

Universidade de São Paulo Instituto de Física

EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS DA NATUREZA QUÂNTICA DA
RADIAÇÃO E DA MATÉRIA

AULA 02

Profa. Márcia de Almeida Rizzutto

Pelletron – sala 220

rizzutto@if.usp.br

2º. Semestre de 2023

Monitores: Rodrigo Fernandes de Almeida

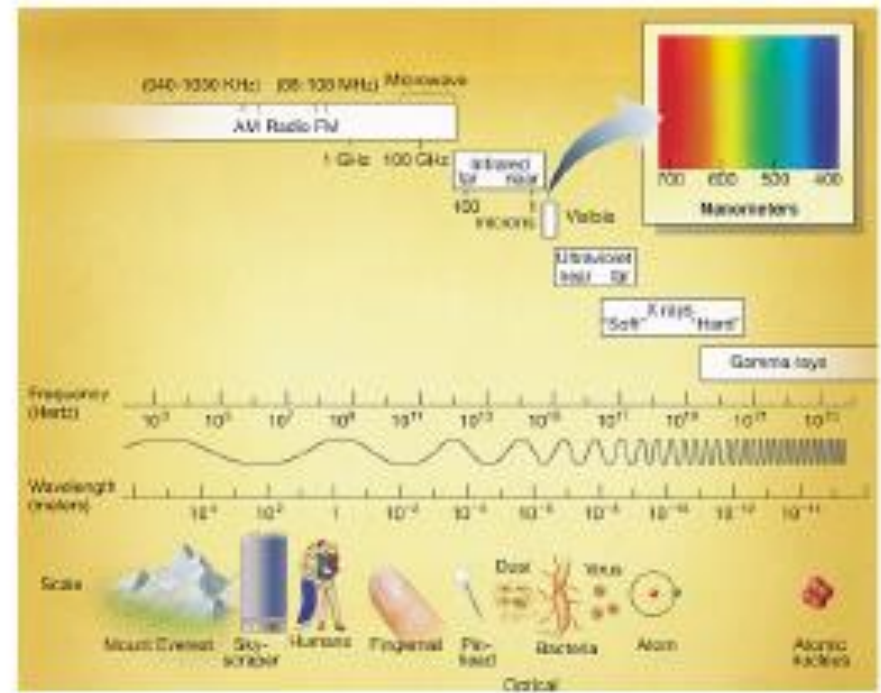
Samuel Pizzol

O que “existe” no mundo físico?

