



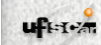
Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês  
Caracelli

1

## Princípios de Mecânica Quântica

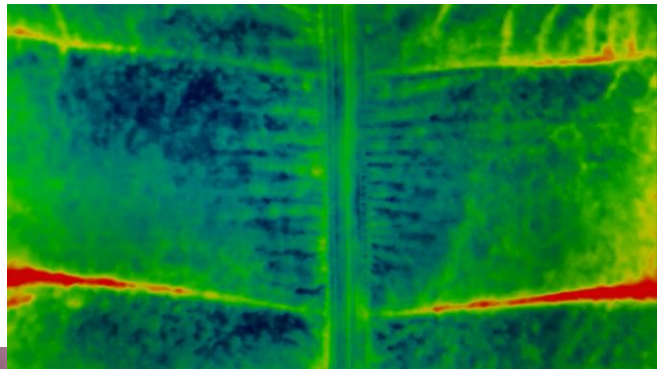


Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês  
Caracelli

2



<https://www.youtube.com/watch?v=o2bzGyc6WAg>



<https://www.youtube.com/watch?v=1FEvv8hgkO4>



## Alguns personagens

Albert Einstein

Max Planck

Erwin Schrodinger

Ernest Rutherford

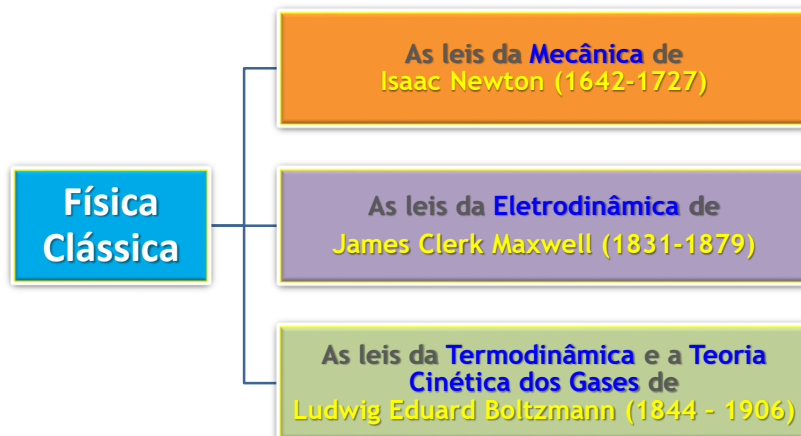
Werner Heisenberg

Niels Bohr

Louis de Broglie



## Fins do Século XIX



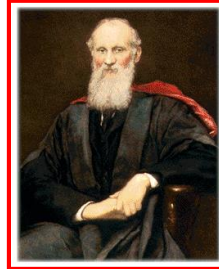
**TEORIA CLÁSSICA: quase tudo entendido!**

Faltam apenas **ALGUNS "DETALHES"** PARA EXPLICAR **"RESULTADOS ESTRANHOS"**

## Fins do Século XIX

Conferência na Royal Society em março de 1900

William Thomson  
Lord Kelvin (1824-1907)  
Físico inglês



*“Atualmente pairam apenas **duas pequeninas nuvens cinzentas** sobre o céu cristalino da Física”*

## Fins do Século XIX

### As duas “nuvenzinhas”

- O fracasso das experiências de Michelson e Morley, ao medir a velocidade da luz através do éter em direções perpendiculares.
- A dificuldade em explicar a distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido.



## Radiação do Corpo Negro



## Fontes de Luz

Entre as fontes luminosas mais comuns encontram-se:

- sólidos aquecidos (p. ex. filamento de lâmpada)
- descargas elétricas em gases

Um corpo em qualquer temperatura emite energia – **a radiação térmica**

## Radiação Térmica

Qualquer objeto a uma temperatura superior ao zero absoluto ( $T > 0\text{K}$ ) **emite radiação eletromagnética**.



## Radiação Térmica na Física Clássica

**Radiação Térmica na Física Clássica:**

**É a radiação eletromagnética emitida por um objeto devido à sua temperatura.**

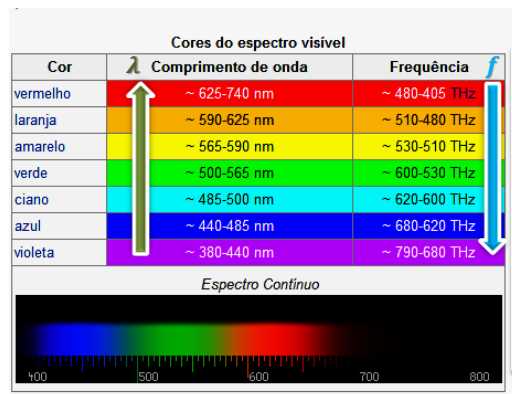
## Fins do século XIX

Medição de altas temperaturas e falta de instrumentos



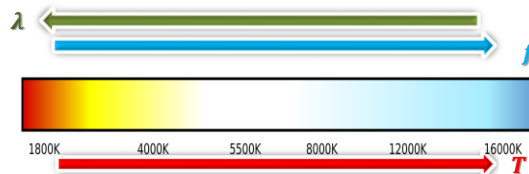
necessidade de associação da cor do material (comprimento de onda da luz  $\lambda$ )

à temperatura  $T$ .

Espectro contínuo:  $\lambda$  e  $f$ 

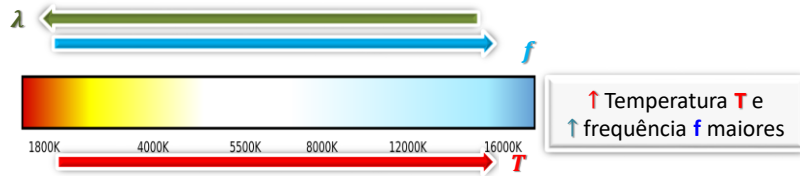
*Radiação Térmica na Física Clássica:*

É a radiação eletromagnética emitida por um objeto devido à sua temperatura.



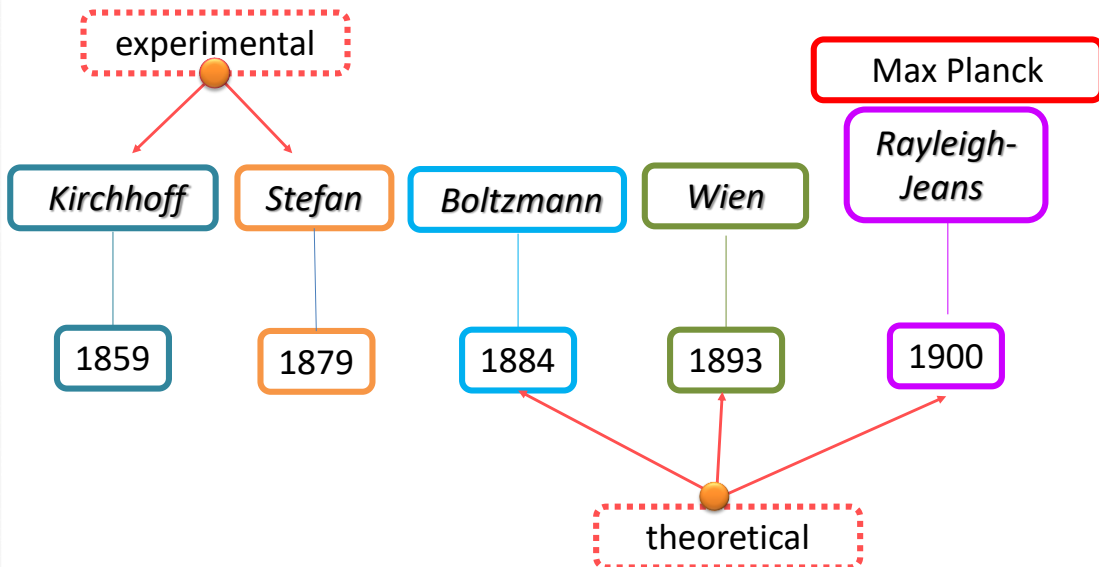
Temperatura  $T$  e frequência  $f$  maiores

## Radiação Térmica



Ignes Caracelli

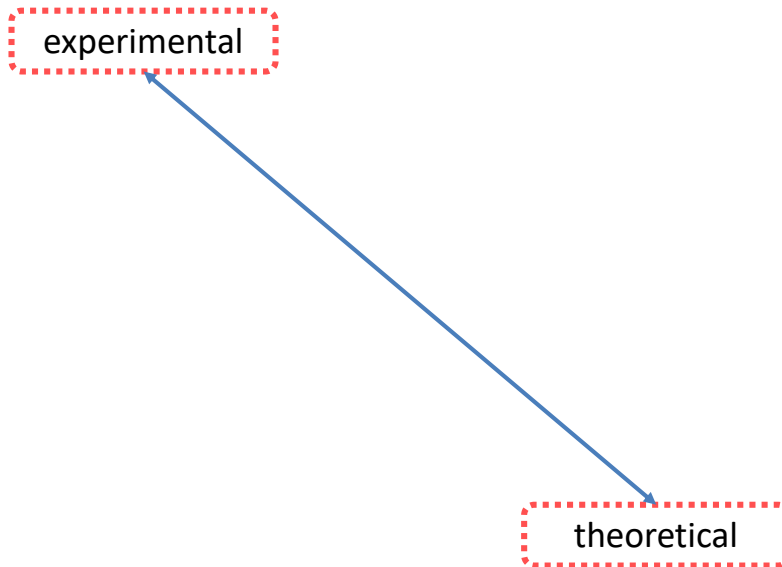
13



Ignes Caracelli

14

## Problema: Construção de um modelo



## Intensidade da radiação emitida e Comprimento de onda

Ao fim do século XIX, era “público e notório” que todos os corpos estão, a todo momento e em qualquer temperatura **T**, emitindo radiação.

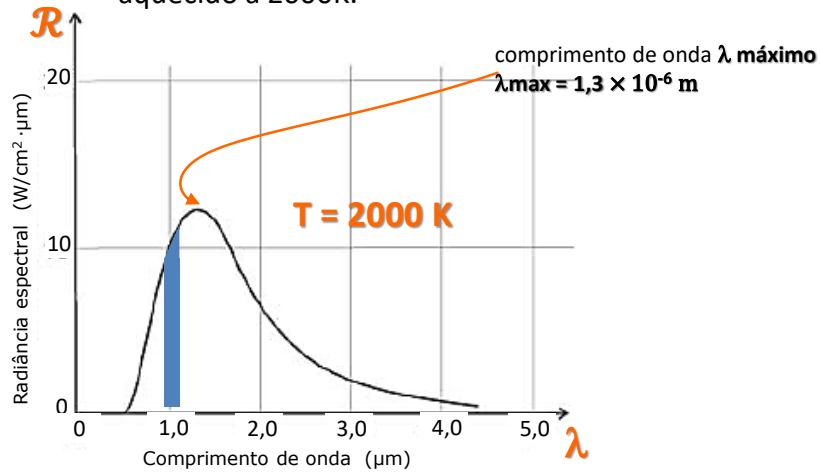
Emissão da Radiação  $\times$  T

Quando a radiação é emitida por um **sólido**, o *espectro é contínuo*, abrangendo uma larga faixa de frequências.



