



Universidade de São Paulo Instituto de Física

FÍSICA MODERNA I

AULA 03

Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br

2o. Semestre de 2017

Página do curso:

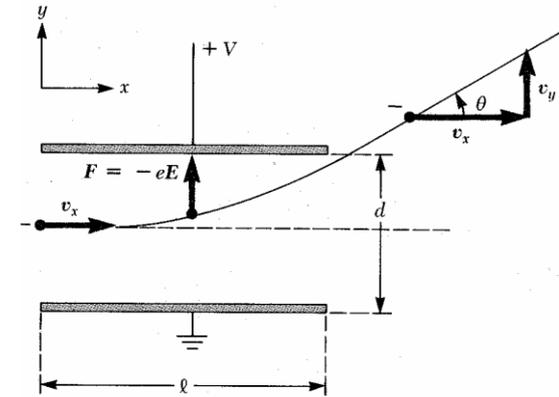
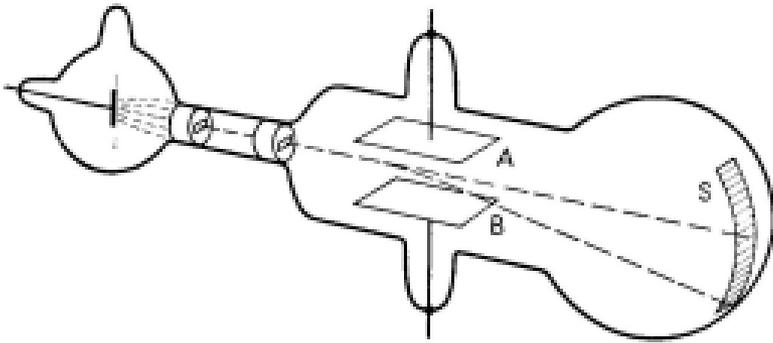
<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=53869>

09/08/2017

Na aula passada: Descoberta do elétron



Em 1897, **J.J. Thomson** estudando descargas elétricas em tubo de raios catódicos e tentando entender estas descargas, descobre o primeiro componente que faz parte do átomo: o **elétron**, uma partícula com carga elétrica negativa.



Thomson consegue medir a razão carga massa dessas partículas deste feixe luminoso..... $q/m = 0,7 \times 10^{11} \text{C/kg}$

Hoje: $q/m = 1,76 \times 10^{11} \text{C/kg}$

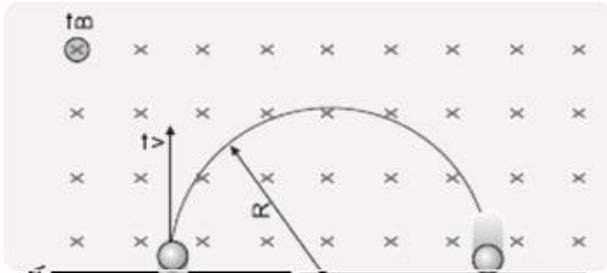
- **espectrômetro de massa**

Equipamentos utilizados para medir a razão q/m . Para tanto utiliza-se de um campo magnético onde pode-se determinar a trajetória da partícula neste campo:

B perpendicular ao movimento

aceleração centrípeta

$$F = qvB = ma \quad a = \frac{v^2}{R} \quad qvB = m \frac{v^2}{R} \quad R^2 = \left(\frac{mv}{qB} \right)^2$$



Energia cinética que possui ao entrar na região de B

$$\frac{1}{2}mv^2 = q\Delta V$$

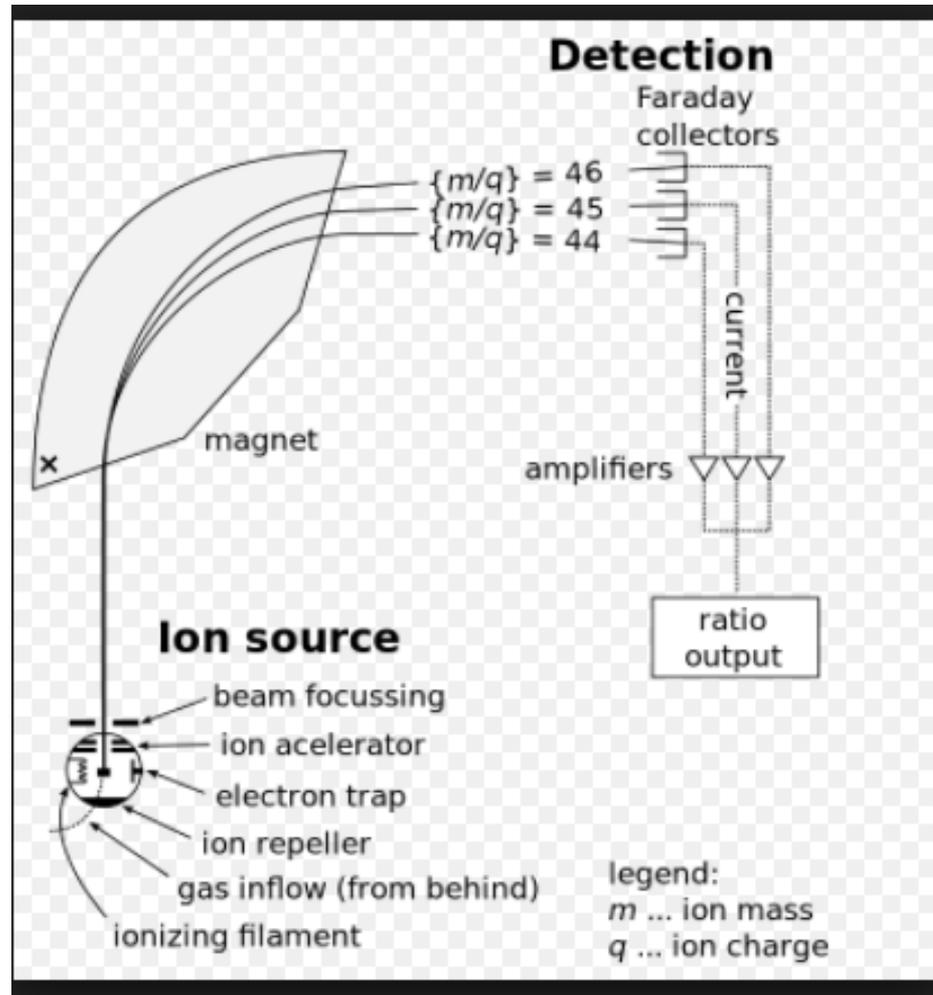
$$mv^2 = 2q\Delta V = \frac{q^2 B^2 R^2}{m}$$