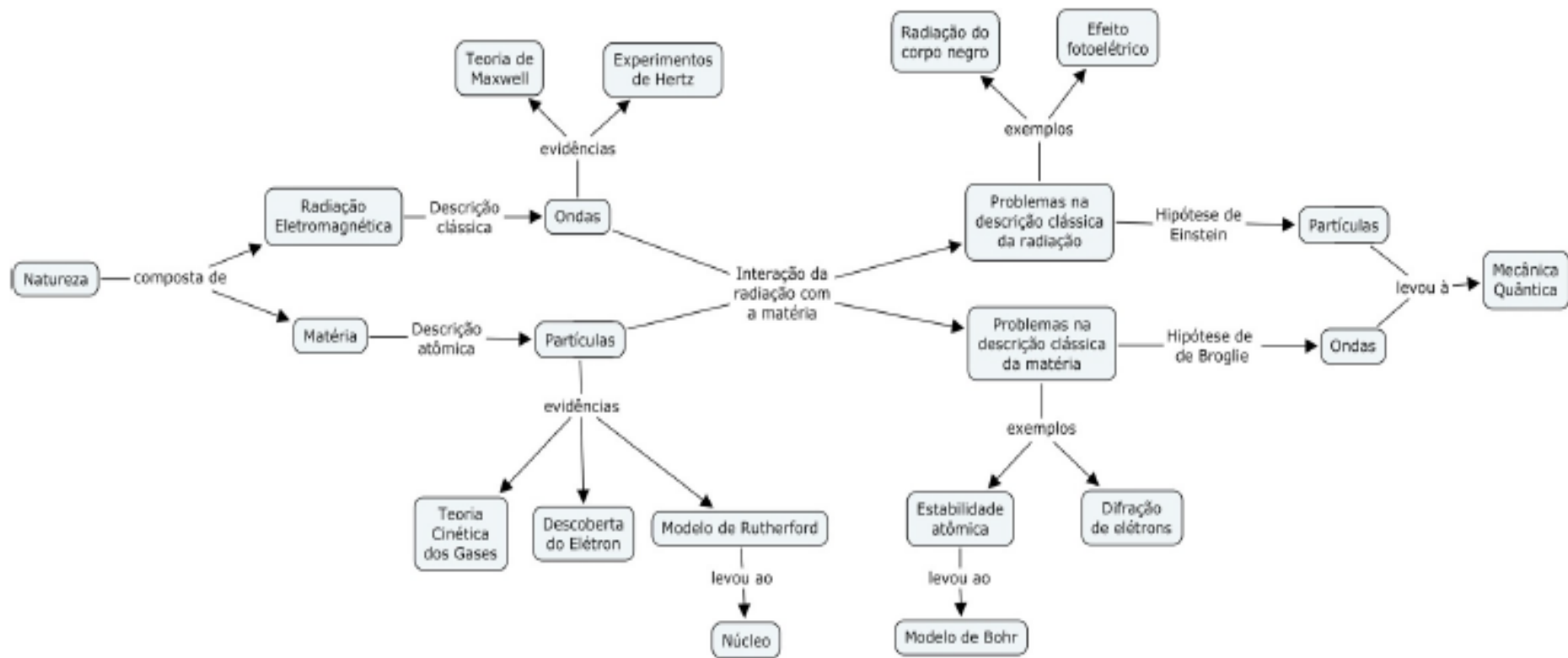
- Matéria



- Radiação eletromagnética



Esquema da Disciplina



A Física no final do século XIX

- Sistemas

- pontuais (centro de massa, corpos celestes, etc.)
- extensos e contínuos
 - rígidos
 - fluídos
 - ondas (perturbações)

- Fenômenos

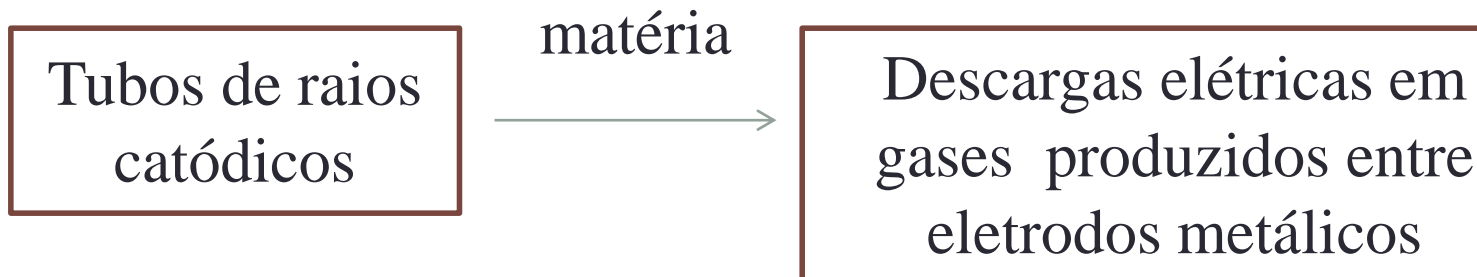
- mecânicos (movimento)
- ondulatórios
- térmicos (calor)
- eletromagnéticos
- ópticos

Problemas em aberto do século 19

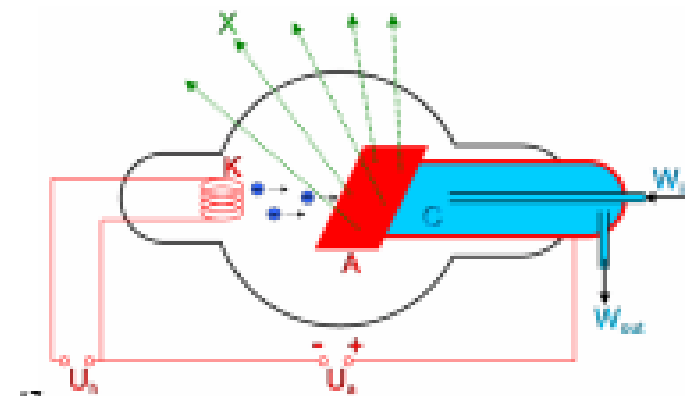
- Meio para propagação das ondas eletromagnéticas (éter?)
- Raios-X (Röntgen, nov/1895)
- Radioatividade (Becquerel, fev/1896)
- Elétron (J.J. Thomson, 1897)
- O efeito fotoelétrico e os espectros dos átomos não poderiam ser explicados pela teoria eletromagnética
- Linhas espectrais e Efeito Zeeman (P. Zeeman, 1896) – desdobramento de linhas espectrais em átomos sob campo magnético
- Radiação de corpo negro não estava de acordo com as previsões da Termodinâmica

Evidências experimentais que sugeriram a divisibilidade do átomo - existência de uma subestrutura (no entanto só compreendido no século XX)

