

# **Universidade de São Paulo**

## **Instituto de Física**

**Física Aplicada**  
**Aula 07**

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**

**Edifício Oscar Sala – sala 220**

**[rizzutto@if.usp.br](mailto:rizzutto@if.usp.br)**

**<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=24279>**

**2º Semestre de 2016**

# Programa

- O Espectro Eletromagnético
  - Dimensões dos objetos
  - Produção de energia
  - Revisão sobre ondas Mecânicas;
- Princípios de acústica - Efeito Doppler;
  - Imagens por Ultrassom
  - Levitação mecânica
- Revisão das Equações de Maxwell - Equação da onda eletromagnética
  - Ondas de rádio; TRC, LCD, LED
  - Estrutura atômica – Revisão de física moderna;
    - Estrutura atômica
    - Aplicações: Celular Solar, Lasers
  - Descrição dos princípios de geração dos Raios-X:
    - Tubos de raios-X e radiação Síncrotron
    - Aceleradores de partículas
  - Propriedades dos Raios-X – Absorção e interação com a matéria
- Imagens médicas obtidas com Raios-X – Radiografia e tomografia.
  - Uso de técnicas atômico-nucleares para análise de materiais
    - Ressonância magnética nuclear

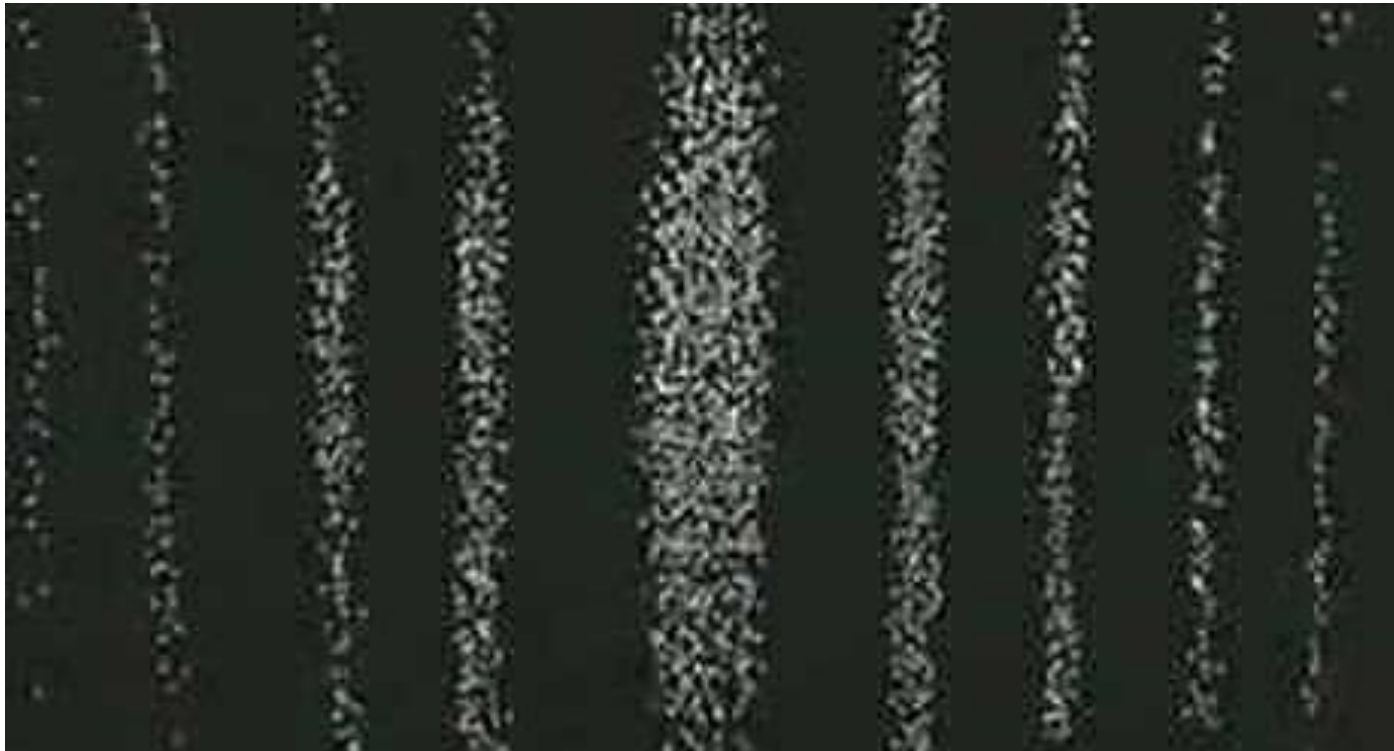
Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
agosto						
	Aula 1		Aula 2			
	Aula 3		Aula 4			
	Aula 5		Aula 6			
	Aula 7		Aula 8			
setembro						
	SEMANA DA	DA	PÁTRIA			
	AULA 9		não AULA			
	não AULA		não AULA			
	Aula 10		Aula 11/AP1			
outubro						
	Aula 12/AP2		Aula 13/AP3			
SEMANA Física	Aula 14		Período			
	Aula 15/AP4		Aula 16/AP5			
	Aula 17/AP6		Aula 18 /AP7			
	Aula 19/AP8					
novembro			Período			
	Aula 20		Aula 21			
	RECESSO	Período	não AULA			
	Aula 22		Aula 23			
	Aula 24		Aula 25			
dezembro						
	PROVA					