$$\frac{q}{m} = \frac{2\Delta V}{B^2 R^2}$$

Experimento inicialmente realizado por F. W. Aston em 1919, e as diferenças de massa podiam ser medidas com precisão de ~ 1 parte em 10000 (hoje 1 parte em 10^9)

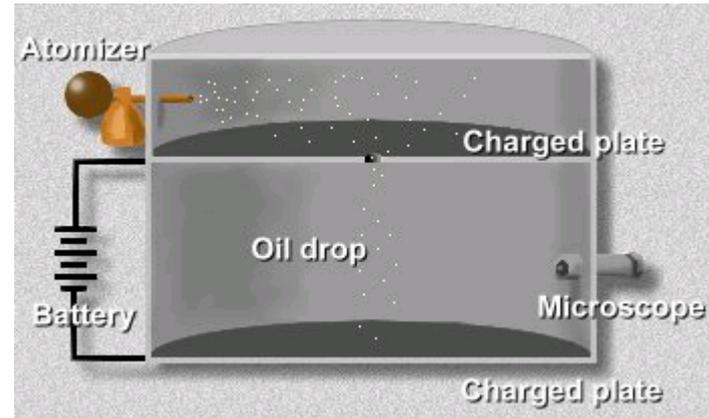
- **espectrômetro de massa**

Equipamentos utilizados para medir a razão q/m são encontrados em aceleradores de partículas



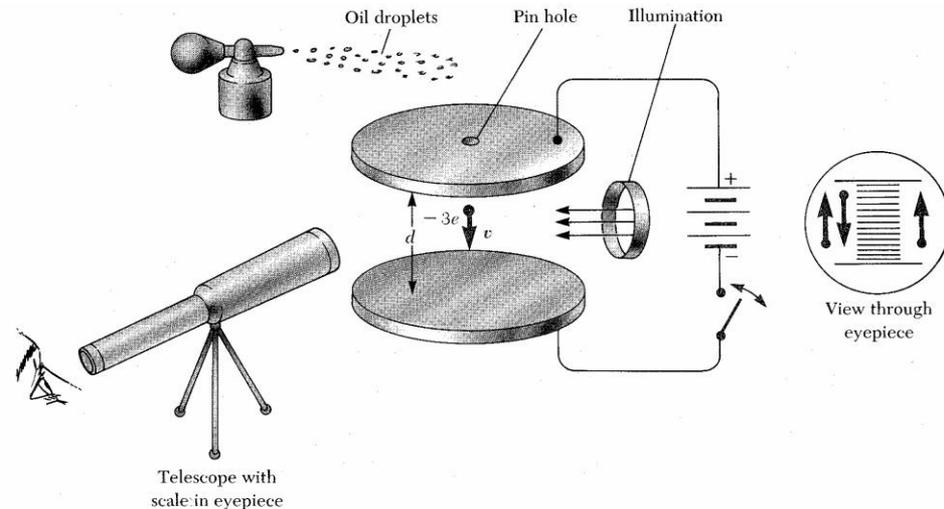
Determinação da Carga Elétrica do Elétron

❑ O experimento foi realizado por Robert A. Millikan em 1909:

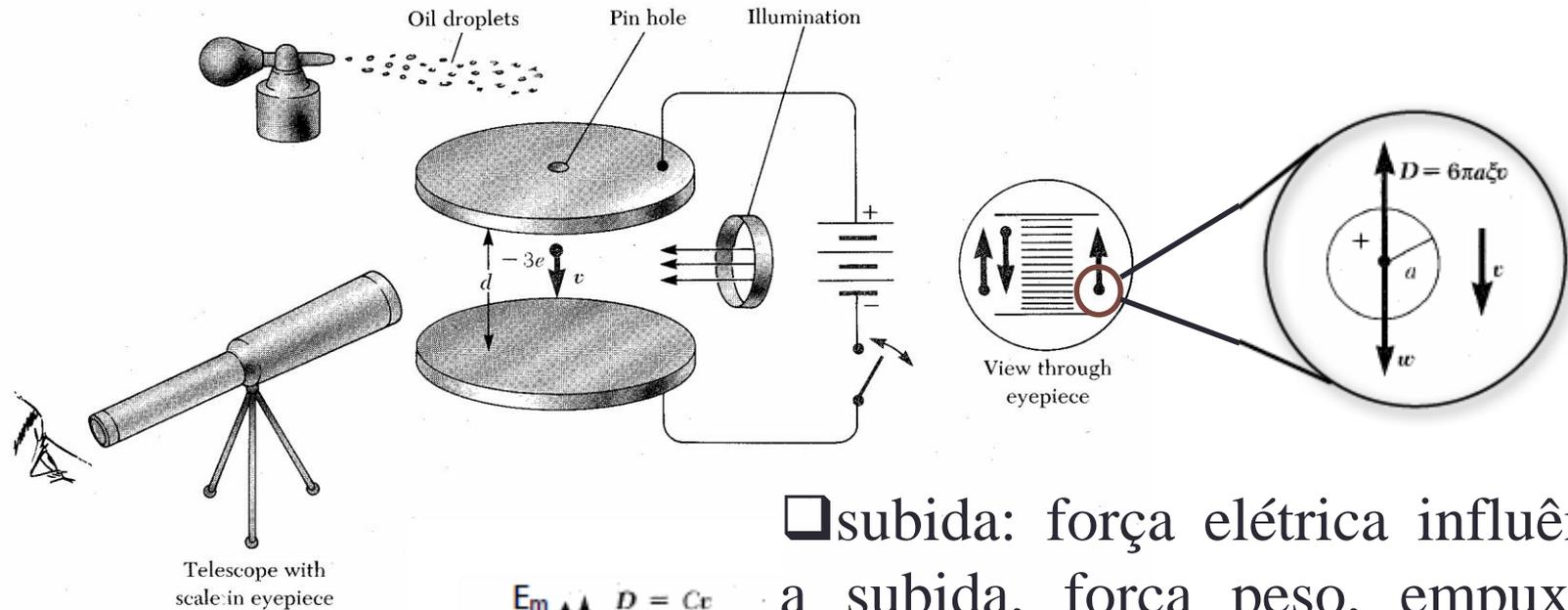


❑ Método utilizado era medir a velocidade de gotículas de óleo sob a influência da gravidade e de um campo elétrico uniforme.

❑ Usou um campo elétrico intenso Para manter uma gota carregada por período de 30 a 60 seg. (observar gotas isoladas). Equações de movimento para a descida e de subida da gota.

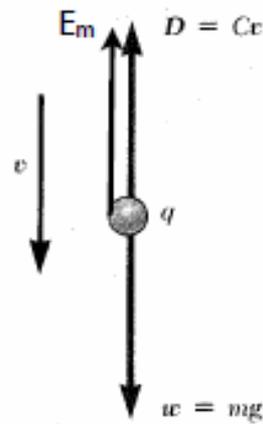


Medidas de Carga Elétrica do Elétron

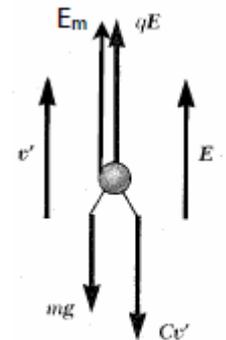


□ subida: força elétrica influencia a subida, força peso, empuxo e atrito do ar (contrário a descida)

□ Descida: a gota sofre influência do peso, empuxo e atrito do ar



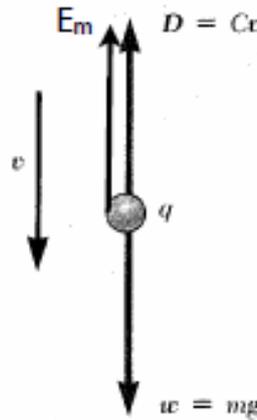
(a) Field off



(b) Field on

Medidas de Carga Elétrica do Elétron

□ Descida: a gota sofre influência do peso, empuxo e atrito do ar
SEM CAMPO

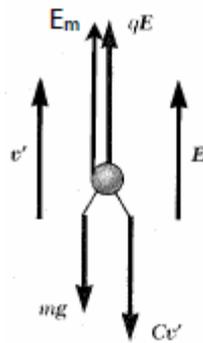


(a) Field off

$$v_d = \frac{mg}{6\pi\rho_{ar}a} = \frac{\frac{4}{3}\pi a^3 d_{ol}g}{6\pi\rho_{ar}a}$$

$$v_d = \frac{2 d_{ol} a^2 g}{9 \rho_{ar}}$$

□ subida: força elétrica influencia a subida, força peso, empuxo e atrito do ar (contrário a descida)
COM CAMPO



