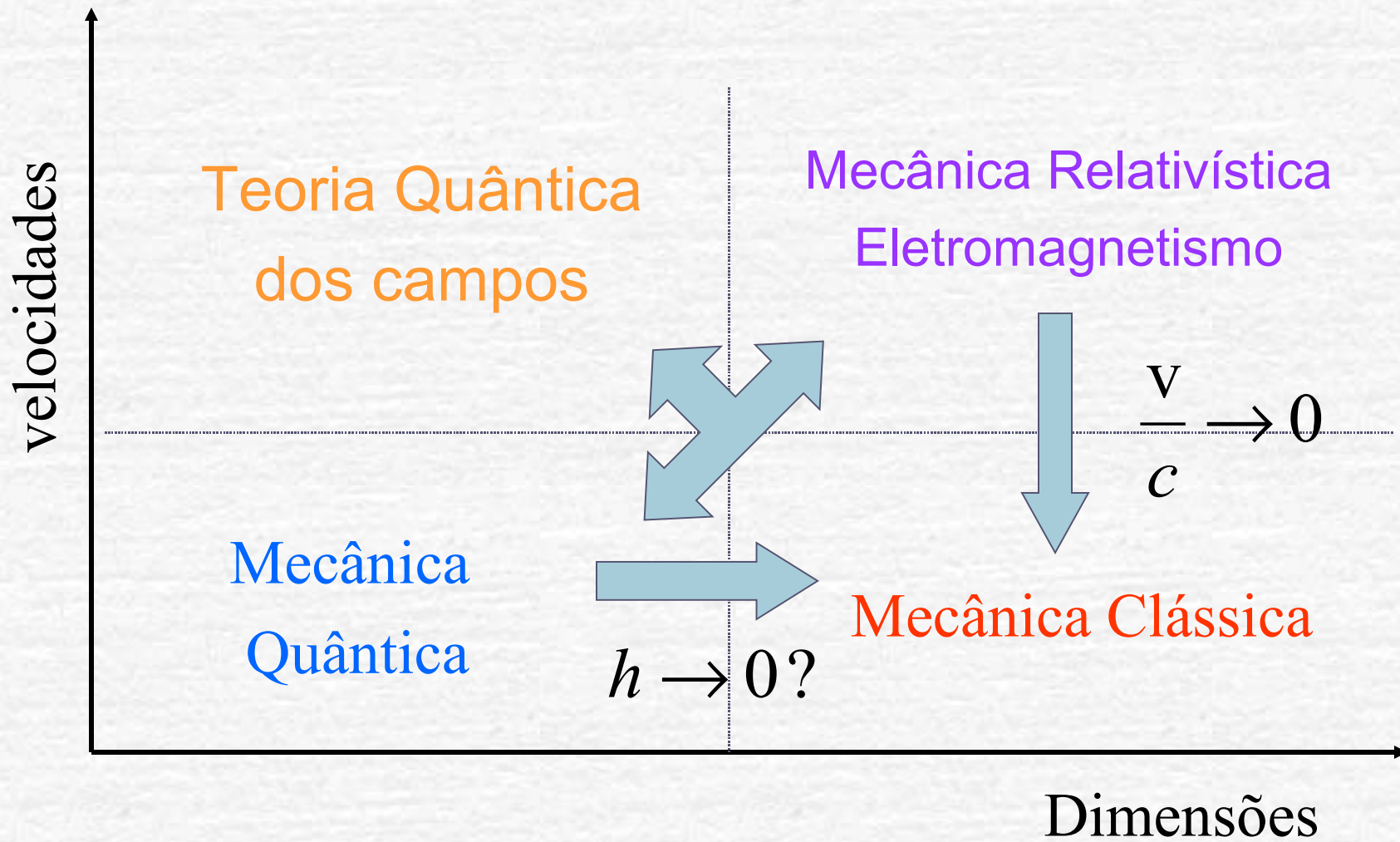


O caminho para a Mecânica  
Quântica:  
na contramão do senso comum

Rio de Janeiro, Março de 2009

M. C. Nemes





# A Era Pré-Quântica

- ☞ Mecânica Newtoniana
- ☞ Óptica geométrica
- ☞ Mecânica Ondulatória
- ☞ Termodinâmica
- ☞ Eletromagnetismo

Por que a Física era tida como consolidada no fim do século XIX ?

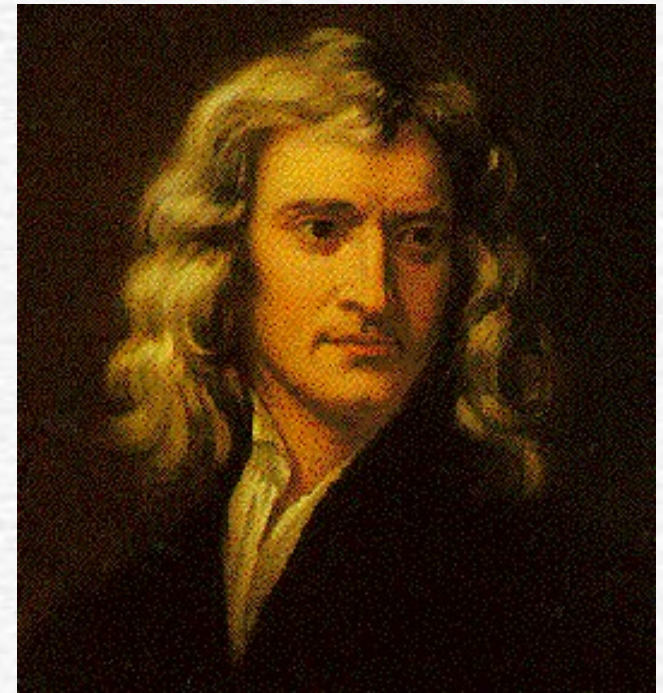
# Mecânica Newtoniana

Fenômenos  
(Tycho Brache)

Leis Empíricas  
(J. Keppler)

Teoria  
(Isaac Newton)

$$M_1 \frac{d^2 r_1}{dt^2} = \frac{GM_1 M_2}{|r_{12}|^2} \hat{r}_{12}$$



1643-1727

# Conseqüências

- Cálculo diferencial e integral
- Previsão da existência de Netuno
- Órbitas planetárias com enorme precisão
- Corpos rígidos, giroscópios, hidrodinâmica (submarinos e balões)

# Óptica geométrica e Mecânica Ondulatória

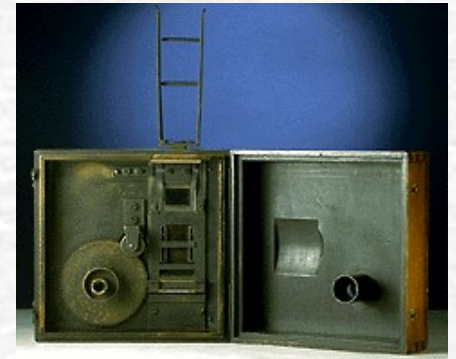
Relação entre luz ↔ Imagens formadas



Fixação de imagens  
(Fotografia)



Imagens animadas  
(Cinema)



Irmãos Lumière

Estudo de ondas → Matemática



Som      Thomas A. Edison (1847-1931)

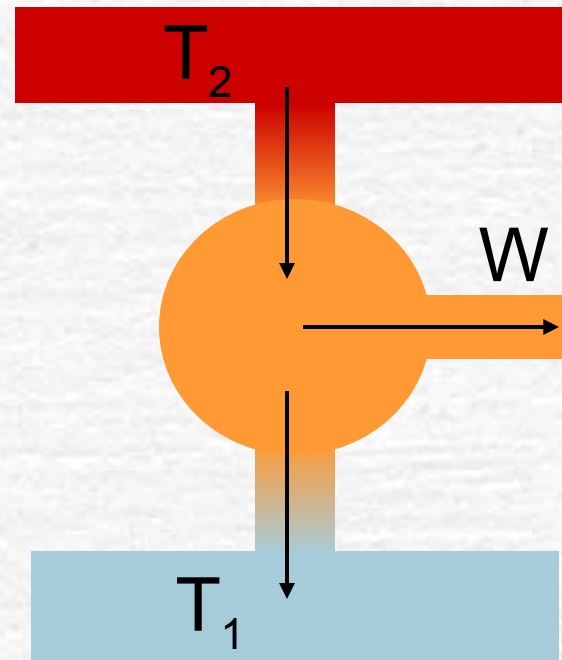


Fonógrafo (reproduz e grava o som)



# Termodinâmica

Estudo de  
Máquinas Térmicas





# Máquina a vapor



# Carro a vapor

# Eletromagnetismo

Unificação da Eletricidade, Magnetismo e Óptica

Equações de Maxwell

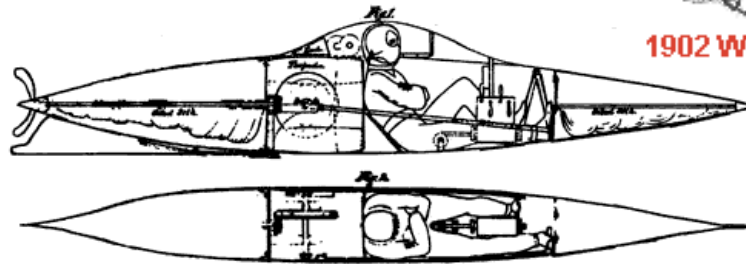
$$\left\{ \begin{array}{ll} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} & \nabla \cdot B = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} & \vec{\nabla} \times B = \mu \cdot j + \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \end{array} \right.$$

# Do lampião...

# a luz elétrica



A voltaic Pile conserved in the "Tempio Voltiano"



1902 Wood's Electric Phaeton

# O que se sabia sobre a matéria?

- Há 2400 anos: Anaxágoras → spermata  
Demócrito → átomos
- Século XIX: Tabela periódica classifica os elementos

Antes da aceitação do conceito atômico, a razão entre massas dos elementos era conhecida

• Dalton → as massas de vários elementos químicos para formar um determinado composto estavam sempre na mesma proporção

Elemento	Peso atômico
Hidrogênio	1 (por def.)
Nitrogênio	4,2
Carbono	4,3
Oxigênio	5,5
Enxofre	14,4

ELEMENTS					
○	Hydrogen.	1	○	Strontian	46
⊖	Azote	5	⊗	Barytes	68
●	Carbon	5	I	Iron	50
○	Oxygen	7	Z	Zinc	56
⊕	Phosphorus	9	C	Copper	56
⊕	Sulphur	13	L	Lead	90
⊕	Magnesia	20	S	Silver	190
⊕	Lime	24	g	Gold	190
⊕	Soda	28	P	Platina	190
⊕	Potash	42	⊗	Mercury	167

## Interpretação de Dalton:

A água consistia de partículas (moléculas) e cada uma conteria:

“1 átomo de hidrogênio e 1 de oxigênio”

# Próximo passo para a teoria atômica

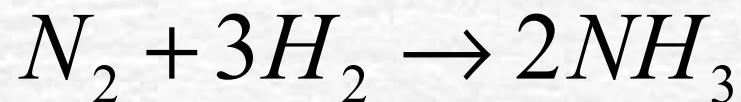
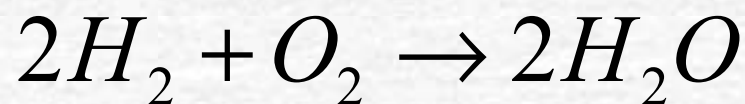
## J. L. Gay-Lussac (1778-1850)

Percebe que também os gases se combinavam em proporções fixas (P, T constantes)

- $2 \text{ vol H} + 1 \text{ vol O} \rightarrow 2 \text{ vol Vapor d'água}$
- $1 \text{ vol N} + 3 \text{ vol H} \rightarrow 2 \text{ vol Amônia}$

## Explicação:

“Volumes iguais de qualquer gás numa dada temperatura e pressão, sempre contém o mesmo número de partículas do gás.”





# A Radioatividade

1895: W. C. Röntgen, Würzburg

raios catódicos colidem com a parede de vidro do tubo e surgem “raios” misteriosos altamente penetrantes

→ Raios X

- Impressão detectável em placas fotográficas

- Fluorescência (fótons  $\lambda \ll \lambda_{\text{visível}}$ )

Seria a única forma de radiação ??

1896: Becquerel (1852-1908),  
Ecole Polytechnique

**Hipótese:** emissão de raios X de  
cristais é provocada pelo Sol.

**Descoberta:** placa guardada junto  
com o cristal em lugar escuro foi  
sensibilizada !

Radiação → propriedade intrínseca  
da matéria ??

