

Física IV

Introdução à Física Moderna

Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva

Início da Física Moderna

Vários fenômenos, não podiam ser compreendidos nos quadros da física clássica

- a radiação do corpo negro
- o efeito fotoelétrico
- a emissão de raios espectrais nítidas pelos átomos em uma descarga em gás

Uma outra revolução ocorreu na física entre 1900 e 1930, no período em que acolheu um modelo novo e mais geral chamado de **mecânica quântica**.

Esta nova abordagem teve muito êxito na explicação do comportamento dos átomos, das moléculas e dos núcleos.

- Além disso, a teoria quântica se reduz à física clássica ao ser aplicada aos sistemas macroscópicos.

As ideias básicas da teoria quântica foram introduzidas por **Max Planck**, mas o desenvolvimento matemático foram obras de vários físicos notáveis:

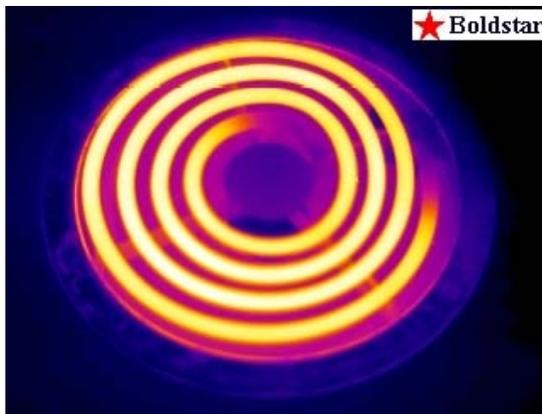
- **Einstein**
- **Bohr**
- **Schrödinger**
- **de Broglie**
- **Heisenberg**
- **Born**
- **Dirac**

Apesar do grande sucesso da teoria quântica, Einstein frequentemente exerceu o papel de crítico, em especial quanto à interpretação da teoria. Em particular, Einstein não aceitava o princípio da incerteza de Heisenberg, que afirma ser impossível ter medições simultâneas e precisas da posição e da velocidade de uma partícula. De acordo com esse princípio só se pode prever a probabilidade do futuro de um sistema, ao contrario da visão determinista mantida por Einstein.

A visão de **Einstein** sobre a natureza probabilística da teoria quântica fica aparente na sua afirmação: *“Deus não joga dados com o universo”*.

A radiação do corpo negro e as hipóteses de Planck

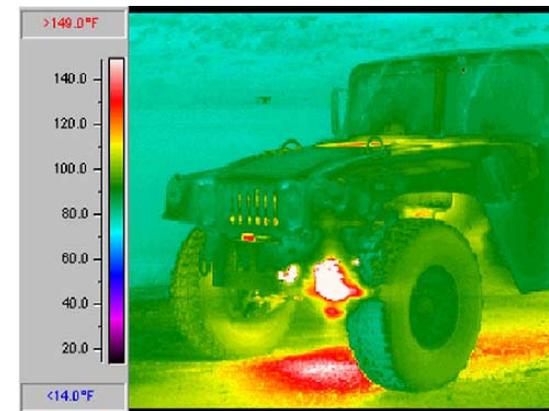
Um corpo, em qualquer temperatura emite radiação, algumas vezes denominada radiação térmica.



Material aquecido emite no visível

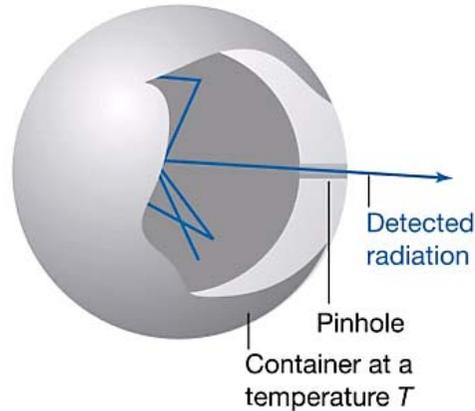
As características desta radiação dependem da temperatura e das propriedades do corpo.

O estudo minucioso da radiação térmica mostra que ela consiste em uma **distribuição contínua de comprimentos de onda**, que vão do infravermelho, passam pelo visível e chegam à parte ultravioleta do espectro.



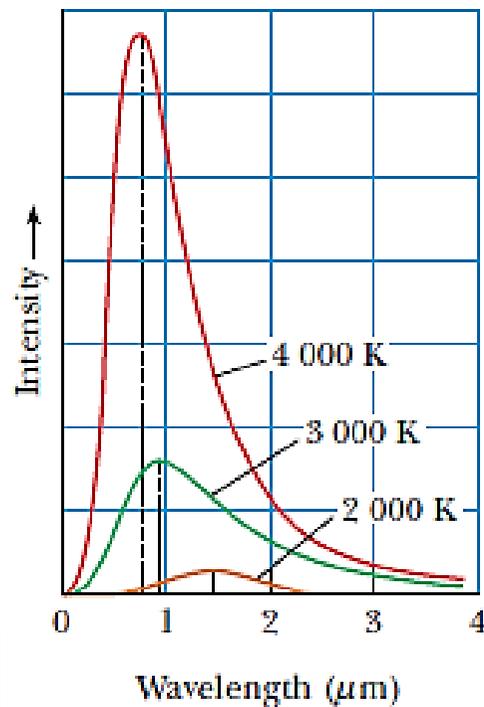
Material em baixa temperatura emite na região do infravermelho

Corpo Negro



O problema fundamental da teoria clássica era o entendimento da distribuição de comprimentos de onda observada na radiação emitida de um corpo negro.

