



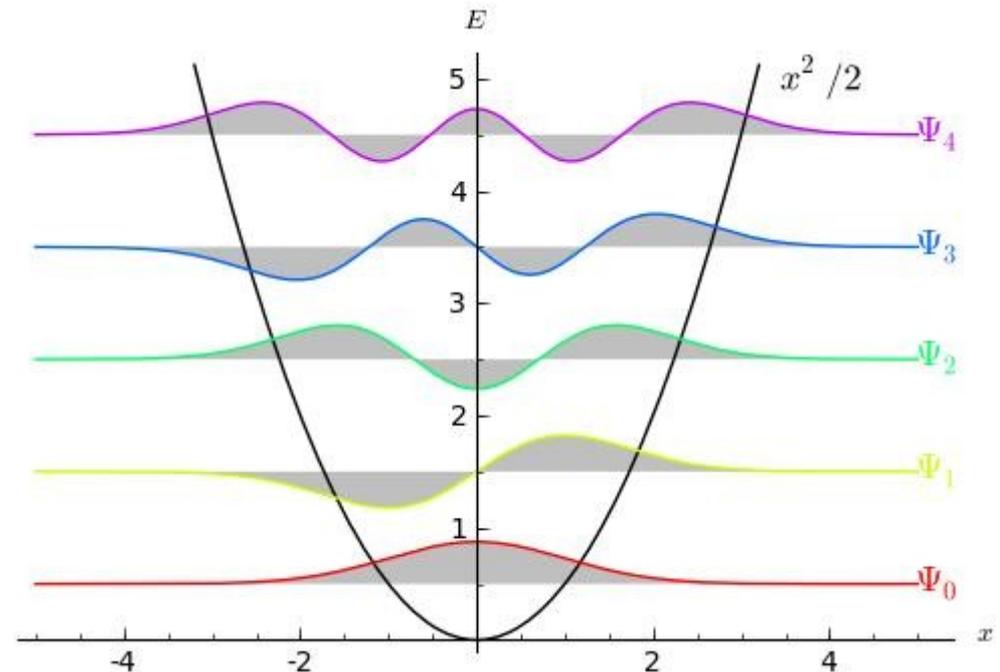
Universidade Federal do ABC

Mecânica Quântica

Aula 1: Apresentação Radiação Térmica, Teorias Clássica e de Planck da Radiação da Cavidade

Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br



<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/MQ.html>

Física Quântica

Def. segundo o Instituto Liberal: Doutrinação comunista disfarçada de ciência que “harmoniza” com o uso de drogas, com a ideia de que o indivíduo é uma ilusão, criando uma justificativa para a irresponsabilidade e o ateísmo.

Para nós: “Física das escalas atômicas e sub-atômicas”

Física Quântica

- Física das **escalas atômicas** e **sub-atômicas**.
- Clássica \Leftrightarrow Quântica (desde ~ 1900)
- Certas grandezas (matéria, carga elétrica, energia, momento angular, ...) ocorrem somente em determinadas valores \Rightarrow **Quantizadas**
- Partículas têm propriedades de ondas (comprimento de onda, interferência, ...) e vice-versa (quantização, momento linear, localização no espaço, ...) \Rightarrow **Dualidade partícula-onda**
- Estas partículas/ondas são descritos por **funções de ondas** (distribuições de probabilidades), que satisfazem a **Equação de Schrödinger**.

Física Quântica

- A física quântica **não é determinista**
- Existem **indeterminações** nas grandezas físicas (posição, momento linear, ...) cujos limites inferiores são relacionados pelo **princípio de incerteza** de Heisenberg.
- Partículas idênticas são indistinguíveis e **intercambiáveis**.
- Certas partículas (elétrons, prótons) seguem o **princípio de exclusão de Pauli**: Dois elétrons (ou prótons, ou ...) não podem estar ao mesmo tempo no mesmo estado (quântico).
- Os efeitos da física quântica se manifestam no mundo **microscópico** (átomos, partículas elementares).
Para ordens de grandeza do mundo **macroscópico**, as leis da física quântica têm que tender às leis da física clássica
=> **princípio de correspondência**

Quantização da Matéria: Átomos

A menor unidade de uma substância (do grego a-tomo = indivisível).

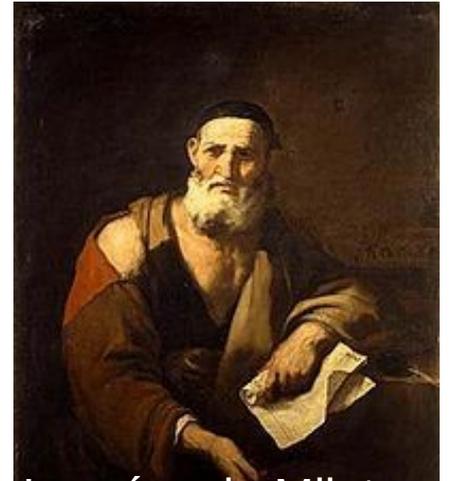
Inicialmente, conceitos atômicos estavam baseados em **considerações filosóficas** e **não** em **observações experimentais**.

Idea desenvolvido por **Kanada** (Índia, 600 a.C.), **Leucípo** de Mileto e seu pupilo, **Demócrito** de Abdera (considerado o **pai** do **atomismo grego**), **Epícuro** de Samos (342-271 a.C.) e defendido por Newton, Claus, Maxwell, Boltzman e outros.

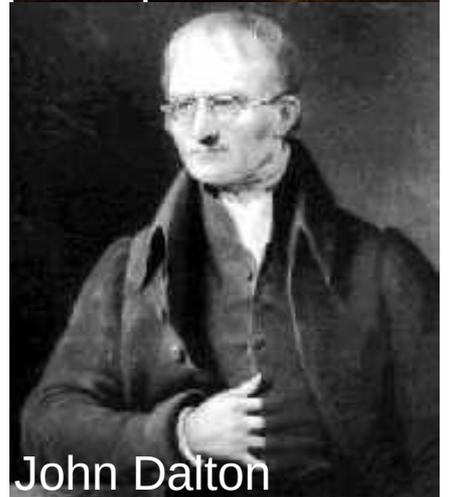
1803/08(?) - **John Dalton: Primeiro modelo atômico** com **base experimental**.

“Modelo da bola de bilhar”.