1898: Marie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906)

Descoberta das radiações  $\alpha$  e  $\beta$

→ Confirmação de Rutherford (Canadá)

Descrição teórica:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$\lambda$  : vida média (característica do material)

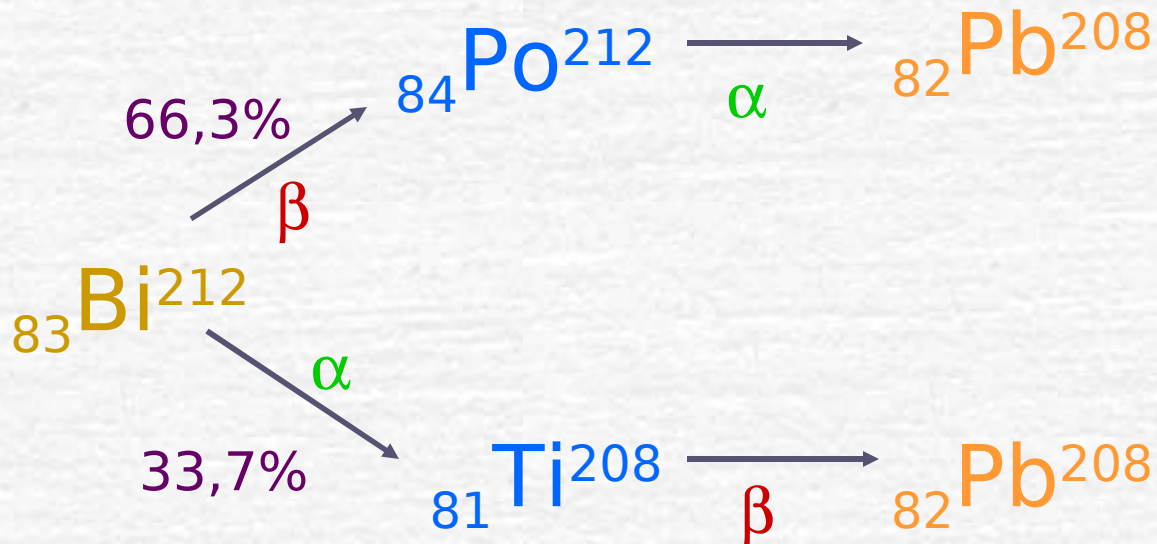


# Interpretação probabilística

Série	Vida média do núcleo mãe (anos)	1º decaimento	Produto final
Tório 232	$1,40 \times 10^{10}$	$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra} + \alpha$	$^{208}\text{Pb}$
Neptúnio 237	$2,14 \times 10^6$	$^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{Pa} + \alpha$	$^{209}\text{Bi}$
Urânio 238	$4,17 \times 10^9$	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + \alpha$	$^{206}\text{Pb}$
Urânio 235	$7,04 \times 10^8$	$^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Th} + \alpha$	$^{207}\text{Pb}$

Decaimento  $\alpha$  decresce massa por 4 unidades

Decaimento  $\beta$  muda o tipo de núcleo



# O que é a eletricidade?

- propriedade intrínseca das substâncias
- fluido produzido e transferido ao se atritar objetos

“virtude elétrica” S. Gray (1667 – 1703)

## 1733: C.F.de F. Dufay (1698-1738)

Pedaços de metal em contato com vidro eletrizado:

- repelem entre si
- atraem metal em contato com resina eletrizada

→ Existem dois tipos de eletricidade:

1. Vítreia
2. Resinosa

↪ Eletricidade é um fluido:

- Consistente com os experimentos do século XVIII

↪ Desafiado por Benjamin Frankling:

→ existe um único tipo de fluido!

“a matéria absorve eletricidade como uma esponja.”

excesso → eletricidade positiva

falta → eletricidade negativa

→ Conservação da carga





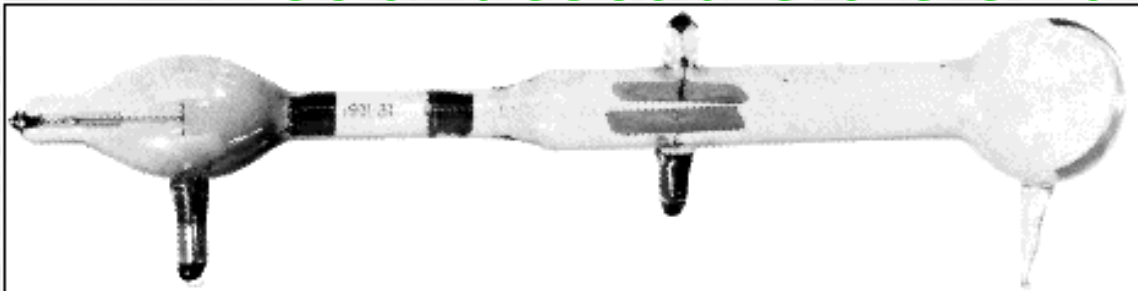
# Como é esse “fluido”?

➤ J. H. Geissler (1819-1879)

- Inventou a bomba de vácuo ( $P = 10^{-4}$  Pa)

➤ J.J. Thomson (1856-1940)

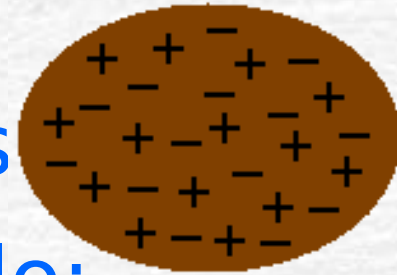
- 1896: descobre o elétron!



# Conseqüências da descoberta do elétron

Matéria é neutra → deve haver cargas +

Como estão distribuídas



→ Modelo de Thomson  
Problemas com o modelo:

- Teorema de Earnshaw: impossível o equilíbrio eletrostático
- As partículas estão em movimento
- Emissão de radiação

Como é a matéria? → século XX, Mec. Quântica

# Resultados sólidos da Física Clássica

- Estados dos corpos são descritos por trajetórias (Newton)

$$\{x(t), p(t)\}$$

- Partículas aceleradas emitem radiação e perdem energia (Maxwell)
- A emissão de radiação é contínua

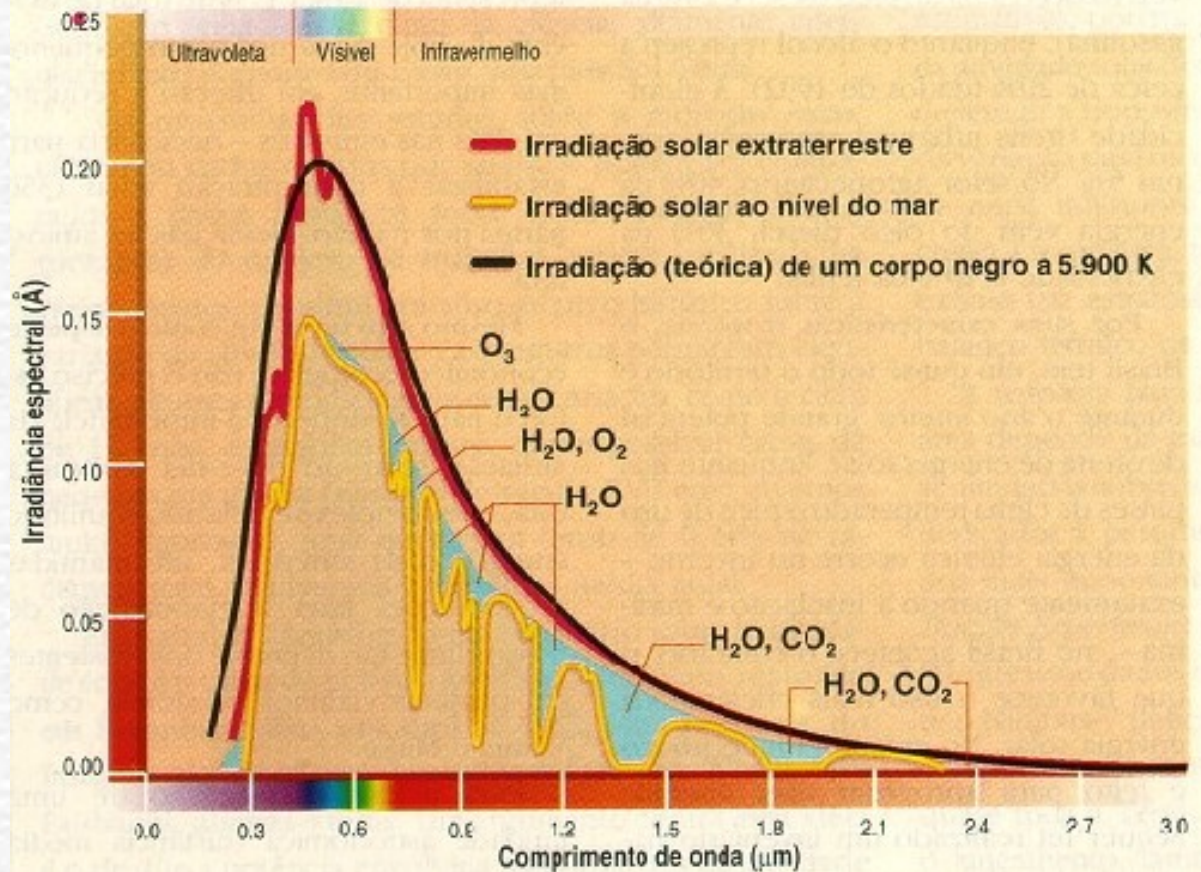
- A energia carregada pela radiação é proporcional a sua intensidade
- A luz é uma onda

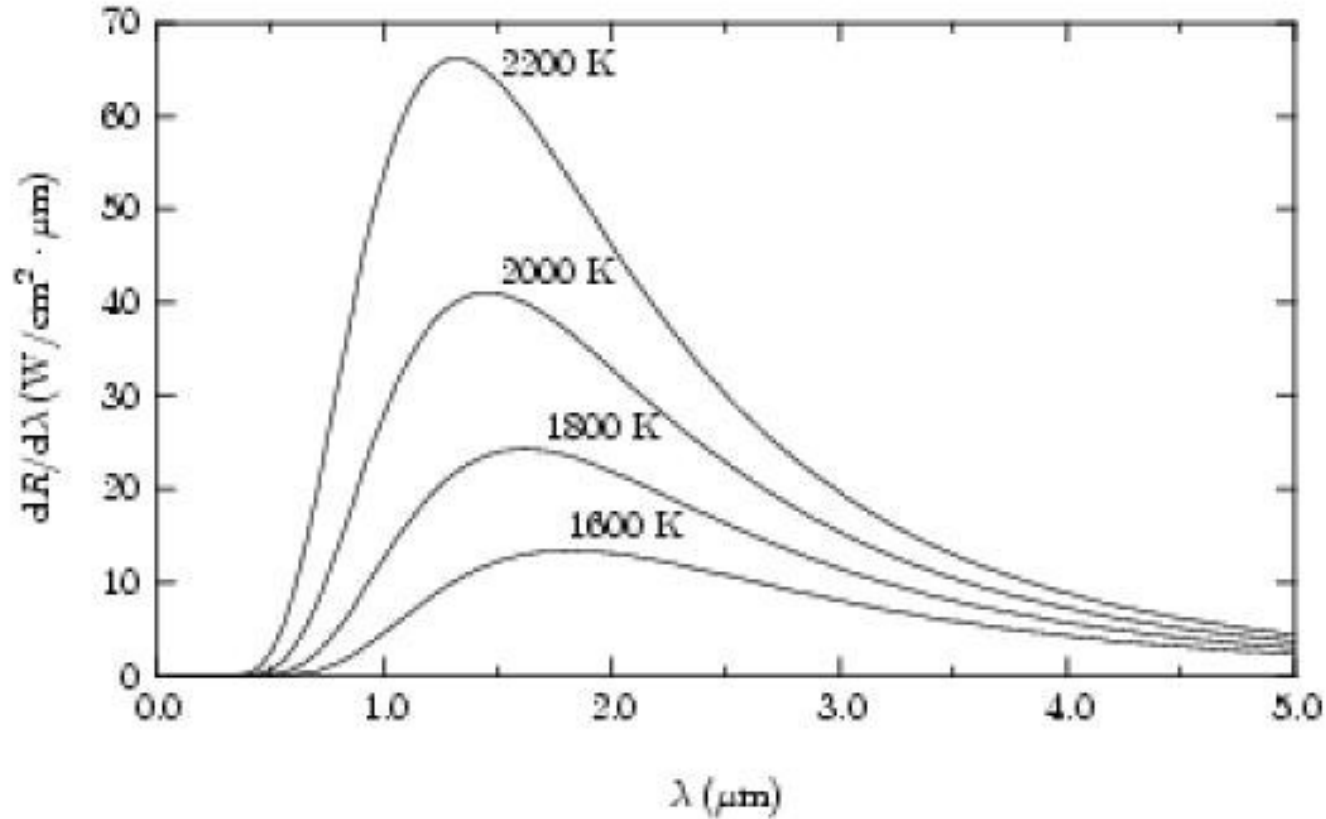
**A Física Quântica vem na  
contramão dessas idéias !!!**

# Radiação de corpo negro

Corpo negro:

Absorve e emite radiação na mesma taxa.