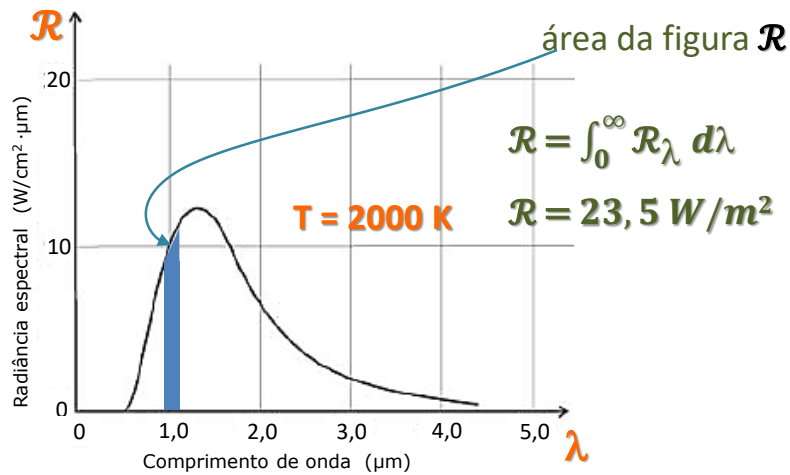
## Radiação emitida $\mathcal{R}$ e Comprimento de onda $\lambda$

radiância espectral  $\mathcal{R}$   $\times$  comprimento de onda  $\lambda$  da radiação emitida para um pedaço de tungstênio aquecido a 2000K.

 $\mathcal{R}$ 

## Radiação emitida $\mathcal{R}$ e Comprimento de onda $\lambda$

$\mathcal{R} \times \lambda$   
 W a 2000K



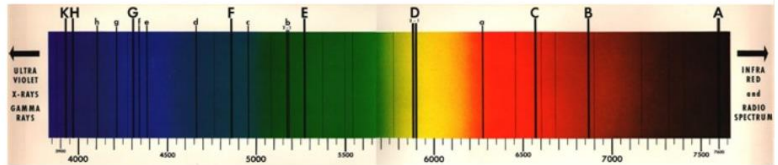
D lines from the light emitted by the Sun

experimental

Gustav Kirchhoff

1859

Kirchhoff discovered that so called D-lines from the light emitted by the Sun came from the absorption of light from its interior by sodium atoms at the surface.



*Kirchhoff could not explain selective absorption. At that time Maxwell had not even begun to formulate his electromagnetic equations. Statistical mechanics did not exist and thermodynamics was in its infancy*

<https://slideplayer.com/slide/10577930/>

## O corpo negro: sólido ideal

Um corpo negro é um **absorvedor perfeito** e também um **emissor perfeito**:

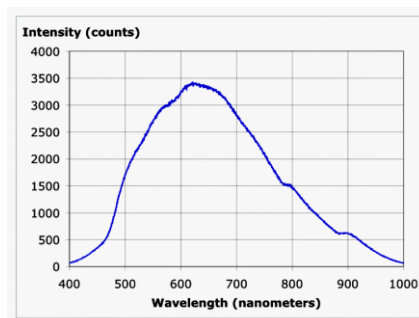
$$E = J(T, \nu).$$



experimental

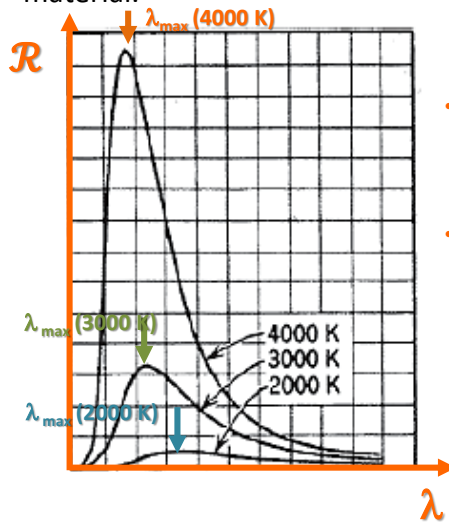
Gustav Kirchhoff

1859



## Intensidade da radiação emitida e Comprimento de onda

três curvas  $\mathcal{R} \times \lambda$   
para um determinado  
material.

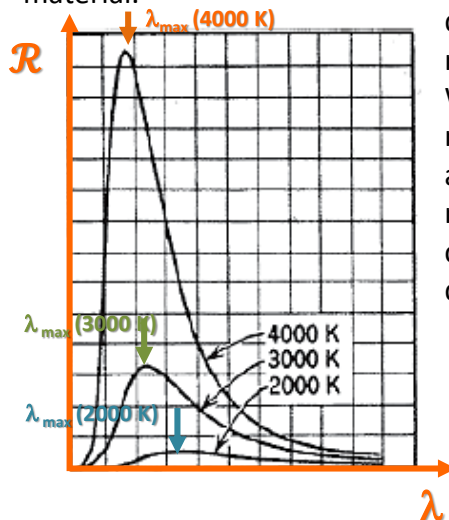


- quanto mais quente o irradiador, maior a potência com que ele emite (ou seja, sua radiância)
- observa-se o deslocamento do “pico” da curva no sentido dos menores comprimentos de onda
- $\lambda_{\max}$  da radiação varia inversamente com a temperatura T

*experimental*

## Intensidade da radiação emitida e Comprimento de onda

três curvas  $\mathcal{R} \times \lambda$   
para um determinado  
material.



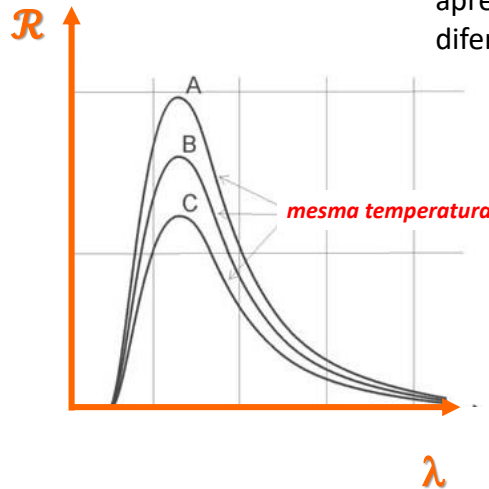
O deslocamento da radiação dominante no sentido dos menores  $\lambda$  foi estudado por Wien, que expressou matematicamente a dependência entre  $\lambda_{\max}$  e T numa equação conhecida como **lei do deslocamento de Wien**

*experimental*

## Intensidade da radiação emitida e Comprimento de onda

três curvas  $\mathcal{R} \times \lambda$   
para um diferentes materiais  
e **mesma temperatura**.

Para mesma temperatura, cada material apresenta uma curva de radiância espectral diferente.



Pode-se concluir que o material A é melhor emissor do que B, e este melhor do que C.

**experimental**

## O corpo negro: sólido ideal



experimental

Gustav **Kirchhoff**

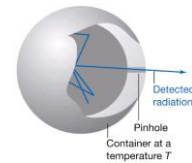
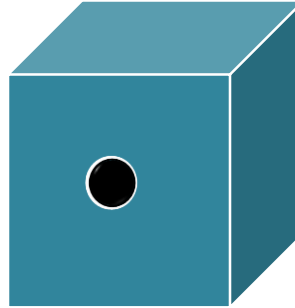
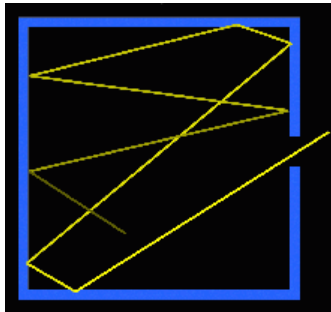
1859

Estabeleceu-se um sólido ideal, um irradiador de cavidade, o corpo negro.

As propriedades de emissão luminosa **independem** da natureza do material e **variam** de maneira simples com a **temperatura**.

**Corpo negro**

**Corpo negro** é um radiador ou emissor ideal capaz de absorver toda a radiação nele incidente.

**Corpo negro**

### O que acontece com a radiação que incide no corpo negro?

A radiação é absorvida nas paredes da cavidade → isto causa aquecimento das paredes da cavidade



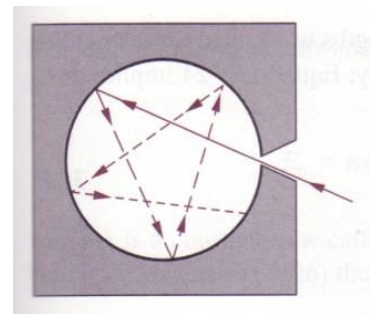
Os átomos nas paredes da cavidade vibram em frequências características da temperatura das paredes.



Estes átomos re-irradiam a energia nesta frequência característica.



**A radiação térmica emitida caracteriza a temperatura de equilíbrio do corpo negro**



## O irradiador ideal

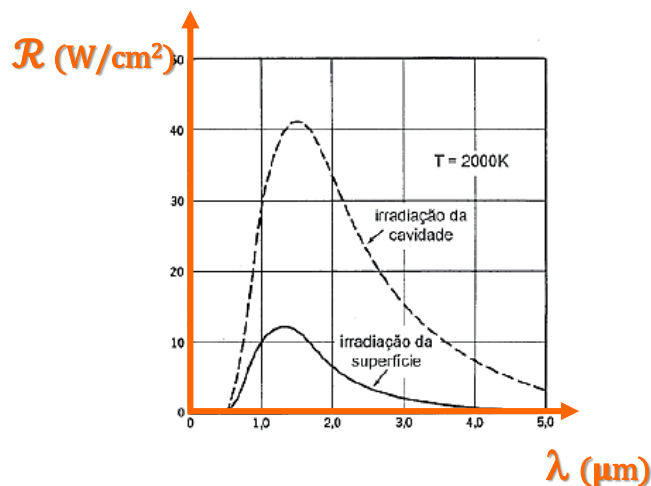
cada material apresenta um comportamento particular, no que diz respeito à emissão de radiação por excitação térmica.