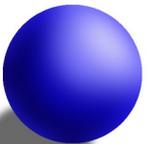
=> Vide a disciplina Estrutura da Matéria



Leucípo de Mileto

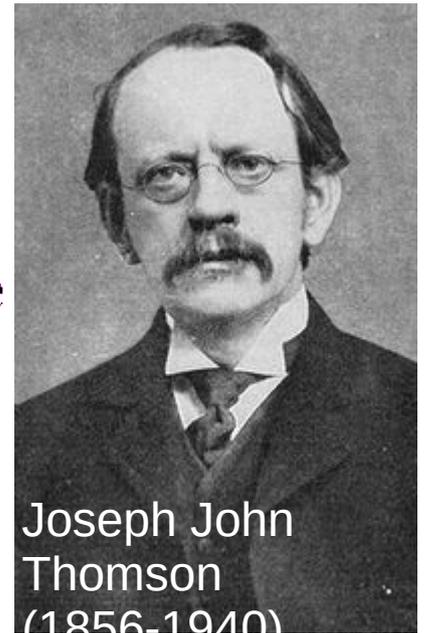


John Dalton

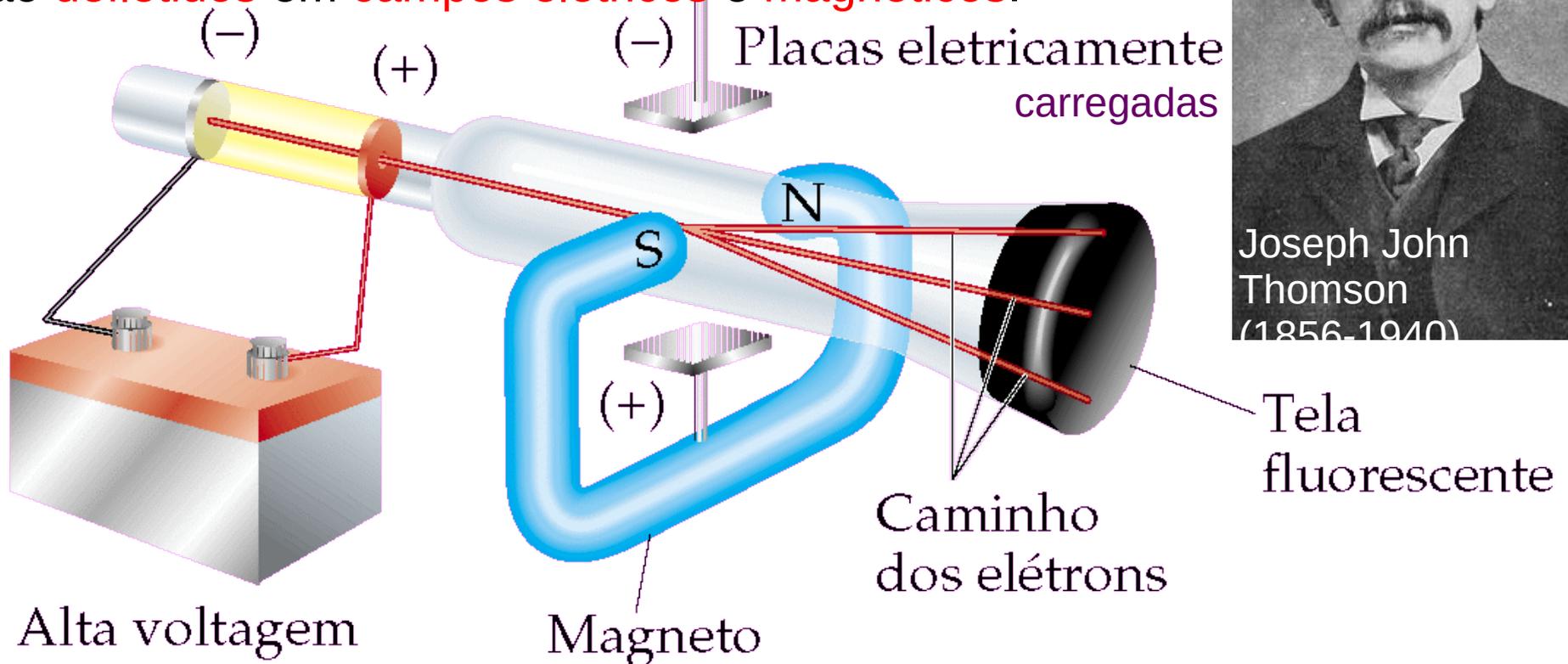


A descoberta da estrutura atômica

Em 1897, J. J. Thomson observou que os **raios emitidos** em **altas voltagens**, os “raios catódicos” (descobertos por Geissler (1859) e estudados por Goldstein e Crookes), são **defletidos** em **campos elétricos** e **magnéticos**.



Joseph John Thomson
(1856-1940)



=> Os “raios catódicos” consistem de **partículas carregadas**!
Descoberta do primeiro **constituente** dos **átomos**, o **elétron**.

A descoberta da estrutura atômica

Raios catódicos e elétrons

A **voltagem** faz com que **partículas negativas** se **desloquem** do **eletrodo negativo** para o eletrodo **positivo**.

=> Primeiro **acelerador** de **partículas**!

Considere os raios catódicos saindo do eletrodo positivo através de um pequeno orifício.

Se eles **interagirem** com um **campo magnético** perpendicular a um **campo elétrico** aplicado, os raios catódicos podem sofrer **diferentes desvios**.

EM: Força de Lorentz: $\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} + q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

onde q = carga da partícula (= $-e$), \mathbf{v} = sua velocidade (vetor), \mathbf{E} , \mathbf{B} = os campos elétrico e magnético defletores (vetores).

A descoberta da estrutura atômica

Raios catódicos e elétrons

Aceleração que causa o desvio, perpendicular à direção do raio:

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m = q/m \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

m = massa da partícula ($= m_e$)

=> O **desvio** depende da **razão q/m**

Thomson determinou que a proporção carga-massa de um elétron é $-1,76 \cdot 10^8$ C/g.

Em muitos experimentos na época se media q/m .

Objetivo: encontrar a carga do elétron para determinar sua massa (ou vice-versa).

(As medidas de Thomson já indicavam que a massa do elétron era cerca de 2000 vezes menor do que a massa do átomo de H.)