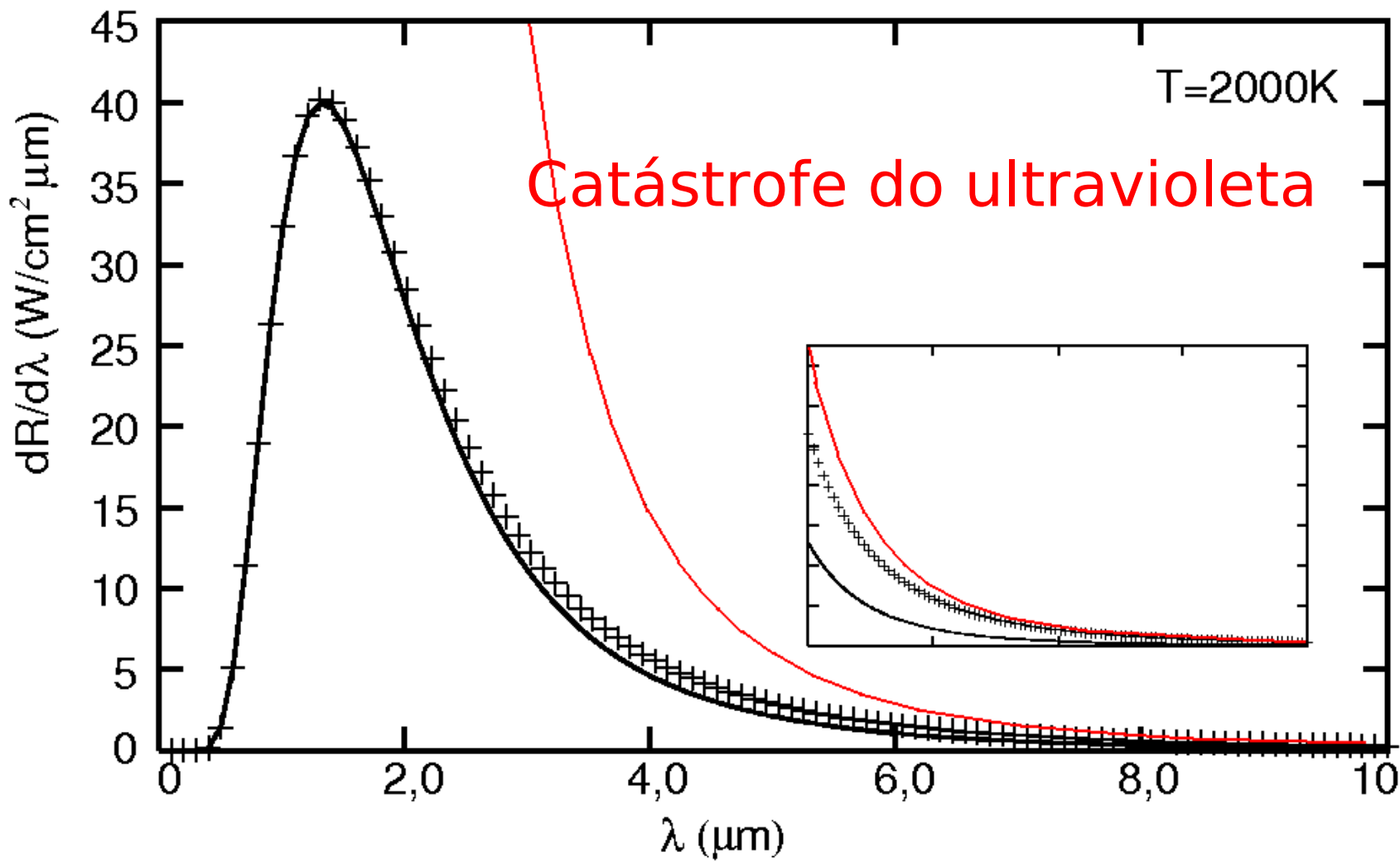




$$R \propto T^4 \quad \lambda_{\max} T = 2,198 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

# Descrição clássica

- Partículas carregadas emitem radiação de forma contínua
- Energia da radiação só depende da intensidade





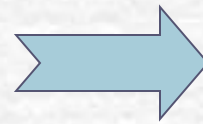
1900: Max Planck (1858-1947)

2 heresias:  $\varepsilon = nh\nu$

é discreta

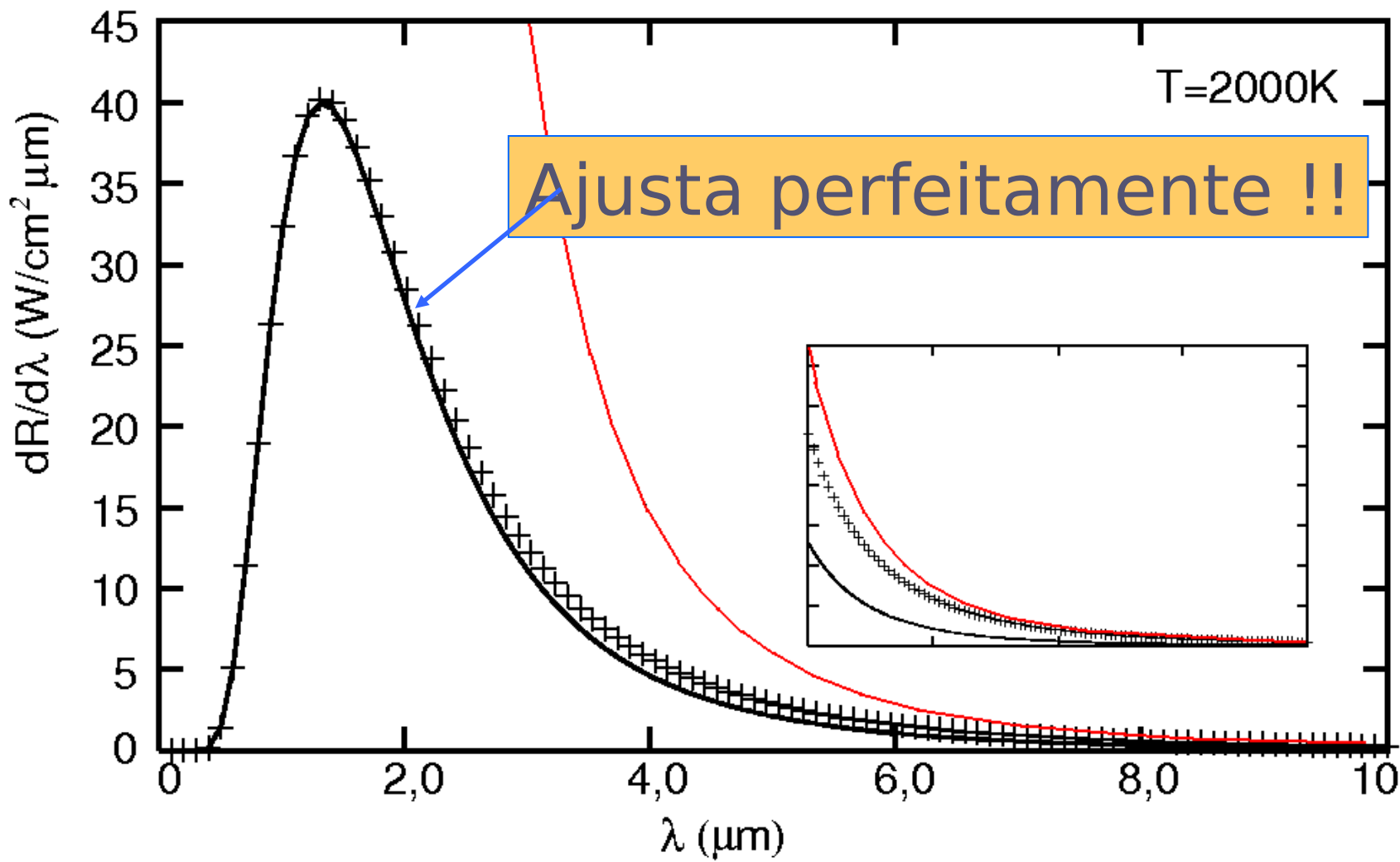
depende da  
freqüência

$$\frac{dR}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$



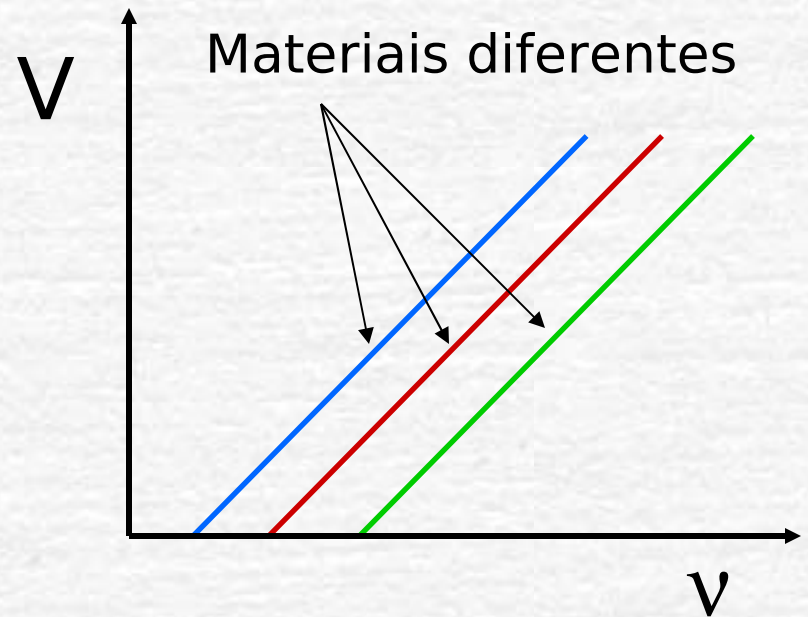
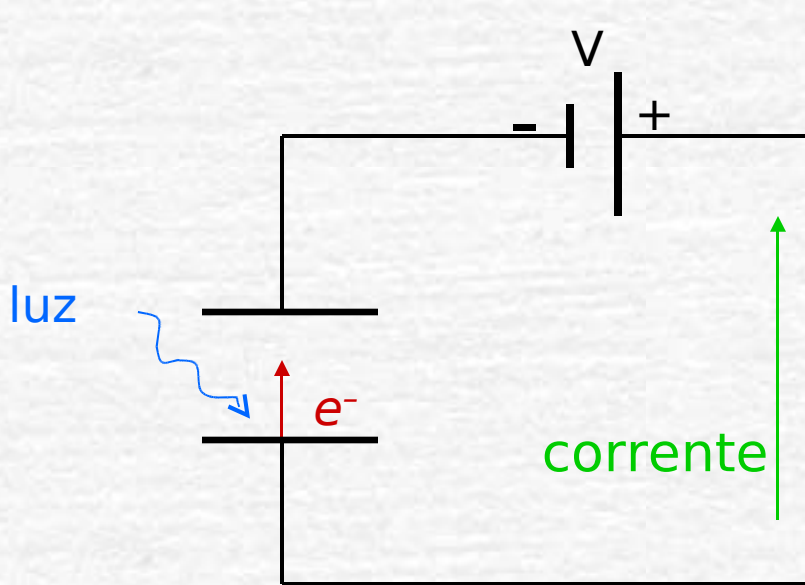
$$R = \int \frac{dR}{d\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

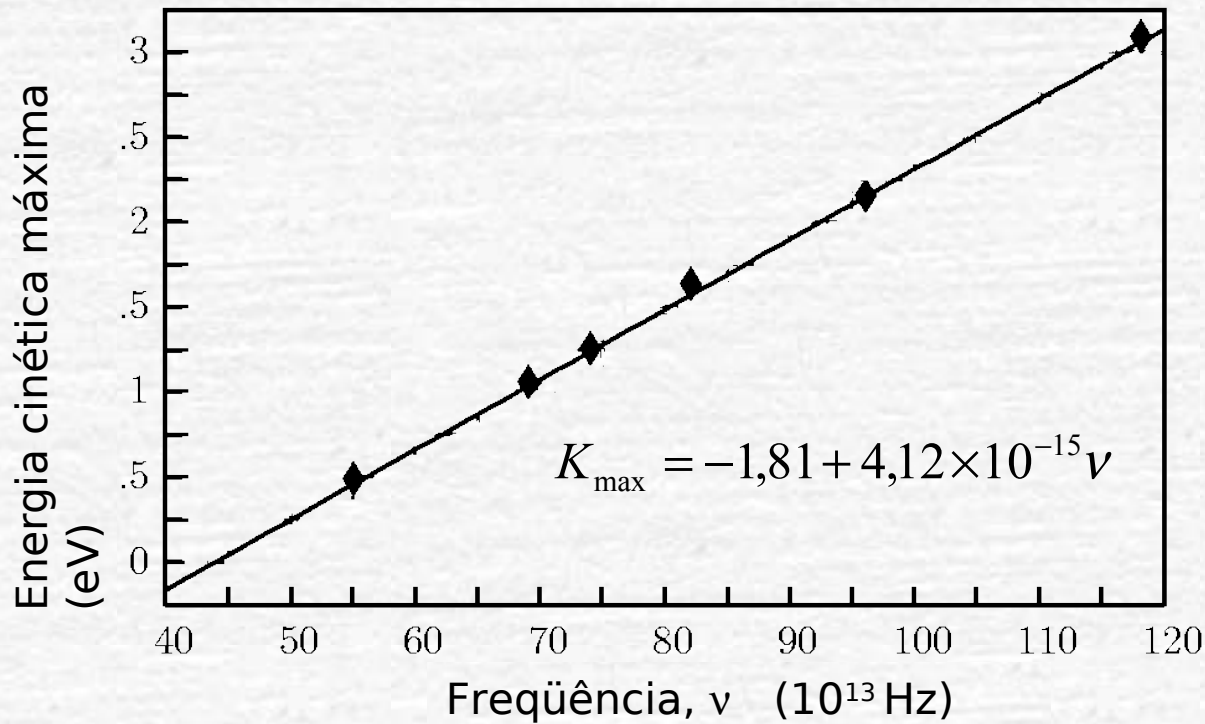
$$\lambda_{\max} T = 2,198 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