# Calendário

# Estrutura atômica – Revisão de física moderna

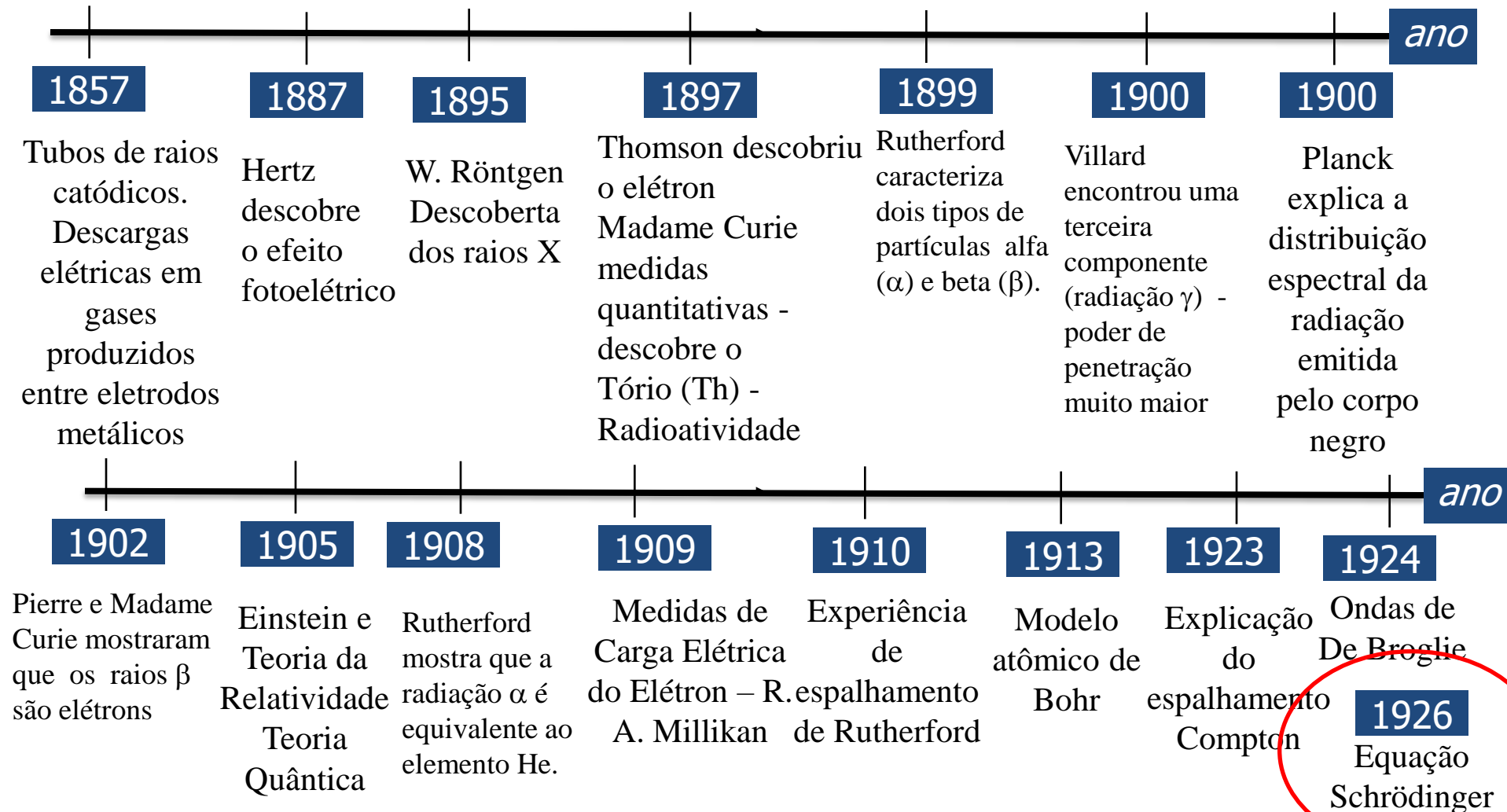
---

## A Natureza Ondulatória da Matéria



# Física Clássica x Moderna

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



# Física Moderna

1857

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

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

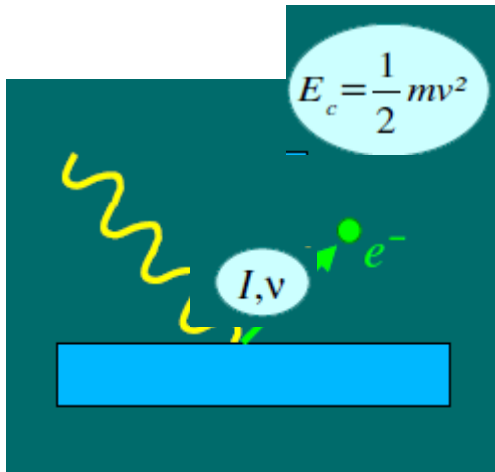
Tubos de raios  
catódicos



Descargas elétricas em  
gases produzidos entre  
eletrodos metálicos

1887

## Efeito Foto-elétrico



- Quando a radiação eletromagnética incide sobre um material há emissão de elétrons



- Este é o chamado efeito foto-elétrico



- Este efeito foto-elétrico contradiz as previsões da teoria ondulatória (puramente) da radiação eletromagnética (clássica)

1887

## Contradições da física ondulatória clássica:

<i>Previsões:</i>	<i>Observações experim.:</i>
1) A energia cinética dos elétrons ( $E_c$ ) deveria aumentar com a intensidade ( $I$ ) da onda E-M.	✗ $\Rightarrow$ 1) $E_c$ não varia com $I$ .
2) Deveria “demorar” para haver emissão de elétrons, dependendo de $I$ .	✗ $\Rightarrow$ 2) Não há atraso perceptível.
3) $E_c$ não deveria depender de forma descontínua da frequência ( $\nu$ ) da onda E-M.	✗ $\Rightarrow$ 3) Para frequências baixas ( $\nu < \nu_0$ ) não ocorre e.f.e.

✓ A energia do foto-elétron depende da frequência da radiação incidente  $\longrightarrow E_c \sim \nu$

✓ Existe uma frequência de corte para a radiação eletromagnética, abaixo desta  $(\nu < \nu_0)$  não ocorre efeito foto-elétrico  $\longrightarrow$  Frequência de corte depende do material da superfície emissora

Falta equacionar



# Física Moderna

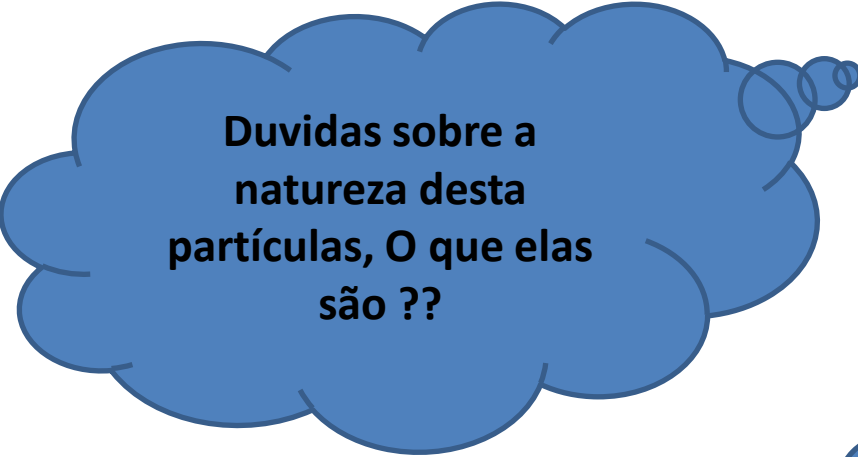
---

## Dúvidas:

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

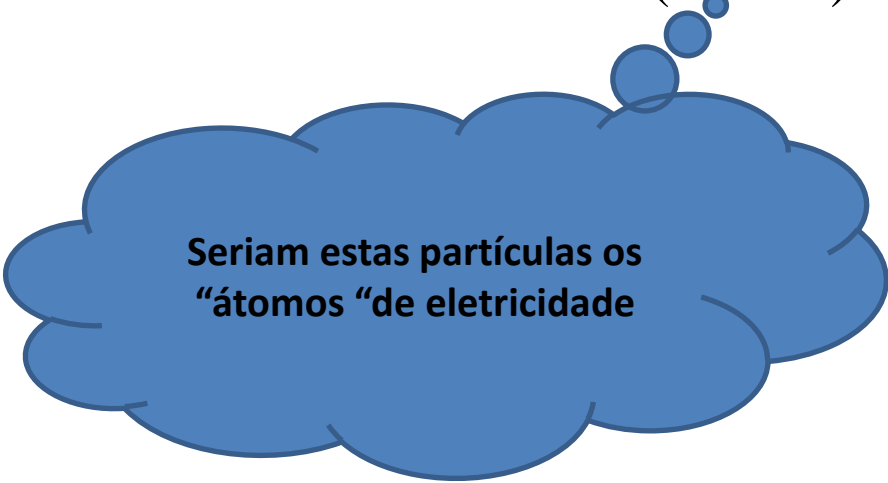
Os Ingleses concordavam com o caráter corpuscular.