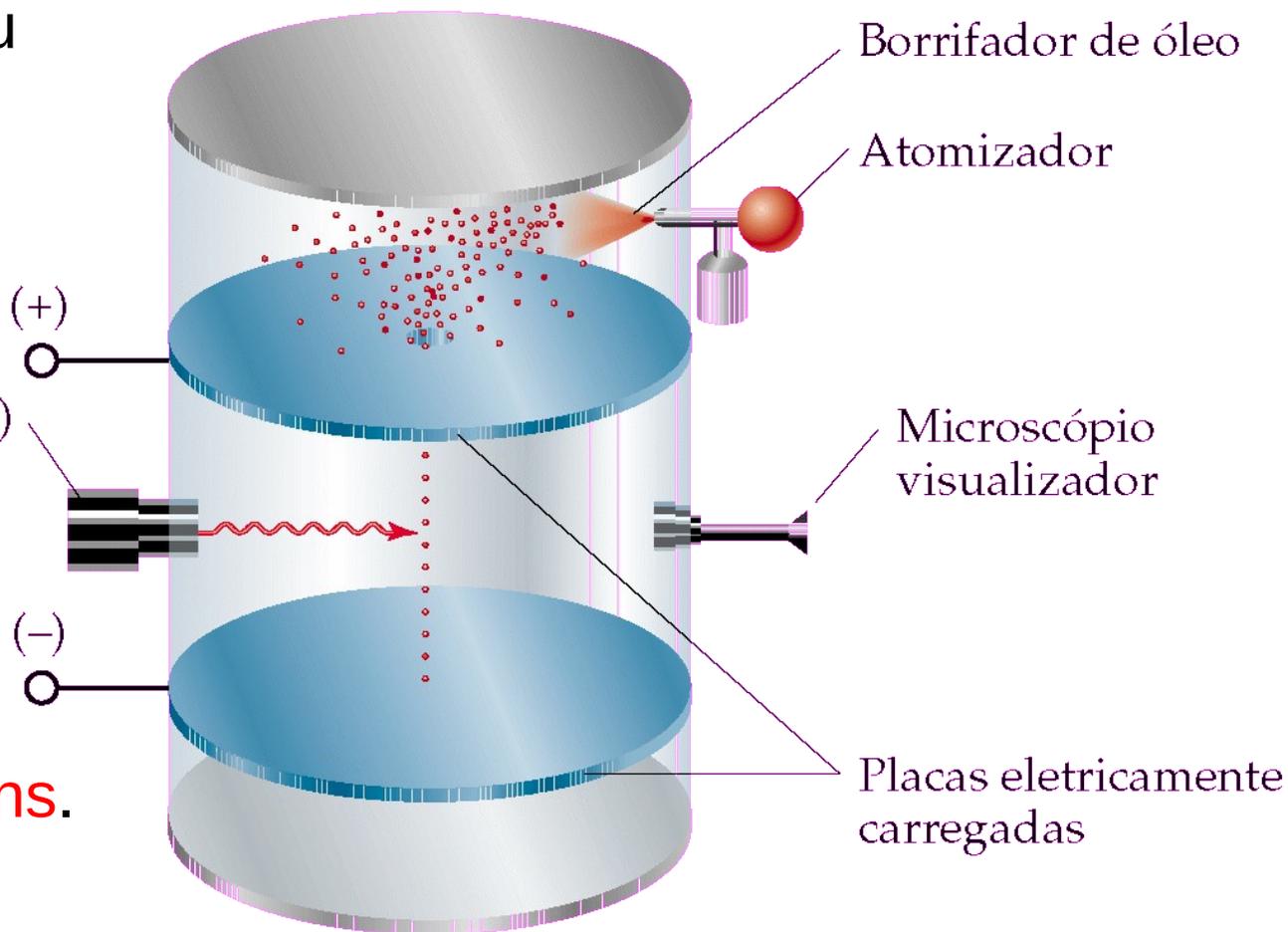
A descoberta da estrutura atômica

Experiência de Millikan: A carga do elétron

1911: Neste experimento, Millikan conseguiu **medir a carga do elétron** medindo o efeito de um

campo elétrico sobre **gotas de óleo** carregadas por **poucos elétrons**.

Fonte de raios X
(radiação ionizante)



A descoberta da estrutura atômica

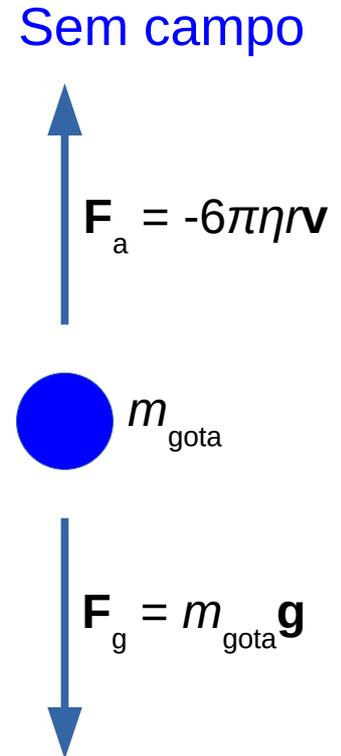
Experiência de Millikan: A carga do elétron

As gotas eram carregadas e descarregadas durante o experimento através de um feixe de raios-X.

Desta maneira foi possível **carregar** as **gotas** por **poucos elétrons**.

Através da **fricção** das gotas com o **gás** na câmara com o **campo elétrico desligado**, Millikan conseguiu medir os seus **diâmetros** e (pela densidade conhecida) as suas **massas**.

F_a é a força da **fricção** sobre uma gota de raio r e com **velocidade** v dentro de um gás com **viscosidade** η .



A descoberta da estrutura atômica

Experiência de Millikan: A carga do elétron

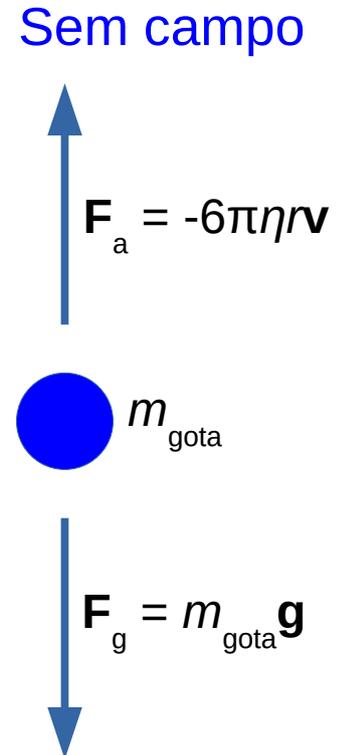
Igualando a força da **fricção** com a **gravidade**,
obtem-se a **velocidade terminal** da gota:

$$v = \frac{mg}{6\pi\eta r} = \frac{4/3\rho r^2 g}{6\eta}$$

Medir v , $r \Rightarrow$ determinação de m .

Quando a **carga** das gotas **mudava**, elas se **movimentavam** dentro do **campo elétrico**.