### MAS, ...

se fizermos uma cavidade em blocos de materiais diferentes, e analisarmos a radiação que emerge de um pequeno orifício que liga a cavidade ao exterior (denominada **radiação de cavidade**), são constatados dois fatos importantes

## O irradiador ideal: fatos importantes

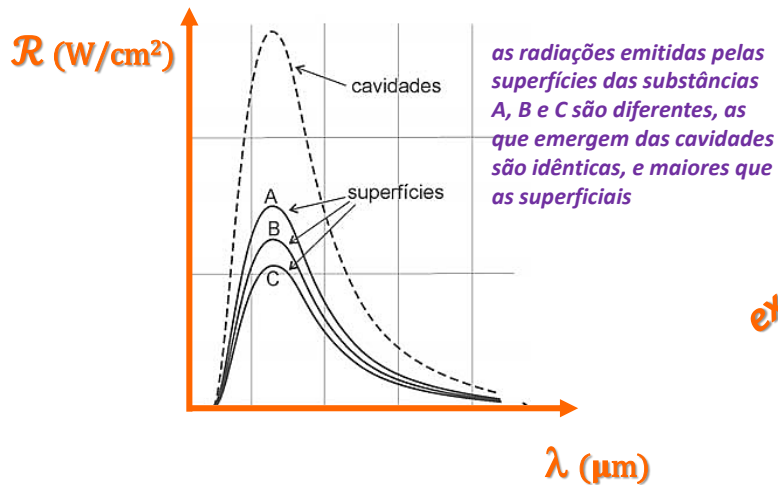
- 1 A radiação proveniente da cavidade é mais intensa que a emitida pela superfície do material, qualquer que seja ele.



experimental

## O irradiador ideal: fatos importantes

2 Tanto a intensidade, como a distribuição da radiação que emerge da cavidade, não dependem do material; elas são função apenas da temperatura.



experimental

## O corpo negro: sólido ideal



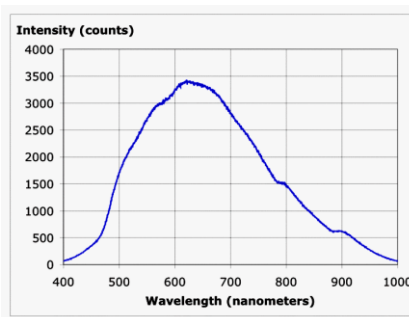
Gustav Kirchhoff  
(1859)



Josef Stefan  
(1879)

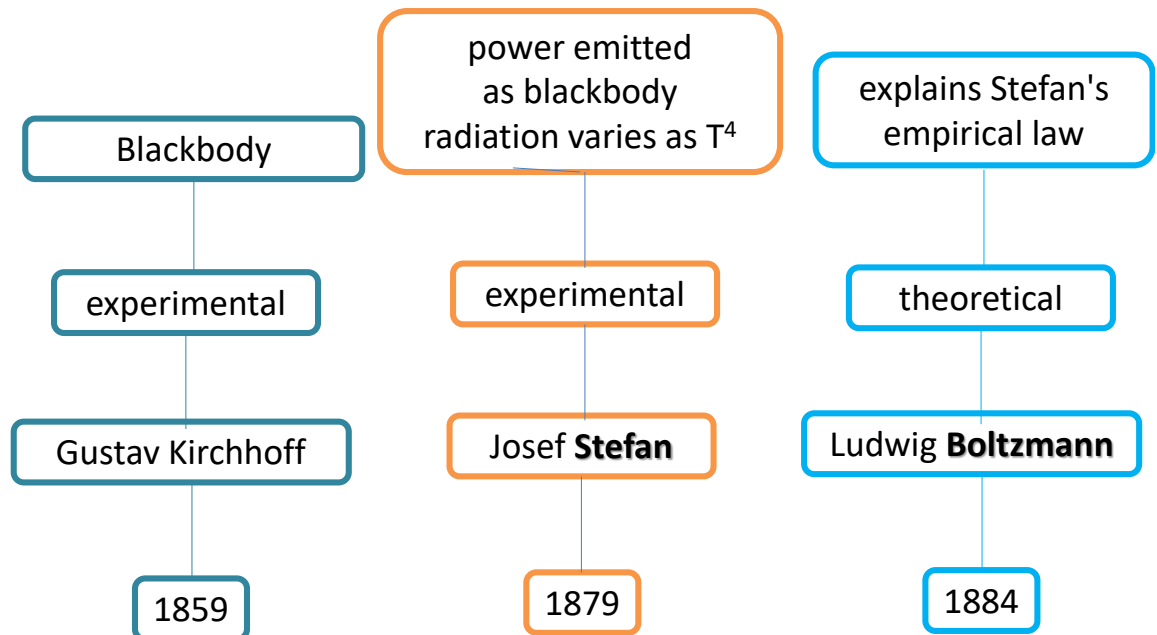
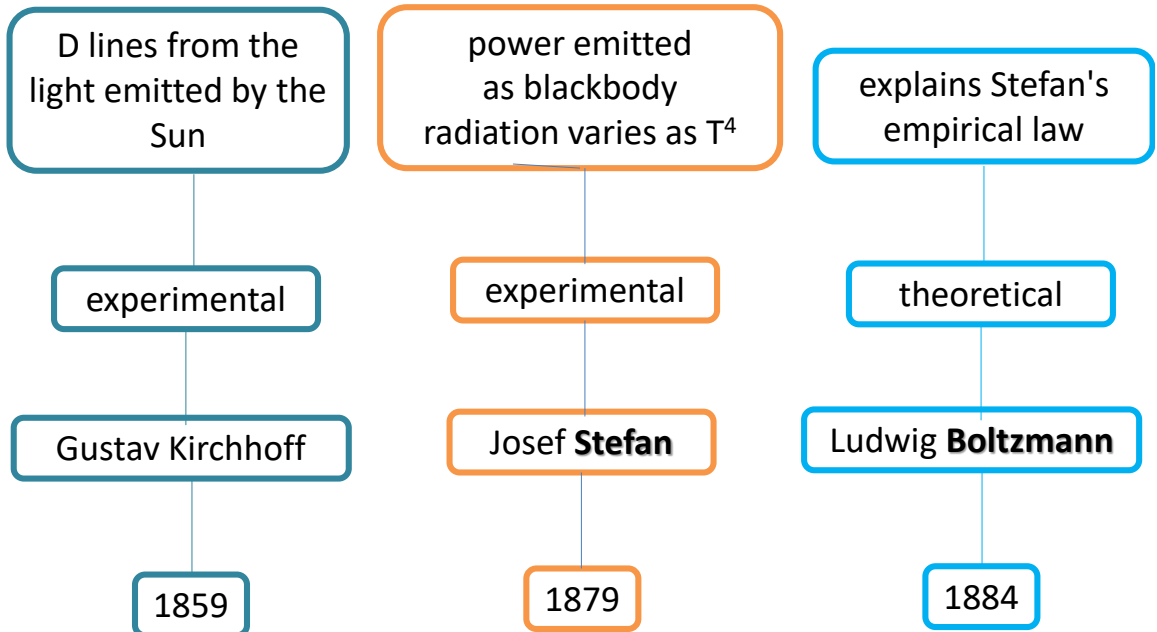
Um corpo negro é um *absorvedor perfeito* e também um *emissor perfeito*:

$$E = J(T, \nu).$$

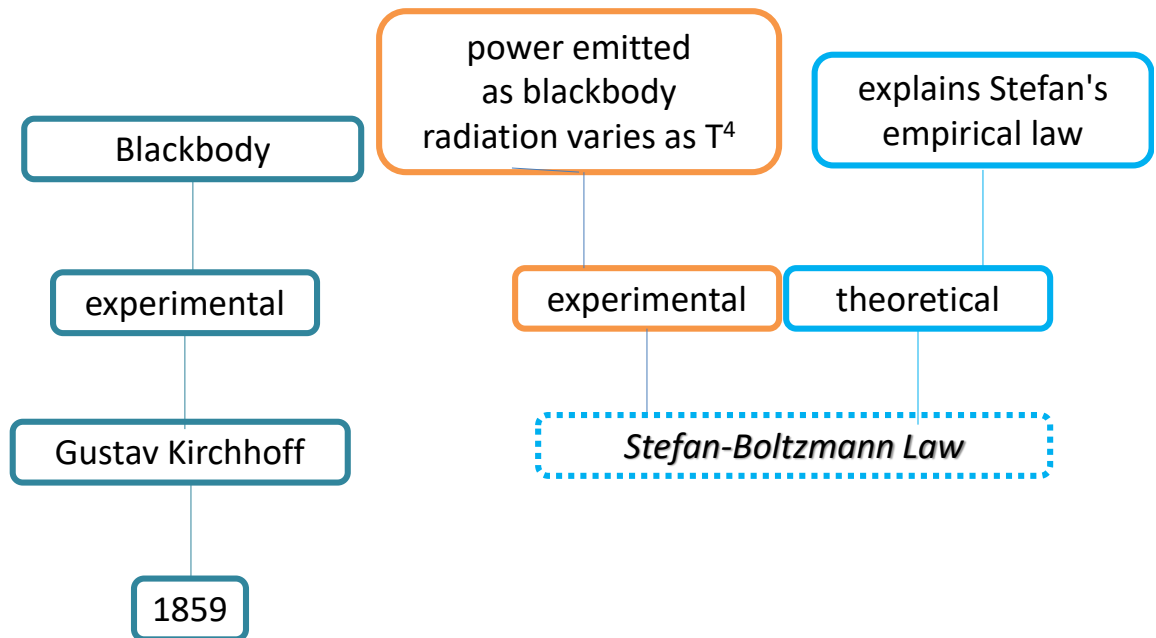


A energia emitida é proporcional à quarta potência da temperatura:

$$E \propto T^4.$$







## Modelos Teóricos para explicar experimentos

### Lei de Stefan-Boltzmann

ano: 1879

ano: 1884; Boltzmann deduziu a Lei de Stefan teoricamente, utilizando a Termodinâmica estatística

potência **P** (energia irradiada por segundo) de um corpo negro é diretamente proporcional à sua  $\propto T^4$

**P** (energia irradiada por segundo)  $\propto T^4$

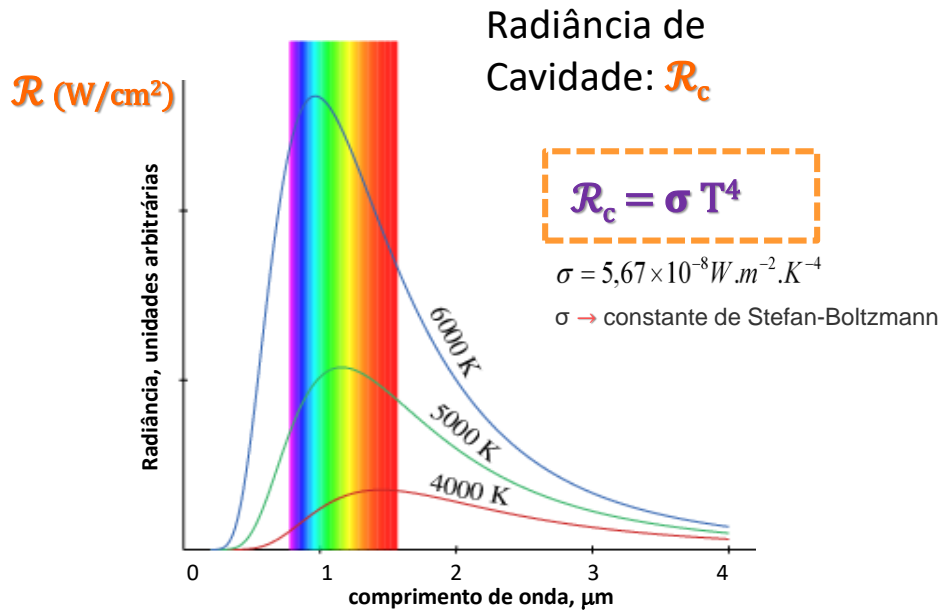
$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \text{ j/m}^2\text{s} \quad \text{Stefan-Boltzmann Law}$$

$$\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ watt / m}^2\text{K}^4$$

Kirchoff em 1859:

**corpo negro**: corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele

## Radiância espectral: lei de Stefan-Boltzmann



## Radiância espectral: lei de Stefan-Boltzmann

Radiância de um material:  $\mathcal{R}$

$$\mathcal{R} = \epsilon \sigma T^4$$

emissividade  $\epsilon \rightarrow$  depende

- material
- temperatura

emissividade de uma superfície

$\epsilon$  varia entre zero e um

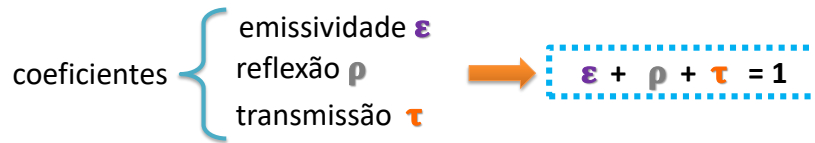
$$0 \leq \epsilon \leq 1$$

Radiância de Cavity:  $\mathcal{R}_c$

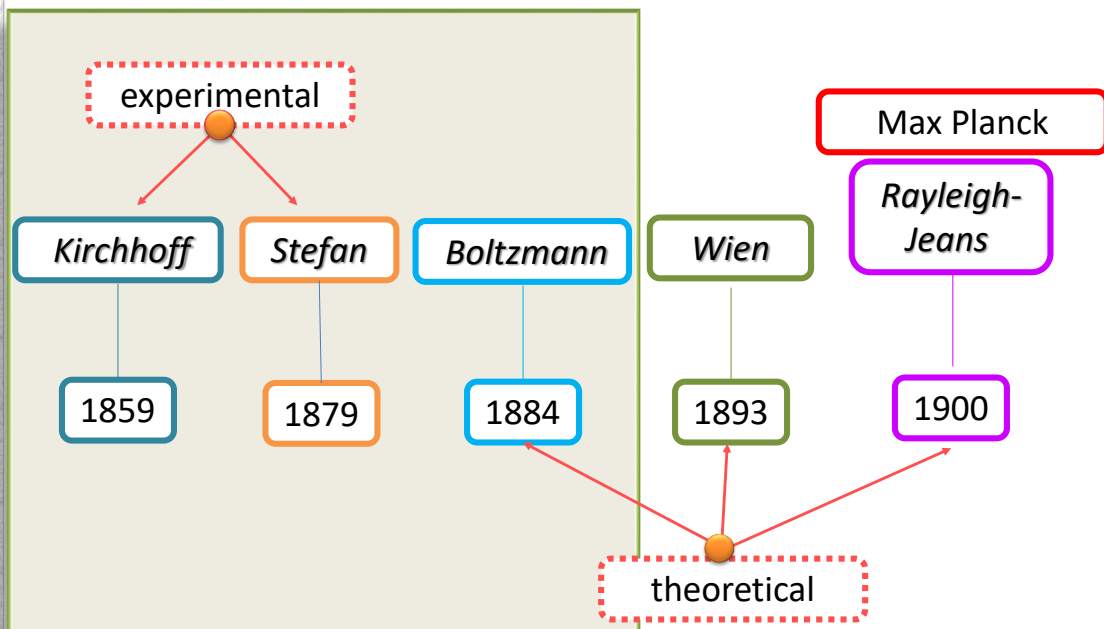
$$\mathcal{R}_c = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$$

## Emissividade



	$\epsilon$	$\rho$	$\tau$
corpo negro	1	0	0
corpo transparente	0	0	1
espelho perfeito	0	1	0
corpo cinzento	$\epsilon + \rho = 1$		0
termografia (IV)	constante para T e $\lambda$ , $\epsilon < 1$		

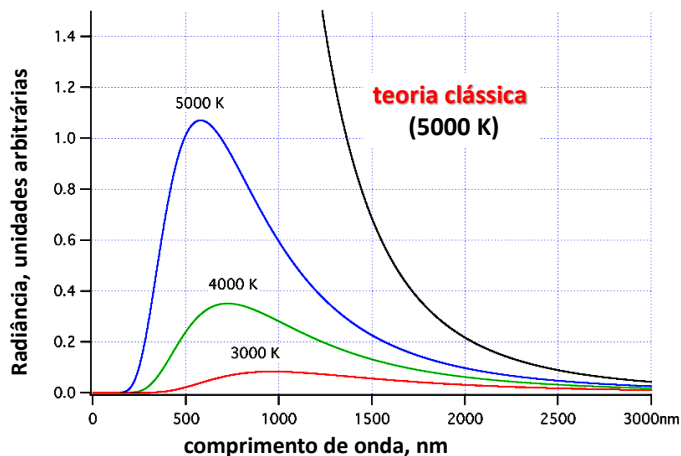


## O espectro de corpo irradiante



Wilhelm Wien  
(1896)

O comprimento de onda máximo de emissão é proporcional ao inverso da temperatura:  $\lambda \propto 1/T$



## O espectro de corpo irradiante

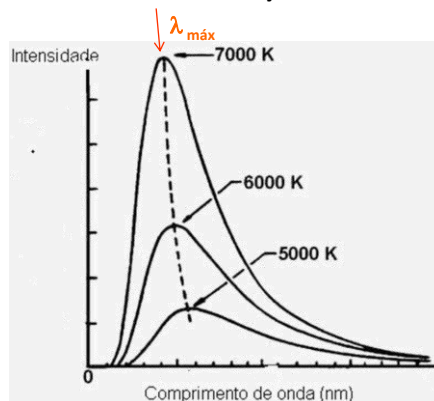


Wilhelm Wien  
(1896)

O comprimento de onda máximo de emissão é proporcional ao inverso da temperatura:  $\lambda \propto 1/T$

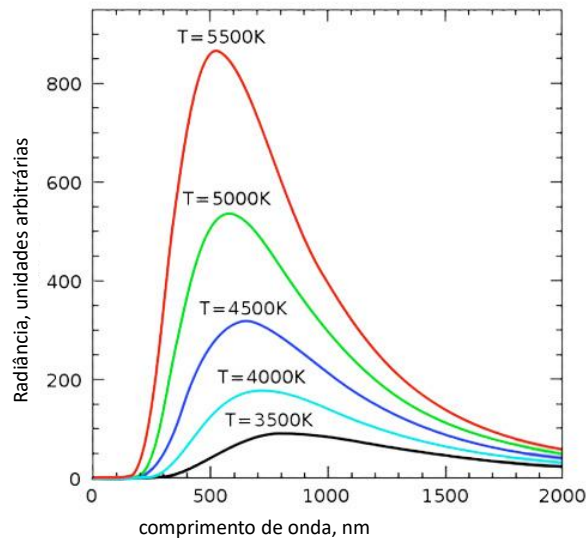
máximo da distribuição

aumentando-se a **temperatura T**, o máximo da distribuição  $\lambda_{\text{máx}}$  se desloca para comprimentos de onda menores



De acordo com a lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



## Lei de Wien

lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

blackbody  
spectrum displacement law:  
peak wavelength varies as  $1/T$

theoretical

Wilhelm **Wien**



1893

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

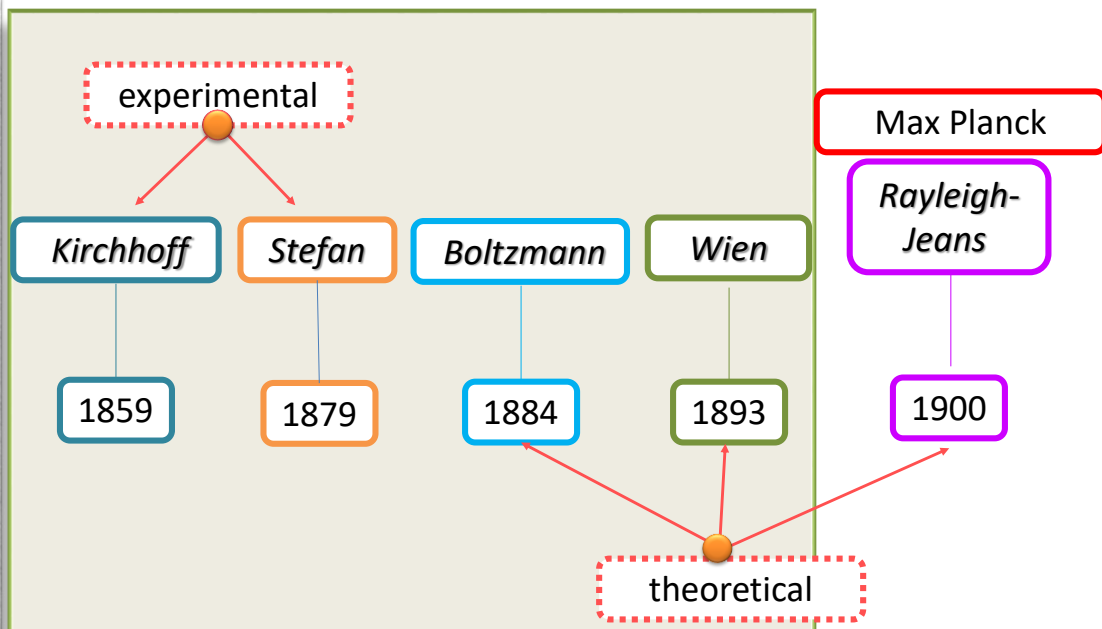
## Teoria de Wien

Apesar de o fenômeno da radiação de cavidade ser bem conhecido ao final do século XIX, sua explicação teórica foi uma das “pedras no caminho” das teorias da Física Clássica.

Vários físicos de renome debruçaram-se sobre o problema, mas as soluções que deduziam eram sempre limitadas.

Ou a curva teórica se ajustava à experimental na região dos pequenos comprimentos de onda, mas errava nos grandes, ou vice-versa.

<http://www.galeradafisica.com.br/fe/20/fmc.pdf>



an ideal black body (also blackbody) at thermal equilibrium will emit radiation in all frequency ranges, emitting more energy as the frequency increases

theoretical

John William Strutt, 3rd Baron **Rayleigh**  
Sir James Hopwood **Jeans**

1900

## Radiância Espectral

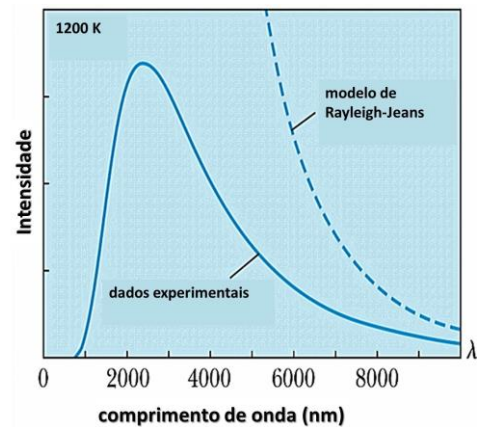
### Modelo de Rayleigh-Jeans



*John William Strutt,  
3rd Baron Rayleigh*

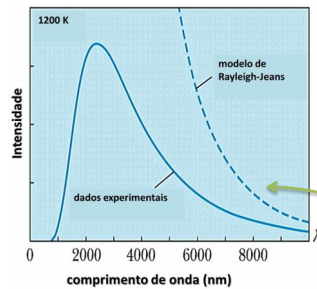


*James Hopwood Jeans*



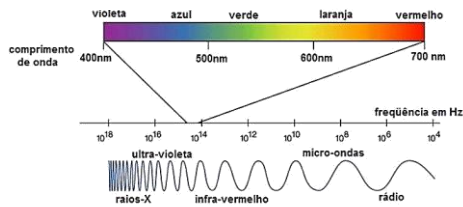
## Modelos Teóricos para explicar experimentos

### Lei de Rayleigh-Jeans



- física clássica
- uma derivação mais completa, que incluía uma constante de proporcionalidade
- predizia uma produção de energia que tendia ao infinito já que o  $\lambda$  se fazia cada vez menor

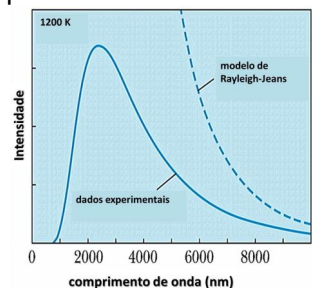
Esta ideia não se sustentava pelos experimentos e o fato ficou conhecido como a "catástrofe ultravioleta"



## Modelos Teóricos para explicar experimentos

### a "catástrofe do ultravioleta"

A **catástrofe do ultravioleta**, também chamada **catástrofe de Rayleigh-Jeans**, é uma falha da teoria clássica do eletromagnetismo para explicar a emissão eletromagnética de um corpo em equilíbrio térmico com o ambiente, ou um **corpo negro**.



