagram illustrates the Einstein photoelectric equation: $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = eV_0 = h\nu - \phi$. Arrows point from descriptive text to specific terms in the equation: 'Energia cinética do elétron' points to $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max}$; 'Potencial de frenamento' points to eV_0 ; '“chute”' points to $h\nu$; and ' Φ = função trabalho...' points to ϕ .

Interpretação de Einstein

$$K_{\max} = h\nu - w_0$$

$$h\nu_0 = w_0$$

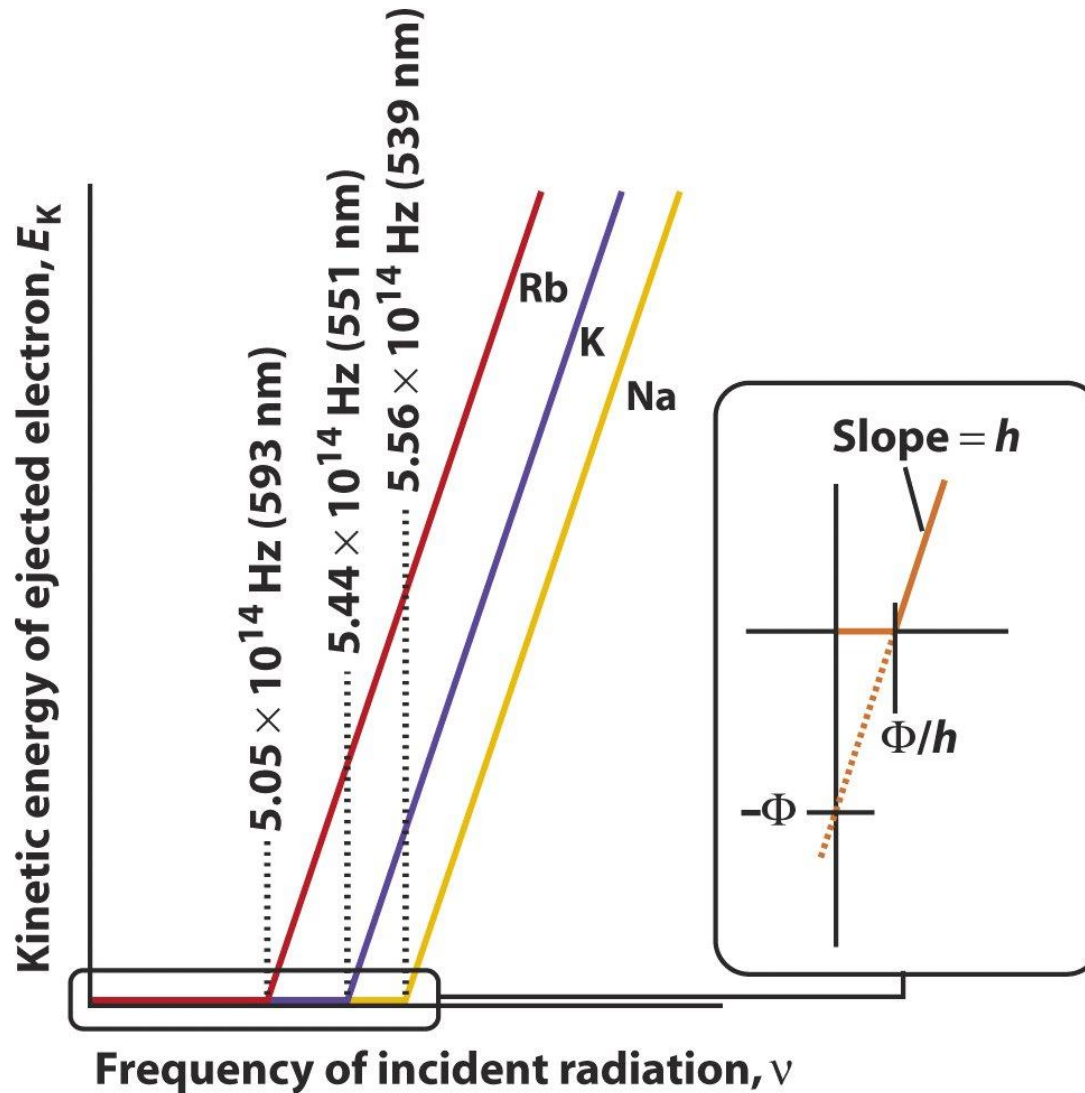


Função trabalho de alguns metais

Metal	Função trabalho (eV)
Sódio	2,36
Alumínio	4,06-4,26
Chumbo	4,25
Zinco	3,63 - 4,90
Ferro	4,67 - 4,81
Cobre	4,53 - 5,10
Prata	4,52 - 4,74
Níquel	5,04 - 5,35
Ouro	5,10 – 5,47

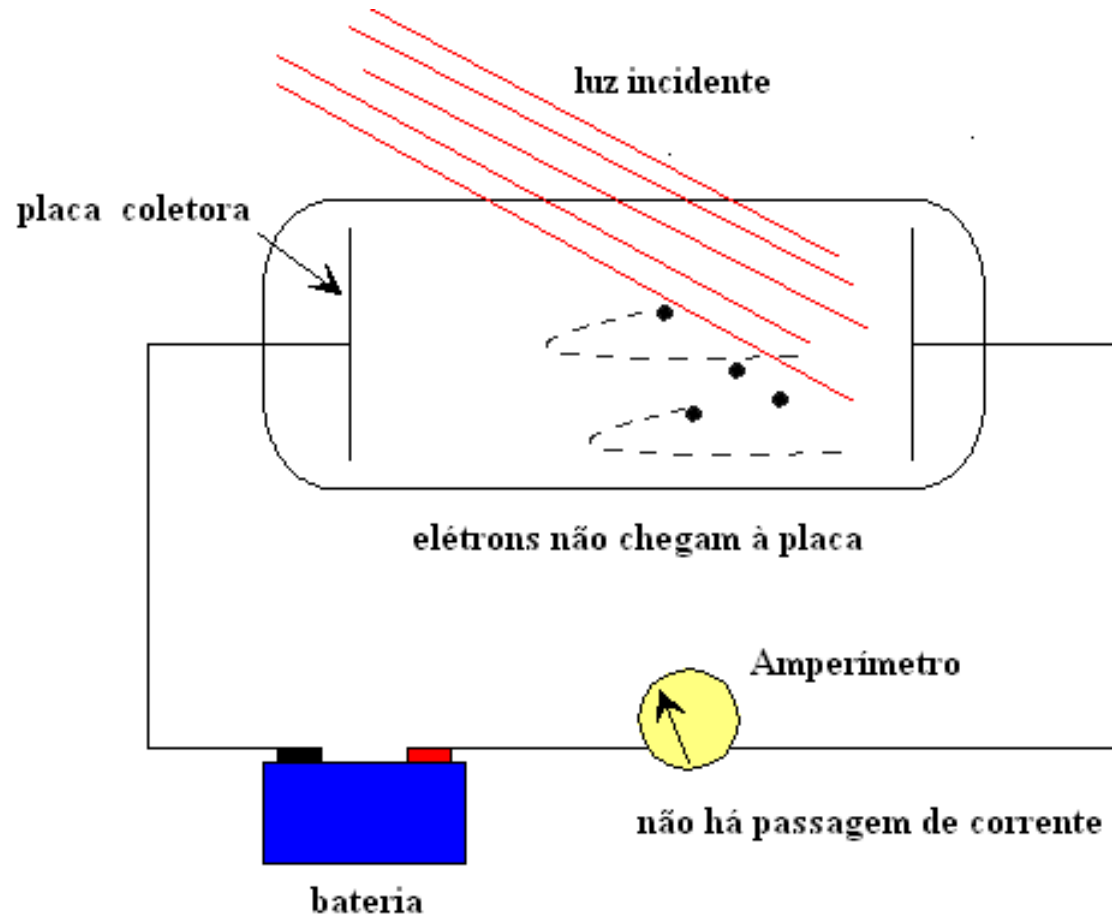
$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Função trabalho de alguns metais