# Efeito Fotoelétrico

- Einstein usa idéia da quantização para explicar o efeito fotoelétrico





$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = e V_0 = h \nu - \phi$$

“Quanta” de energia de luz

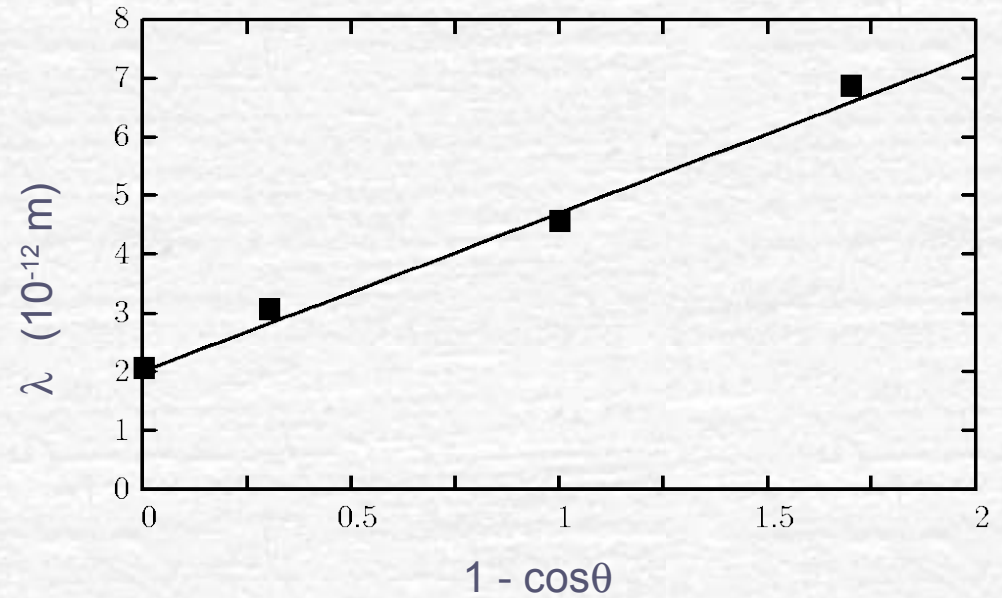
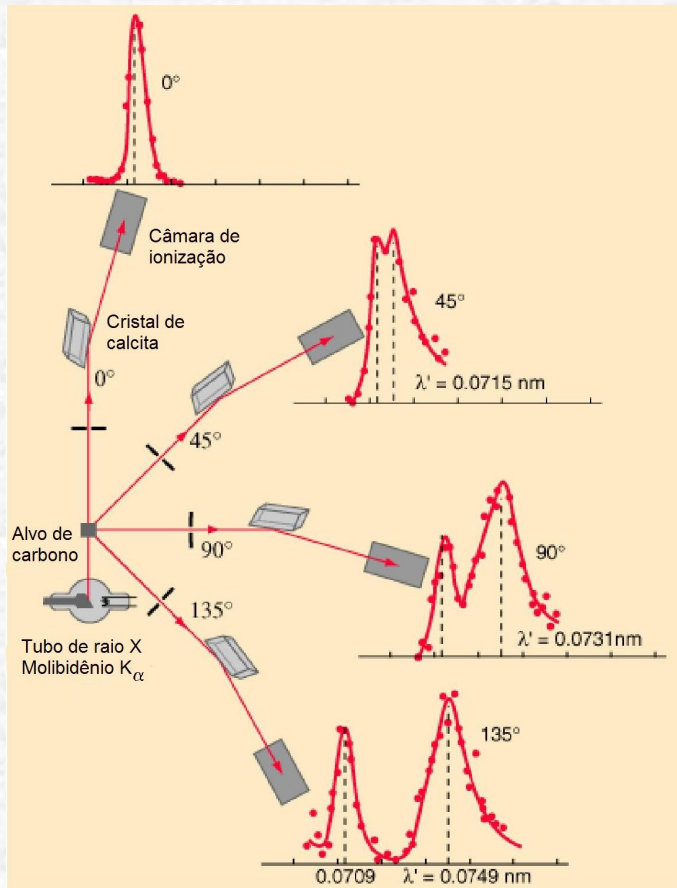
$\frac{h}{e}$  → comprovação da validade da hipótese de Planck

Em 1913, Einstein foi proposto como membro titular à Academia Prussiana de Física. Ele tinha, então, 34 anos. A proposta terminava da seguinte forma:

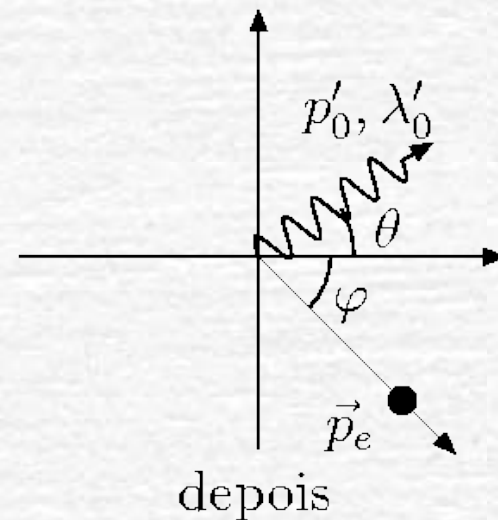
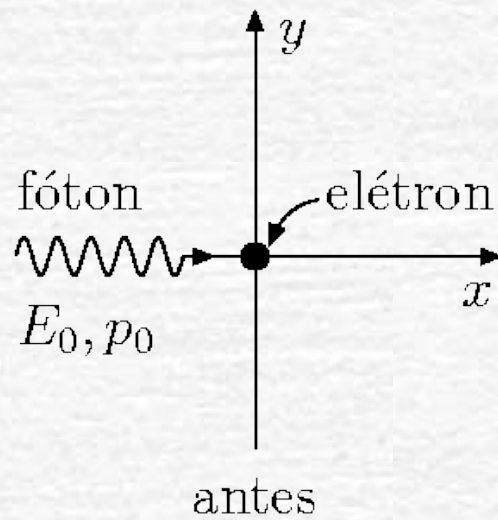
“Pode-se afirmar que não há praticamente nenhum dos grandes problemas físicos ao qual Einstein não tenha dado alguma notável contribuição. **Que ele, às vezes, tenha errado o alvo** em suas especulações, como por exemplo, em sua hipótese dos **quanta de luz, não pode realmente ser tomado como uma acusação muito séria contra ele**, pois não é possível introduzir idéias verdadeiramente novas, mesmo nas circunstâncias mais exatas, sem correr alguns riscos de vez em quando.”

**Em 1921**, após a comprovação de sua teoria sobre o efeito fotoelétrico, através dos experimentos de Millikan, **Einstein recebeu o prêmio Nobel de física pela sua explicação do Efeito fotoelétrico.**

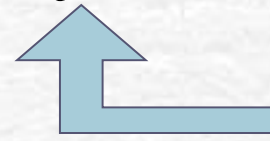
# Efeito Compton



$$\Delta\lambda = 2,4 \times 10^{-12} (1 - \cos\theta)$$



$$\Delta\lambda = \frac{hc}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)$$


 $2,4 \times 10^{-12} \text{ m}$

→ Luz é composta de partículas ??

# Rutherford e o 1<sup>o</sup> acelerador

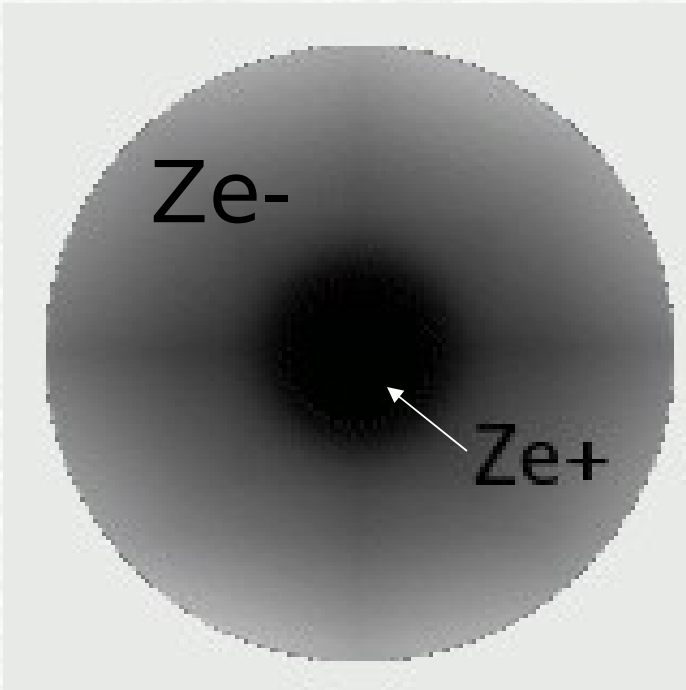


→ Partículas  $\alpha$  em ângulos traseiros

→ Modelo de Thomson:  $\theta \approx 10^{-4}$  rd



# Novo modelo para matéria

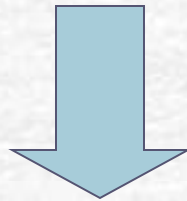


## Problemas:

- Não é estacionário
- Partículas aceleradas irradiam

1912: Niels Bohr e Rutherford se encontram

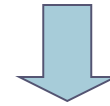
Bohr se convence de que a Física Clássica não se aplica ao mundo microscópico.



Postula:

“As órbitas dos elétrons em torno do núcleo são estacionárias.”