A **velocidade** que a partícula ganha é **proporcional** a sua **carga**.



A descoberta da estrutura atômica

Experiência de Millikan: A carga do elétron

Ajustando o **campo** de tal maneira, que uma gota “flutua”, ou seja, que a **gravidade** e a **força eletrostática** se anulam, pode-se **medir** a **carga** com precisão ainda melhor (forças pra cima são tidas como positivas):

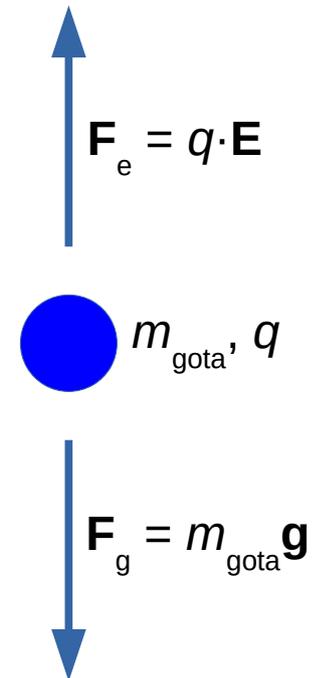
$$\text{Gravidade: } F_g = -m_{\text{gota}} g$$

$$\text{Força elétrica: } F_e = -q \cdot E$$

$$F_g + F_e = 0 \Rightarrow q = -m_{\text{gota}} g/E$$

As cargas ocorriam sempre em **múltiplos** (negativos) de uma **carga elementar** e . \Rightarrow **carga do elétron**

Com campo



A descoberta da estrutura atômica

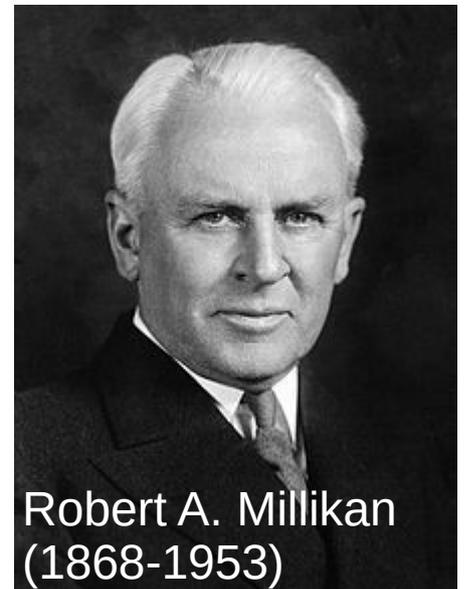
Experiência de Millikan: A carga do elétron

Utilizando este experimento, Millikan determinou que a **carga do elétron** é $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Conhecendo a proporção carga-massa, $-1,76 \cdot 10^8$ C/g, Millikan calculou a **massa do elétron**: $9,10 \cdot 10^{-28}$ g.

Com números mais exatos, concluimos que a massa do elétron é $9,10939 \cdot 10^{-28}$ g.

=>  Prémio Nobel em 1923



Radiação do Corpo Negro

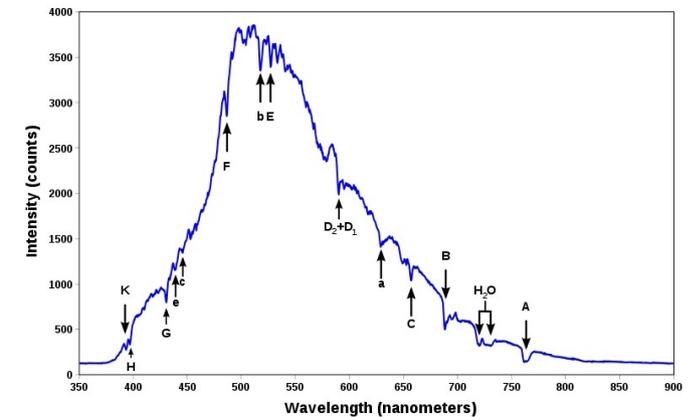
- Toda matéria emite radiação eletromagnética.
- A faixa espectral da maior intensidade desta radiação depende da temperatura.

Exemplos: seres humanos irradiam predominantemente no infravermelho, o Sol no ótico.

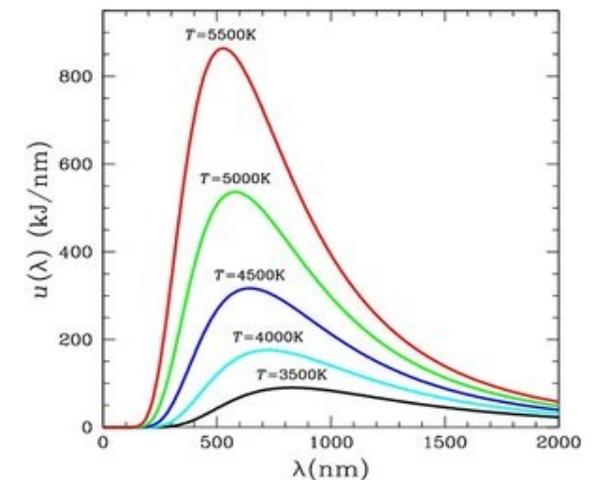
- Na física, um corpo negro é um corpo que absorve toda a radiação que nele incide: nenhuma luz o atravessa nem é refletida. Ele emite radiação térmica pura (ele não é negro!). Na prática, uma cavidade com uma pequena abertura na parede é uma boa aproximação para um corpo negro.

- Observa-se, que os espectros de corpos negros têm formas típicas.

corpo qualquer (Sol)