Interpretação de Einstein

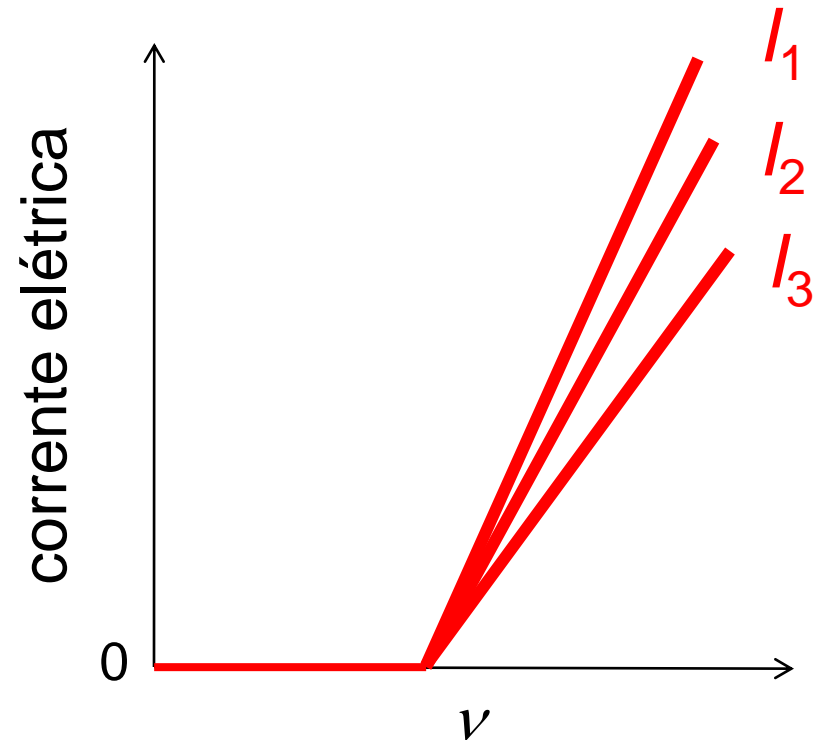
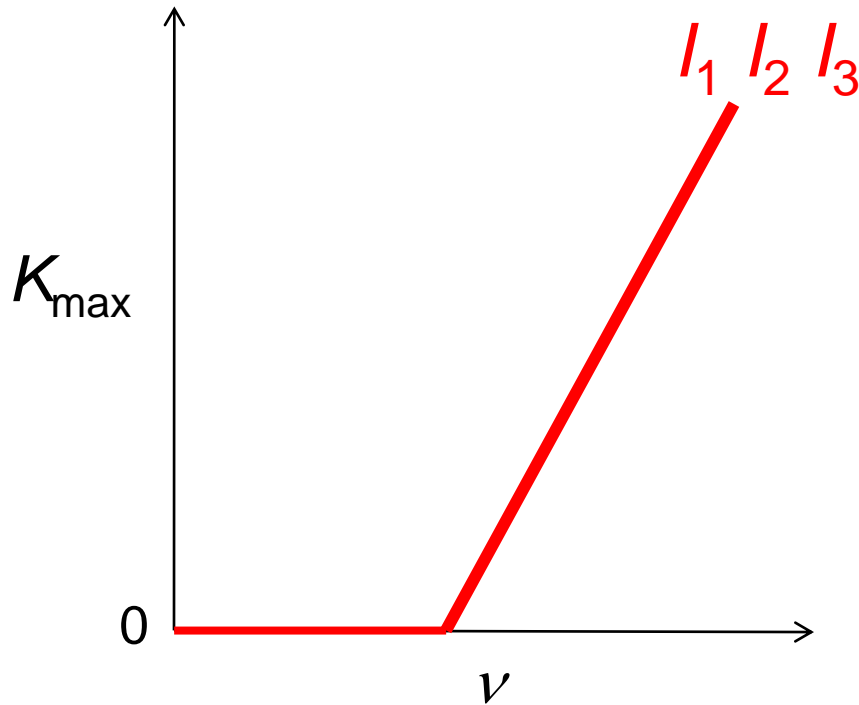
- Dobrando a intensidade, o número de elétrons ejetados dobra, mas sua energia cinética não muda.