(b) Field on

$$v_d = v_q = \frac{L}{t_q} = \frac{2 d_{ol} a^2 g}{9 \rho_{ar}}$$

$$a = \sqrt{\frac{9\rho_{ar}L}{2t_q d_{ol}g}}$$

ρ_{ar} viscosidade do ar
 d_{ol} densidade do óleo

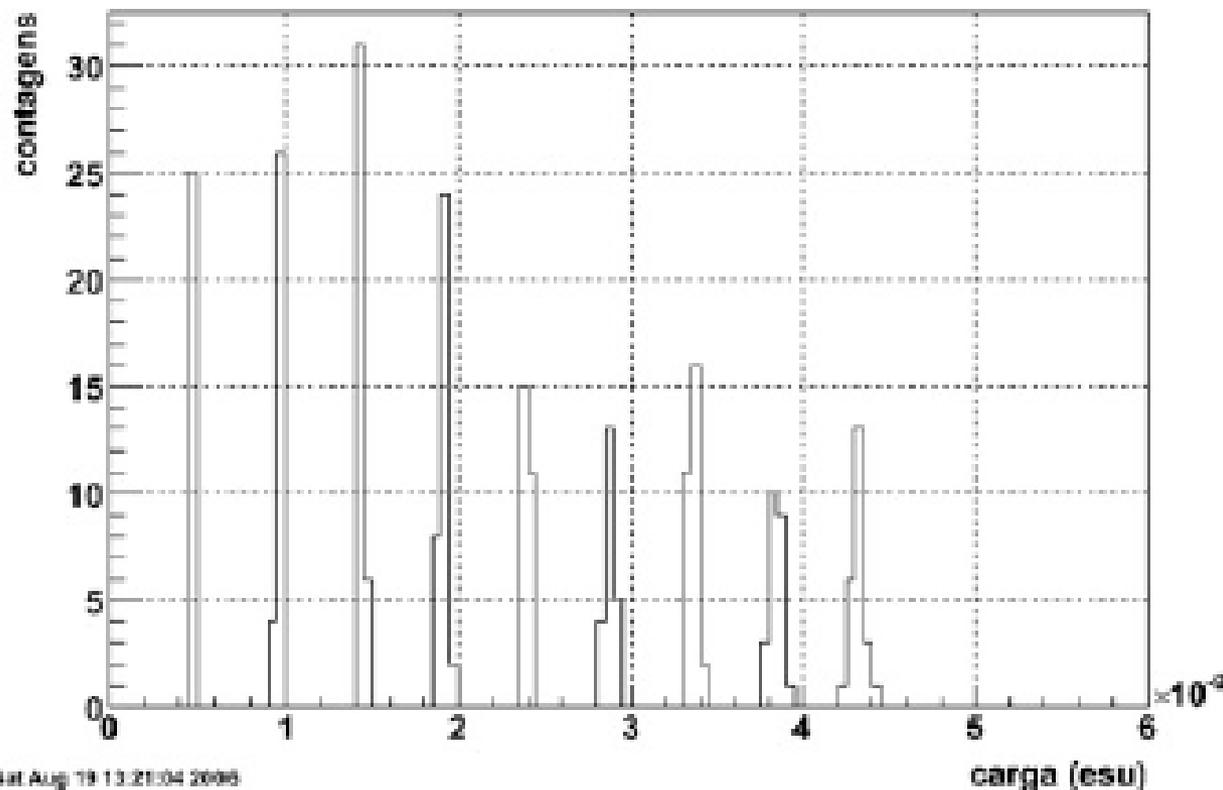
Raio da gota

Medidas de Carga Elétrica do Elétron

□ Várias medidas de tempo de queda, cálculos de velocidade e raio da gota, podemos constatar a quantização da carga elétrica

A carga do elétron é de $1,60217653(14) \times 10^{-19} \text{ C}$

Erro = 1%, Canal = $0.5e-10 \text{ esu}$



Natureza



Composta



matéria



Radiação
eletromagnética



Descrição atômica



partículas



evidências



Química

Teoria Cinética dos gases



?

Estudos do movimento browniano

Carga/massa J.J. Thomson

Espectrômetro de Massa

Millikan

A descrição eletromagnética da luz

- Ideias iniciais baseavam-se na propagação de ondas em meios.
- Ondas em água e ondas acústicas usavam diferentes meios, ondas eletromagnéticas necessitavam de um meio chamado éter
- Baseado nas ideias de Faraday sobre o éter - Maxwell em 1865 sintetizou os todos os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos e os descreveu unificadamente através das equações:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Lei de Gauss

Lei de Faraday

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Lei de Gauss
para o campo
magnético

Lei de Ampere
+ corrente de
deslocamento

Teoria clássica do eletro-magnetismo

Maxwell 1865

Onda Eletromagnética. Ex:

$$\vec{E} = E_0 \hat{e} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta)$$

E_0 : Amplitude do campo elétrico, $k=2\pi/\lambda$, $\omega=2\pi\nu$

Vetor de Poynting:

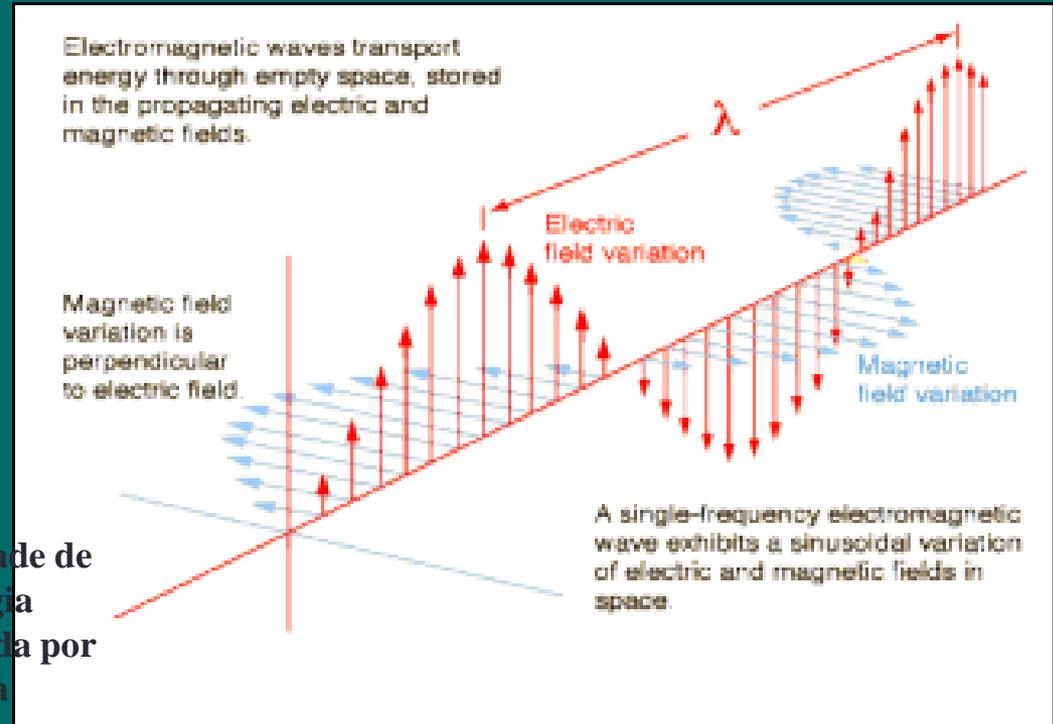
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Quantidade de energia transferida por área