A partir de 1857, aperfeiçoamento das técnicas experimentais com trabalhos de vidros e máquina de fazer vácuo - condições de realizar experimentos para compreensão da estrutura da



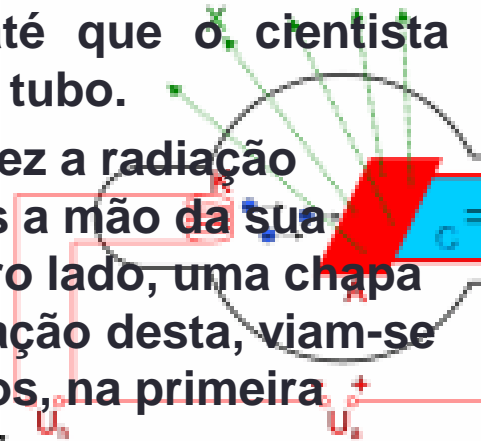
W. Röntgen estudava a fluorescência de certas substâncias e queria testar os raios catódicos interagindo com estas substâncias, no entanto os raios possuem alcance de poucos centímetros no ar. Mas o cartão fluorescente foi atingido a alguns metros. **Descoberta dos raios X em 1895**



Tubo moderno de raios X

Raio X - 1895, pelo físico W. Röntgen (1845-1923)

- Ele percebeu que quando estava trabalhando com um tubo de raios catódicos ele conseguia ver um brilho de uma placa de um material fluorescente.
- Este brilho persistiu mesmo quando o físico colocou um livro e uma folha de alumínio entre o tubo e a placa.
- Passaram-se semanas até que o cientista entendesse o que saía do tubo.
- Em Dezembro, Rontgen fez a radiação atravessar por 15 minutos a mão da sua mulher, atingindo, do outro lado, uma chapa fotográfica. Após a revelação desta, viam-se nela as sombras dos ossos, na primeira radiografia da história.
- A existência e a importância desta radiação só foi, efetiva e merecidamente, reconhecida no século XX quando W. Roetgen recebeu o Prêmio Nobel da Física em 1901.

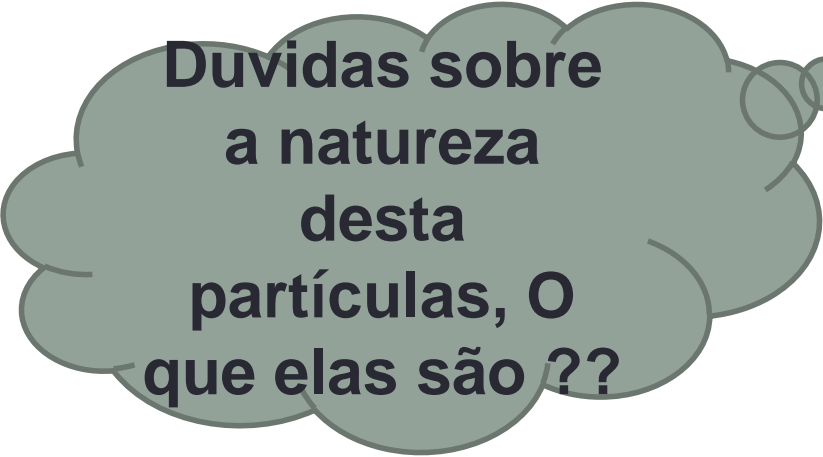


Dúvidas:

Em 1894 apesar da luz ainda não ser bem compreendida, a comunidade ainda não entendia também os raios catódicos.

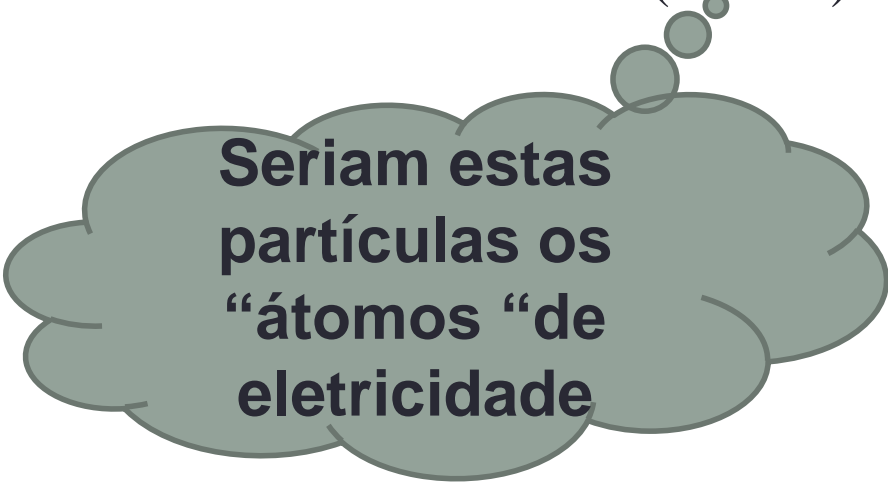
Os Ingleses concordavam com o caráter corpuscular.