Foi uma previsão da física clássica do final do século 19 e começo do século 20, que um *corpo negro* ideal no equilíbrio térmico emite radiação com energia infinita.



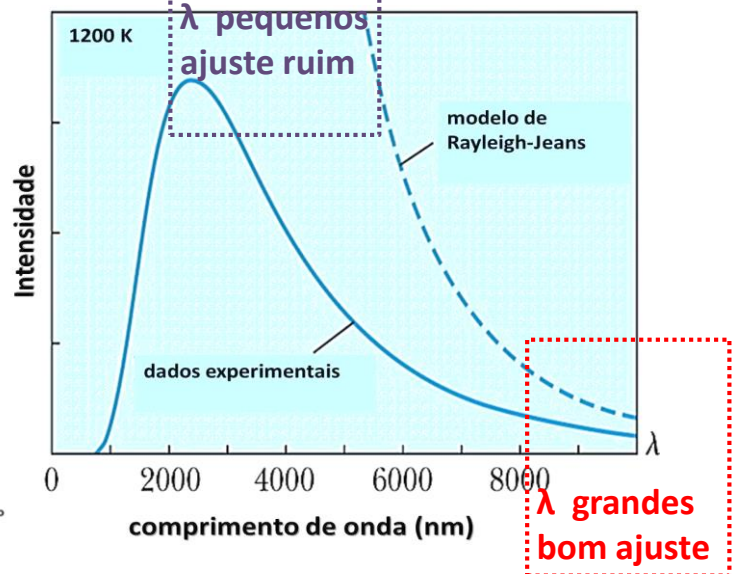
## Radiância espectral

### Modelo de Rayleigh-Jeans

discordância muito grande entre esta teoria e a experiência.

$$I = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

Esta discordância é chamada de **catástrofe do ultravioleta**.

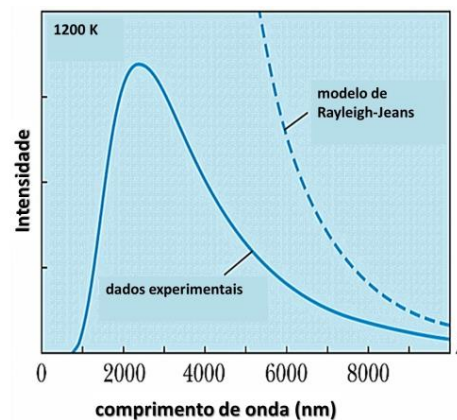


## Radiância espectral

### Modelo de Rayleigh-Jeans

Lord Rayleigh usou as teorias clássicas do eletromagnetismo e da termodinâmica para mostrar que a distribuição espectral de um corpo negro deveria ser:

$$I = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

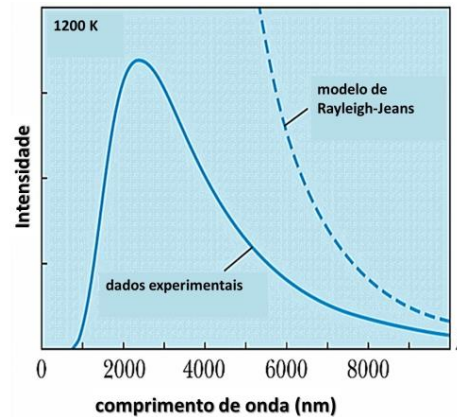


## Radiância espectral

### Modelo de Rayleigh-Jeans

Para comprimentos de ondas grandes esta equação se ajusta aos resultados experimentais, mas para os comprimentos de onda curtos há uma discordância muito grande entre esta teoria e a experiência.

Esta discordância é chamada de **catástrofe do ultravioleta**.

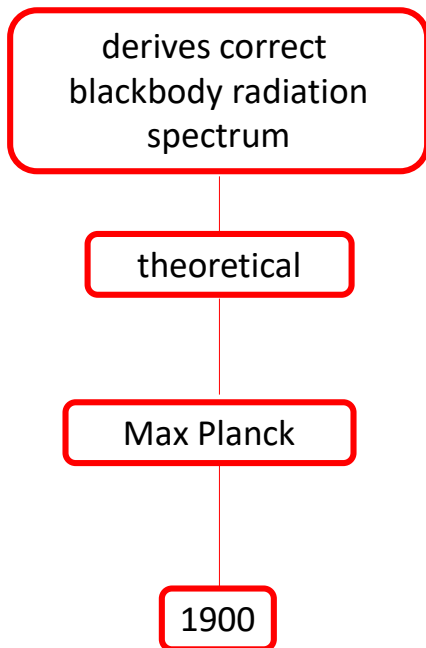
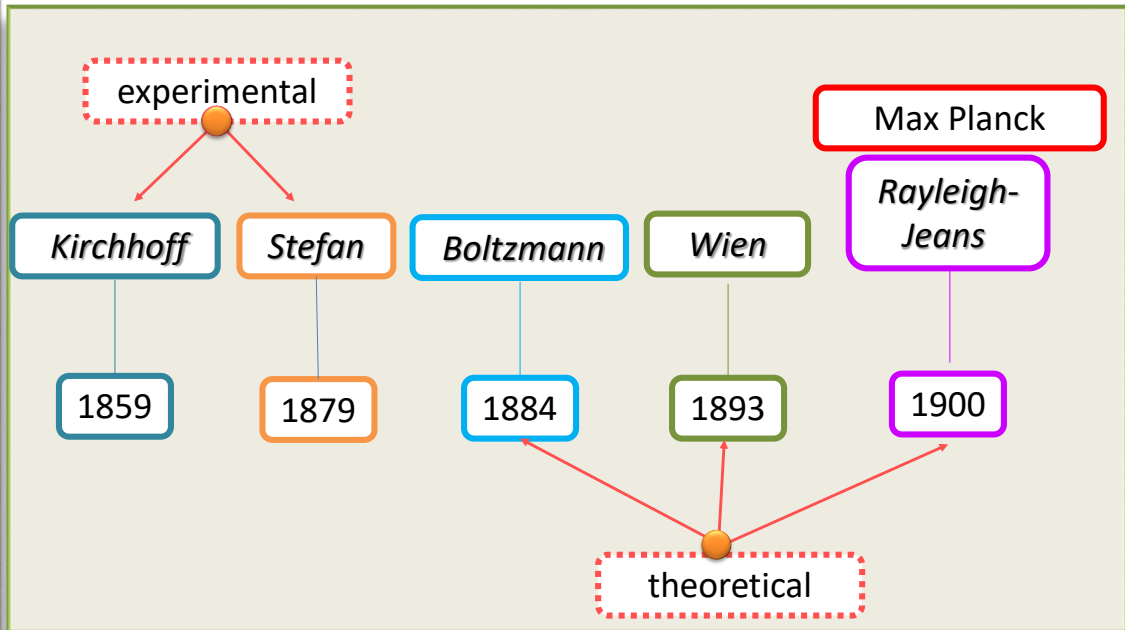


### Teoria de Rayleigh-Jeans (clássica)

A equação proposta para a dependência da radiância espectral com o comprimento de onda e a temperatura:

$$\mathcal{R} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T}} \cong \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

constantes  $c_1$  e  $c_2$

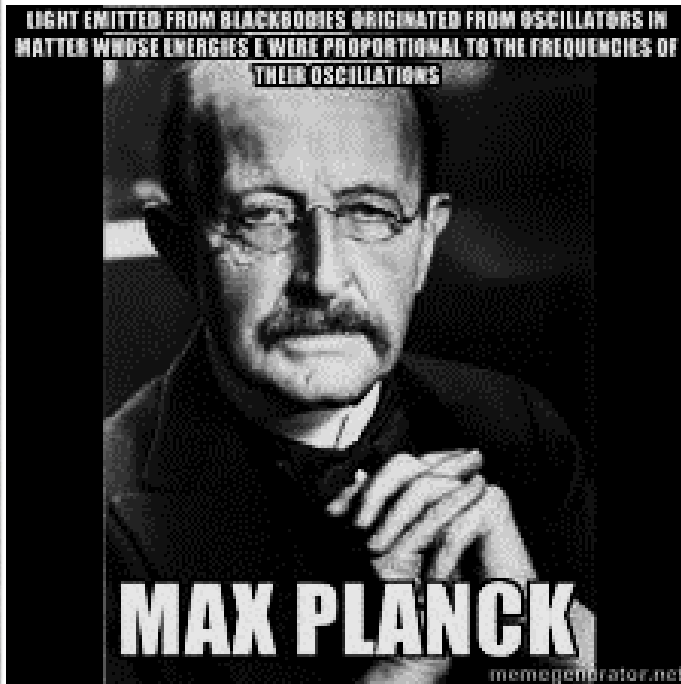


ufes  
Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Caracelli

55



## A teoria de Planck

Max Planck  
(1858-1947)

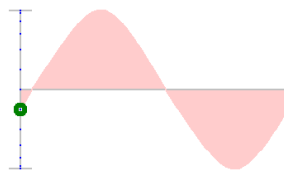
Em dezembro de 1900, Planck apresentou à Sociedade Alemã de Física um estudo teórico sobre a emissão de radiação de um corpo negro, no qual deduz uma equação plenamente em acordo com os resultados experimentais.

ufes  
Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Caracelli

56

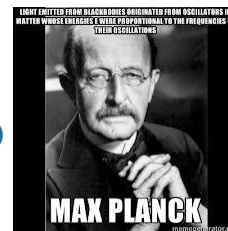


### Radiação térmica:

Produzida pelos elétrons oscilantes na superfície do material

Para conseguir um **modelo**:  
teve que considerar a existência, na superfície do corpo negro, de cargas elétricas oscilantes emitindo energia radiante não de modo contínuo, como sugere a teoria clássica, mas sim em porções descontínuas, “partículas” que transportam, cada qual, uma quantidade de energia bem definida.