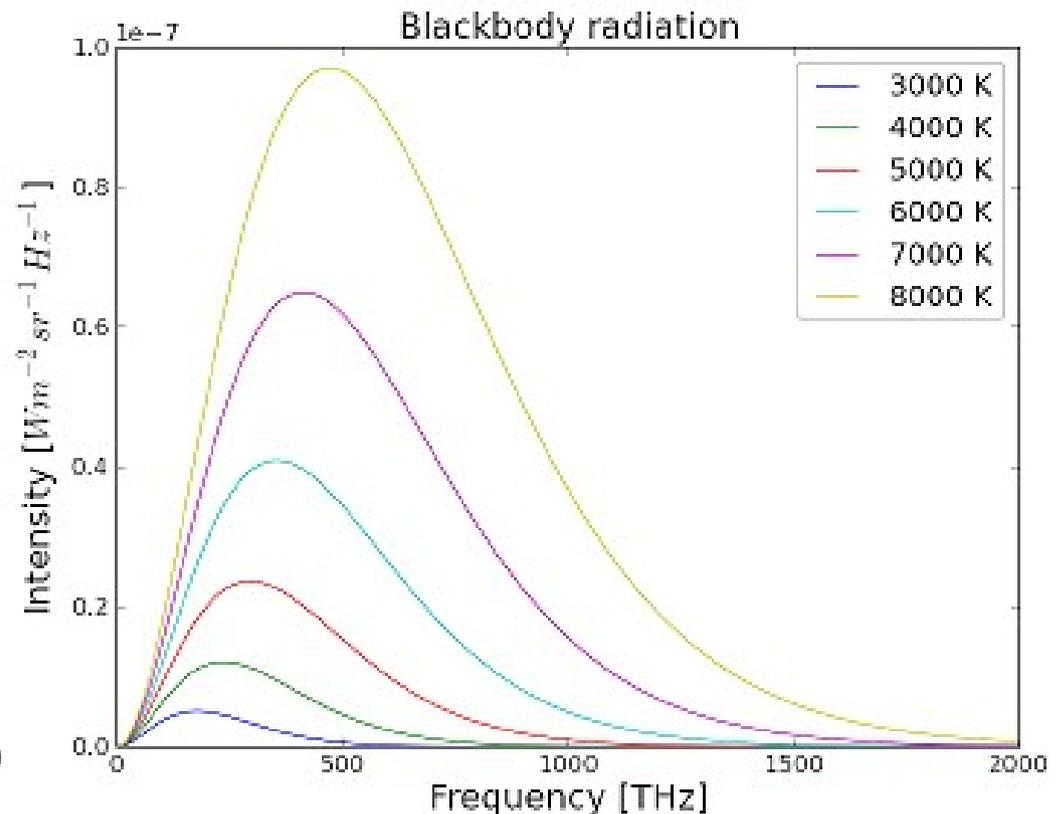
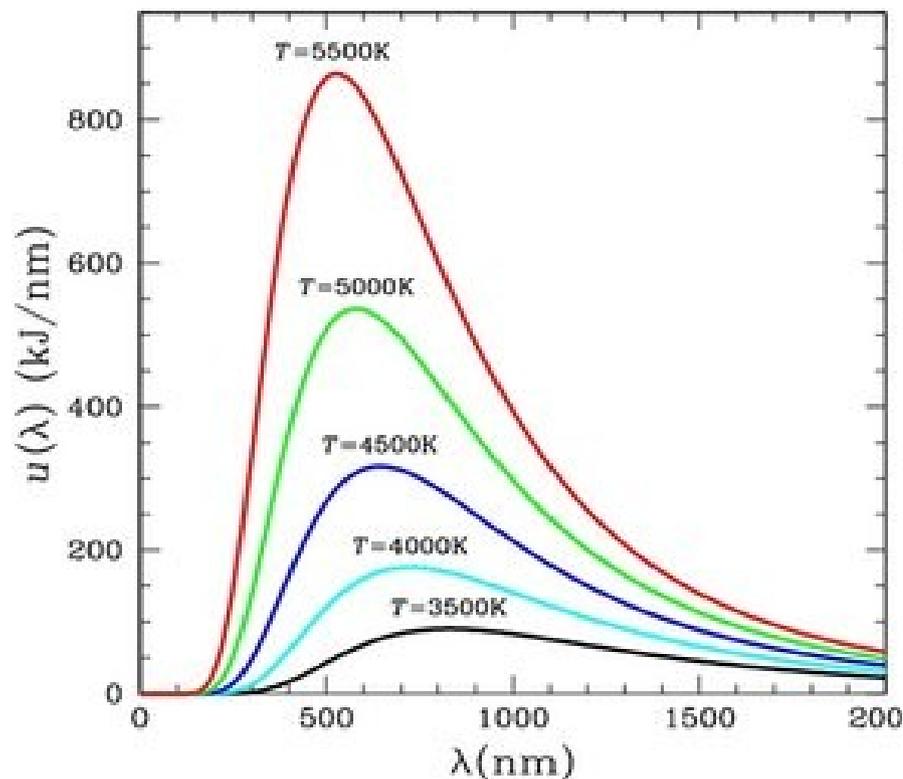


corpos negros



Radiação do Corpo Negro

- Em função do comprimento de onda e da Frequência
- Área sob as curvas ($R_T = \int_0^\infty R_T(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty R_T(\nu) d\nu =$ **intensidade total**)
aumenta com a **temperatura**
- λ_{\max} **diminui** - resp. ν_{\max} **aumenta** com a **temperatura**

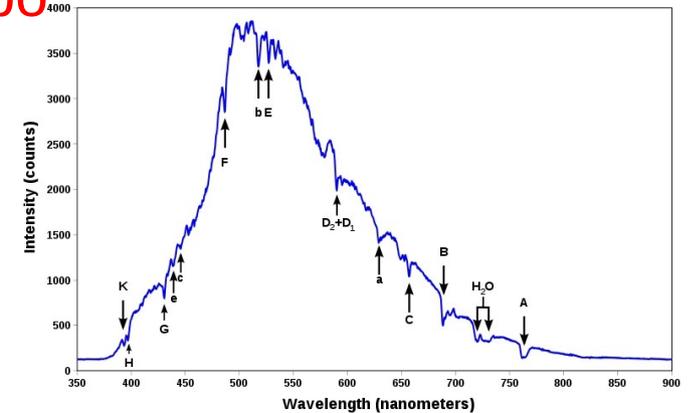


Radiação do Corpo Negro

- Em 1879, Stefan descobriu, que a **potência** desta **corpo qualquer (Sol)** radiação por **área** de **superfície** de **qualquer corpo** depende apenas da sua **temperatura**:

$$R_T = \sigma T^4, \text{ onde } \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

- Em 1884, Boltzmann forneceu uma explicação teórica para esta lei, que passou a ser chamada **Lei de Stefan-Boltzmann**.