No entanto Goldstein, Hertz, Lenard acreditavam que os raios catódicos fossem ondas eletromagnéticas



Duvidas sobre a natureza desta partículas, O que elas são ??

Não podiam ser átomos, os átomos eram neutros e eram constituintes da matéria (neutra)

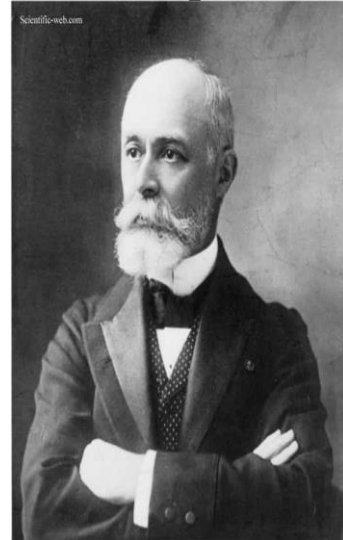


Seriam estas partículas os “átomos “de eletricidade

Descoberta da radioatividade

- Com a descoberta dos raios X por Röntgen,
- Becquerel descobre a radioatividade (1896)
- estudava fosforescência e fluorescência dos materiais, materiais que emitem luz naturalmente após serem expostos à luz intensa
- Observou que alguns desses materiais (urânio), marcaram um filme fotográfico mesmo estando no escuro
- Afinal, qual a natureza dos raios-X de Röntgen e destes raios?.
- Ponto de partida: estudo de alguns materiais que se tornavam fosforescentes sob incidência de luz -
Pergunta: materiais eram capazes emitir qualquer tipo de radiação penetrante como os raios X

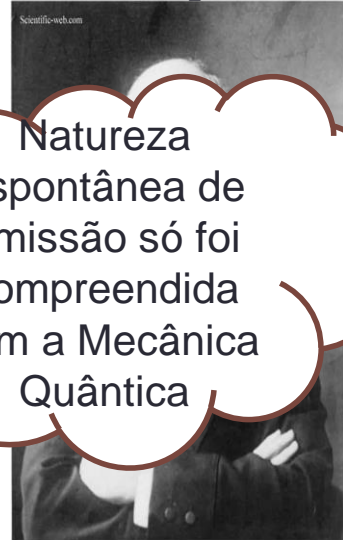
Becquerel



Descoberta da radioatividade

- Sal de urânio possui fosforescência induzida por luz UV. Surpresa: marcavam filmes fotográficos mesmo no escuro – material era capaz de sensibilizar o material mesmo sem ser exposto ao sol
- Questão aberta: qual a natureza dos raios X observados por Röntgen e estes observados por Becquerel ?? “Raios urânicos”

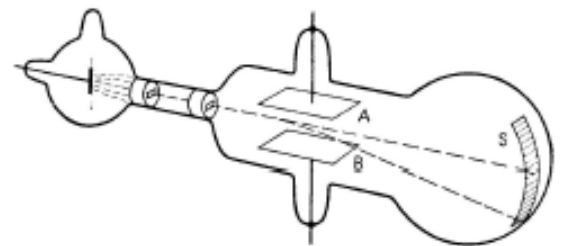
Becquerel



Natureza espontânea de emissão só foi compreendida com a Mecânica Quântica

J.J. Thomson descobre o elétron (1897)

- Thomson também estudava descargas elétricas em gases utilizando tubos de raios catódicos
- Através de um experimento e princípios simples de eletromagnetismo, ele mediu a razão e/m do elétron



Descoberta da radioatividade

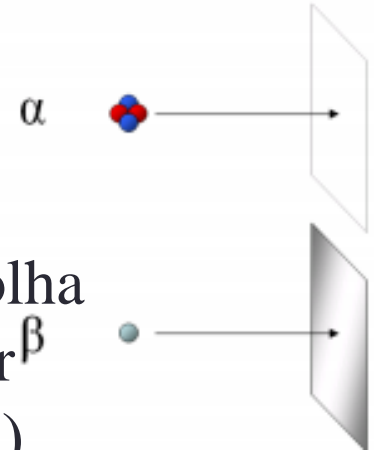
Madame Curie

- Madame Curie, a partir de 1897 refez os trabalhos de Becquerel – ir além – medidas quantitativas - descobre o Tório (Th) - Raios ~~urânicos~~ –
- **Radioatividade – termo para este fenômeno**
- Análise de várias rochas – as que possuíam Th e U emitiam mais radioatividade – possibilidade de descoberta de novos elementos
- Polônio e Rádio descobertos em 1898 - emissores de raios
- Muito trabalho para alcançar níveis maiores de purificação e concentração destes elementos
- Vários tipos de radiação são observados , relacionados ao poder de ionização e penetração na matéria