Max Planck  
(1858-1947)

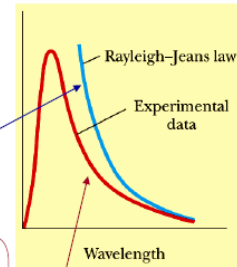


## A teoria de Planck

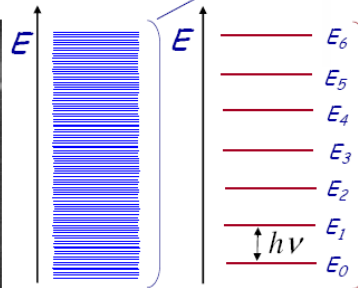
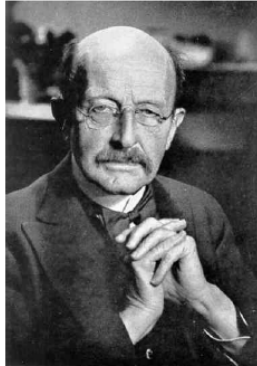
## Radiação de corpo negro

Problema com a descrição clássica :

- para os  $\lambda$  grandes, a teoria clássica está de acordo com os resultados experimentais
- mas quando  $\lambda \rightarrow 0$ , a intensidade da radiação  $\rightarrow \infty$  (catástrofe do ultra-violeta)



1900, Max Planck



Descrição Clássica  
Espectro contínuo  
Depende da amplitude

Descrição Quântica  
Espectro discreto  
Depende da frequência

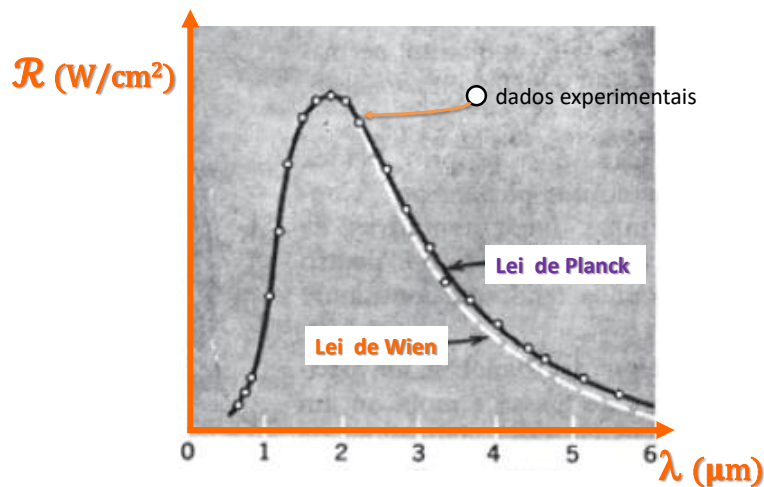
## Radiação de corpo negro

Lei da Radiação de Planck

$$I = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

Modelo de Rayleigh-Jeans (clássico)

$$I = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T}}$$



<http://www.galeradafisica.com.br/fe/20/fmc.pdf>

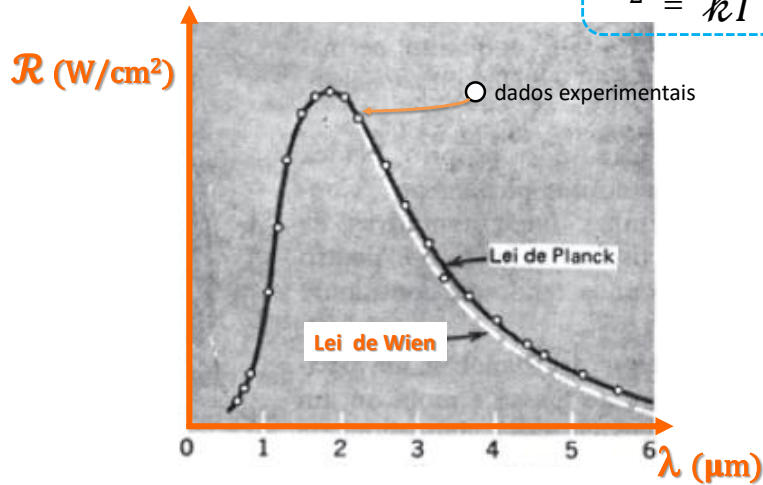
## Radiação de corpo negro

### Lei da Radiação de Planck

$$I = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

$$C_1 = 8\pi hc$$

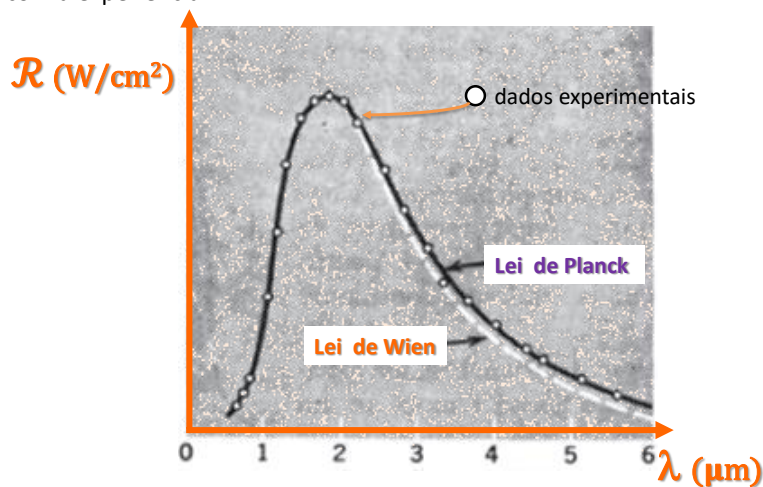
$$C_2 = \frac{hc}{kT}$$



<http://www.galeradafisica.com.br/fe/20/fmc.pdf>

## Radiação de corpo negro

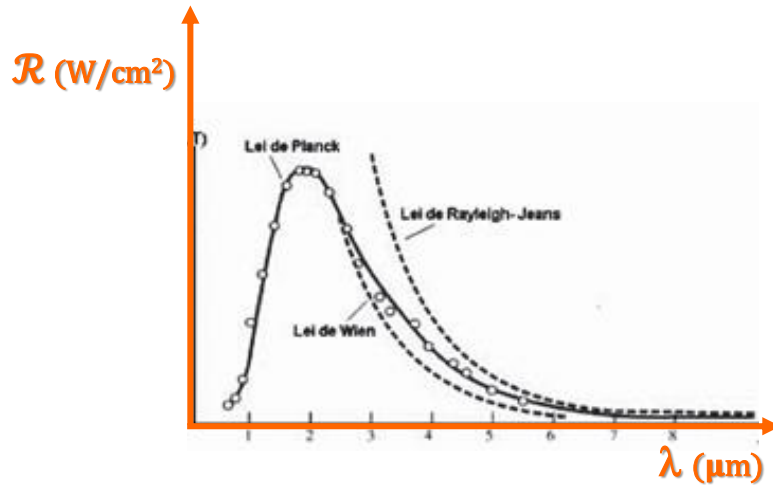
Os círculos indicam os dados experimentais da Radiação espectral  $\mathcal{R}$  obtidos por Coblenz para a radiação de cavidade. Aparecem também os resultados das equações teóricas de *Rayleigh-Jeans* e *Planck*, fornecendo esta última uma excelente concordância com a experiência.



<http://www.galeradafisica.com.br/fe/20/fmc.pdf>

## Radiação de corpo negro

Enquanto que a solução de Wien se ajustava bem aos pequenos comprimentos de onda, Raleigh e Jeans chegaram a uma solução que se ajustava aos grandes comprimentos de onda.



<http://www.galeradafisica.com.br/fe/20/fmc.pdf>



Max Planck  
(1900)

## O modelo de Planck

$$C_1 = 8\pi hc$$

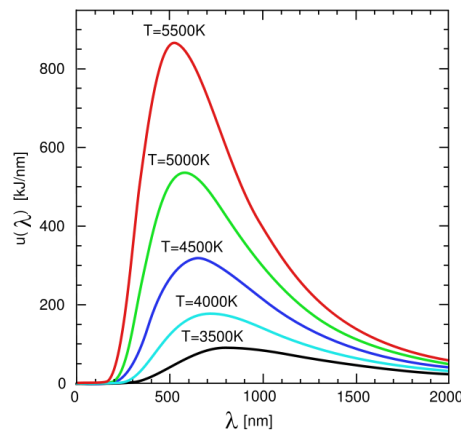
$$C_2 = \frac{hc}{kT}$$

Constante de Planck  $h$

$$h \cong 6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$$

Equação de Planck:

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



Classical

$$\text{Rayleigh-Jeans Law}$$

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

$$\text{Planck Law}$$


$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Quantum

Frequência  $\nu$ Constante de Planck  $h \cong 6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$ 


## Planck e sua constante

Physics



### The Nobel Prize in Physics 1918

"in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta"



**Max Karl Ernst Ludwig Planck**  
Germany  
Berlin University  
Berlin, Germany  
b. 1858  
d. 1947

$$E = hf$$

(energia do fóton)

**Constante de Planck**

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

$$h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$$

[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1918/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/index.html)



## Radiação de corpo negro

### Teoria de Planck

#### Planck fez duas modificações na teoria clássica:

1. Os osciladores (de origem electromagnética) podem ter apenas certas energias discretas:

$$E_n = nhf$$

onde  $n$  é um número inteiro,  $f$  é a frequência, e  $h$  é chamada de constante de Planck:

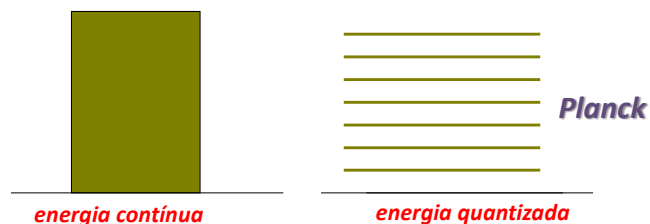
Constante de Planck  $h \cong 6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$

### A quantização de Planck

Planck fez a hipótese de que a **energia armazenada**, em cada modo de oscilação eletromagnética (de frequência  $f$ ), era **discreta** e da forma:

$$E_n = nhf \quad n = 0, 1, 2...$$

Isso indicava que o movimento dos elétrons oscilantes nas paredes da cavidade deveria apresentar apenas valores discretos (**quantizados**), não contínuos, como se acreditava.



## Radiação de corpo negro

### Teoria de Planck

Planck fez duas modificações na teoria clássica:

- Os osciladores podem absorver ou emitir energia em múltiplos discretos de um quantum fundamental de energia dada por:

$$\Delta E = h f$$

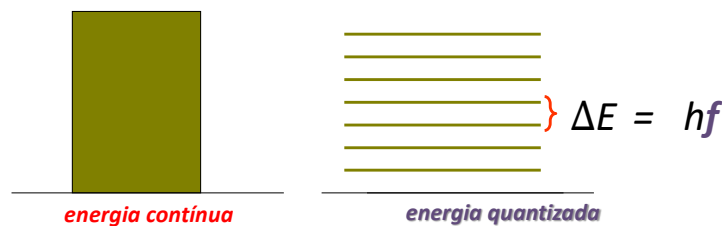
## Radiação de corpo negro

### Teoria de Planck

Planck fez duas modificações na teoria clássica:

- Os osciladores podem absorver ou emitir energia em múltiplos discretos de um quantum fundamental de energia dada por:

$$\Delta E = h f$$



## Planck e a radiação do corpo negro

Planck acreditava que a sua hipótese era apenas um **artifício matemático**, e que o fenômeno de radiação do corpo negro ainda viria a ser explicado de uma outra forma.

Ele mesmo tentou obter uma outra explicação, por muitos anos.