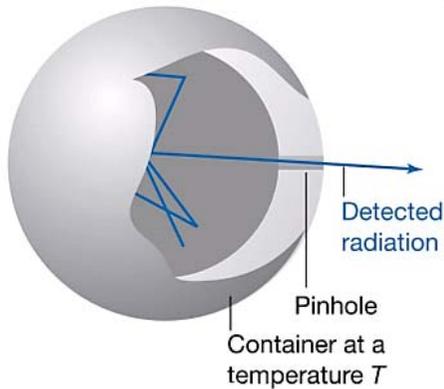
Um corpo negro é um sistema ideal que absorve toda a radiação incidente sobre ele.



A natureza da radiação emitida depende somente da temperatura das paredes da cavidade.

A energia irradiada varia com o comprimento de onda e com a temperatura.

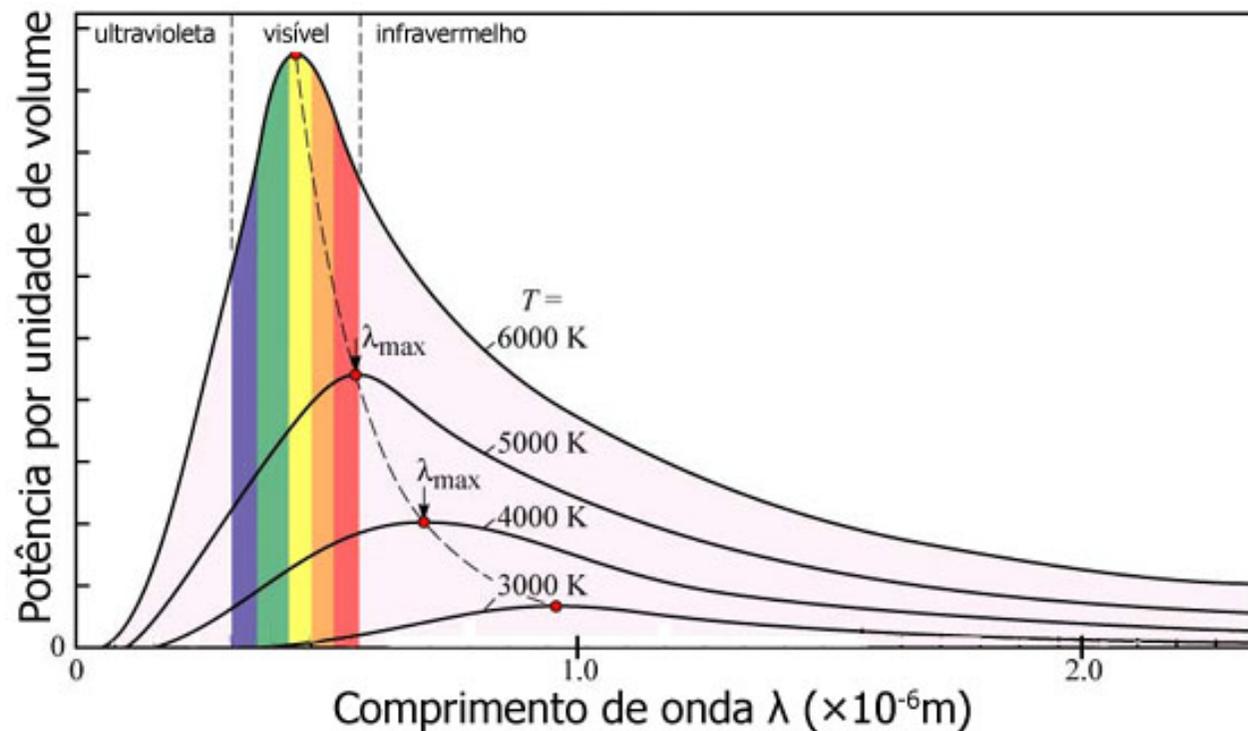
Corpo Negro



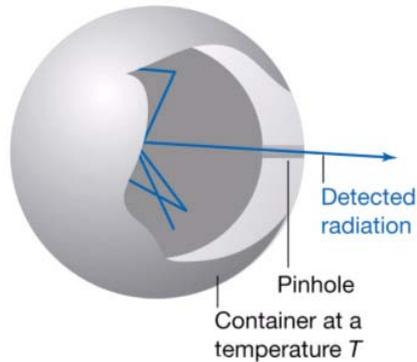
Com a elevação da temperatura, o pico da distribuição se desloca para os comprimentos de ondas menores.

Lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} T = 0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$$



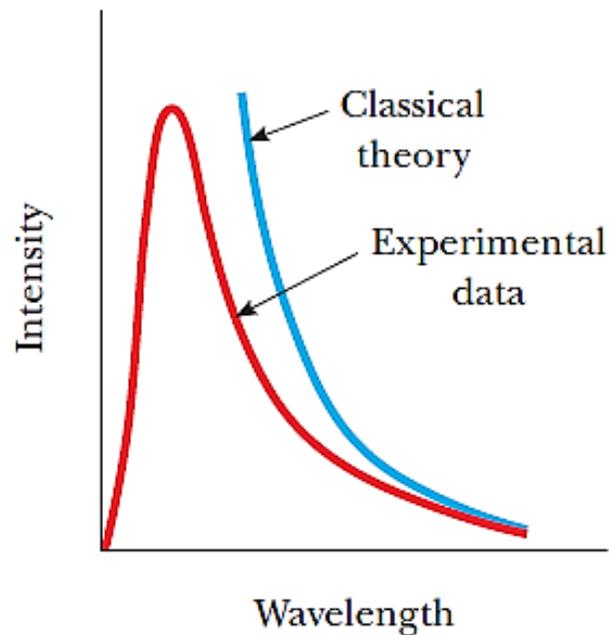
Corpo Negro



O resultado de um cálculo baseado no modelo clássico, **Teoria de Rayleigh-Jeans**, mostra que:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ck_B T}{\lambda^4}$$

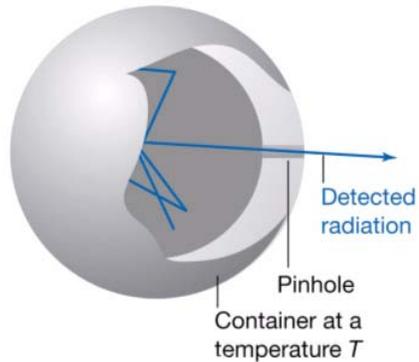
Catástrofe do Ultravioleta



onde, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$
(Constante de Boltzmann)

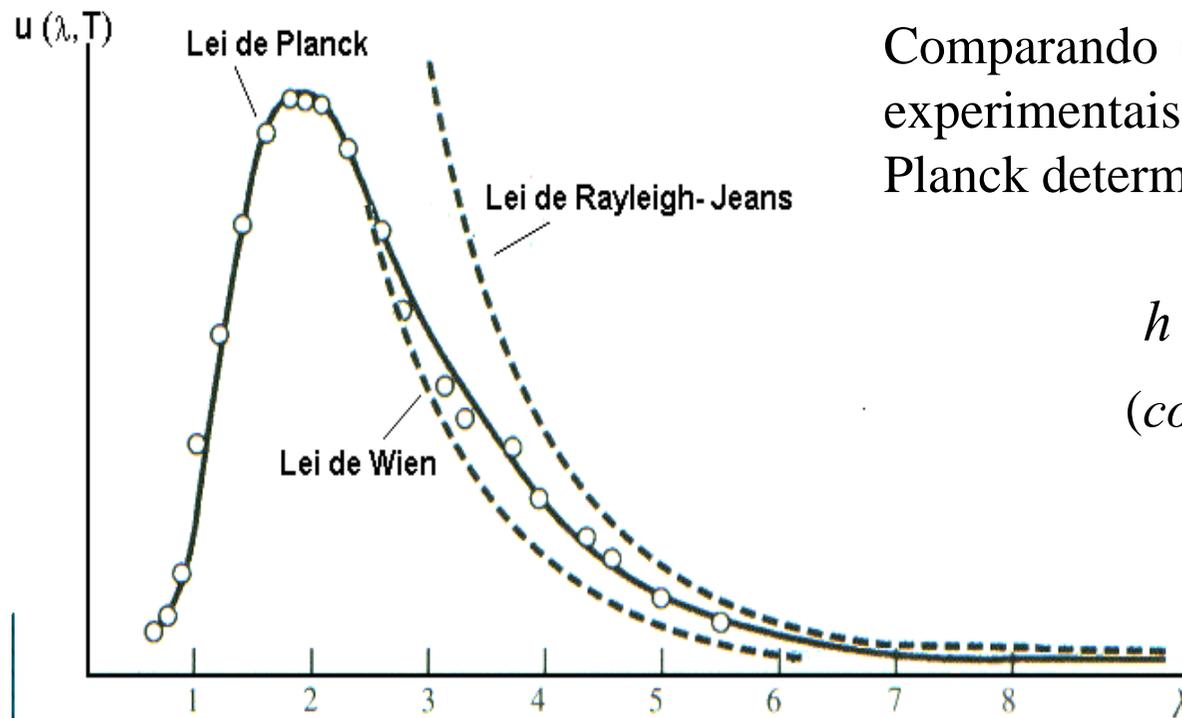
A lei de Rayleigh-Jeans concorda com os resultados experimentais para longos comprimentos de onda