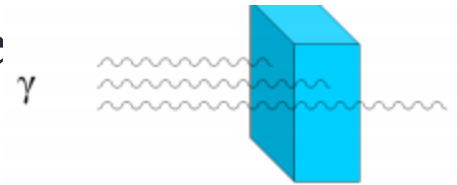


Tipos de radiação

- Rutherford(1899) caracteriza dois tipos: alfa (α) e beta (β). Diferença entre elas: ionização e o poder depenetração. α : altamente ionizante – blindadas por folha de papel. β : menos ionizantes – capazes de atravessar camadas finas (radiografia pode ser feita com raios β)



- Villard (1900) encontrou uma terceira componente radiações - poder de penetração muito maior



- Pierre e Madame Curie (1902) mostraram que os raios β são elétrons
- Rutherford (1908) mostra que a radiação α é equivalente ao elemento He.

A Física no final do século XIX

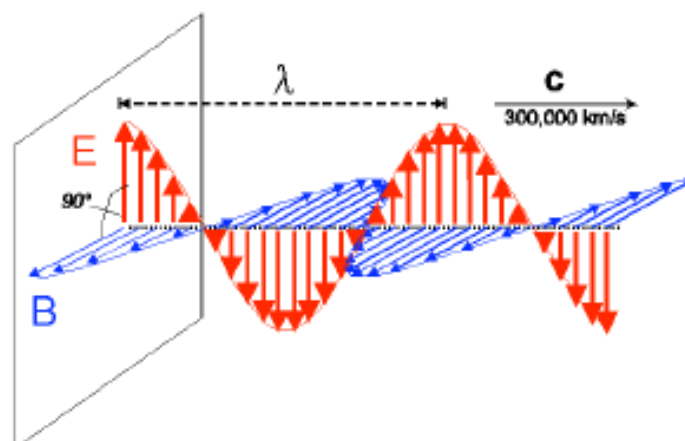
- Eletromagnetismo × Óptica:
 - uma das grandes unificações da física
 - a “aparente” resolução de um problema que durou séculos: a natureza da luz

Natureza da luz: onda ou partículas?

- Polêmica que envolveu grandes físicos e durou vários séculos
- Newton acreditava que a luz constituía-se de feixes de corpúsculos que se deslocam no vácuo em linha reta
- Christiaan Huygens era um dos que defendia a idéia de que a luz era uma onda se propagando em algum meio (qual?)
- Somente no século XIX, com experimentos de Young e Fresnel sobre a interferência e difração da luz é que a natureza ondulatória prevaleceu

Ondas eletromagnéticas

- James Clerk Maxwell estuda o efeito de correntes oscilantes em circuitos
- Essas correntes geram campos elétricos e magnéticos que variam com o tempo



- Simulação de ondas eletromagnéticas

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

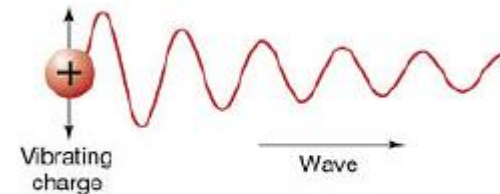
Materiais que emitem na região do visível: carvão, filamento de uma lâmpada, sol

Radiação Térmica

Ondas eletromagnéticas emitidas por todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto

Importância: um dos grandes problemas em aberto da física clássica no final do século XIX

Radiação térmica ocorre devido ao movimento térmico de cargas elétricas que existem no interior dos corpos