Foi em 1905 que Einstein, para explicar o efeito fotoelétrico, avança um pouco mais no sentido de propor um comportamento “quantificado” para a luz, também em sua propagação

## Uma nova física: a física quântica

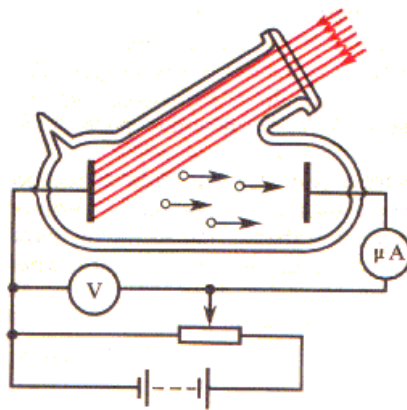
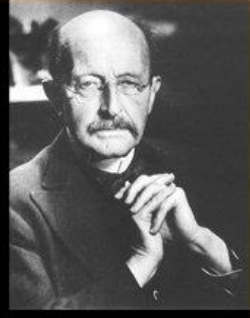
A solução de Planck para a questão do corpo negro, considerando que a energia é quantizada, permitiu explicar outros conceitos físicos em nível microscópico.



Embora o desenvolvimento efetivo da nova teoria só tenha ocorrido a partir de 1920, dezembro de 1900 é considerado o marco divisório entre a Física Clássica e a Física Quântica - a teoria física dos fenômenos microscópicos.

Things exist only if  
they can be  
measured

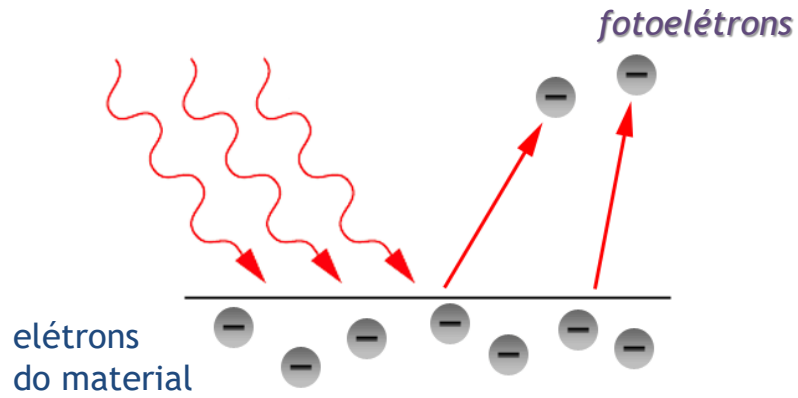
~ Max Planck ~



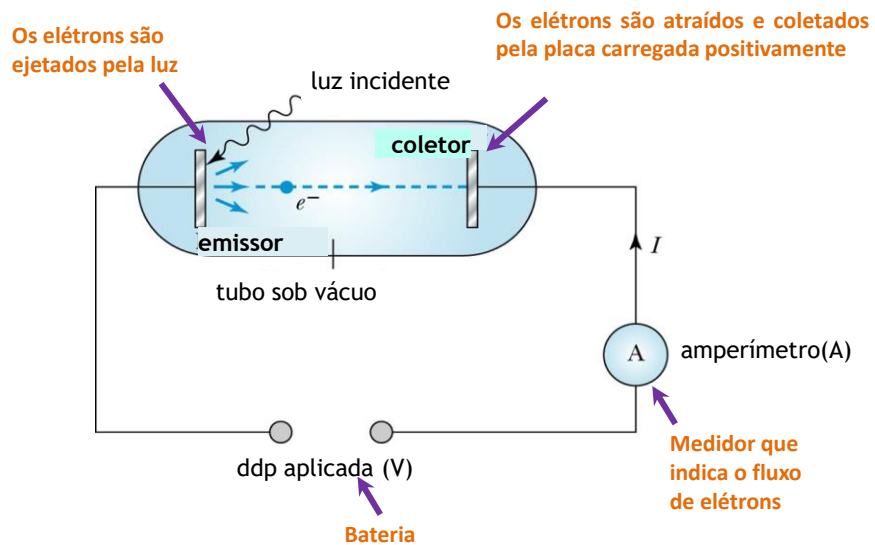
Efeito Fotoelétrico

## Efeito fotoelétrico

A luz arranca elétrons de diversas superfícies metálicas.



## Experimento do Efeito Fotoelétrico



## O efeito fotoelétrico e a física clássica

As ondas eletromagnéticas de luz transferem energia aos elétrons do metal e são capazes de arrancá-los do mesmo:

1. Quanto mais intensa a luz, mais energia terão os elétrons
2. Se a luz é muito tênue, haverá que esperar um certo tempo até que os elétrons ganhem energia suficiente e sejam arrancados
3. Qualquer luz (comprimento de onda) é válida para arrancar elétrons

## O efeito fotoelétrico e a física clássica (Contradições)

As ondas eletromagnéticas de luz transferem energia aos elétrons do metal e são capazes de arrancá-los do mesmo. Os experimentos parecem contradizer a **teoria clássica**:

### teoria clássica

1. Quanto mais intensa a luz, mais energia terão os elétrons
2. Se a luz é muito tênue, haverá que esperar um certo tempo até que os elétrons ganhem energia suficiente e sejam arrancados
3. Qualquer luz (comprimento de onda) é válida para arrancar elétrons

### experimentos

1. A energia cinética dos elétrons **NÃO** depende da intensidade da luz
2. Os elétrons são produzidos **IMEDIATAMENTE** (no há atraso), mesmo que uma luz fraca produza apenas uns poucos.
3. Se a luz tem uma frequência abaixo de um limiar, **NÃO** há corrente

## Observações sobre o efeito fotoelétrico

A **energia cinética K** dos fotoelétrons:

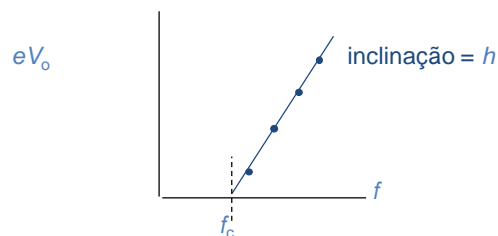
- é **independente da intensidade da luz**
- para qualquer material, depende somente da **frequência  $f$  da luz**

Classicamente, a **energia cinética K** dos fotoelétrons deveria aumentar com a intensidade da luz e não depender da frequência

## Observações sobre o efeito fotoelétrico

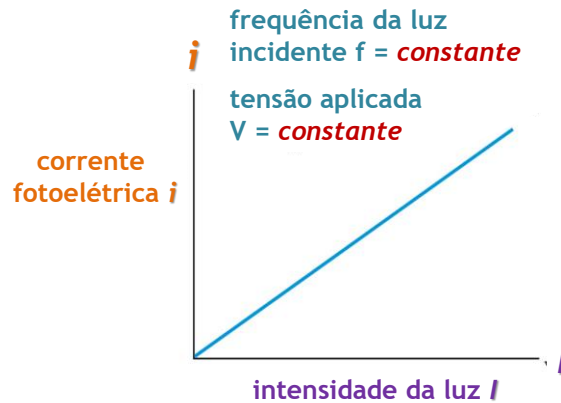
Existe uma **frequência de corte  $f_0$**  para a luz abaixo da qual nenhum fotoelétron é ejetado (relacionada à **função trabalho  $\phi$**  do material emissor)

A existência de uma frequência de corte é completamente inexplicável pela teoria clássica



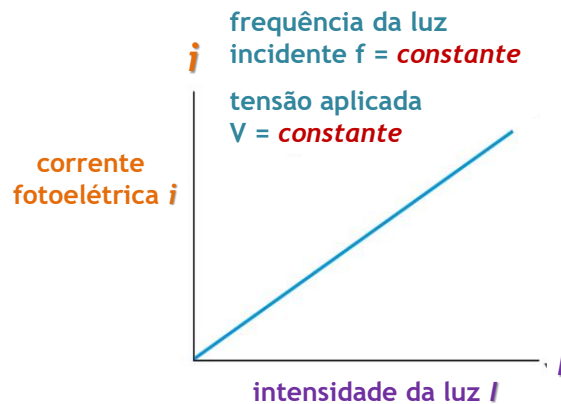
## Mais observações sobre o efeito fotoelétrico

- Quando fotoelétrons são produzidos, seu **número** é proporcional à **intensidade da luz  $I$**



## Mais observações sobre o efeito fotoelétrico

Os fotoelétrons são emitidos **quase instantaneamente** assim que o fotocátodo é iluminado, independente da intensidade da luz





## Mais observações sobre o efeito fotoelétrico

A **teoria clássica** prediz que, para intensidades extremamente baixas da luz, um longo período de tempo deveria se passar antes que qualquer elétron pudesse obter energia suficiente para escapar do foto cátodo.

Entretanto, **foi observado**, que os fotoelétrons eram ejetados quase que **imediatamente**



## A solução de Einstein

- Albert Einstein propõe uma solução baseada em uma teoria corpuscular para a luz.
- A luz está composta de “quanta” ou pacotes, e somente pode ser absorvida ou emitida nestes pacotes e não de forma “contínua”.
- Cada pacote tem uma energia dada pela equação de Planck:

$$E = hf$$



## A solução de Einstein

### Pela conservação de energia

Energia antes (fóton) = Energia depois (elétron)

$$E = hf$$

$$hf = \phi + \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

ou

$$hf = \phi + K_{max}$$

onde  $\phi$  é a **função trabalho** do metal (energia potencial a ser superada antes do elétron poder escapar)

## A solução de Einstein

$$hf = \phi + K_{max}$$

Aplica-se uma **diferença de potencial**  $V$  para que cesse a corrente - é o **potencial de corte** (potencial frenador)

$$V = -V_0$$

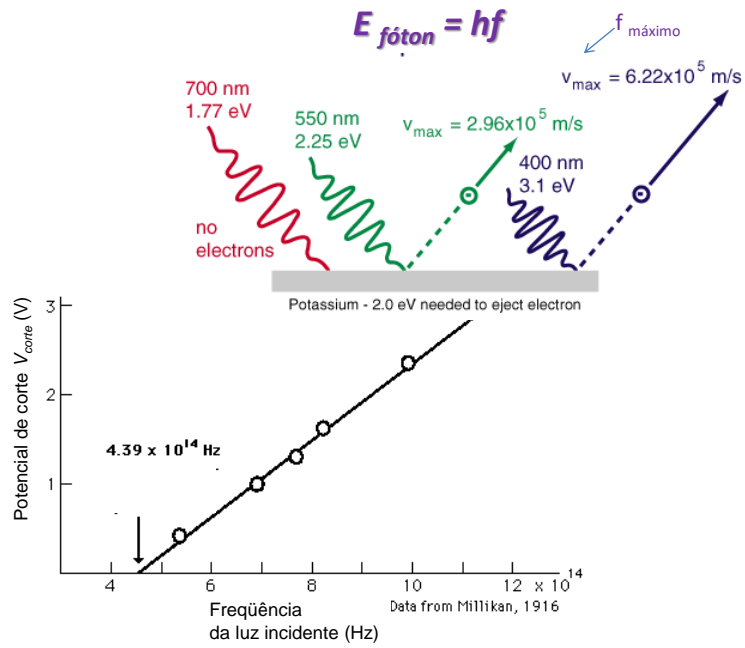
Então, trabalho realizado pelo campo elétrico entre as placas