Corpo Negro



Planck postulou a expressão (*lei da radiação de Planck*):

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda k_B T} - 1 \right)}$$

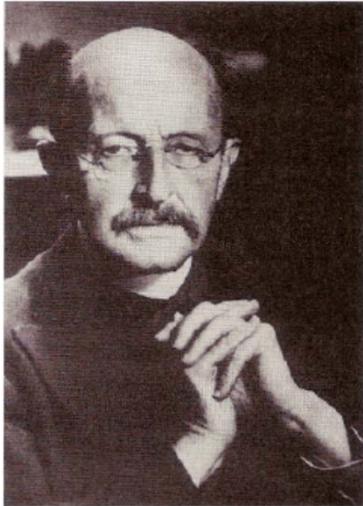


Comparando esta expressão com resultados experimentais para várias temperaturas, Planck determinou o valor de h como:

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

(*constante de Planck*)

Os Postulados de Planck e suas implicações



Max Planck, por descobrir que a energia é quantizada, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918.

Como foi visto, em 1900, Max Planck desenvolveu um modelo matemático para a emissão de radiação eletromagnética, que se ajustava perfeitamente aos dados experimentais.

Para isso, teve de admitir que a emissão de energia não era contínua. No modelo de Planck, a radiação era emitida e absorvida em pequenos pacotes de energia, denominados *quanta*, donde o nome teoria dos *quanta*, ou **teoria quântica**.

Os Postulados de Planck e suas implicações

1. Planck considerou que, na superfície do corpo negro, existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes). As partículas oscilantes, que emitem radiação, podem ter apenas determinadas quantidades de energia, com **valores discretos**:

$$E_n = n h f$$

onde, n = um número inteiro positivo (**número quântico**)

f = a frequência de vibração das moléculas

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

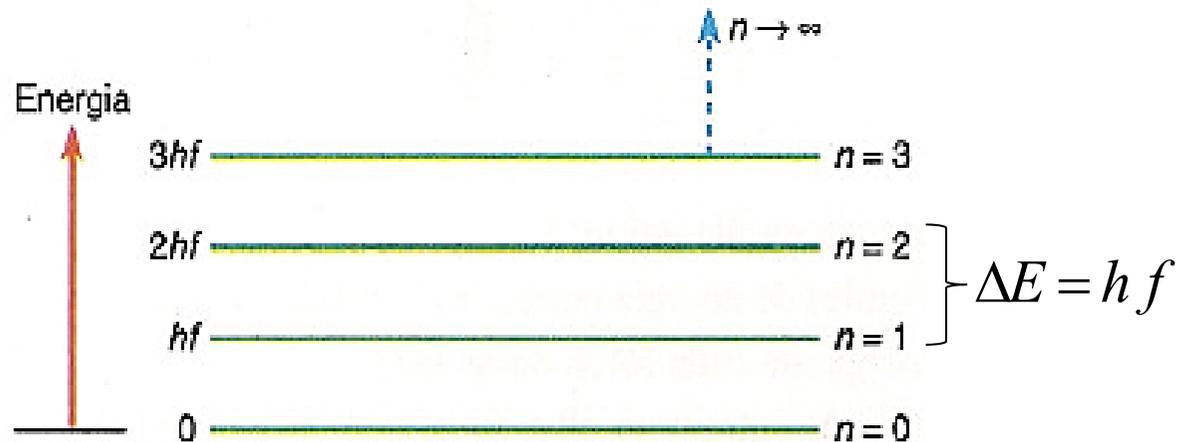
2. Planck também considerou que as moléculas **emitem ou absorvem energia em unidades discretas de energia** luminosa, os **quanta** (ou fótons).

$$E = h f$$

Por exemplo:

- De $n = 2$ para $n = 1$, emite uma porção discreta de energia igual a hf , que é a diferença entre $2hf$ e $1hf$.
- De $n = 1$ para $n = 2$, absorve uma porção discreta de energia hf .

Portanto, a emissão e a absorção de energia também se dão em quantidades quantizadas.