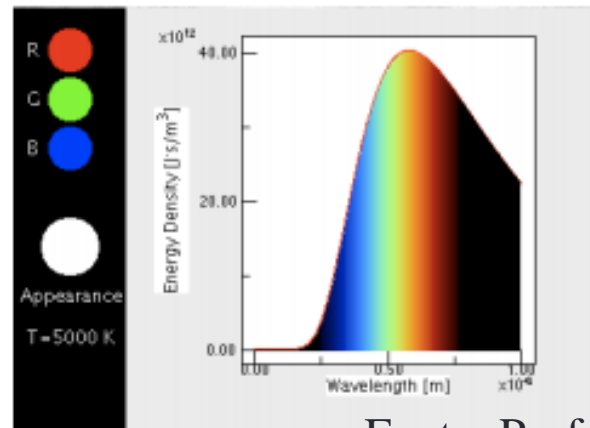
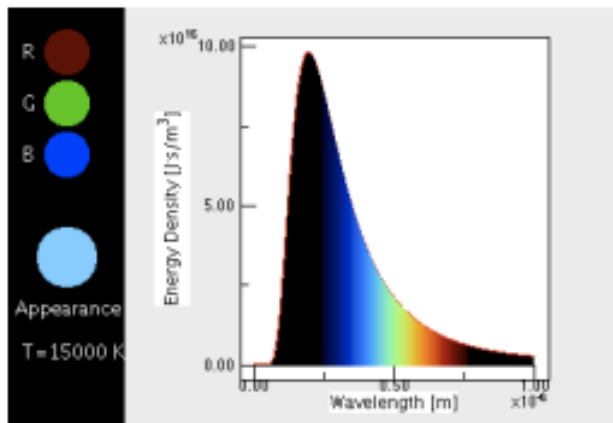


Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

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

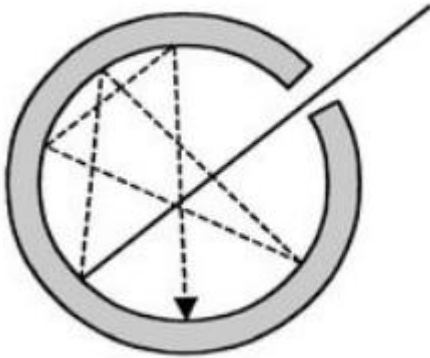


Caso + simples

Corpo Negro



Objetos cuja superfície absorve toda a radiação incidente



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.

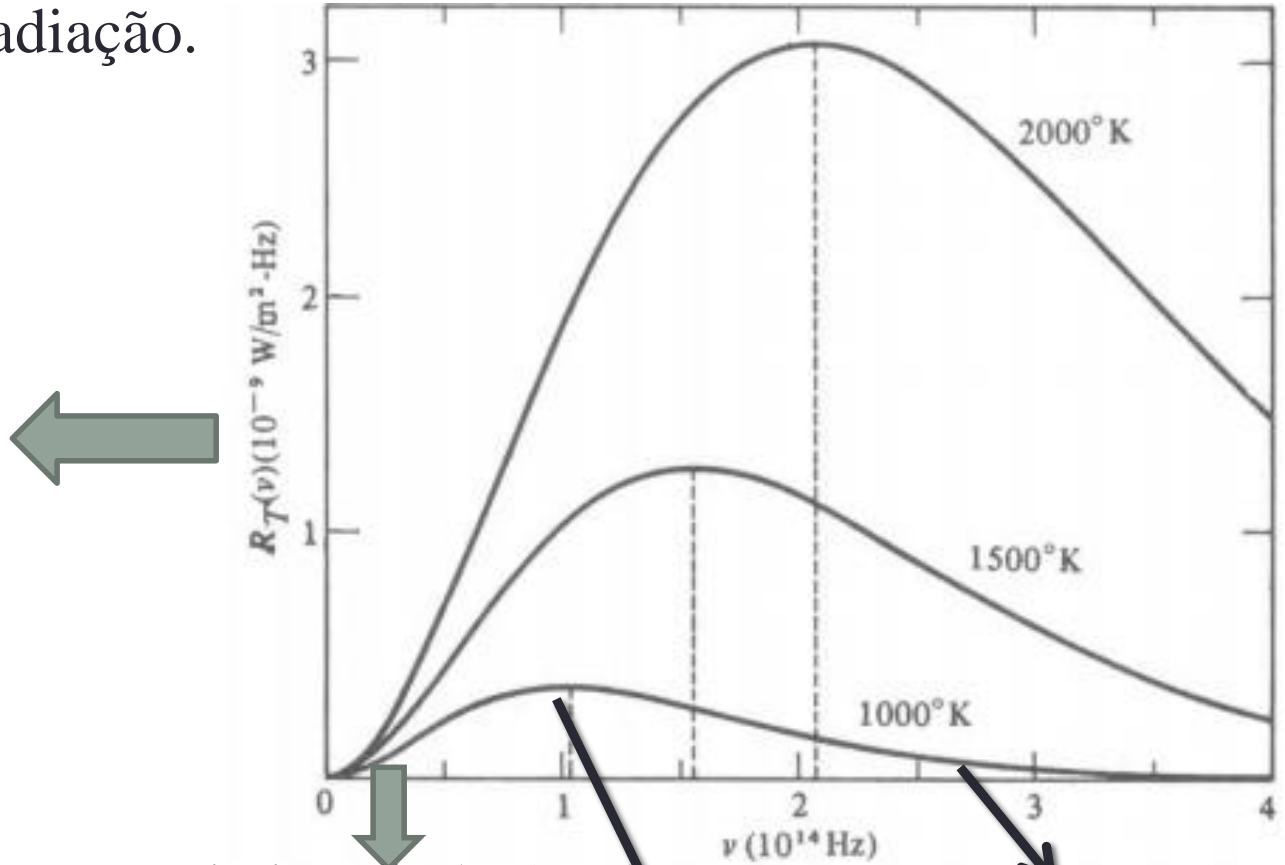
Verifica-se que todos os corpos negros à mesma temperatura emitem radiação térmica com o mesmo espectro