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



**Duvidas sobre a natureza desta partícula, O que elas são ??**

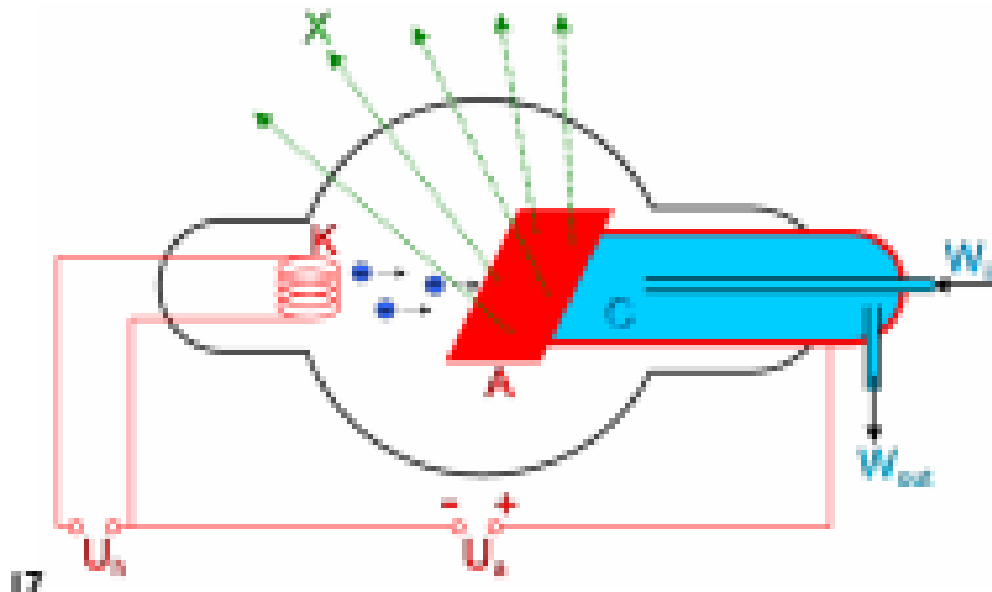
Não podiam ser átomos, os átomos eram neutros e eram constituintes da matéria (neutra)



**Seriam estas partículas os "átomos" de eletricidade**

1895

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

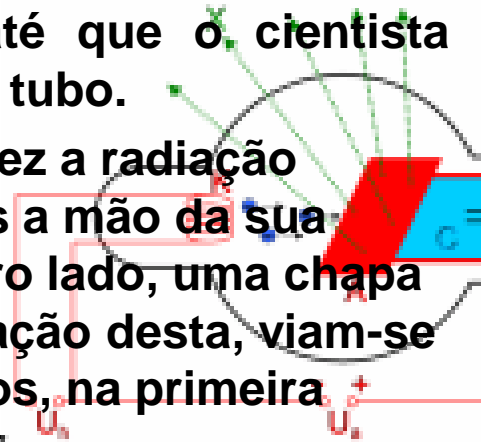


Tubo moderno de raios X

1895

## Raio X pelo físico W. Rontgen (1845-1923)

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



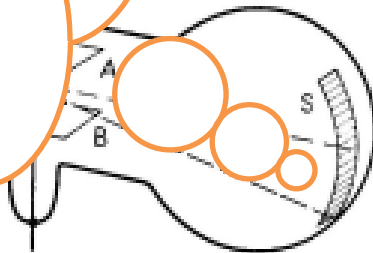
1897

## Descoberta do elétron



**J.J. Thomson** estava estudando descargas elétricas em tubo de raios catódicos (Laboratório Cavendish – Inglaterra), tentando entender as descargas que ocorrem dentro desses tubos e descobre o primeiro componente que faz parte do átomo: **o elétron**, uma partícula com carga elétrica negativa.

Este feixe luminoso não podia ser luz pois em 1869 o feixe luminoso (dos raios catódicos) quando aproximado a um campo magnético eram desviados enquanto que luz não sofria este efeito

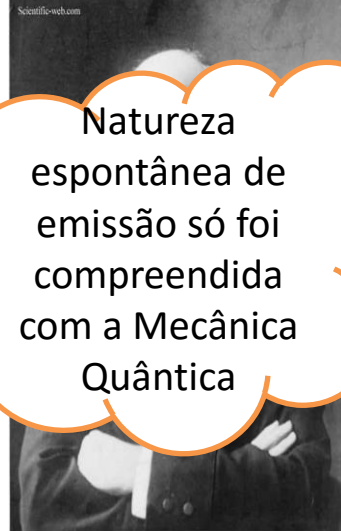


**Thomson** consegue medir a razão carga massa dessas partículas deste feixe luminoso. Este corpúsculo carregado identificado era exatamente o mesmo quaisquer que fossem os elementos do catodo, anodo e do gás dentro do tubo

## Descoberta da radioatividade

- Com a descoberta dos raios X por Röntgen, Becquerel que já estudava fosforescência e fluorescência dos materiais, começou a indagar sobre as relações de emissão de raios X e a fluorescência.
- Ponto de partida: estudo de alguns materiais que se tornavam fosforescentes sob incidência de luz -  
Pergunta: materiais eram capazes emitir qualquer tipo de radiação penetrante como os raios X
- Sal de urânio possui fosforescência induzida por luz UV. Surpresa: marcavam filmes fotográficos mesmo no escuro – material era capaz de sensibilizar o material mesmo sem ser exposto ao sol
- Questão aberta: qual a natureza dos raios X observados por Röntgen e estes observados por Becquerel ?? “Raios urânicos”

Becquerel



Natureza espontânea de emissão só foi compreendida com a Mecânica Quântica

## Descoberta da radioatividade

Madame Curie



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

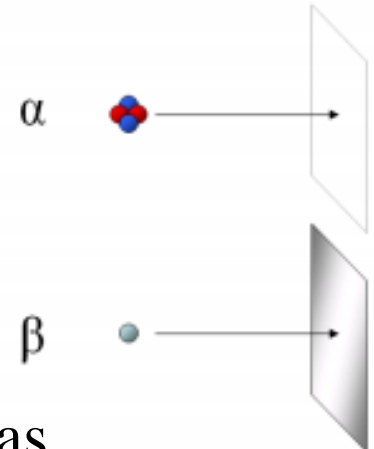
1899

## Tipos de radiação

- Rutherford(1899) caracteriza dois tipos: alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). Diferença entre elas: ionização e o poder de .....penetração.

$\alpha$ : altamente ionizante – blindadas por folha de papel.

$\beta$ : menos ionizantes – capazes de atravessar camadas finas (radiografia pode ser feita com raios  $\beta$ )

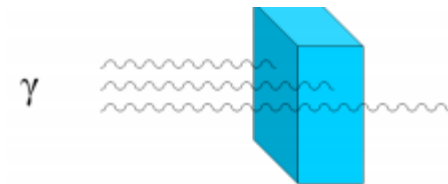


1900

1902

1908

- Villard encontrou uma terceira componente dessas radiações - poder de penetração muito maior
- Pierre e Madame Curie (1902) mostraram que os raios  $\beta$  são elétrons
- Rutherford (1908) mostra que a radiação  $\alpha$  é equivalente ao elemento He.