$$L = \frac{nh}{2\pi}$$



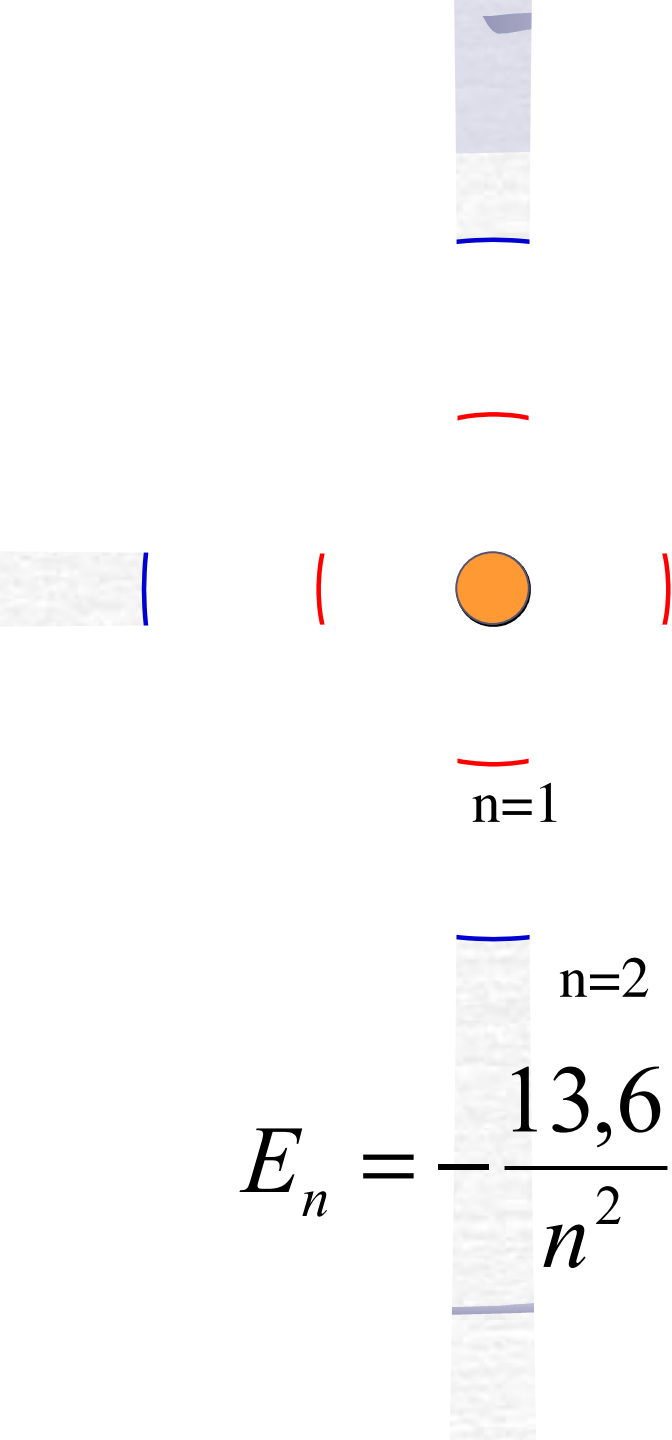
Órbitas com raios  
quantizados  $r_n$



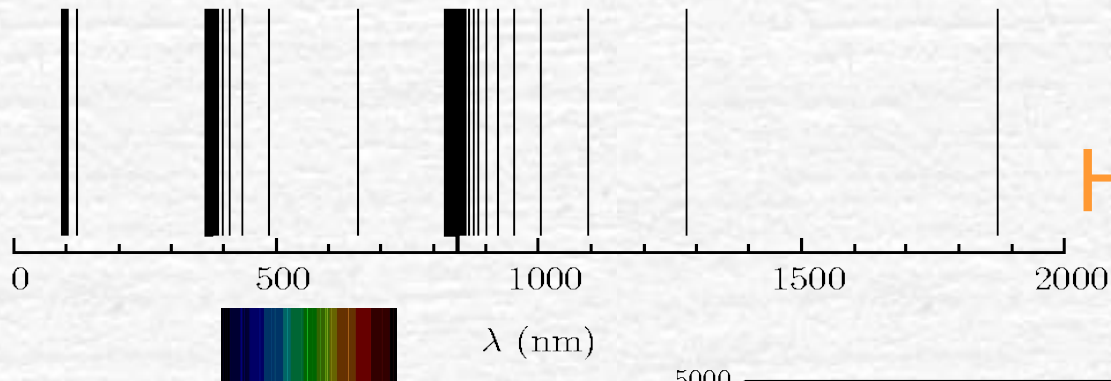
Energia quantizada

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

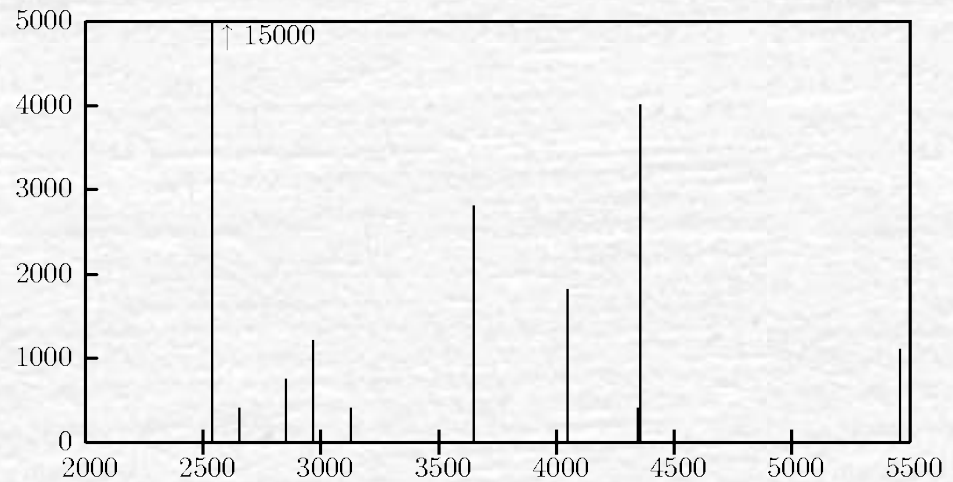
Átomo de Hidrogênio



# Espectros atômicos



**Mercúrio**

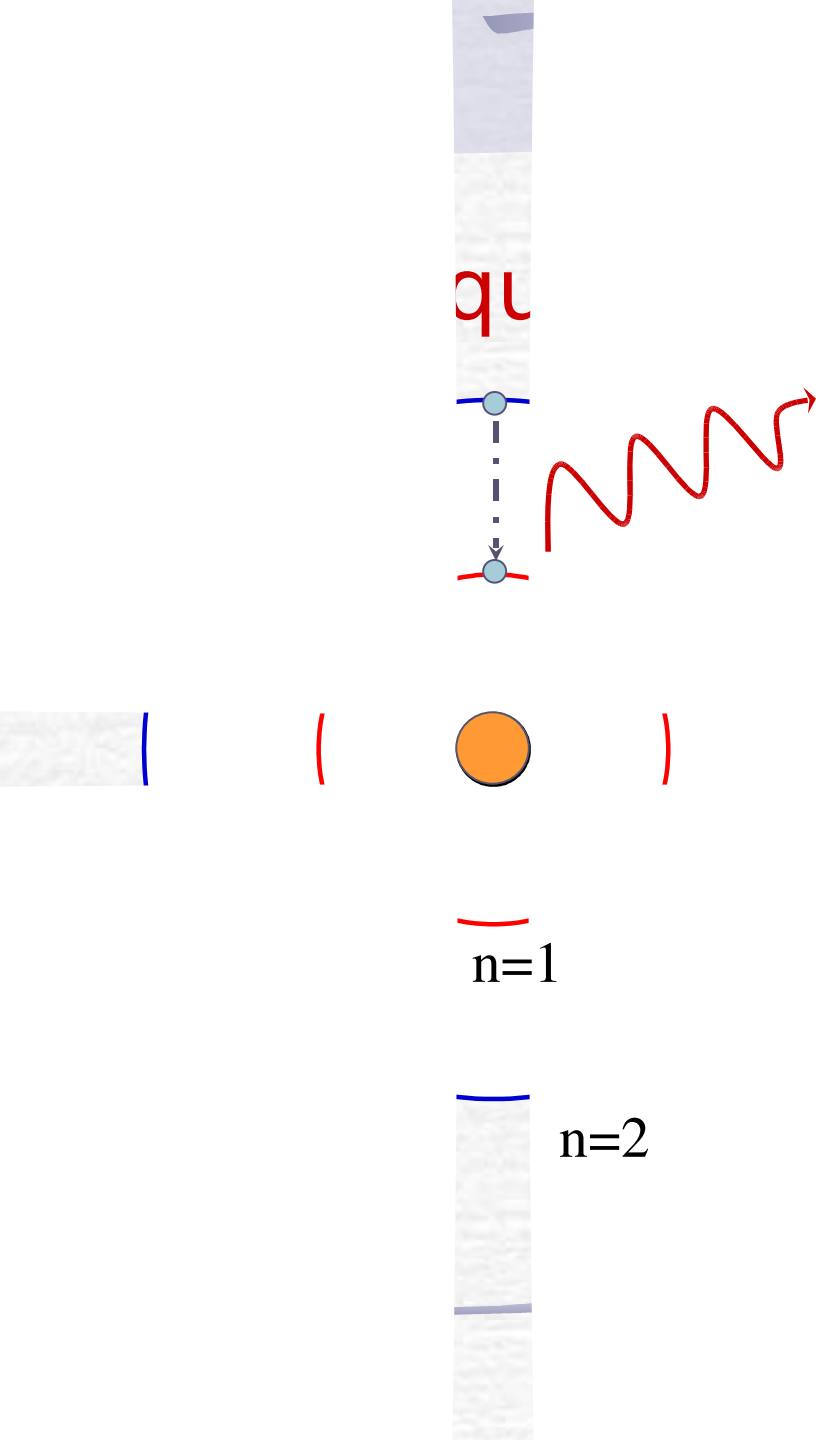


Hipótese ainda não questionada:  
As trajetórias Newtonianas!

Modelo de Bohr tem sucesso na  
explicação das energias  
quantizadas.

E as intensidades ??

No contexto do modelo de Bohr, a  
intensidade deve ser calculada  
usando a **aceleração** do elétron na  
órbita...



emissão de  
radiação envolve  
duas órbitas.



Qual usar ?

Heisenberg → só consegue explicar as intensidades fazendo as hipóteses:

trajetória → matriz

$$\vec{x}(t) \longrightarrow X_{mn}(\mathbf{X})$$

$$p(t) \longrightarrow P_{mn}(\mathbf{P})$$



$$\mathbf{XP} - \mathbf{PX} = i$$

# Ondas de De Broglie

Einstein,  
Planck  
Luz

Louis de Broglie  
Dualidade  
onda/partícula

$$E = h\nu$$

mas

$$E = pc$$

então

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

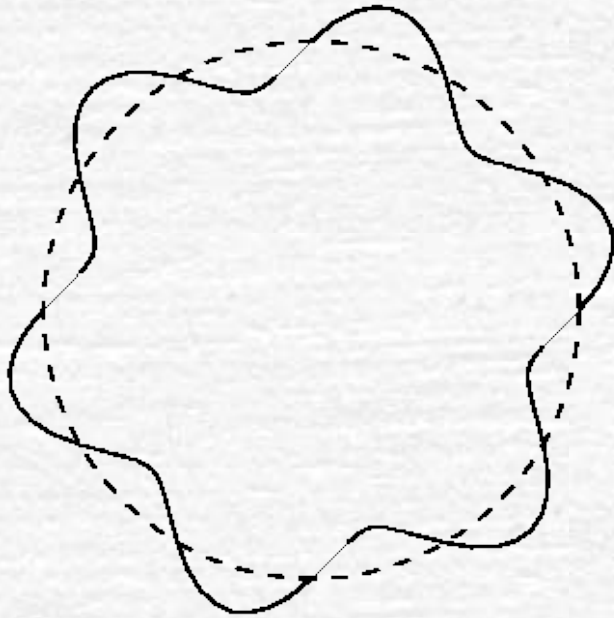
$$\lambda = \frac{h}{m v}$$

$$h \sim 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}, m_e \sim 10^{-31} \text{ kg}$$

característica fundamental de todas as partícu



Hipótese ondulatória de De Broglie explica “trajetórias” estacionárias postuladas por Bohr.



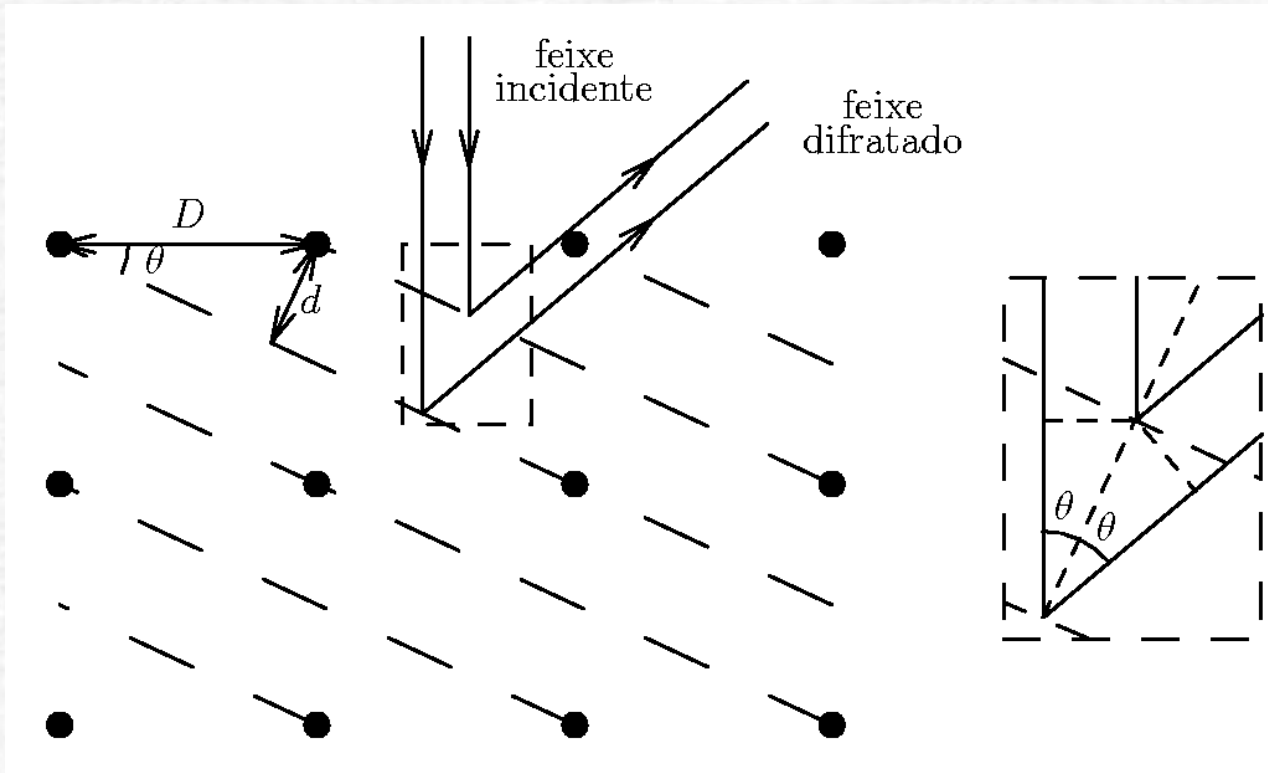
↳ Tese de doutorado

$$\left\{ \begin{array}{l} m v r = \frac{nh}{2\pi} \text{ (Bohr)} \\ m v = \frac{h}{\lambda} \text{ (DeBroglie)} \end{array} \right.$$