O Postulado de Planck:

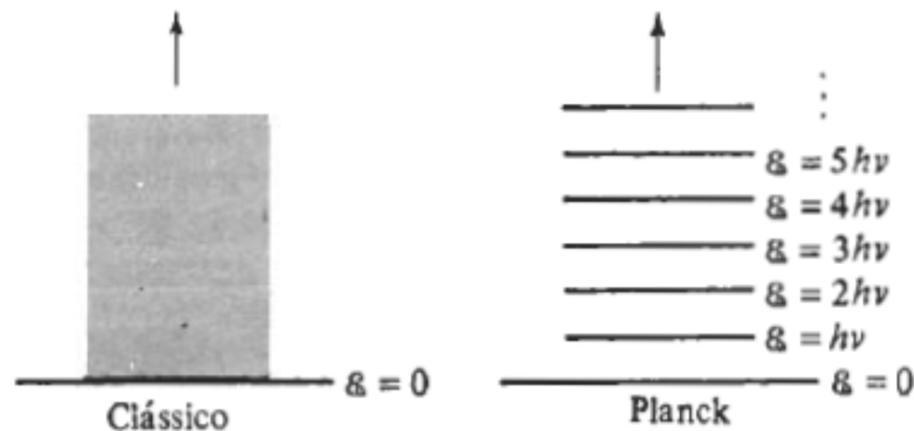
A energia total E de qualquer entidade física cuja única “*coordenada*” execute oscilações harmônicas simples (isto é, seja expressa por uma função senoidal do tempo) pode assumir tão somente valores que satisfaçam a relação

$$E_n = n h f$$

onde, $n =$ um número inteiro positivo (número quântico)

$f =$ a frequência de vibração das moléculas

$h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$ (constante de Planck)



Max Planck

- O trabalho de Planck foi muito mais que uma manipulação matemática.
- Planck passou mais de seis anos de sua vida tentando deduzir a curva de distribuição de energia do corpo negro.
- Nas suas próprias palavras o problema da emissão “*representa alguma coisa absoluta, e em virtude de ter sempre considerado a busca do absoluto o mais alto objetivo da atividade científica, empenhei-me ardorosamente no trabalho*”.
- Este trabalho na realidade, iria ocupar a maior parte da sua vida, pois continuou a busca de uma interpretação física da sua fórmula e da reconciliação entre o conceito quântico e a teoria clássica.

Exemplo:

Oscilador quantizado

Um corpo de 2 kg de massa está preso a uma mola, de massa desprezível e constante de força $k = 25 \text{ N/m}$. A mola está esticada 0,4 m com relação à sua posição de equilíbrio e é então solta.

- a) Ache a energia total e a frequência da oscilação, de acordo com o cálculo clássico.
- b) Admita que a energia seja quantizada e então calcule o número quântico, n , do sistema.
- c) Qual a energia que seria transportada em uma variação correspondente a um quantum?

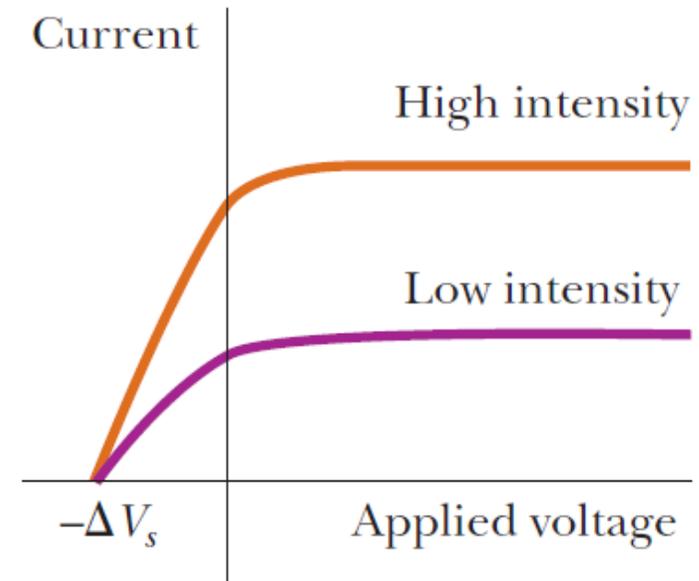
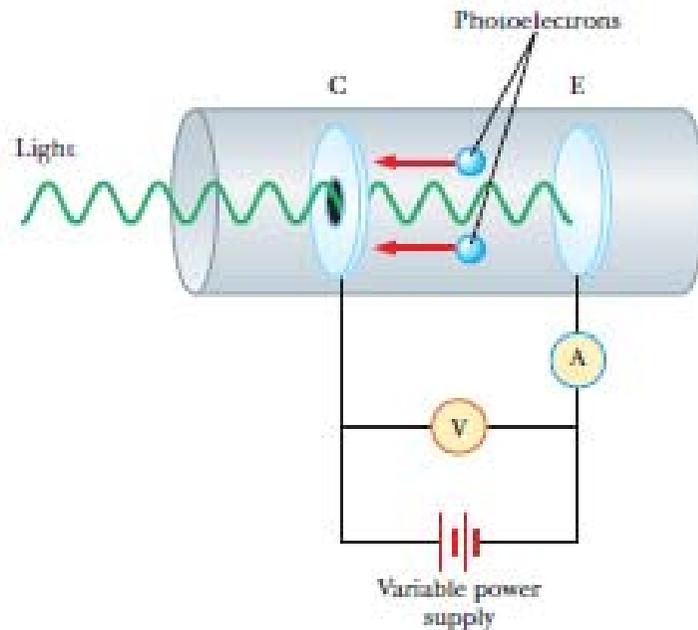
Exemplo:

A energia de um fóton azul

- a) Qual a energia de um quantum de luz cuja frequência seja igual a $6,00 \times 10^{14}$ Hz (luz azul)? Dê a resposta em eV.
- b) Qual o comprimento de onda dessa luz?