Todos os objetos que se comportam como um corpo negro emitem a mesma radiação espectral (universalidade) que depende da temperatura e não do material de que é feito

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 cai

Potência irradiada é máxima em

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

Radiação de corpo negro – Leis empíricas

- 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

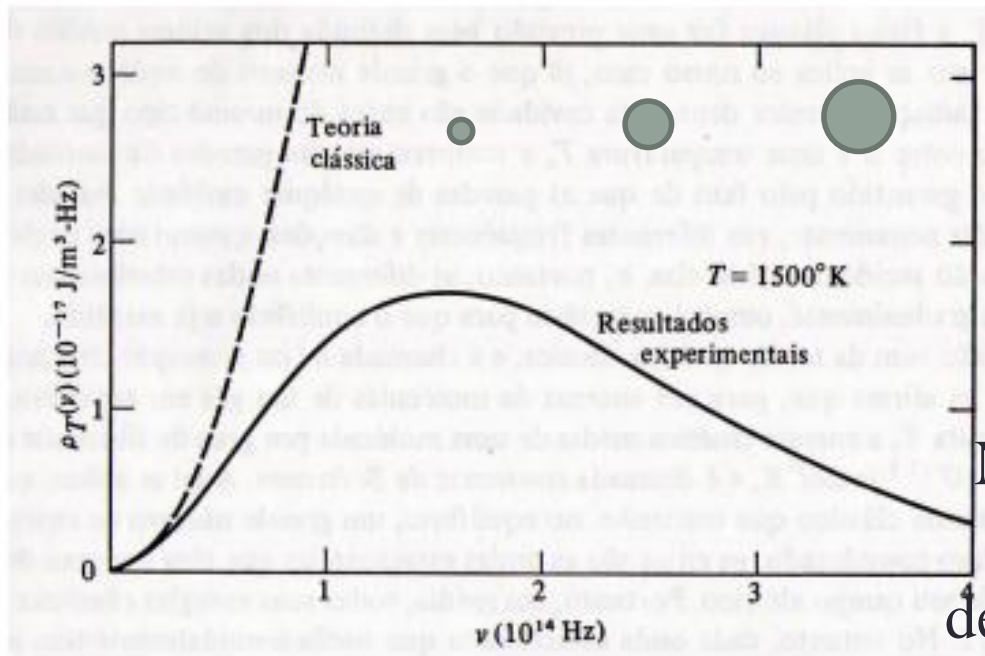
O crescimento rápido de R_T com a temperatura é chamada de Lei de Stefan anunciada em 1879


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

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

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

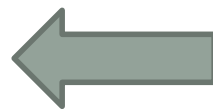
Dúvidas sobre o espectro de $R_T(\lambda)$:



Classicamente conseguimos explicar pequenos valores de ν

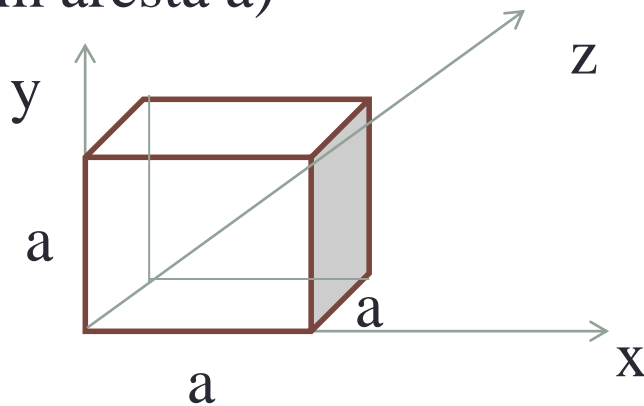
No início do século Ralyleigh-Jeans fizeram cálculo da densidade de energia da radiação da cavidade (ou do corpo negro) mas mostrou uma série de divergência entre a física clássica e os resultados experimentais