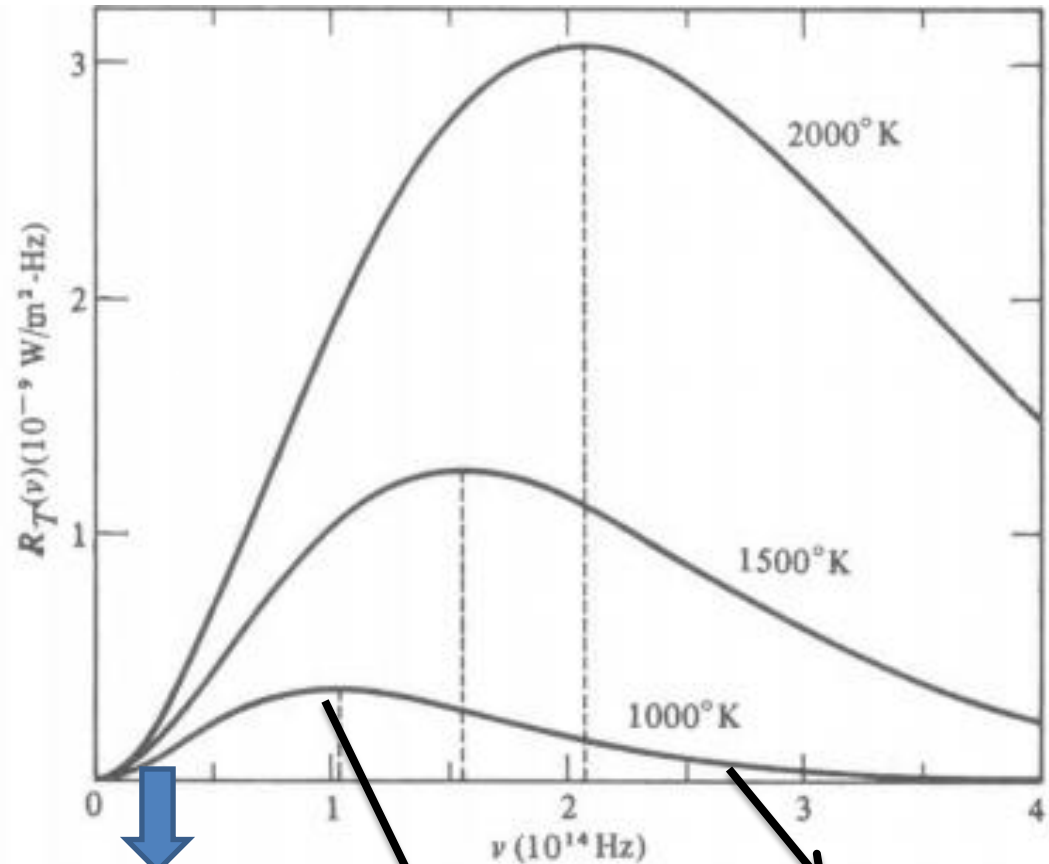


1900

## Radiância Espectral

- A Radiância espectral:  $R_T(\nu)$  de um corpo em função da frequência da radiação.

A frequência em que a radiância é máxima varia linearmente com a temperatura. Potência total emitida por metro quadrado (área sob a curva) aumenta rapidamente com a temperatura



Potência irradiada é nula

Potência irradiada cai

Potência irradiada é máxima em

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



1900

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



$$R_T = \sigma T^4$$

A intensidade da radiação emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura

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

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

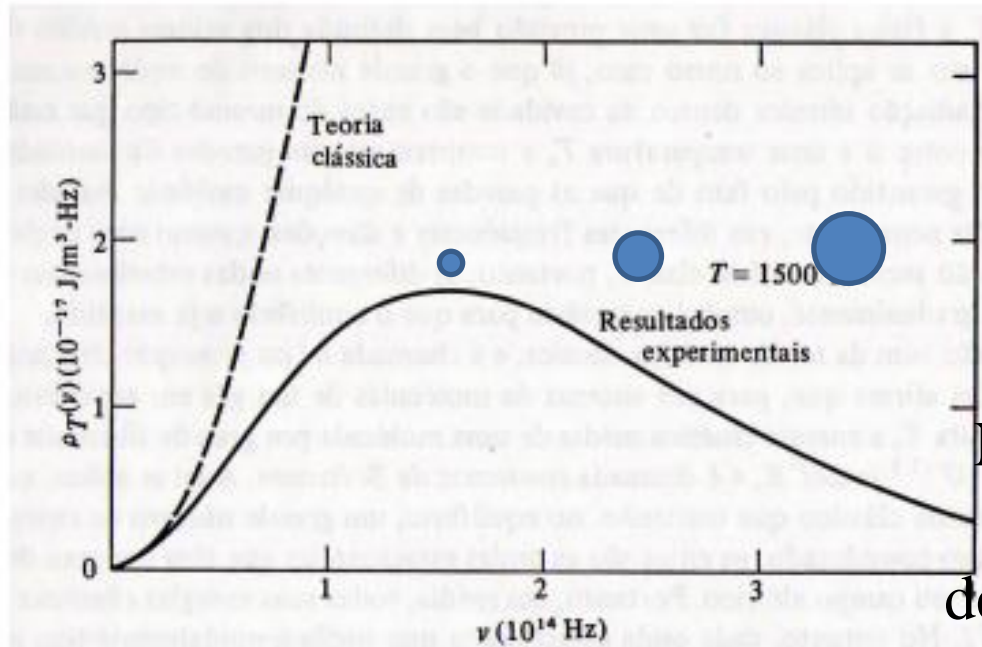


Resultado-Lei de deslocamento de Wien (1893)

$$\nu_{\max} \approx T$$

1900

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



Classicamente conseguimos explicar pequenos valores de  $\nu$

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

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

$$\lambda \rightarrow \infty, \rho(\lambda) \rightarrow 0$$


$$\lambda \rightarrow 0, \rho(\lambda) \rightarrow \infty$$

**catástrofe do ultravioleta**

1900

## Teoria de Planck da radiação da cavidade

- Discrepância entre teoria e dados experimentais, como solucionar???
- Baixas frequências o modelo é satisfatório


$$\bar{\varepsilon}_{\nu \rightarrow 0} \rightarrow kT$$

Energia total media tende a  $kT$  para baixas frequências ou altos comprimentos de onda

- Porém para altas frequências ou pequenos comprimentos de onda o modelo falha, gostaríamos de ter

$$\bar{\varepsilon}_{\nu \rightarrow \infty} \rightarrow 0$$

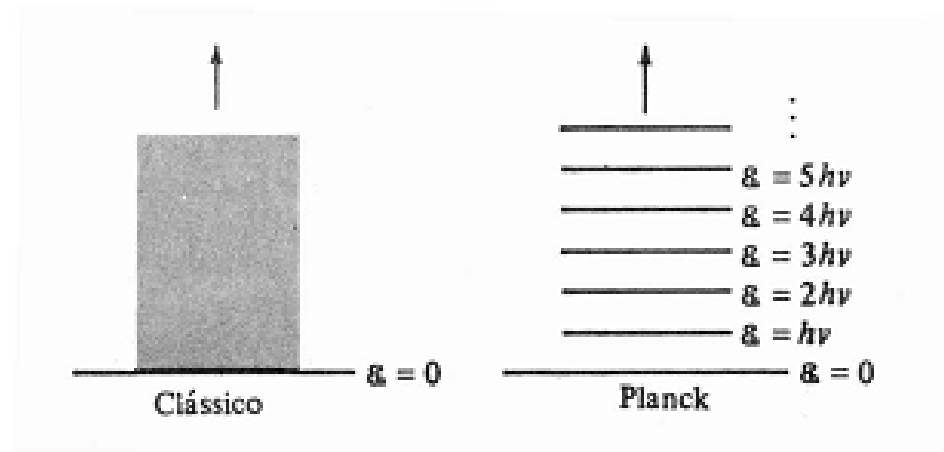
• **Nova proposta:** tratar a energia como uma variável discreta e não mais contínua (sempre considerado na física clássica). A parede aquecida do corpo negro (cavidade), possui ressoadores vibrando com várias frequências diferentes cada um emitindo luz com mesma frequência que a frequência de vibração

$$\varepsilon_0 = 0, \varepsilon_1 = \Delta\varepsilon, \varepsilon_2 = 2.\Delta\varepsilon, \dots$$