Interpretação de Einstein

➤ Dobrando a intensidade (I), o número de elétrons ejetados dobra, mas sua energia cinética não muda.

$$K_{\max} = h\nu - w_0$$



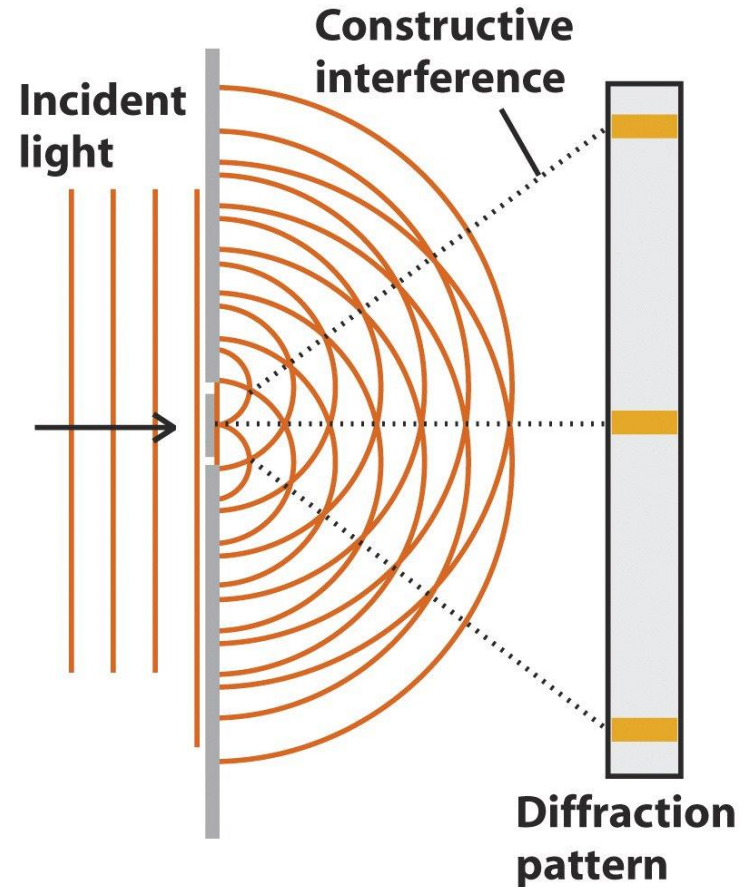
$$I_1 > I_2 > I_3$$

Células Fotovoltaicas



Consequências

- A radiação eletromagnética consiste de fótons que se comportam como **partículas**.
Ex.: *efeito fotoelétrico*.
- A radiação eletromagnética é composta de **ondas**.
Ex.: *difração da luz*.



Como conciliar as duas visões?

Afinal, a luz é uma partícula ou uma onda?

Dualidade Onda-Partícula

- A propagação da luz entre dois pontos pode ser descrita tratando-a como uma onda.
- A interação da luz com a matéria pode ser descrita tratando-a como partícula.

Dualidade Partícula-Onda para o Elétron



Louis de Broglie

O elétron pode se comportar tanto como partícula quanto como onda.



ONDAS DE MATÉRIA

Bibliografia

- **Moore, W.J., Physical Chemistry, 4ª Edição, Longmans, página 469, 1962.**
- **Typler, P.A., Física Moderna, Guanabara Dois, 1981.**
- **Russel, J.B., Química Geral, 2ª Edição, Volume 1, Makron Bools, 1994.**
- **White, D.P., Química a Ciência Central, Pearson Education, 9ª Edição, 2005.**
- **Eisberg, R., Resnick, R., Física Quântica, Editora Campus, 1ª Edição, 1979**
- **Eisberg, R., Fundamentals of Modern Physics, John Wiley & Sons, 1ª Edição, 1961.**