O Efeito Fotoelétrico

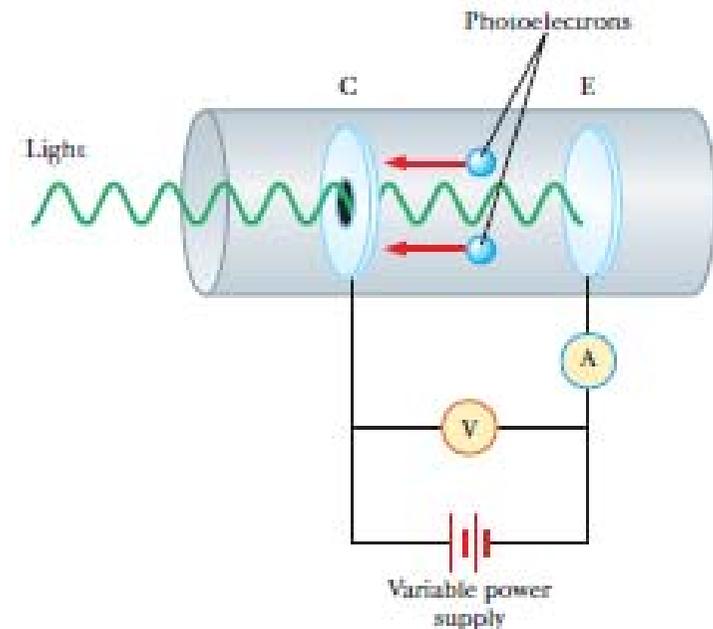
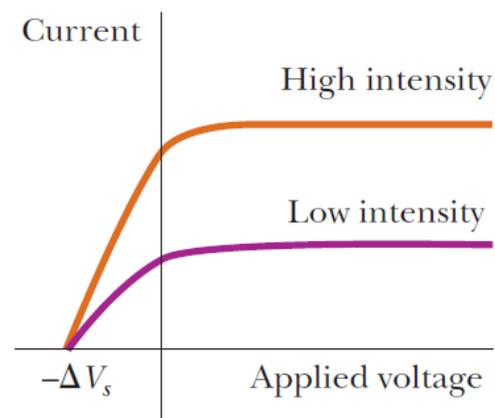
Observado por Hertz (1887) e Hallwachs (1888)



Ocorre a emissão de elétrons de uma placa metálica, quando iluminada por radiação eletromagnética.

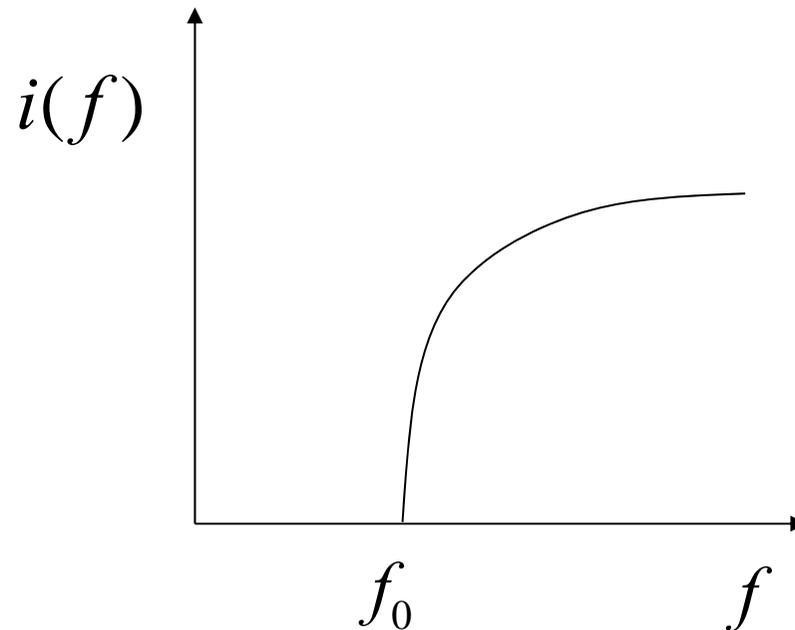
- Somente aqueles elétrons que tiverem uma energia cinética maior que eV atingirão C.
- Se V for menor ou igual a V_s , (**potencial frenador**) nenhum elétron atingirá C e a corrente será nula.
- O potencial frenador *independe* da intensidade da radiação.
- A energia cinética máxima dos fotoelétrons está relacionada com o potencial frenador por:

$$K_{m\acute{a}x} = eV_s$$



Muitas características do efeito fotoelétrico **não podem ser explicados pela física clássica ou pela teoria ondulatória da luz**. Os aspectos mais importantes, que não tinham explicação são:

1- Nenhum elétron é emitido se a frequência da luz incidente for menor que um certo **limiar de frequência, f_c** , que é característico do material iluminado.