$$W = eV_0$$

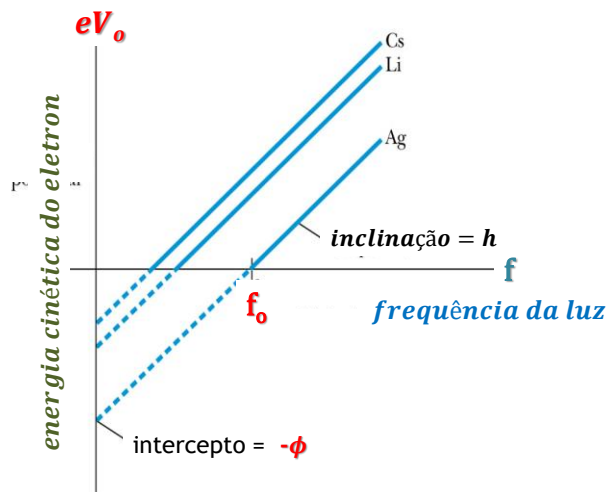
Pelo teorema trabalho-energia:

$$W = \Delta K \quad \Rightarrow \quad K_{max} = eV_0$$

### O efeito fotoelétrico

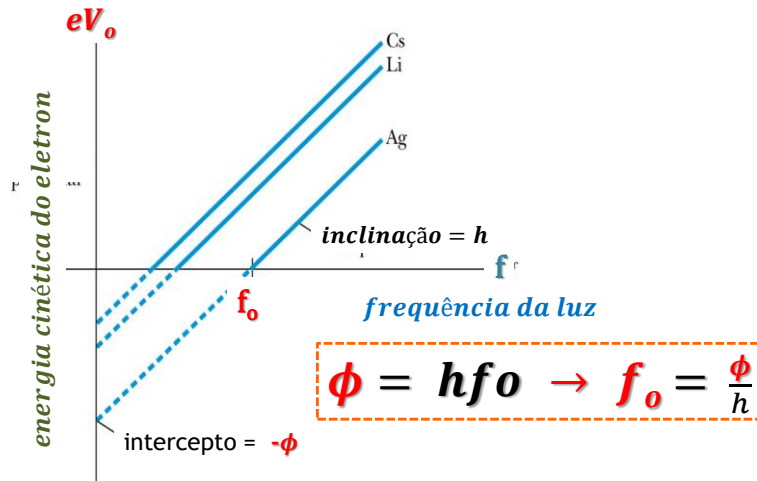


### O efeito fotoelétrico

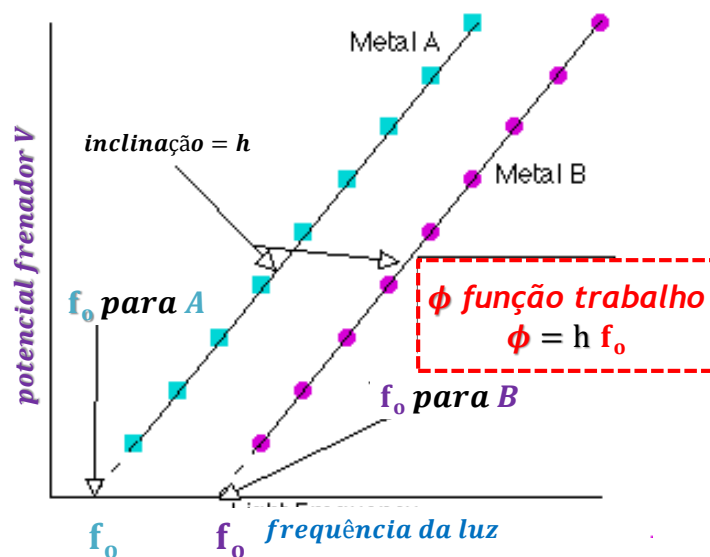


## Frequência mínima ou frequência de corte

Existe uma frequência mínima ( $f_0$ ) chamada **frequência de corte** para a qual o elétron escapará se a energia que ele receber do fóton ( $hf_0$ ) for igual à energia mínima



## 0 efeito fotoelétrico: frequência de corte



## 0 efeito fotoelétrico: a função trabalho

$$\phi \text{ função trabalho}$$

$$\phi = h f_0$$

**Função trabalho** é o nome que se dá à energia mínima necessária para que um elétron escape do metal. Seu valor varia de metal para metal.

Metal	Função trabalho (eV)
Sódio	2,28
Alumínio	4,08
Zinco	4,31
Ferro	4,50
Prata	4,73

## A equação do efeito fotoelétrico

$$hf = K_{\max} + \phi$$

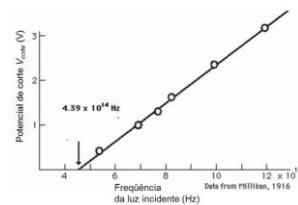
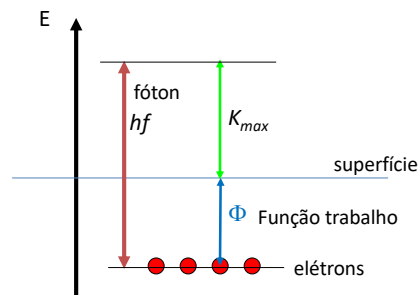
Função trabalho

Substituindo  $K_{\max} = eV$

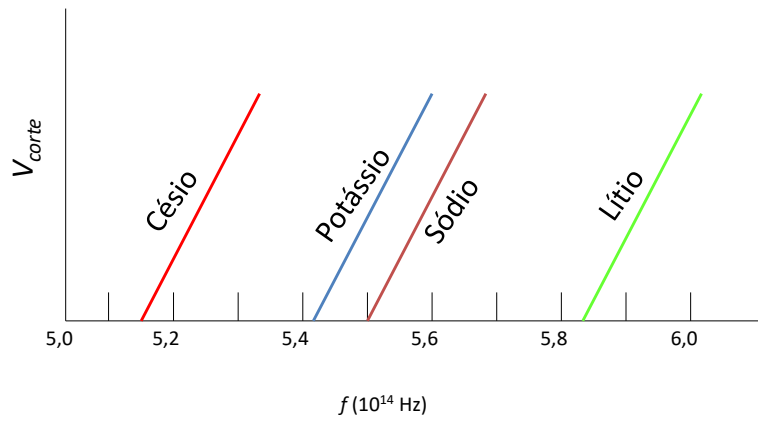
$$hf = eV + \phi$$

$$eV = hf - \phi$$

$$V = \frac{h}{e} f - \frac{\phi}{e} \rightarrow \text{reta}$$

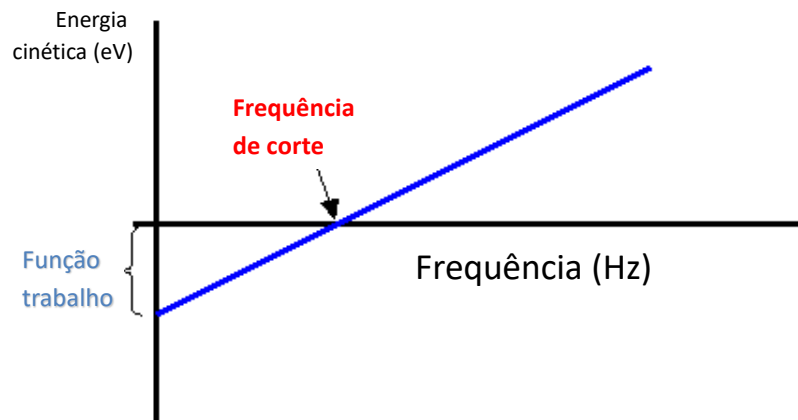


## Potencial de Corte



Ignez  
Caracelli

91



Ignez  
Caracelli

92

## Os fótons possuem momento

1916 Einstein:

fóton possui momento linear  $\vec{p}$

**fóton**

**não** tem massa

$$E = hf$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

(momento do fóton)

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

$$E = hf$$

## Os fótons possuem momento

1916 Einstein:

fóton possui momento linear  $\vec{p}$

**partícula**

tem massa  $m$

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

$$K = \frac{1}{2m} p^2$$

$$p = \sqrt{2mK}$$

**fóton**

**não** tem massa

$$E = hf$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

(momento do fóton)

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

## Os fótons possuem momento

**1916 Einstein:**

fóton possui momento linear  $\vec{p}$

(momento do fóton)

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

fóton

não tem massa

Quando um fóton interage com a matéria há transferência de **energia** e de **momento**

$$E = hf$$

## Os fótons possuem momento

fóton

$$E = hf$$

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

não tem massa

Os postulados de Einstein sobre os quanta de luz e suas interações com a matéria:

1. A luz de frequência  $f$  consiste de quanta discretos, cada qual com energia  $E = hf$ .

Cada fóton viaja à velocidade da luz,  $c$ .



## Os fótons possuem momento

fóton  $E = hf$   $p = \frac{h}{\lambda}$  não tem massa

Os postulados de Einstein sobre os quanta de luz e suas interações com a matéria:

2. Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente.

Uma substância pode **emitir** 1, 2 ou 3 quanta, mas não 1,5 quantum.

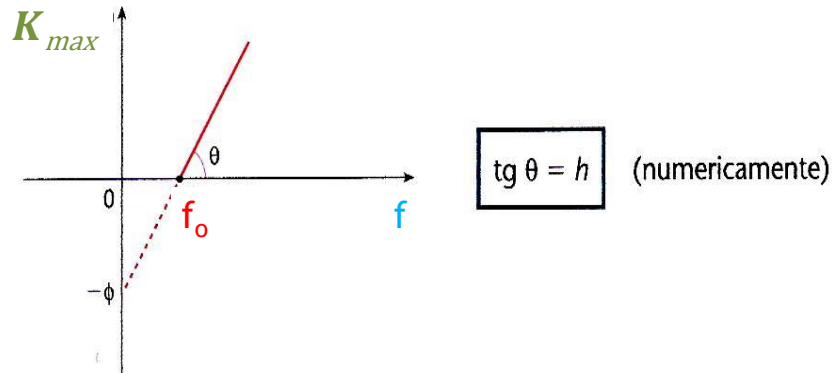
Analogamente, um elétron de um metal não pode **absorver** meio quantum, e sim, apenas **um número inteiro** deles.

## Os fótons possuem momento

fóton  $E = hf$   $p = \frac{h}{\lambda}$  não tem massa

Os postulados de Einstein sobre os quanta de luz e suas interações com a matéria:

3. Um quantum de luz, quando absorvido pelo metal, transfere a totalidade de sua energia a um **único elétron**.

Energia cinética máxima  $\times f$ Gráfico  $K_{max}$  em função de  $f$ 

## A solução de Einstein (II)

A hipótese de Einstein explica o experimento?

1. A energia dos elétrons **NÃO** depende da intensidade da luz.

$$E = hf = \phi + K$$

energia do fóton incidente  $\rightarrow$   $hf$   $\leftarrow$  energia cinética do fotoelétron  
 $\phi$   $\leftarrow$  trabalho para remover o elétron do metal

2. Não há atraso na produção de elétrons
3. Não há corrente abaixo de uma frequência limiar