$$n\lambda = 2\pi r$$

# Comprovação experimental das ondas de De Broglie



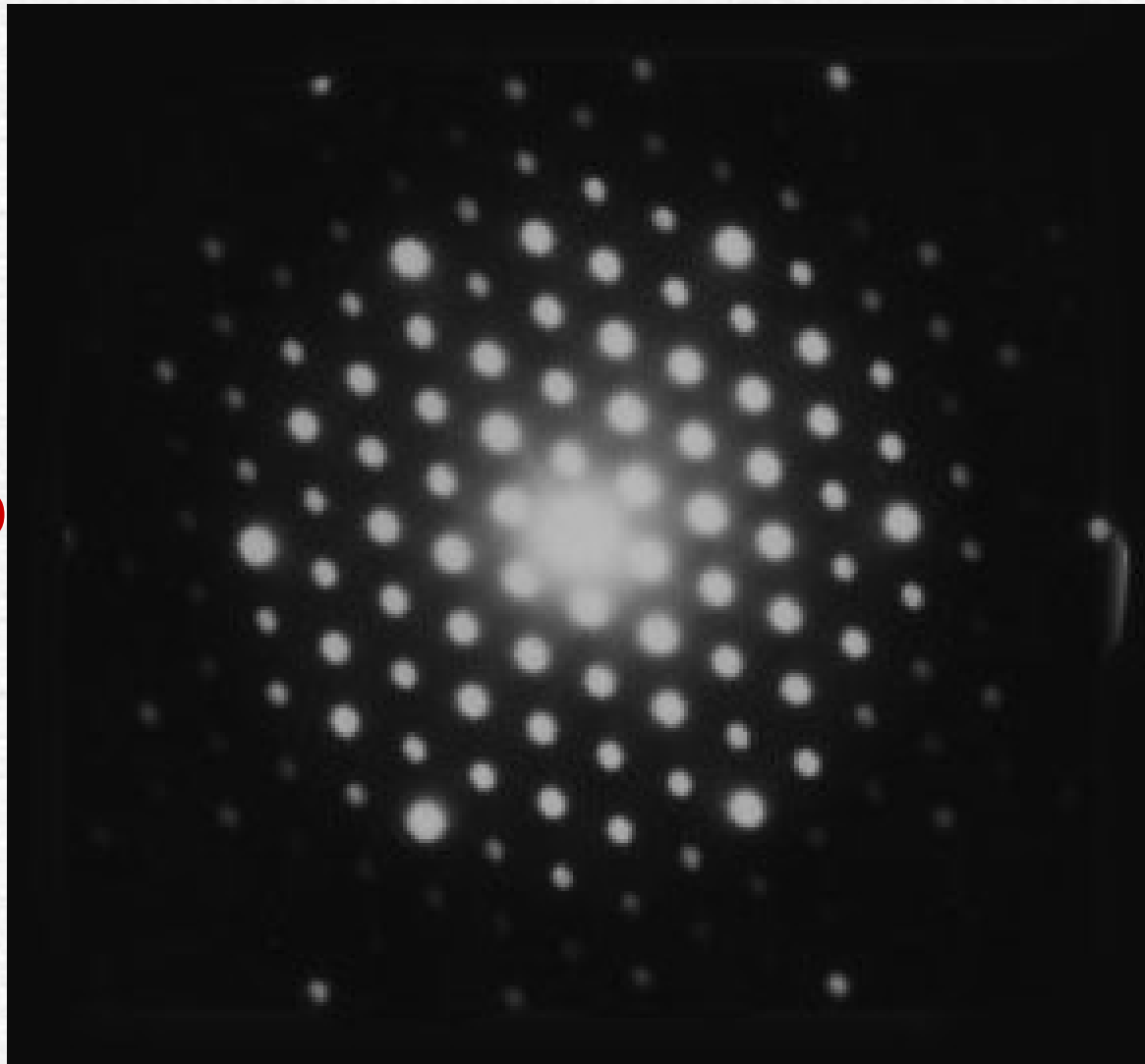
$$\lambda_{\text{exp}} = 1,65$$

$\approx$

$$\lambda_{\text{dB}} = 1,66$$

$\approx$

Difração  
de  
elétrons



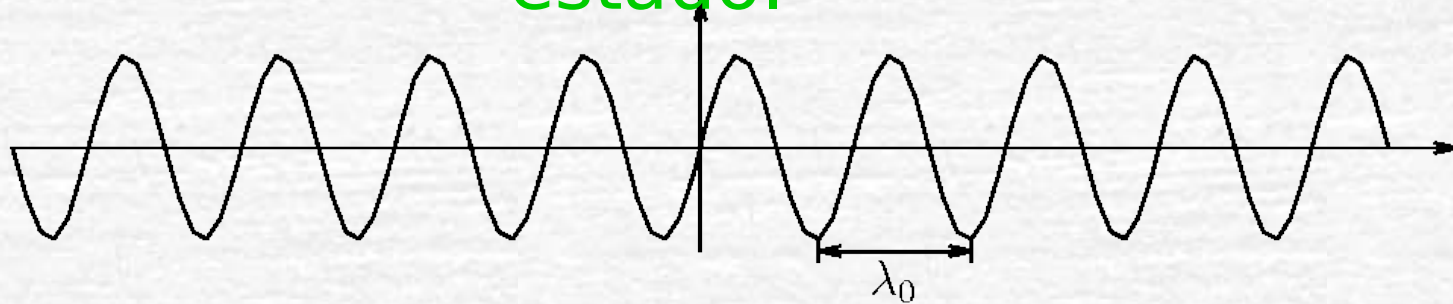
Como  
os  
raios X

# Conseqüências da dualidade

Onde está a partícula??

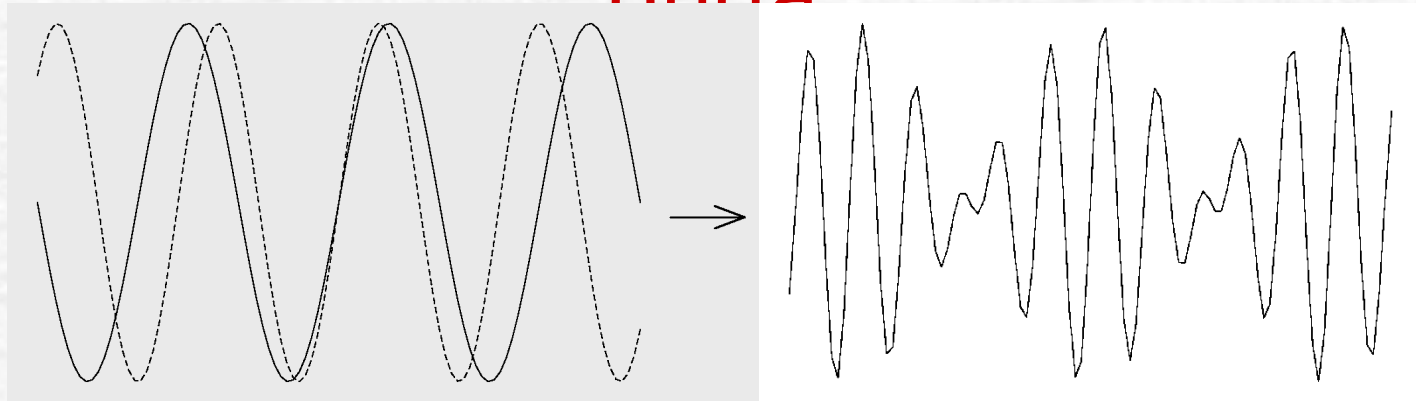
$$\{x(t), p(t)\}$$

Localização da partícula é uma característica do seu estado.



Ondas  $\Psi(x,t)$   $p_0$  bem definido  $\rightarrow$  onda deslocalizada

Para localizar, constroem-se pacotes de  
onda



Precisamos de vários  $\lambda$  ( $p$ )

→ Perdemos informação sobre o momento

Na Mecânica Quântica pode-se mostrar que:


$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (\hbar = h/2\pi)$$

Matematicamente  
implementável se  $x$  e  $p$  são  
matrizes

# Equação de Schrödinger

Debye: Que onda é essa??

Schrödinger:  $p = \frac{h}{\lambda} + E = h\nu$


$$i \cdot \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = \underbrace{\left( \frac{p^2}{2m} + V(r) \right)}_{\text{operadores}} \Psi(x, t)$$

# Interpretação de $\Psi(x,t)$

$$x(t), p(t) \longrightarrow \Psi(x,t)$$

Trajectoria clássica

Onda

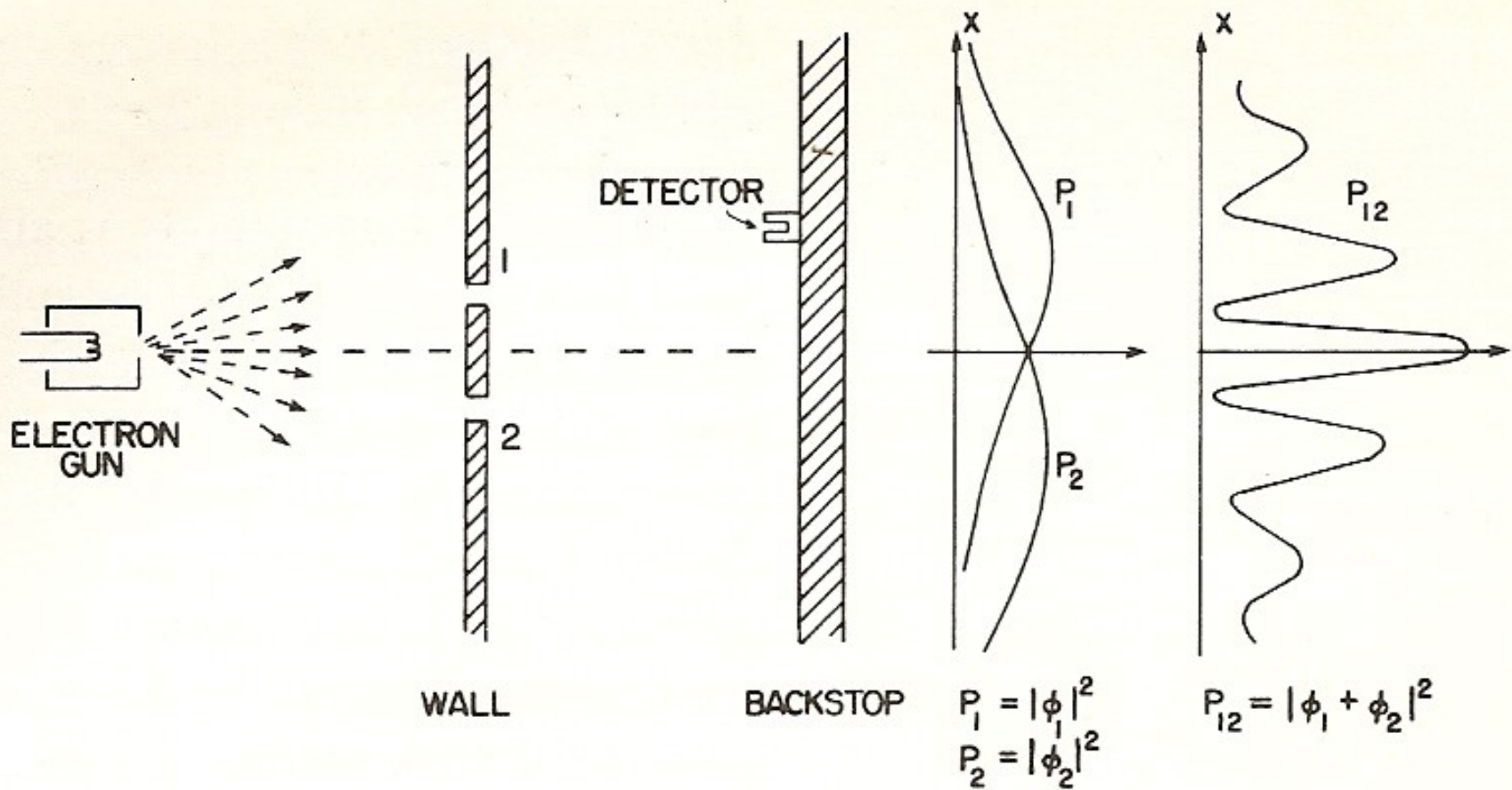
Qual o significado dessa onda?

$$|\Psi(x,t)|^2 dx$$

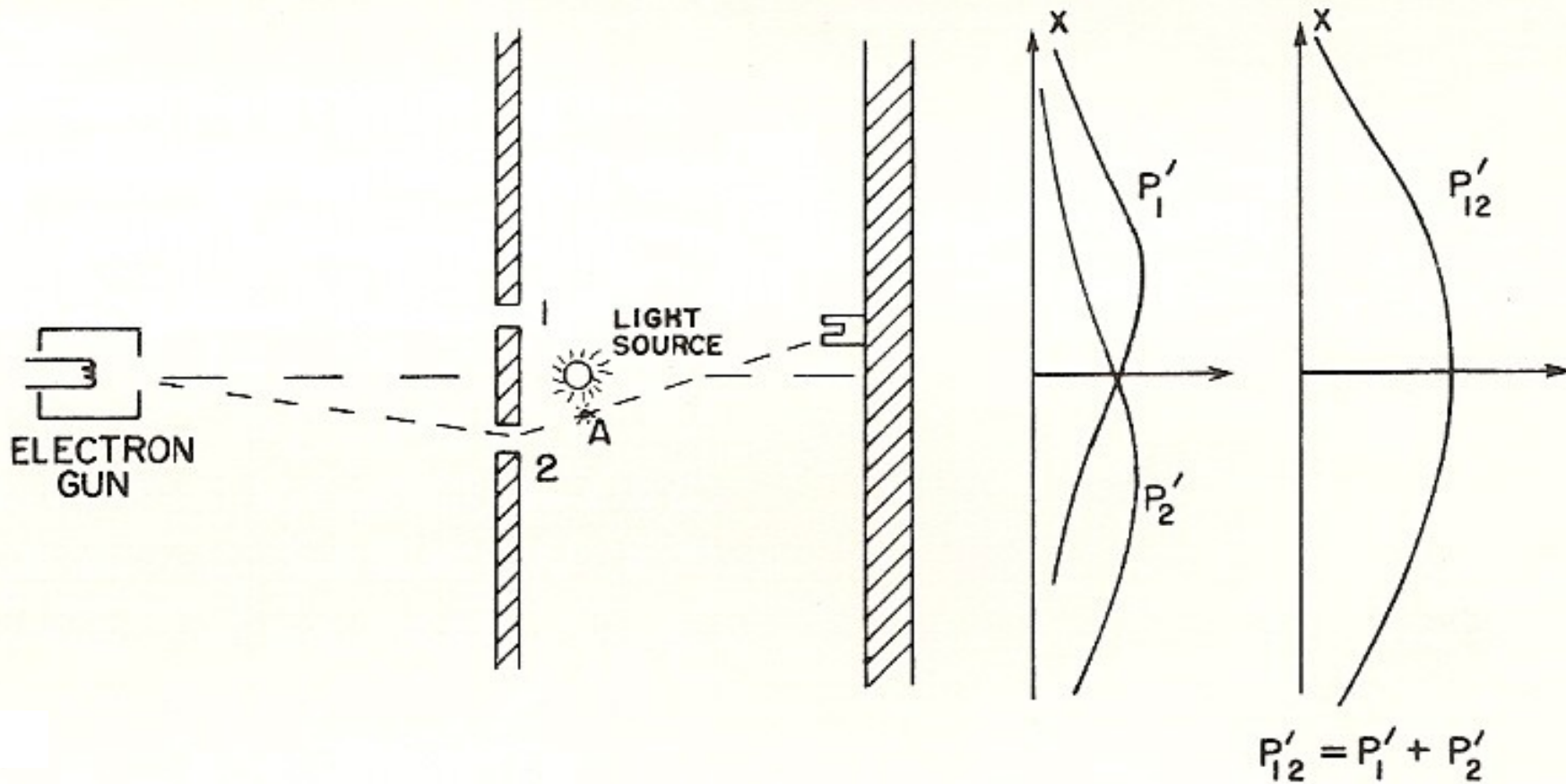
Probabilidade de encontrar a partícula entre  $x$  e  $dx$

(M. Born)