2- Se a frequência da luz for superior ao limiar de frequência, o efeito fotoelétrico ocorrerá e o número de fotoelétrons emitidos será proporcional à intensidade da luz. Porém, **a energia cinética máxima dos fotoelétrons independe da intensidade da luz**, o que não pode ser explicado pelos conceitos da física clássica.

3- A energia cinética máxima dos fotoelétrons aumenta com o aumento da **frequência da luz**.

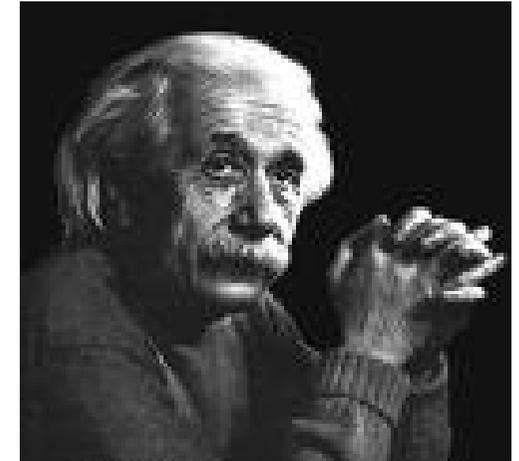
4- Os elétrons são emitidos, pela superfície, quase instantaneamente ($t < 10^{-9}$ s depois de a superfície ser iluminada) mesmo se a intensidade da luz for baixa.

Explicação do efeito fotoelétrico

- 1905, Einstein explicou o efeito fotoelétrico (Prêmio Nobel de 1921)

Para isso, ele estendeu a teoria de Planck às radiações eletromagnéticas, considerando que a *energia dessas radiações também é quantizada*.

Assim, uma radiação eletromagnética passou a ser tratada como um feixe de partículas, denominadas fótons, propagando-se.



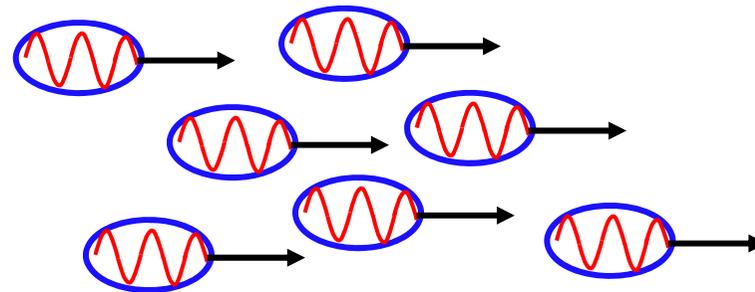
$$E = hf$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \rightarrow \text{constante de Planck}$$

$$f \rightarrow \text{frequência da radiação}$$

Einstein admitiu que a luz não estivesse distribuída uniformemente sobre a frente de onda clássica, mas se concentrasse em regiões discretas (ou em “pacotes”), que são os **quanta de luz** ou **fótons**.

pictoricamente:



Cada fóton transfere toda sua energia a um único elétron no metal.

Os elétrons emitidos pela superfície do metal têm uma certa energia cinética máxima:

$$K_{m\acute{a}x} = hf - \phi$$

onde, ϕ é a **função trabalho** do metal

ϕ é a **função trabalho** do metal

A **função trabalho** constitui a energia mínima de ligação de um elétron no metal, e é da ordem de alguns elétrons-volt.

Metal	ϕ (eV)
Na	2,28
Co	3,90
Al	4,08
Cu	4,70
Pb	4,14
Zn	4,31
Fe	4,50
Ag	4,73
Pt	6,35