Intensidade da onda E-M:

$$I = \langle \vec{S} \rangle \cdot \hat{u} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

$$I = \frac{\Delta U}{\Delta a \Delta t} \quad (\text{energia/área/tempo})$$



A descrição eletromagnética da luz

- Maxwell estabeleceu que ondas eletromagnéticas tem o mesmo comportamento da luz – pode prever a velocidade das ondas acústicas nos meios gasosos, líquidos e sólidos

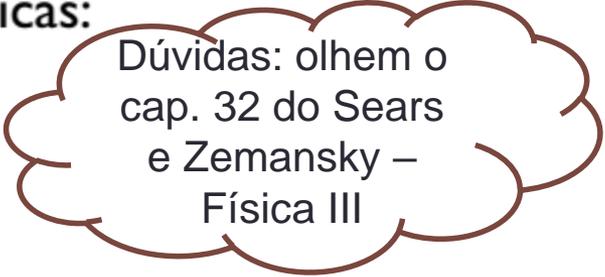
- tem a velocidade da luz

$$v = \sqrt{1/\mu_0\epsilon_0} = c$$

- Equação das ondas eletromagnéticas:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$



Dúvidas: olhem o cap. 32 do Sears e Zemansky – Física III

- Hertz em 1887 realizou a observação experimental das ondas eletromagnéticas

LUZ são ondas eletromagnéticas produzidas por osciladores microscópicos da matéria

Sucesso da teoria de Maxwell e do modelo de osciladores: usados para explicar

Radiação Térmica

Quando a matéria é aquecida emite radiação e é possível sentir esta radiação de calor.

~ 550°C o objeto se torna vermelho escuro,

~700°C se torna vermelho brilhante, se a temperatura continua a aumentar a coloração passa para laranja, amarelo e finalmente branco. Experimentalmente pode-se observar o espectro eletromagnético de emissão quando a matéria é aquecida

Este foi o grande interesse dos físicos do século 19

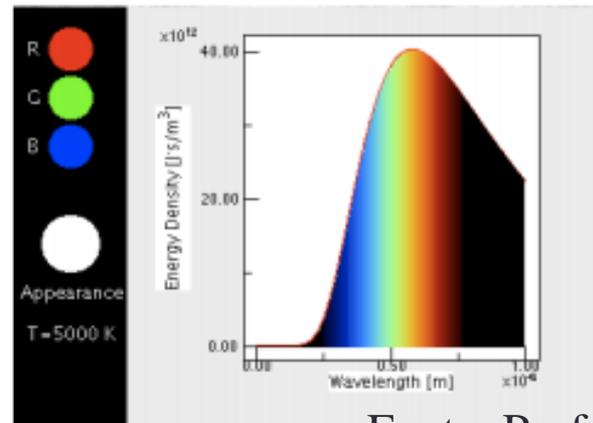
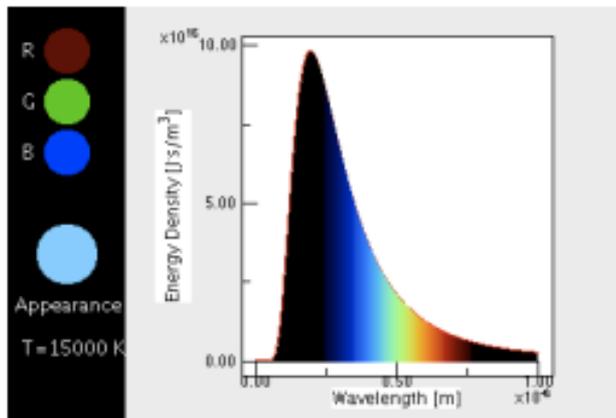
Mediram a intensidade da radiação emitida em função: do material, da temperatura e do comprimento de onda

Materiais que emitem na região do visível: carvão, filamento de uma lâmpada, sol

Espectro de frequência de radiação

- Todos os corpos simultaneamente emitem e absorvem radiação.
- A radiação emitida por um objeto com $T > 0\text{K}$ apresenta uma distribuição de frequências.
- Todos os corpos emitem um espectro de radiação contínuo .