Feynman Lectures on Physics, v. 3



# Como se mede ?

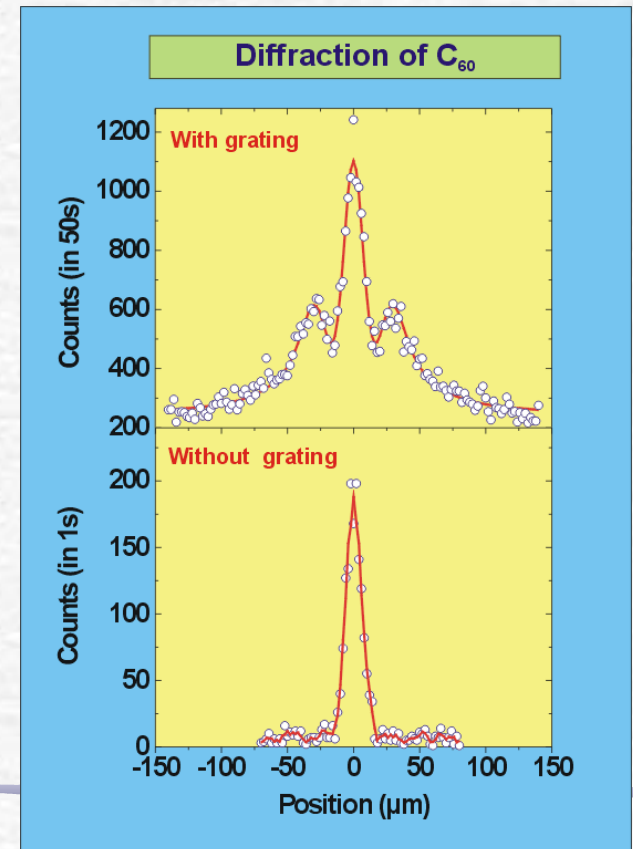
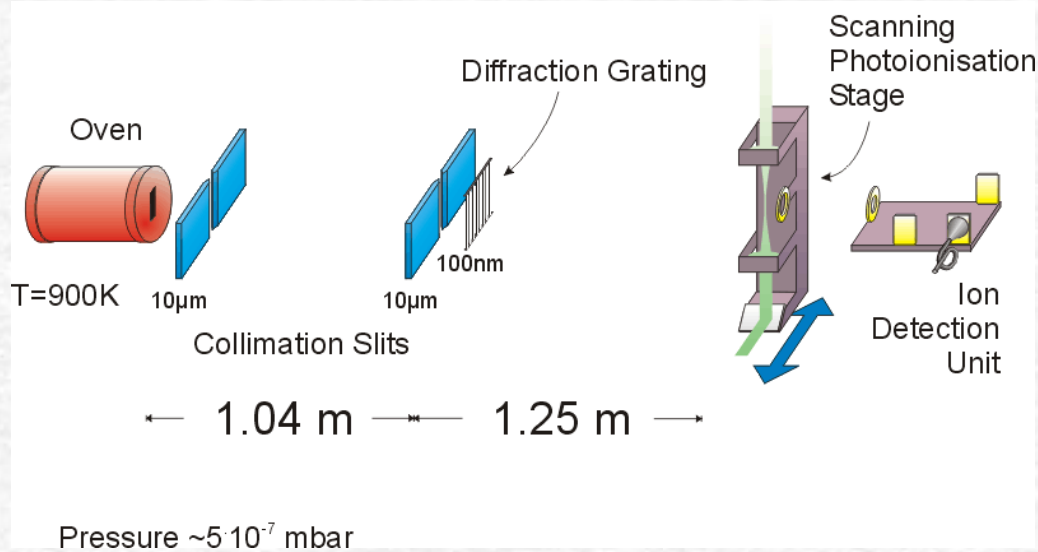
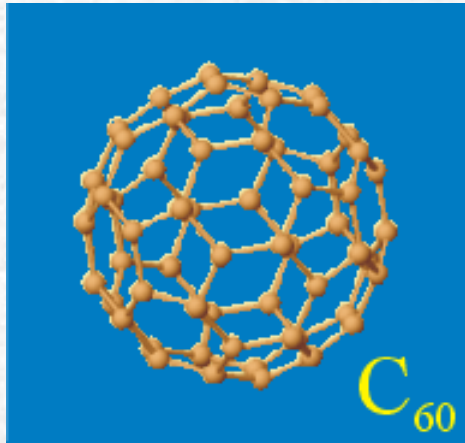
$x(t)$

Onde cada elétron vai parar na experiência das fendas??

 Não há resposta para isso.

Há somente a **probabilidade** de encontrá-lo em determinada posição.

# Experiência com fulereno $C_{60}$ (2001)



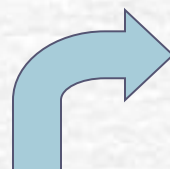
# Características ondulatórias

Linearidade e superposição

$$\Psi(x, t) = \psi_1(x, t) + \psi_2(x, t)$$

Probabilidade

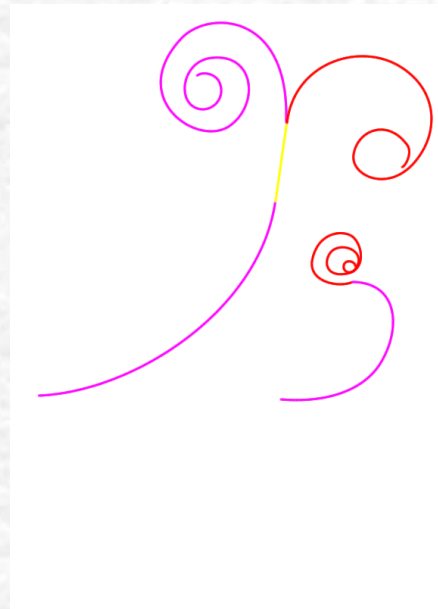
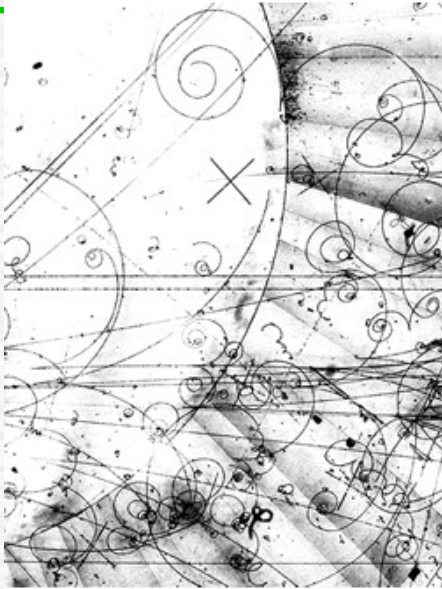
$$|\Psi(x, t)|^2 = |\psi_1(x, t)|^2 + |\psi_2(x, t)|^2$$


$$+ 2 \operatorname{Re}(\psi_1^*(x, t)\psi_2(x, t))$$

Termo de interferência

# Previsões (espetaculares) da Mecânica Quântica

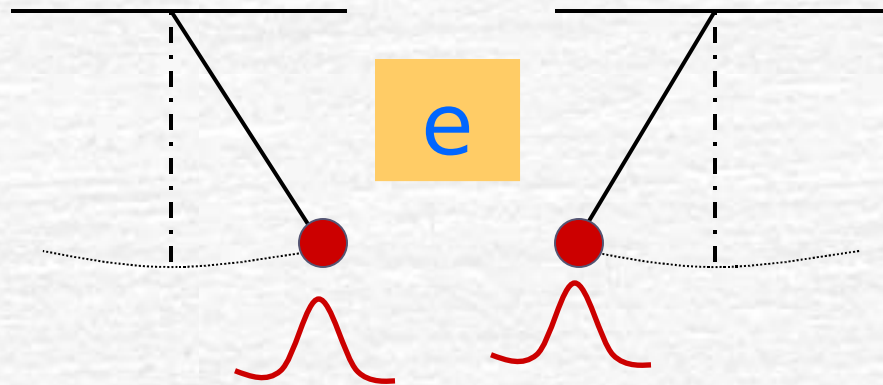
- 1926: E. Dirac prevê a antimatéria



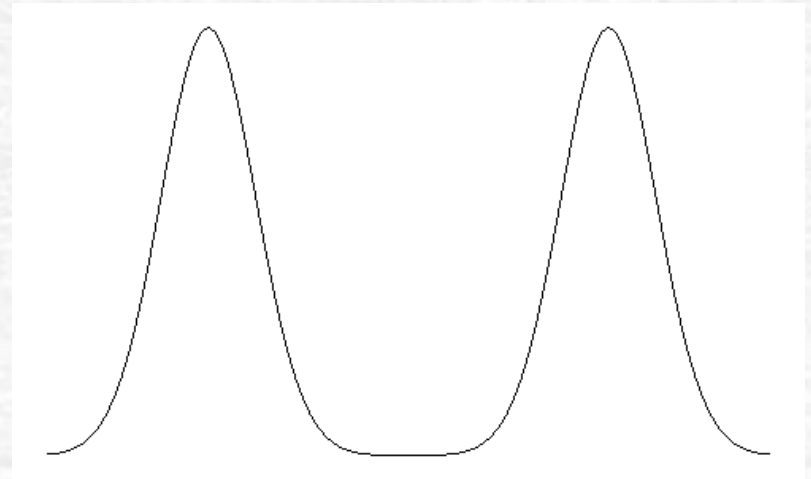
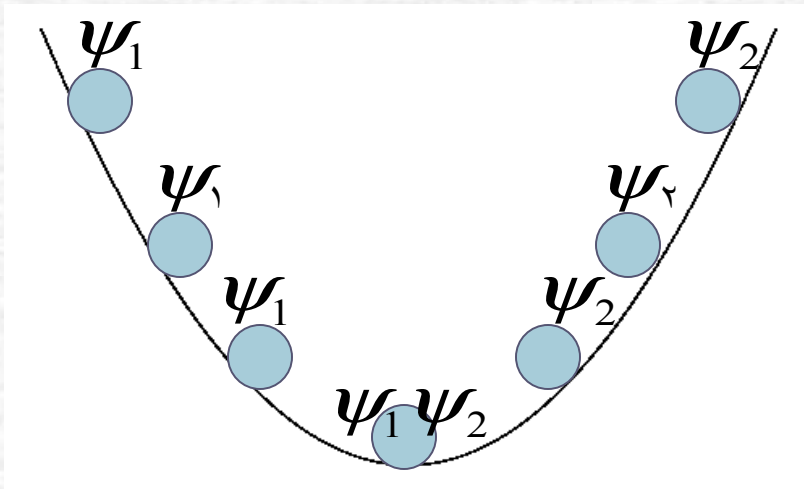
Formação  
de um  
par  
 $e^-e^+$

Uma partícula  $\rightarrow \Psi(x,t)$

Mas...  $\Psi(x,t) = \Psi_1(x,t) +$   
 $\Psi$  Quanticamente



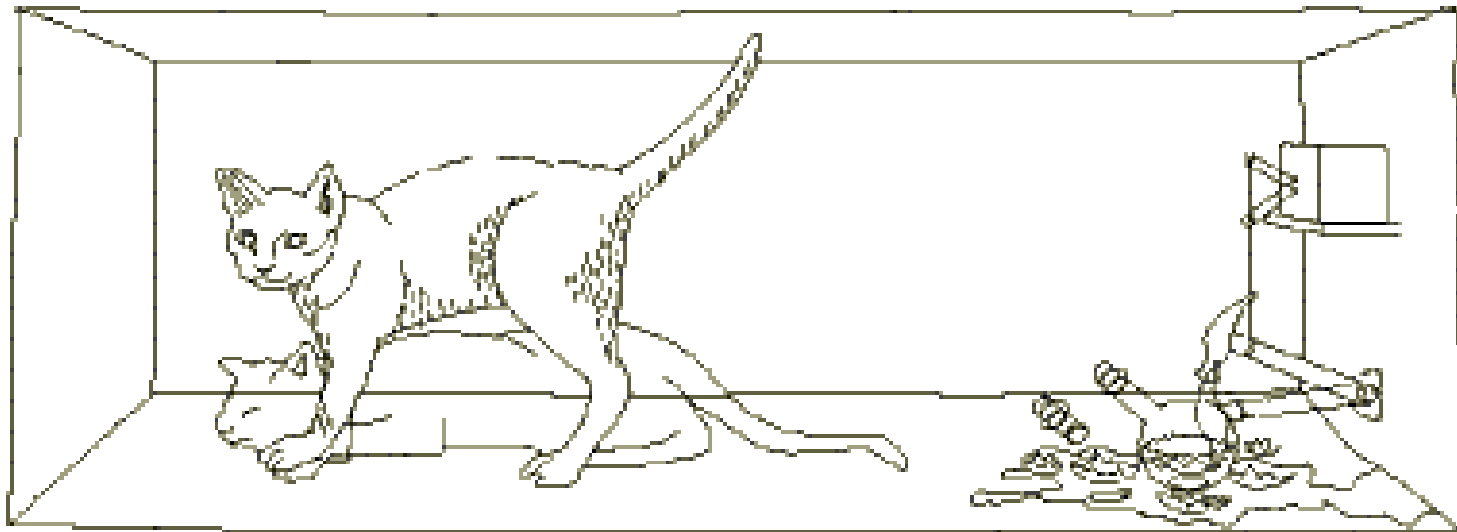
# Superposição quântica de um átomo de ${}^9\text{Be}$ (1995)



$$|\psi_1 + \psi_2|^2$$

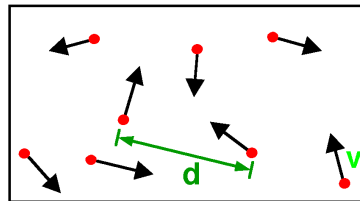


# O Gato de Schrödinger



# Condensados de Bose-Einstein

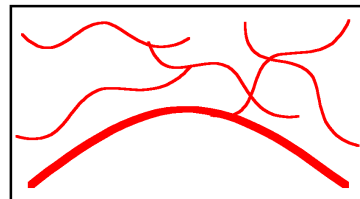
What is Bose-Einstein condensation (BEC)?