## Implicações do resultado de Planck

- Qual o significado físico da hipótese de Planck?
- Ela impõem que os pequenos osciladores que constituem as paredes da cavidade e estão em equilíbrio com a radiação, só podem assumir certos valores discretos de energia:

$$E = nh\nu$$



## Teoria Quântica

- ❑ A quantização de energia é postulado por Einstein teoria corpuscular da luz



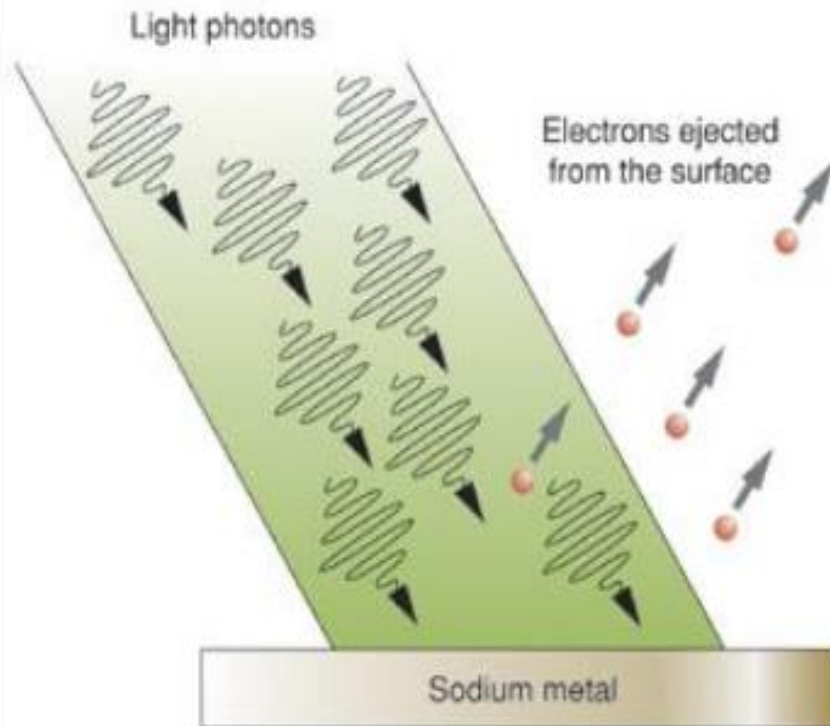
- ❑ Propôs que a radiação eletromagnética é composto de “pacotes” de energia ou “fótons”. A energia  $E$  de cada fóton é proporcional a frequência  $\nu$  da radiação:

$$E_f = h\nu$$

- ❑ onde  $h$  é a constante de Planck usada originalmente para explicar a radiação de corpo negro

# Física Moderna

1905



- ✓ Partícula de luz = fóton
- ✓ Propriedades:
  - não tem massa:  $m = 0$ ;
  - não tem carga:  $q = 0$ ;
  - se move com  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s;
- ✓ Cada fóton tem energia:

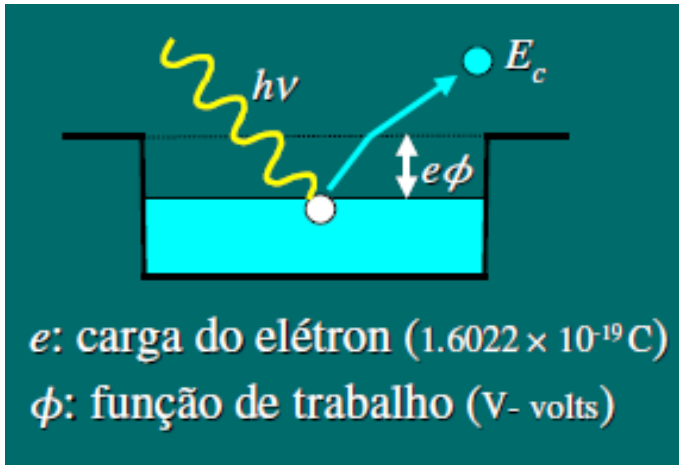
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$h =$  constante de Planck  $= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

# Física Moderna

1905

□ A energia do fóton ao incidir sobre uma superfície metálica, é totalmente absorvida por um elétron, o qual pode ser ejetado da superfície com energia cinética de:



$$E_c^{\text{máx}} = h\nu - e\phi$$

□ Isto explica por que a energia máxima dos elétrons independe da intensidade da fonte, pois aumentar a intensidade da fonte significa aumentar o número de fótons que vai aumentar o número de elétrons (corrente foto-elétrica), mas a energia máxima de cada elétron é a mesma

□ No entanto se a frequência da radiação ( $h\nu$ ) for menor que  $e\phi$ , isto é: nenhum elétron terá energia para escapar do metal

frequência de corte



$$\nu_0 = \frac{e\phi}{h}$$

$$h\nu < e\phi$$

□ Não há atrasos na emissão dos fotoelétrons, mesmo baixa I (há fótons incidente) ejetando elétrons, o elétron não fica acumulando energia para depois escapar.

- 1) ✓
- 2) ✓
- 3) ✓

# Física Moderna

Tabela 38.1 Função trabalho de diversos elementos.

Elemento	Função trabalho (eV)
Alumínio	4,3
Carbono	5,0
Cobre	4,7
Níquel	5,1
Ouro	5,1
Prata	4,3
Silício	4,8
Sódio	2,7

Cor	Comprimento de onda	Frequência
vermelho	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
laranja	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
amarelo	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
verde	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz

1905

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

$$E = 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{3 \cdot 10^8}{700 \cdot 10^{-9}} = 1,77 \text{ eV}$$

700 nm  
1.77 eV



A energia do fóton é menor que a função trabalho! Logo nenhum elétron é ejetado.