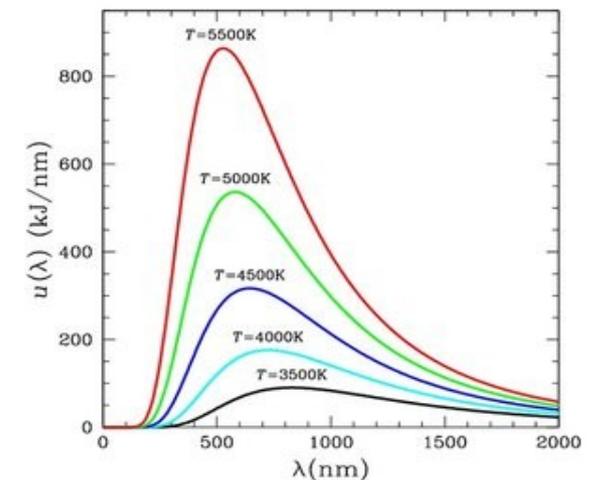
corpos negros



Josef Stefan
(1835-1893)



Boltzmann



Radiação do Corpo Negro

• Em 1893, Wien mostrou que o **comprimento de onda** do **pico** do espectro de um **corpo negro** é **inversamente proporcional** a sua **temperatura**:

Lei de deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\max} = \text{const} / T, \text{ onde } \text{const} = 2.89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

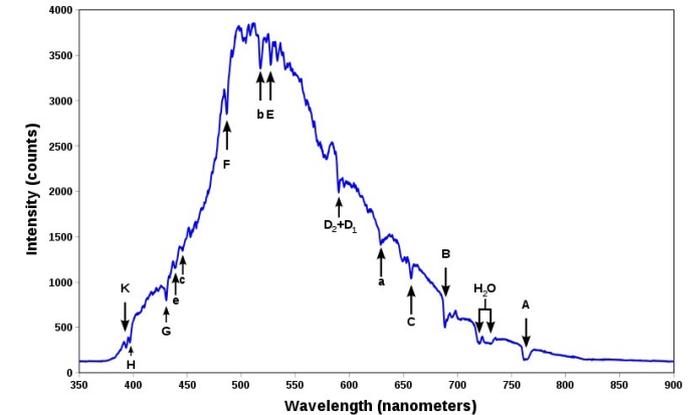
(ou ν_{\max} prop T)

Quanto **maior** a **temperatura**, tanto **mais intensa** e **energética** é a radiação térmica.

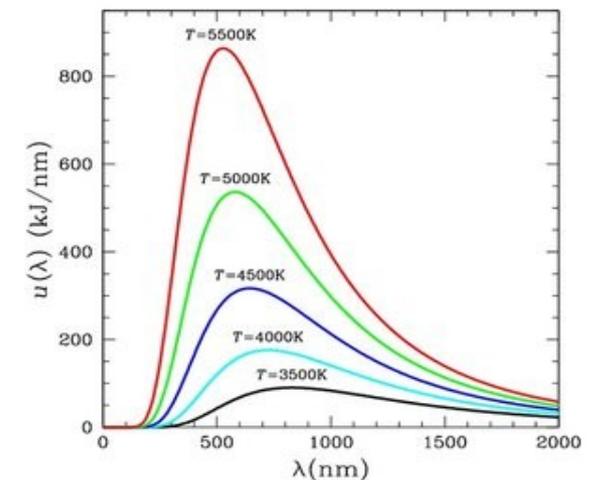


Wilhelm Carl Werner
Otto Fritz Franz Wien
(1864-1928)

corpo qualquer (Sol)



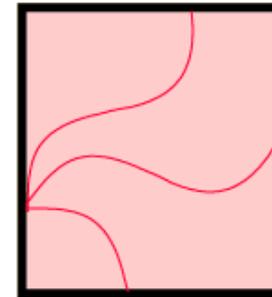
corpos negros



Radiação do Corpo Negro

1900 Rayleigh e Jeans

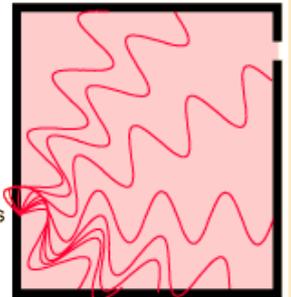
- Desenvolveram uma teoria para prever o espectro de um Corpo Negro.
 - Cabem **mais ondas** com **curtos λ** no Corpo Negro do que ondas com λ compridos.
- => O **número** de **modos** de **oscilação** com comprimento de onda entre λ e $\lambda+d\lambda$, $N(\lambda)d\lambda$, tem que **aumentar**, quando **λ diminui**.
- Obtém-se $n(\lambda) = 8\pi/\lambda^4$.
 - Para detalhes do cálculo, vide Eisberg e Resnick, p. 24-30.



Number of modes
per unit frequency
per unit volume

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

For higher frequencies
you can fit more modes
into the cavity. For
double the frequency,
four times as many
modes.



Lord Rayleigh (1842-1919)
Sir James Jeans (1877-1946)



Radiação do Corpo Negro

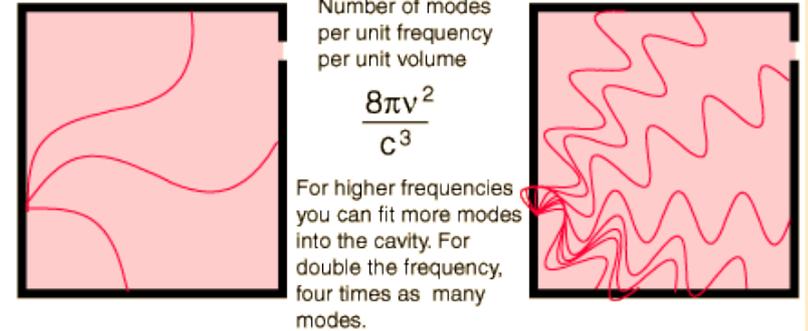
1900 Rayleigh e Jeans

- Tomando $k_B T$ como energia por modo (k_B ou, frequentemente, simplesmente k = constante de Boltzman = $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), obtém-se para a densidade de energia das ondas no interior:

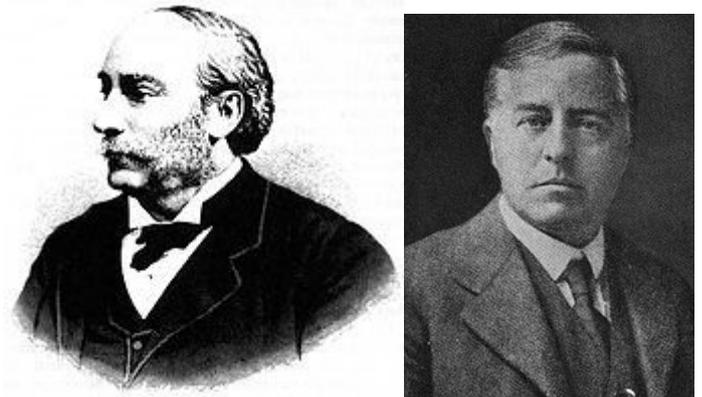
$$\rho_T(\lambda) = k_B T N(\lambda) = 8\pi k_B T / \lambda^4 \text{ prop. } 1/\lambda^4,$$

conhecida como **Lei de Rayleigh-Jeans**.