A “quantidade” de radiação emitida com cada valor de frequência é medida em energia por unidade de tempo (potência) por unidade de área, chamada de radiância espectral $R_T(\nu)$



- Para um corpo estar em equilíbrio térmico com o ambiente é preciso que o corpo absorva energia térmica na mesma taxa que a emite

Um bom emissor térmico será
também um bom absorvedor



Caso + simples

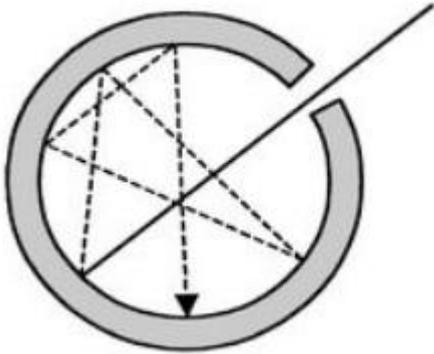
Corpo Negro

Radiação de corpo negro



Caso + simples

Corpo Negro



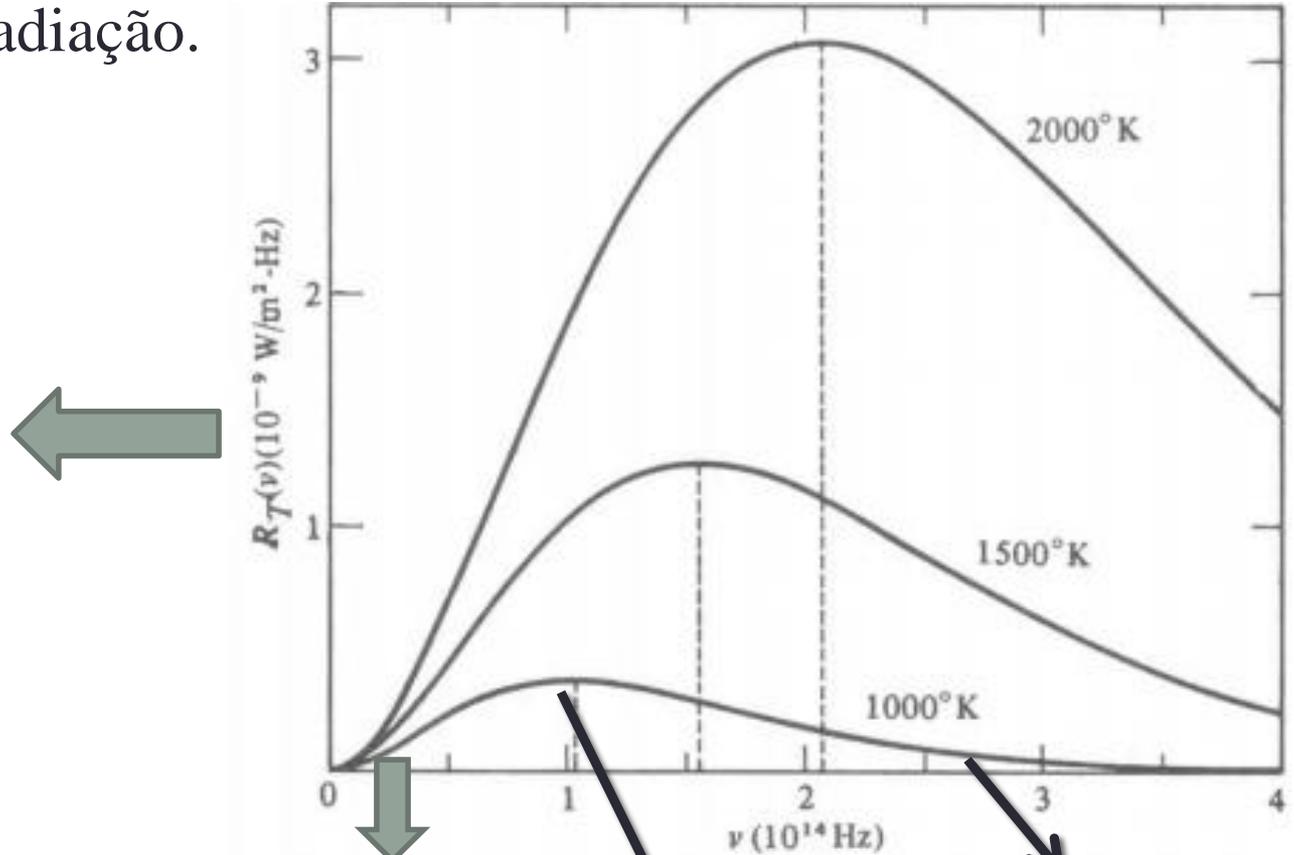
Corpo ideal que absorve toda a radiação e não reflete nada, a radiação vinda do exterior entre na cavidade e é refletida várias vezes na parede até ser absorvida totalmente.

Verifica-se que todos os corpos negros à mesma temperatura emitem radiação térmica com o mesmo espectro

Radiação de corpo negro

- A Radiância espectral: $R_T(\nu)$ de um corpo em função da frequência da radiação.

A frequência em que a radiância é máxima varia linearmente com a temperatura. Potência total emitida por metro quadrado (área sob a curva) aumenta rapidamente com a temperatura



Potência irradiada é nula

Potência irradiada é máxima em

$$\nu = 1,1 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Potência irradiada cai

Radiação de corpo negro

- A Radiância espectral $R_T(\nu)$: função de distribuição da potência irradiada por unidade de área, em um intervalo de frequência, em função de ν e T .