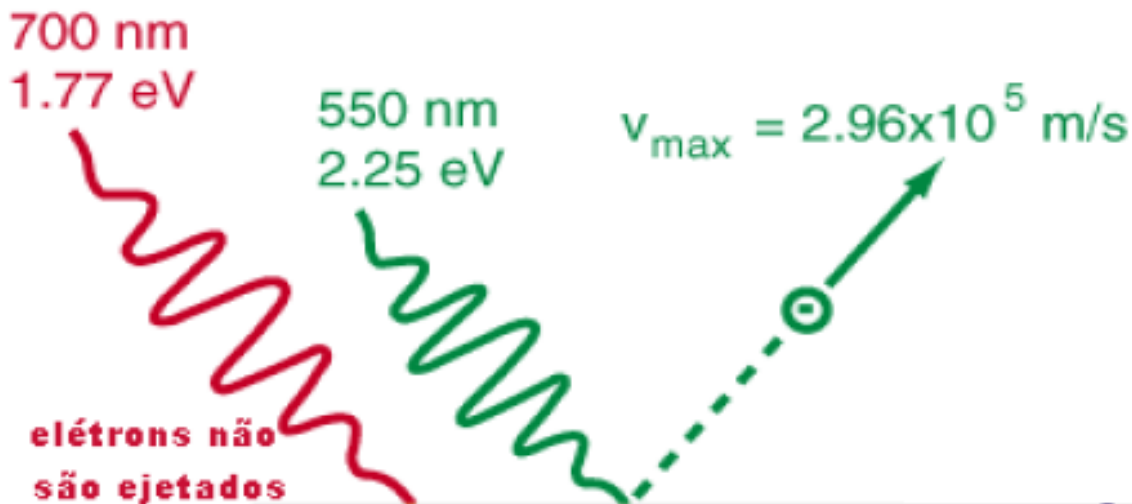
**Potássio: 2,0 eV são necessários para ejetar elétron**



1905

Cor	Comprimento de onda	Frequência
vermelho	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
laranja	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
amarelo	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
verde	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz

$$E = h \frac{c}{\lambda} = 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{3 \cdot 10^8}{550 \cdot 10^{-9}} = 2,25 \text{ eV}$$

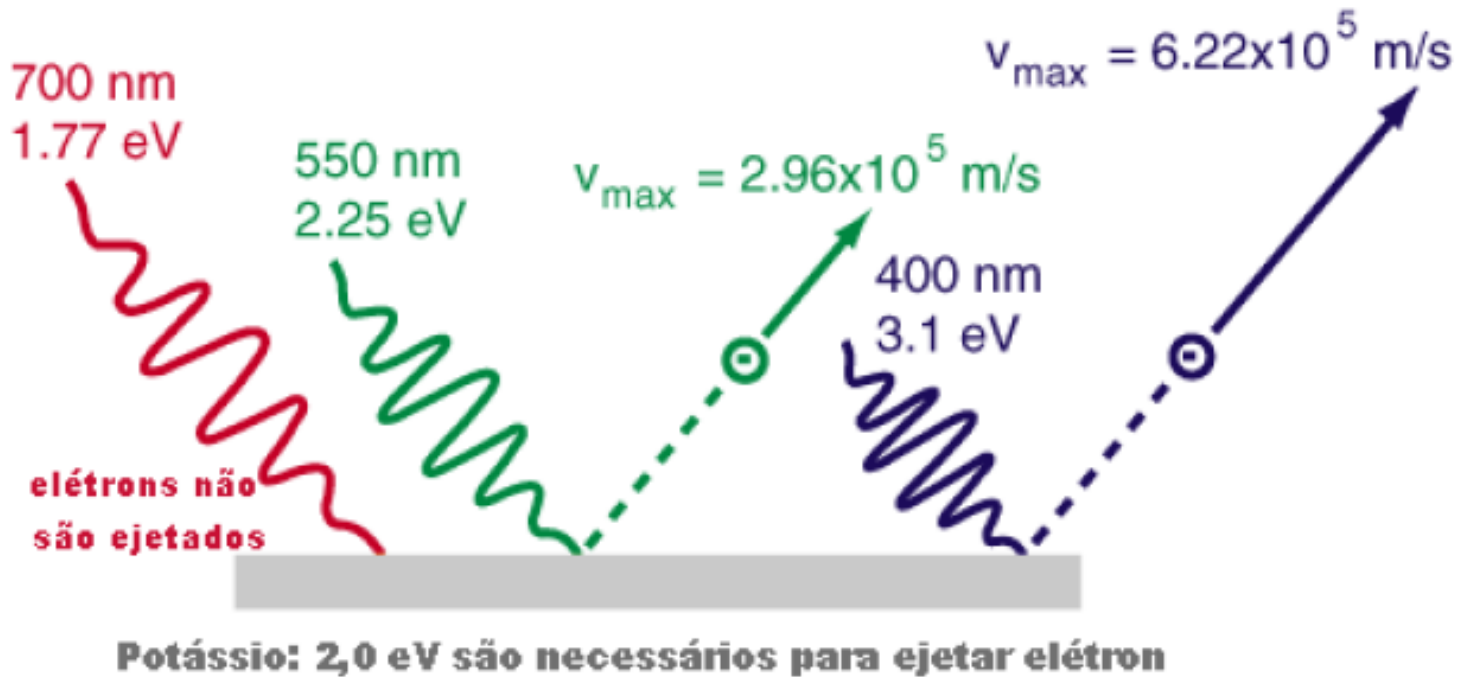


**Potássio: 2,0 eV são necessários para ejetar elétron**

1905

Cor	Comprimento de onda	Frequência
vermelho	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
laranja	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
amarelo	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
verde	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz

$$E = h \frac{c}{\lambda} = 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} = 3,1 \text{ eV}$$



# Aplicação:

✓ Como o painel solar converte energia solar em corrente elétrica?



**EFEITO FOTOELÉTRICO**

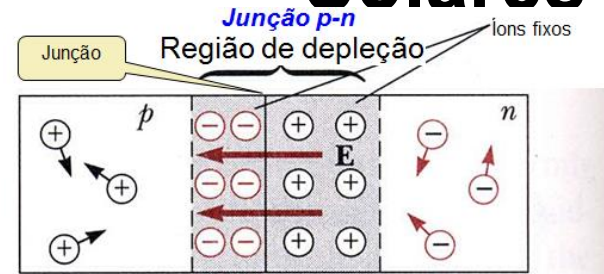
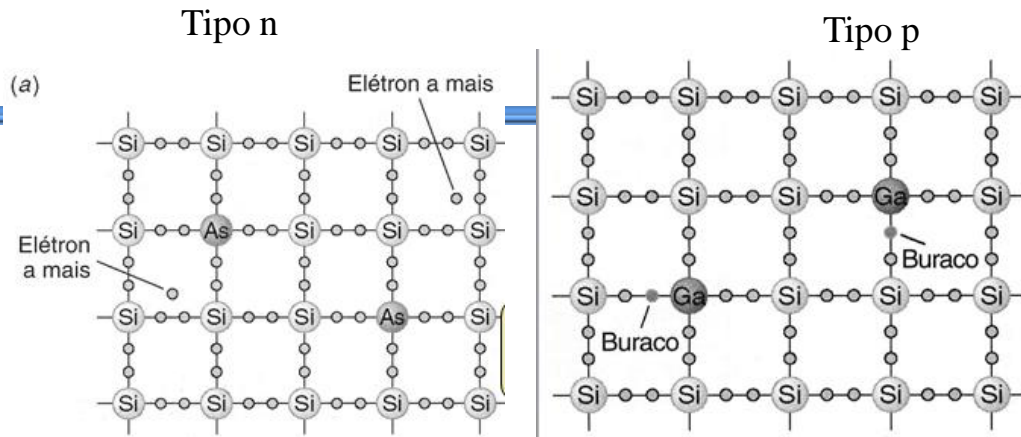


✓ Por que sua eficiência é tão baixa?