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

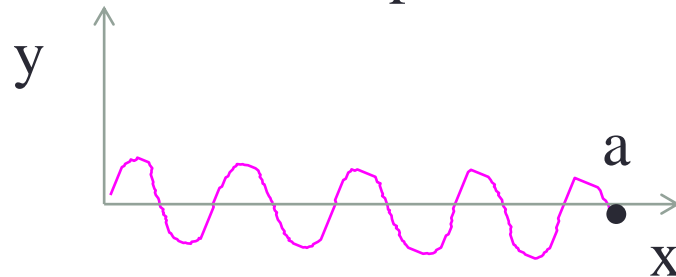


Suposições:

1) Vamos tratar um corpo negro que corresponde a uma cavidade cúbica de superfícies 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) Ondas eletromagnéticas só podem existir no interior dessa cavidade como ondas estacionárias, com nós nas paredes 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

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

Isto só é possível quando $\left(\frac{2\pi a}{\lambda_x}\right) = n\pi \rightarrow \lambda_x = \frac{2a}{n_x}$

ou $\nu \lambda = c$

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

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

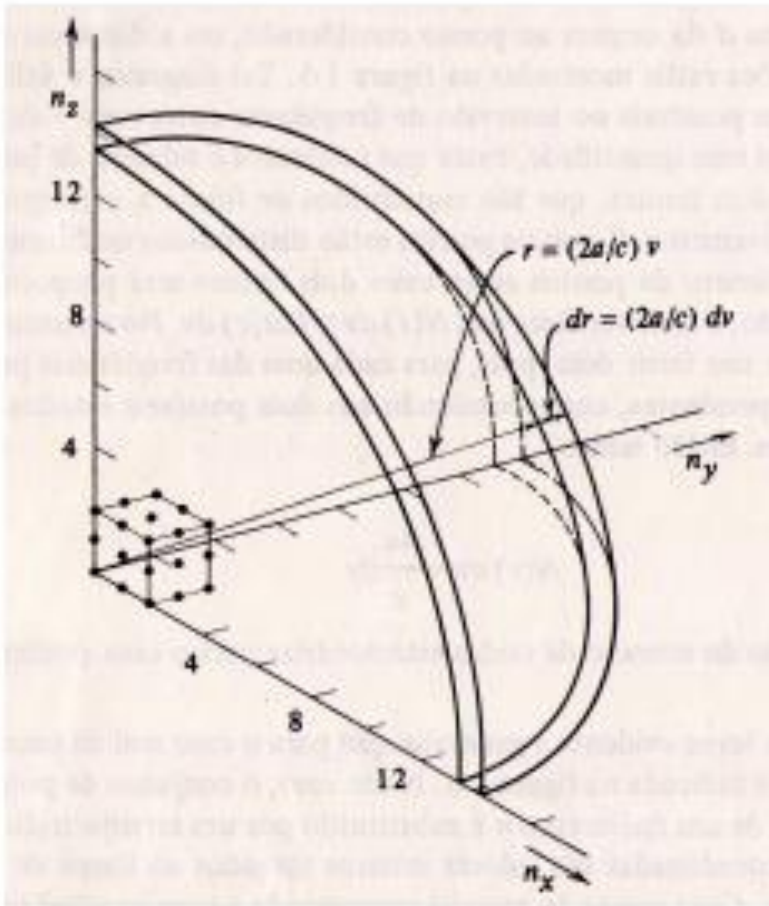
$$N(\nu) d\nu$$

6) próximo passo consiste em contar o número de ondas estacionárias que “cabem” dentro da cavidade com os diferentes valores de frequência ν : $N(\nu)d\nu$

AREA DA SUPERFÍCIE DA ESFERA

Caso tridimensional

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



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

2 ondas possíveis para cada frequência

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

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



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

Ondas eletromagnéticas estacionárias dentro da cavidade

- **CALCULAMOS**

de ondas estacionárias que “cabem” dentro da cavidade com os diferentes valores de frequência ν : $N(\nu)d\nu$



- Em seguida, multiplicamos esse valor pela energia média de cada onda estacionária e dividimos pelo volume da cavidade para obter $\rho_T(\nu)$, ou seja:

$$\rho_T(\nu)d\nu = \langle E \rangle \frac{N(\nu)d\nu}{V}$$

Energia média de cada onda estacionária

- Vamos utilizar uma abordagem estatística para obter a energia média de cada onda estacionária
- Essa abordagem é válida pois estamos tratando de um sistema (corpo negro) que possui uma temperatura (T) bem definida