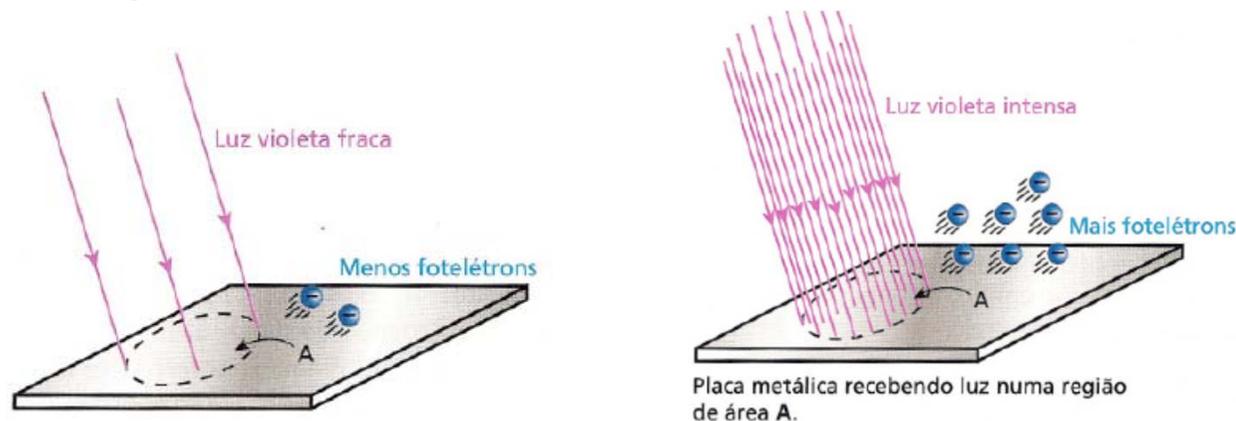
O elétron-volt:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Com a teoria dos fótons para a luz é possível explicar os aspectos do efeito fotoelétrico que não podem ser compreendidos mediante conceitos clássicos.

1- O fato de o efeito fotoelétrico não ser observado abaixo de um certo limiar de frequência é consequência de a energia do fóton ter que ser igual ou maior que a função trabalho.

2- O fato de $K_{máx}$ ser independente da intensidade da luz pode ser compreendido da seguinte forma.



Se a intensidade da luz for duplicada, o número de fótons também o será, o que duplica o número de fotoelétrons emitidos.

3- O fato de $K_{m\acute{a}x}$ aumentar com o aumento da frequ\ecancia \u00e9 entendido com facilidade por:

$$K_{m\acute{a}x} = hf - \phi$$

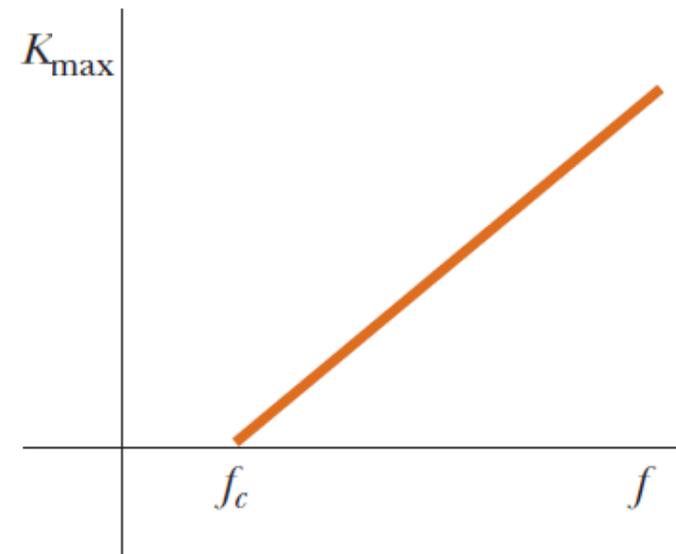
4- Finalmente, o fato de os el\u00e9trons serem emitidos quase instantaneamente \u00e9 coerente com a **teoria corpuscular da luz**, para qual a energia incidente aparece em pequenos pacotes e h\u00e1 uma intera\u00e7\u00e3o de um para um dos f\u00f3tons com os el\u00e9trons. O que difere de a energia dos f\u00f3tons se distribuir em uma grande \u00e1rea.

Uma confirmação final da teoria de Einstein é a verificação da previsão da relação linear entre f e $K_{máx}$.

Esta relação foi verificada experimentalmente.

- O coeficiente angular da curva dá o valor de h .
- A abscissa da intercessão com o eixo horizontal dá o limiar de frequência, que está relacionado com a função trabalho por $f_c = \phi/h$. Isto corresponde a **um limiar de comprimento de onda** dado por:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{\phi/h} = \frac{hc}{\phi}$$



Comprimentos de onda maiores que λ_c , não provocam a emissão de fotoelétrons.

Exemplo

O efeito fotoelétrico no sódio

Uma superfície de sódio é iluminada por luz com comprimento de onda de 300 nm. A função trabalho do sódio metálico é 2,46 eV.

Ache:

- a) a energia dos fotoelétrons ejetados
- b) o limiar de comprimento de onda do sódio
- c) calcule a velocidade máxima dos elétrons emitidos

Exemplo

Duas fontes de luz

Duas fontes de luz são usadas em uma experiência de efeito fotoelétrico que visa determinar a função trabalho de certa superfície metálica. Quando é usada a luz verde de uma lâmpada de mercúrio ($\lambda = 546,1 \text{ nm}$), o potencial retardador de $1,70 \text{ V}$ reduz a fotocorrente a zero. a) Com essa medida qual é a função trabalho desse metal? (b) Qual o potencial frenador que seria observado se fosse usada à luz amarela de um tubo de descarga em hélio ($\lambda = 587,5 \text{ nm}$)?