- Em função da frequência (usando $\rho_T(\lambda)d\lambda = -\rho_T(\nu)d\nu$ e $\lambda = c/\nu$)
 $\Rightarrow \rho_T(\nu) = \rho_T(\lambda) d\lambda/d\nu$:
 $\rho_T(\nu) = 8\pi\nu^2 k_B T / c^3 \text{ prop. } \nu^2$



Lord Rayleigh (1842-1919)
Sir James Jeans (1877-1946)



Radiação do Corpo Negro

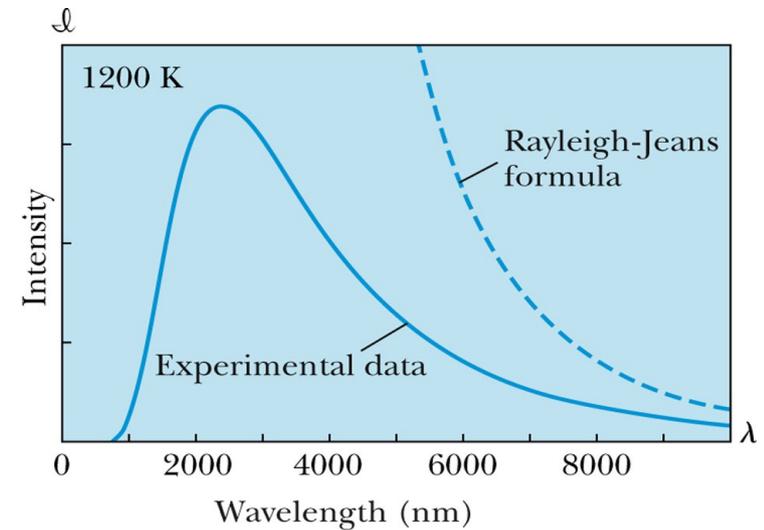
1900 Rayleigh e Jeans

- Para grandes valores de λ (ν pequenas), a lei prevê bem o espectro do Corpo Negro.
- Porém para $\lambda \rightarrow 0$ ($\nu \rightarrow \infty$), ρ_T tende a infinito, e

a energia total vira

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

Este resultado foi chamada de **catástrofe do ultravioleta** e estava em conflito com as observações.



Radiação do Corpo Negro

1900 Planck

Hipótese: **Quantização da energia dos átomos na parede:**

• Planck sugeriu, que as **ondas** são **emitidas** por **osciladores harmônicos** (os átomos) nas paredes do Corpo Negro, e que as **energias** destes osciladores só podem assumir certos **valores discretos**, múltiplos de um certo **quantum** de **energia** ε :

$$E_n = n\varepsilon = nh\nu_0 = nhc/\lambda_0,$$

onde ν_0 e λ_0 são **frequência** e **comprimento de onda** do **modo fundamental** destes osciladores,

$n = 1, 2, 3, \dots$ é o **número quântico** do **modo** de **oscilação** do **átomo** emitindo a onda, e $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s = constante de Planck

=> **Quantização** da energia oscilatória dos átomos.

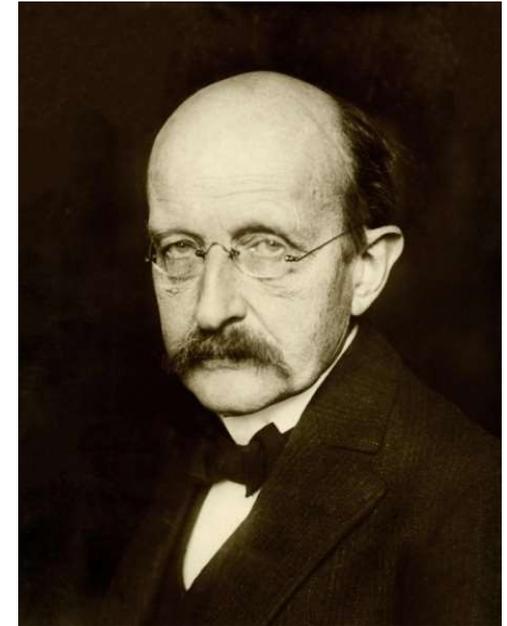
Radiação do Corpo Negro

1900 Planck

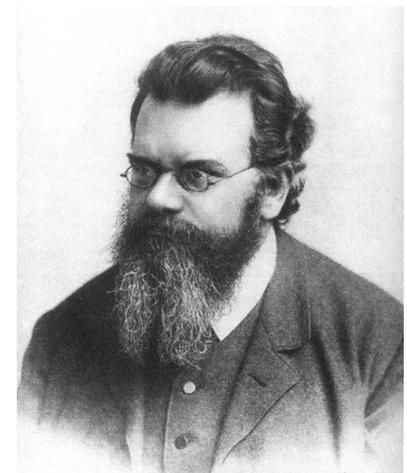
- Em um conjunto de objetos com **estados discretos**, os **números** de objetos por **estado** com **energia E** segue a **função** de **distribuição** de Boltzman:

$$f(E) = A \cdot e^{-E/k_B T}$$

No caso do corpo negro: Há muito **menos átomos** com **energias altas** (os que emitem radiação com curtos λ) do que átomos com energias baixas, o que **evita** a **catástrofe** do **ultravioleta**.



Max Planck (1858-1947)



Boltzmann
(já conhecemos)

Radiação do Corpo Negro

1900 Planck

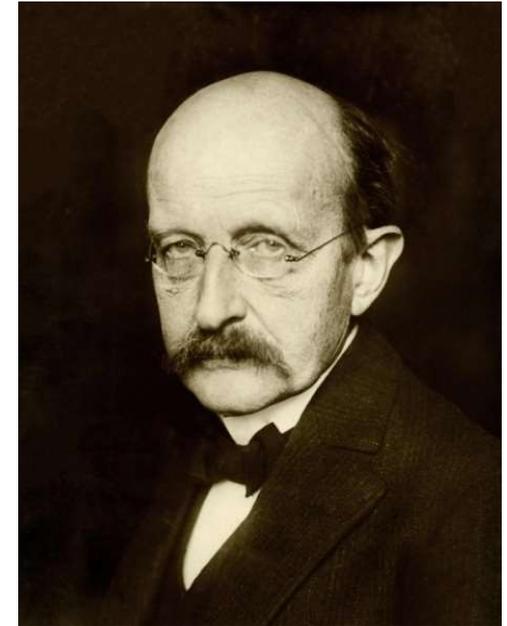
· Usando esta hipótese, Planck recalculou o espectro teórico do corpo negro em função da sua temperatura:

Lei de Planck

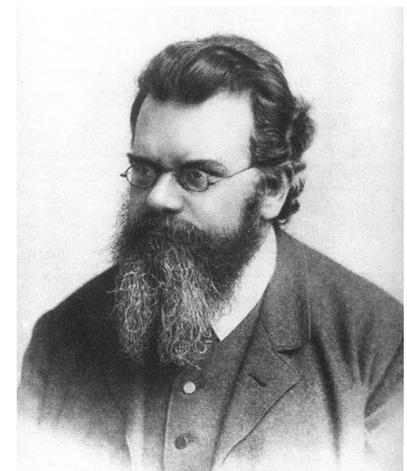
Em função da frequência: $\rho_T(\nu) = 8\pi h\nu^3/[c^3(e^{h\nu/kT} - 1)]$

Em função do comprimento de onda:

$$\rho_T(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$



Max Planck (1858-1947)



Boltzmann
(já conhecemos)

Radiação do Corpo Negro

1900 Planck

• Lei de Planck:
$$\rho_T(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

• Reproduz bem os espectros medidos.

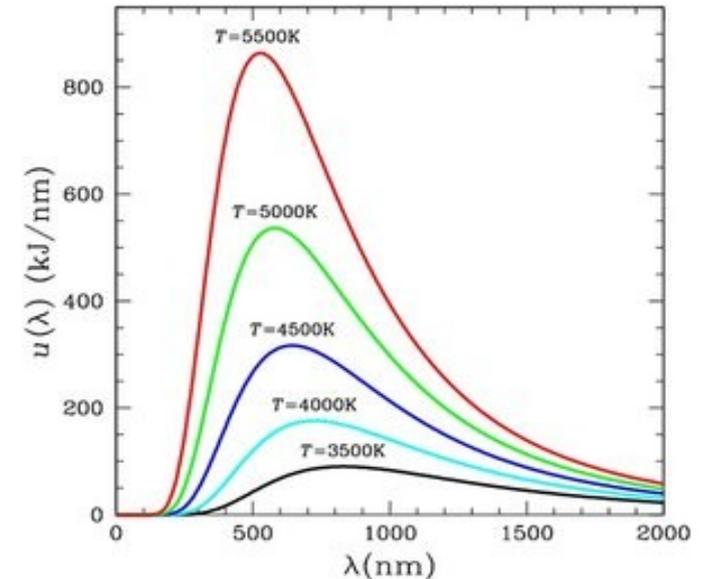
• Para λ grandes, ela se torna a Lei de Rayleigh-Jeans,
$$\rho_T(\lambda) = 8\pi kT/\lambda^4 \text{ prop. } 1/\lambda^4$$

• Para $\lambda \rightarrow 0$, $\rho_T(\lambda) \rightarrow 8\pi hc/\lambda^5 \cdot e^{-hc/\lambda kT} \rightarrow 0$

• A partir da Lei de Planck é possível deduzir as Leis de Stefan-Boltzmann, $R_T = \sigma T^4$

e de deslocamento de Wien (tomando $dR_T/d\lambda = 0$), $\lambda_{\max} = \text{const} / T$

=> A hipótese de **átomos** com **energias quantizadas** consegue **explicar** os **espectros** dos **Corpos Negros**.



Nascimento da mecânica quântica!

Radiação do Corpo Negro

O Uso da Lei da Radiação de Planck na Termometria

· Lei de Planck:
$$\rho_T(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

· Para um valor constante de λ , por exemplo a faixa, naquela mede um certo detector, a Lei de Planck pode também ser interpretada como função (crescente) da temperatura.

=> A **intensidade** da radiação emitida por um objeto **numa dada faixa espectral** dá a **temperatura** do objeto (aplicando uma correção pelo fato, de ele não é um corpo negro).

=> **termômetro de radiação** (não precisa de contato) ou **pirômetro**.

Usando um detector que media a radiação em micro-ondas provindo do céu, na década de 50 Penzias e Wilson descobriram uma radiação correspondendo a ~ 3 K, a radiação cósmica de fundo.



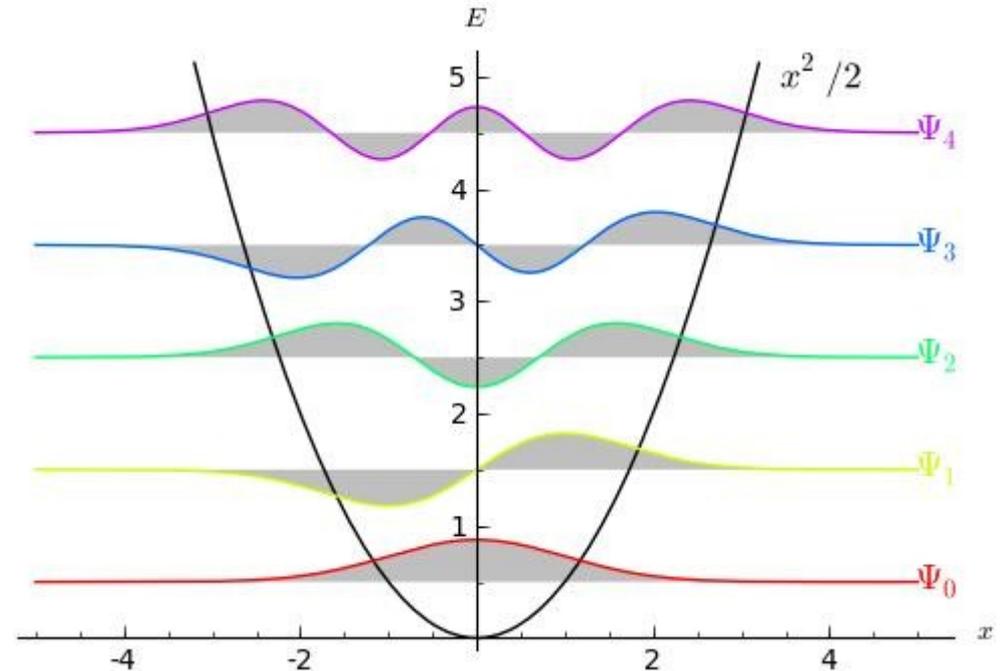
pirômetro que opera no infravermelho

Física Quântica

FIM PARA HOJE



Universidade Federal do ABC



<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/MQ.html>