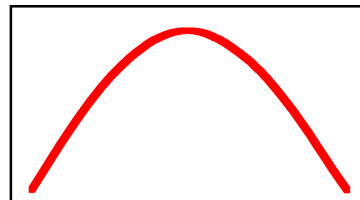
High  
Temperature  $T$ :  
thermal velocity  $v$   
density  $d^{-3}$   
"Billiard balls"



Low  
Temperature  $T$ :  
De Broglie wavelength  
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$   
"Wave packets"



$T = T_{crit}$ :  
Bose-Einstein  
Condensation  
 $\lambda_{dB} \approx d$   
"Matter wave overlap"



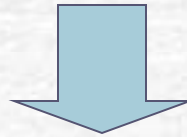
$T = 0$ :  
Pure Bose  
condensate  
"Giant matter wave"

## Processo:

aprisionamento dos átomos  
em armadilhas magneto-  
ópticas



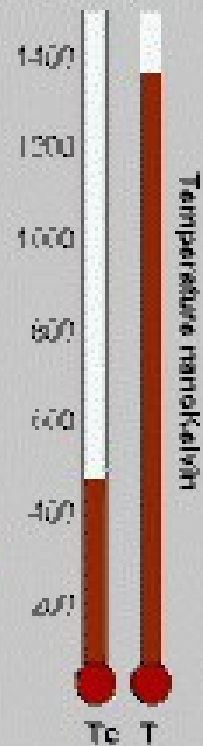
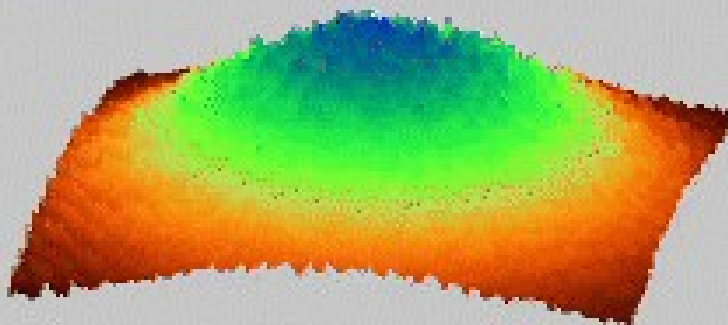
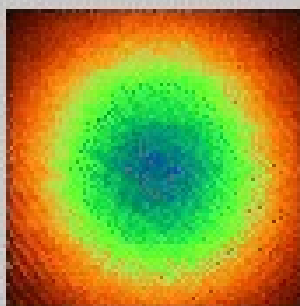
resfriamento



todos os átomos vão ocupar  
um **único estado**, visível  
essencialmente a olho nu !

# Bose-Einstein Condensation of Rb 87

$$\text{Initial } N = 2 \cdot 10^7 \quad \text{Final } N = 3 \cdot 10^7$$



# Problemas da M.Q. em aberto

☞ A M.Q. é universal ?

Se é, por que não vemos fenômenos assim no nosso dia a dia?

Nosso mundo clássico é local.



M.Q.

The diagram shows a central light blue circle labeled 'M.Q.' (Microscópio Quântico) surrounded by a larger, semi-transparent purple oval representing the environment. Several purple lines radiate from the central circle to the boundary of the environment, symbolizing interaction.

o Ambiente destrói efeitos

Quânticos **1970**  
(decoerência)

S

E destrói mesmo ??

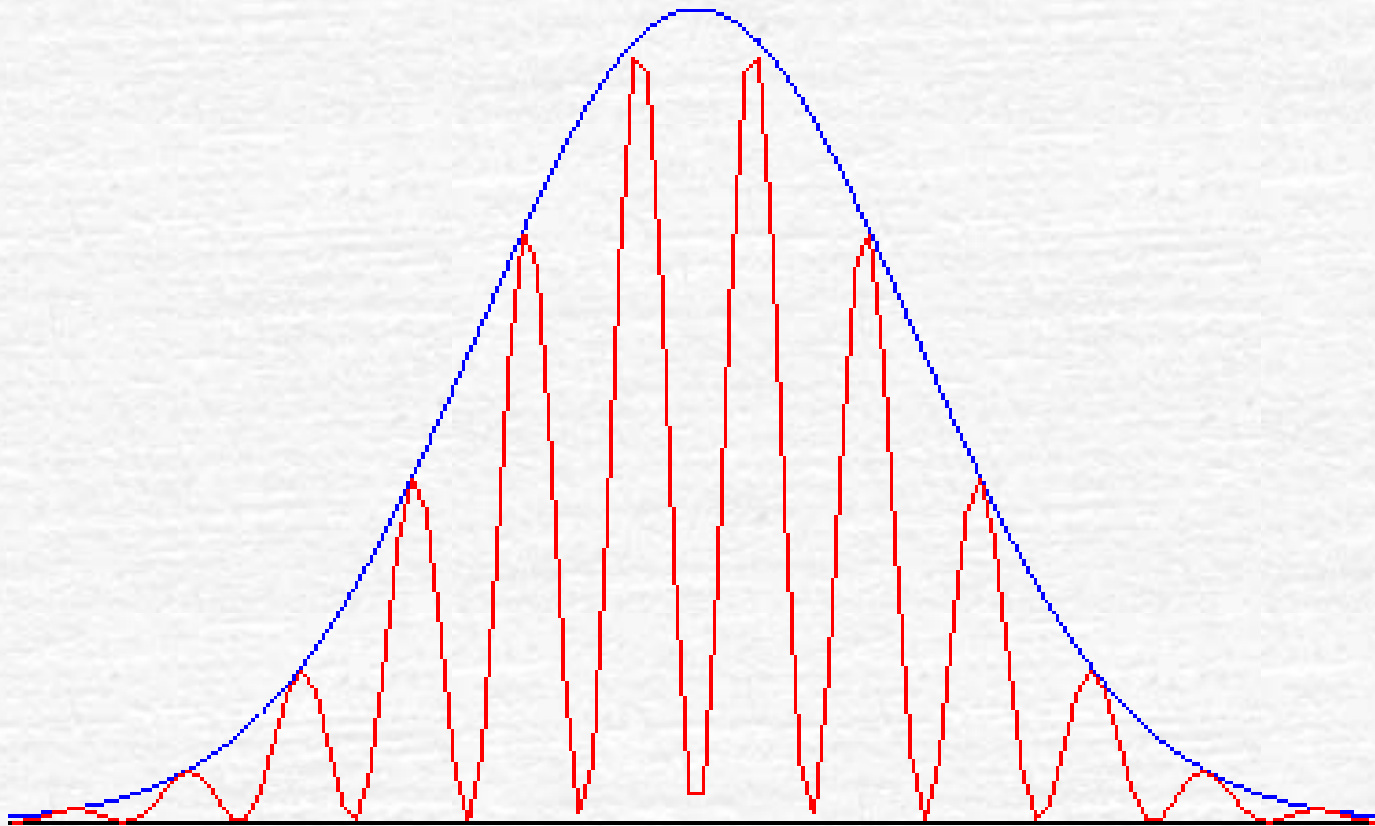
Destruir significaria:  $= 0!$

Mas...  $\neq 0$

Uma visão possível:

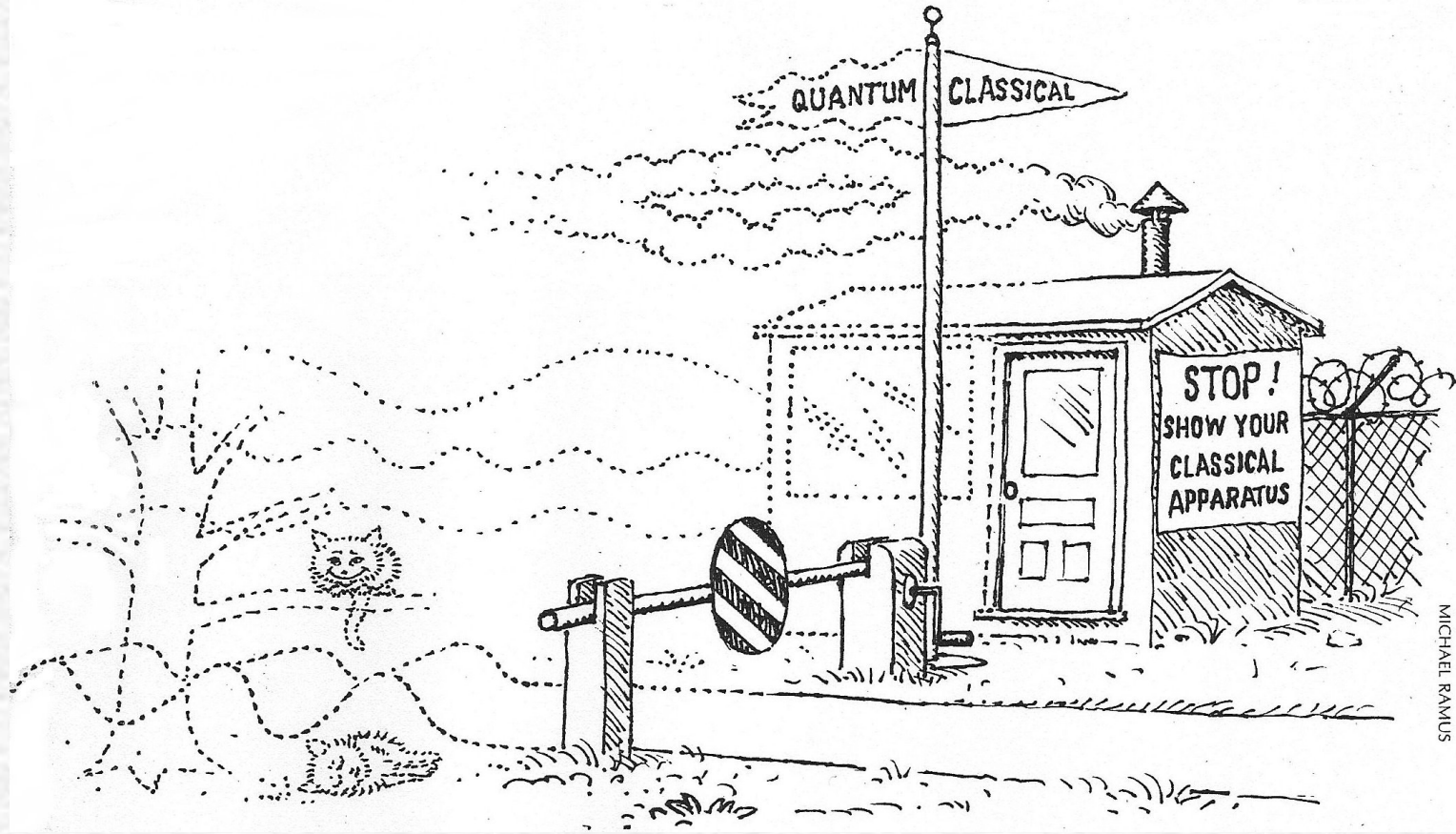
A **Mec. Clássica** é um fenômeno de **miopia**.

A **Mec. Quântica** envolve um processo de **remoção** dessa miopia.



resolução  
dos "óculos"

# Transição Clássica- Quântica



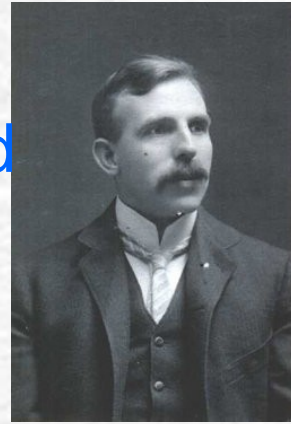


Rutherford

Descoberta do núcleo atômico

1896

1913



Chadwick

Descoberta do nêutron

1932

1935

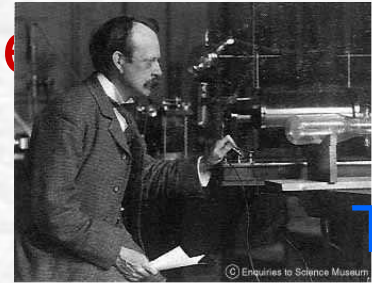


1924

Previsão dos BEC's

Paradoxo do G

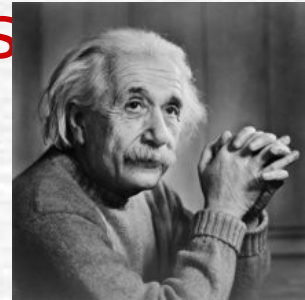
Descoberta do e



Thomson



Bose e Einstein



Schrödinger



Lederman

Descoberta do quark bottom

1961

Previsão dos quarks

Gell-Mann



Zeilinger

Monroe

Experimento com o gato

1995

Fabricação dos BEC



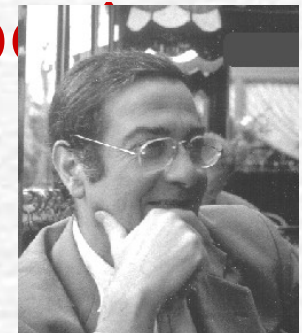
Ketterle, Wieman e Cornell Nobel 2001



Ondas de matéria

2001

Experimento de decoerência



Haroche