$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu$$

Energia total emitida
por unidade de tempo,
por unidade de área

O crescimento rápido de R_T com a temperatura é chamada de Lei de Stefan anunciada em 1879


$$R_T = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ (constante de Stefan-Boltzman) medida experimen.}$$

O espectro se desloca para valores maiores de frequências à medida que T aumenta

Resultado-Lei de deslocamento
de Wien (1893) $\nu_{\max} \approx T$

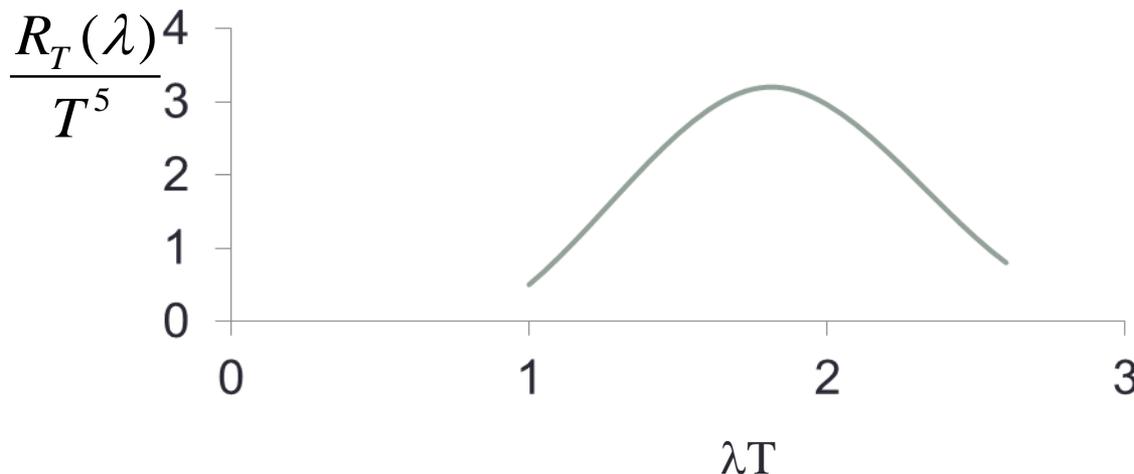
Radiação de corpo negro

Como \longrightarrow $T\lambda_{\max} = c^*$

c^* é a constante de Wien = $2.898 \times 10^{-3} \text{mK}$

Quando a temperatura aumenta \longrightarrow λ_{\max} diminui

Se fizermos um gráfico das várias curvas $R_T(\lambda)$ para diferentes T , não como função de T mas como função de λT . Teremos que os valores de $R_T(\lambda)$ máximo para todas as curvas estarão alinhadas na mesma posição e todas as curvas se sobrepõem perfeitamente

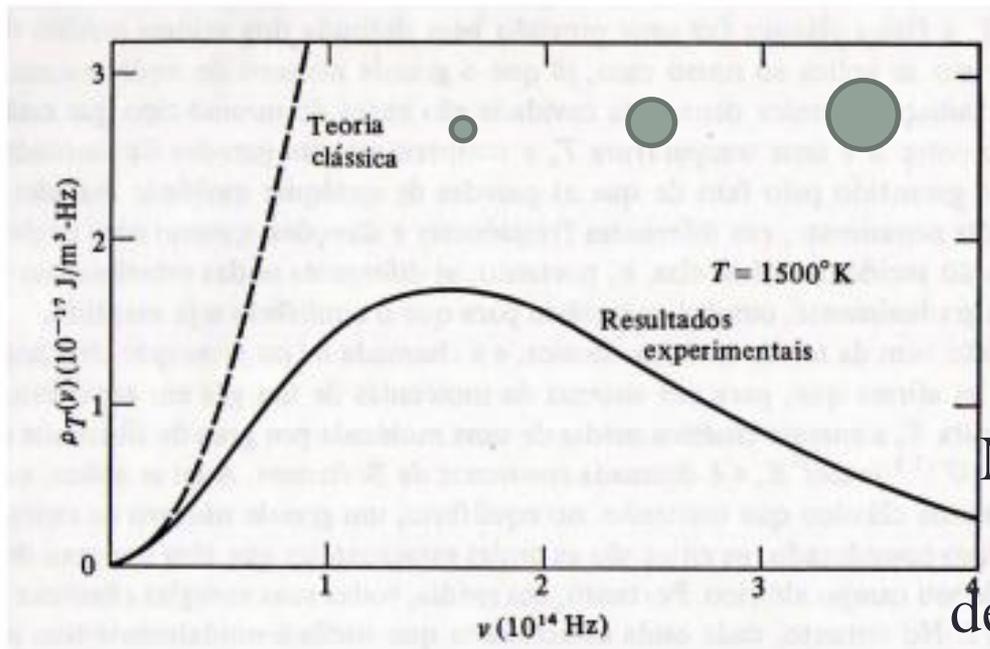


Isto mostra que $R_T(\lambda)/T^5$ é uma função de $f(\lambda T)$, isto é:

$$R_T(\lambda) = cT^5 f(\lambda T) = \frac{c(\lambda T)^5}{\lambda^5} f(\lambda T)$$

$$R_T(\lambda) = \frac{cf(\lambda T)}{\lambda^5}$$

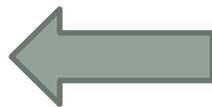
Dúvidas sobre o espectro de $R_T(\lambda)$:



Classicamente conseguimos explicar pequenos valores de ν

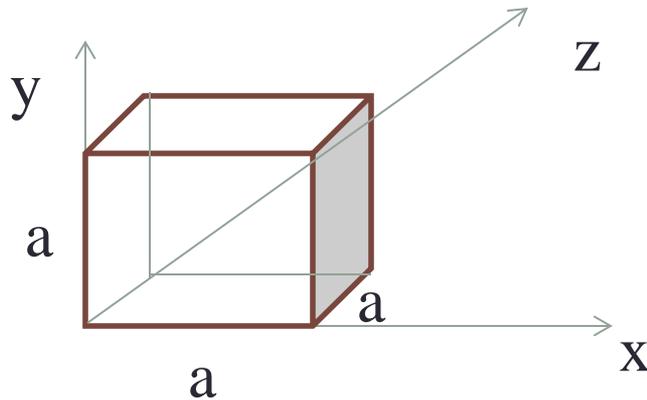
No início do século Ralyleigh-Jeans fizeram cálculo da densidade de energia da radiação da cavidade (ou do corpo negro) mas mostrou uma série de divergência entre a física clássica e os resultados experimentais

Calculo da densidade de energia usando ondas estacionárias
 $\rho_T(\nu) \propto R_T(\nu)$

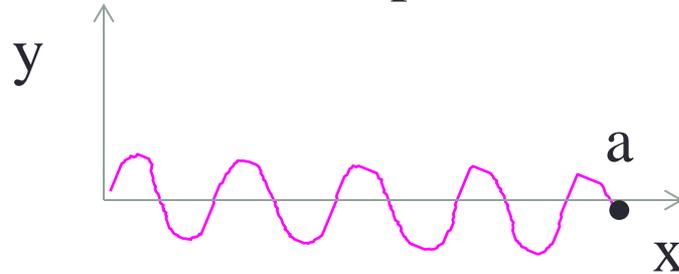


Suposições:

1) Cavidade com paredes metálicas contendo radiação eletromagnética (cubo com aresta a)



2) Radiação é refletida sucessivamente nas paredes e decomposta em três componentes



3) Como as paredes opostas são perpendiculares, as três componentes da radiação não se misturam e podemos tratá-las separadamente

4) Onda estacionária dentro da cavidade:

$$E(x, t) = E_o \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \operatorname{sen}(2\pi \nu t)$$

Como um oscilador harmônico

Nas paredes temos os nós com amplitude zero

$$\left(\frac{2\pi a}{\lambda_x}\right) = n\pi$$

$$\lambda_x = \frac{2a}{n_x} \text{ ou } \nu_x = \frac{n_x c}{2a}$$

$$n_x = \frac{2a}{c} \nu_x$$

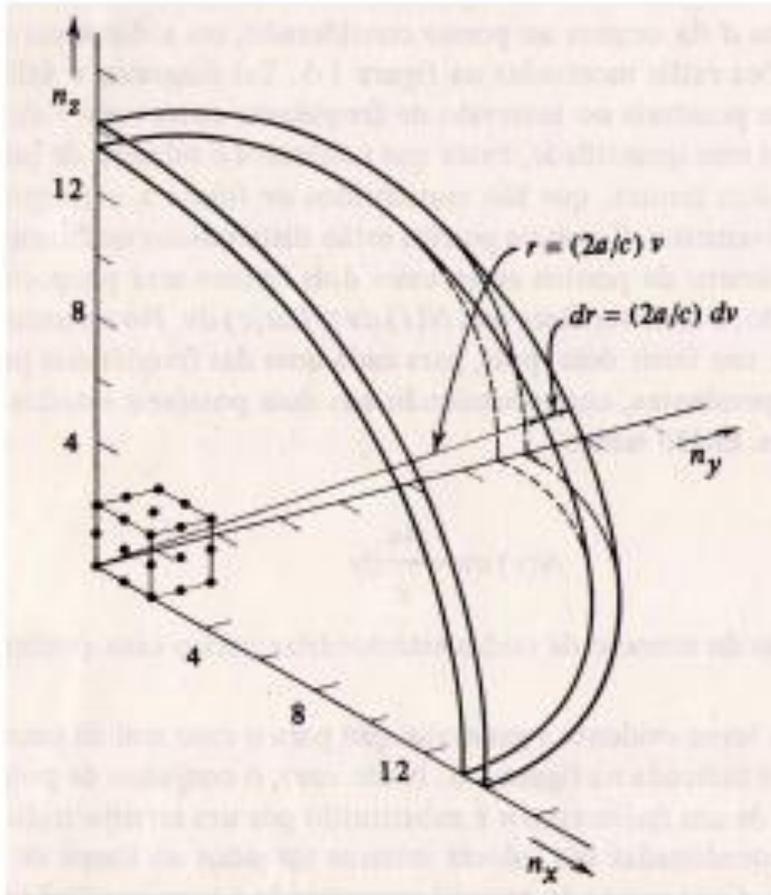
$$\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi 0}{\lambda}\right) = 0$$

$$\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right) = 0$$

5) O que queremos é o número de frequências possíveis entre ν e $\nu + d\nu$

$$N(\nu) d\nu$$

6) O número de onda dentro da cavidade



Caso tridimensional

$$r = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = \frac{2a}{c} \nu$$

$$dr = \frac{2a}{c} d\nu$$

$$N(r)dr = \frac{1}{8} 4\pi r^2 dr$$

$$N(\nu)d\nu = (2) \frac{\pi}{2} \left(\frac{2a}{c} \right)^3 \nu^2 d\nu$$

$$N(\nu)d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \cdot V \cdot \nu^2 d\nu$$

2 ondas possíveis para cada frequência