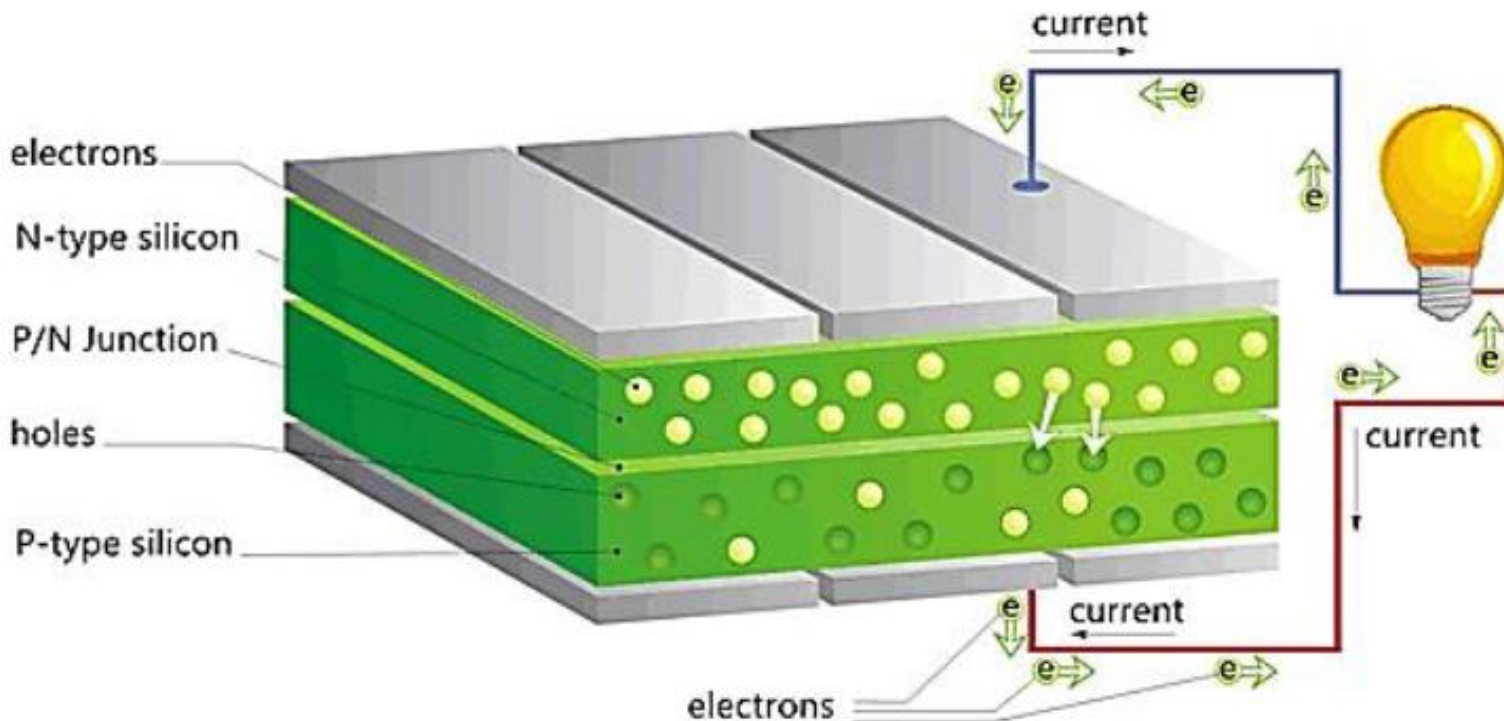
✓ Por que é tão caro?



# Aplicação: Células Solares

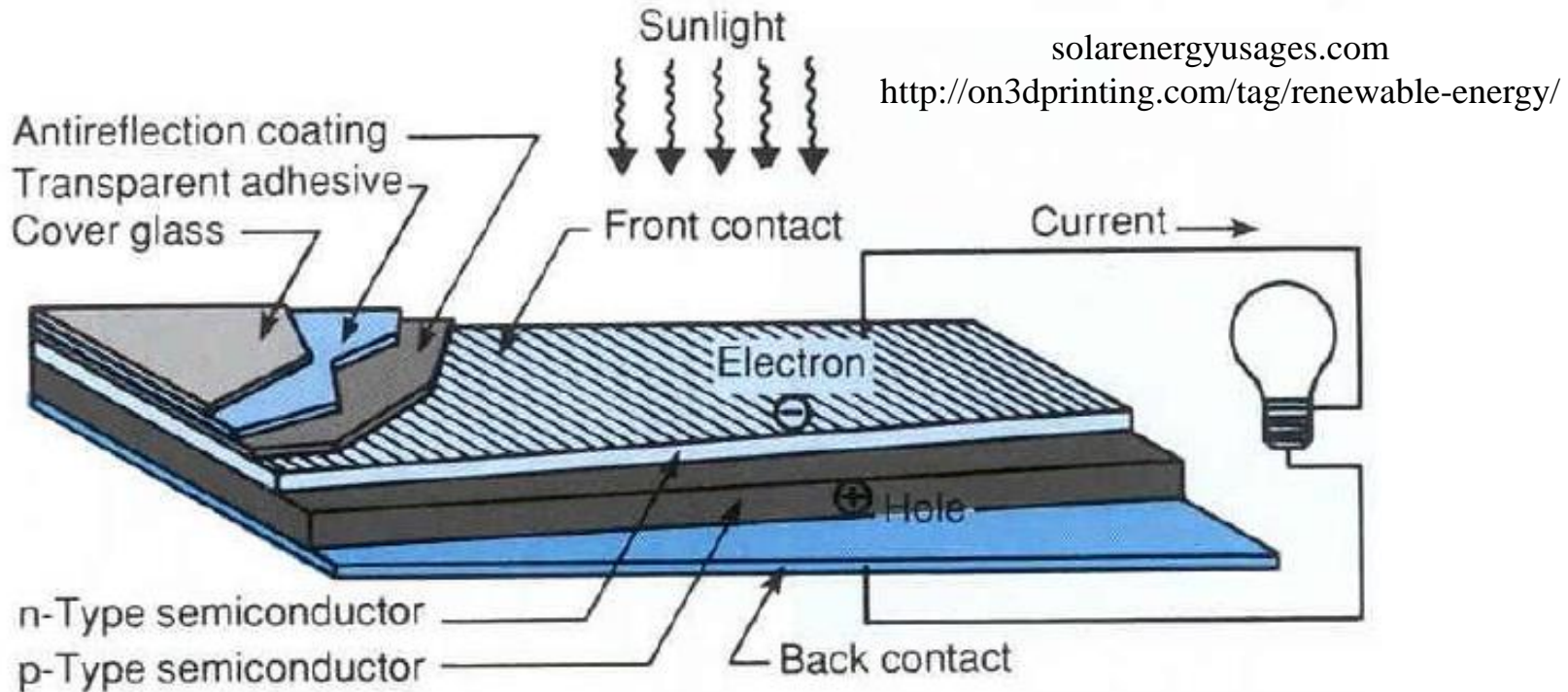


Quando um semiconductor tipo n entra em contato com um tipo p, há uma concentração desigual de elétrons e buracos e isto promove a difusão de elétrons para o tipo p e de buracos para o lado n, até o equilíbrio. Da origem uma ddp  $V$  entre o lado n e o lado p (potencial de contato).





# Aplicação: Células Solares

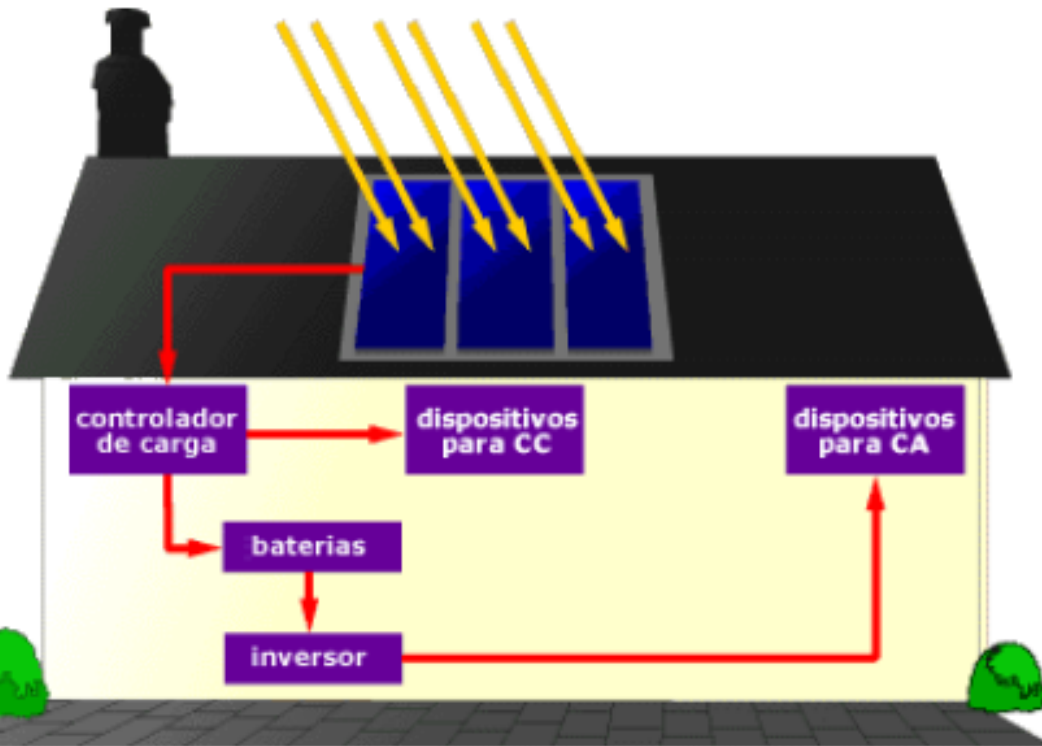
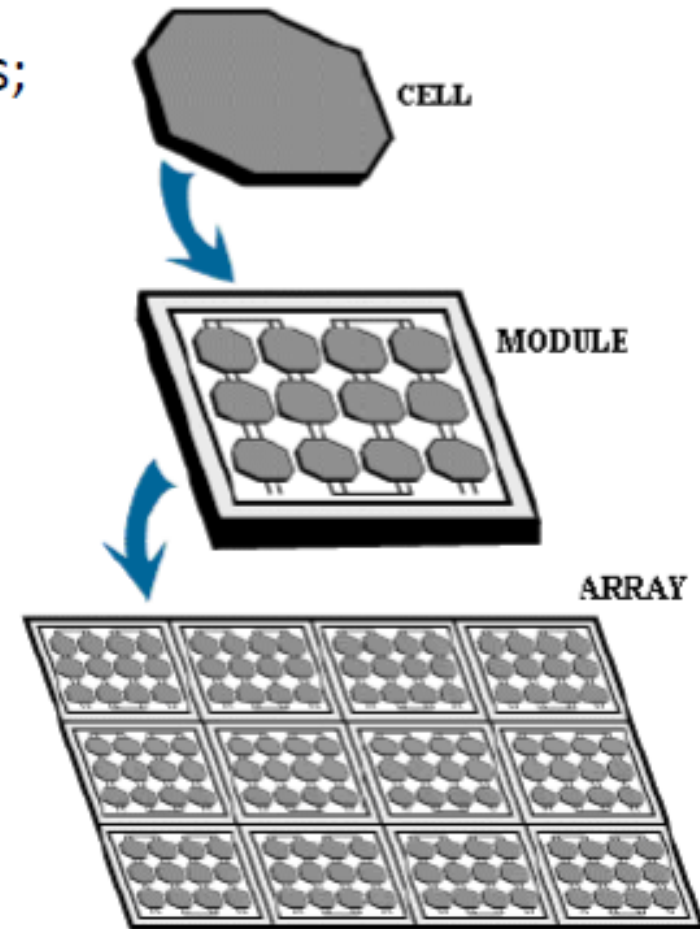


Na etapa final de fabricação a célula solar é coberta uma placa de vidro que a protege dos fenômenos atmosféricos. Os módulos são feitos pela conexão de várias células em série e em paralelo para atingir níveis úteis de voltagem e corrente.

100%	Irradiação Solar Total
-3,0%	Reflexão e sombreamento dos contatos frontais
-23,0%	Fótons com energia insuficiente na Irradiância de ondas compridas
-32,0%	Fótons com energia excedente na Irradiância de ondas curtas
-8,5%	Recombinação de elétrons
-20,0%	Gradiente elétrica, especialmente na região do campo elétrico
-0,5%	Resistência em série (perdas térmicas na condução elétrica)
= 13,0%	<b>Energia elétrica utilizável.</b>

# Aplicação: Células Solares

- ✓ Cada célula individual produz 1 a 2 watts;
- ✓ Célula → módulo → conjunto;



[solarenergyusages.com](http://solarenergyusages.com)

<http://on3dprinting.com/tag/renewable-energy/>

# Aplicação: Células Solares

Células feitas de silício têm maior eficiência, mas são mais caras

## 1ª GERAÇÃO



Com elevado custo de produção, as células de primeira geração são feitas de material rígido

**MATERIAL** Silício cristalino

**FOTOCONVERSÃO MÁXIMA** 24,7%

**PARTICIPAÇÃO NO MERCADO** 90%

## 2ª GERAÇÃO



Embora menos eficientes do que as células tradicionais, são mais baratas de produzir

**MATERIAL** Silício amorfo, silício policristalino ou microcristalino e seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)

**FOTOCONVERSÃO MÁXIMA** 18,8%

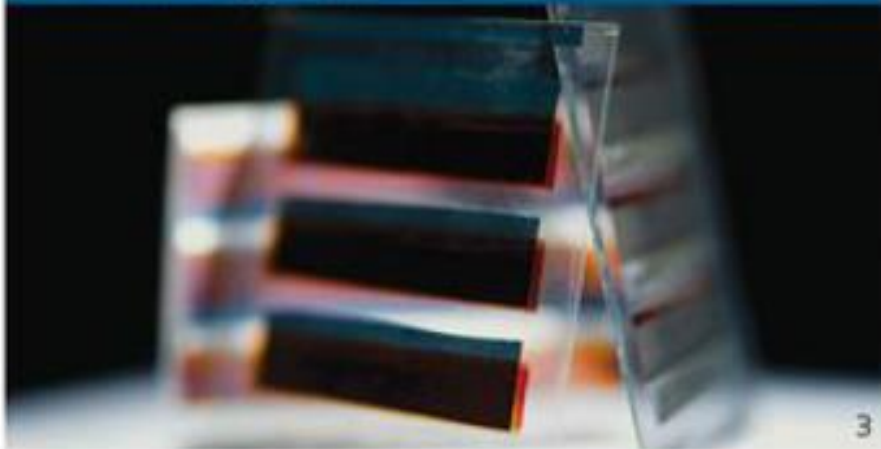
**PARTICIPAÇÃO NO MERCADO** 10%



# Aplicação: Células Solares

## 3ª GERAÇÃO

### Célula orgânica



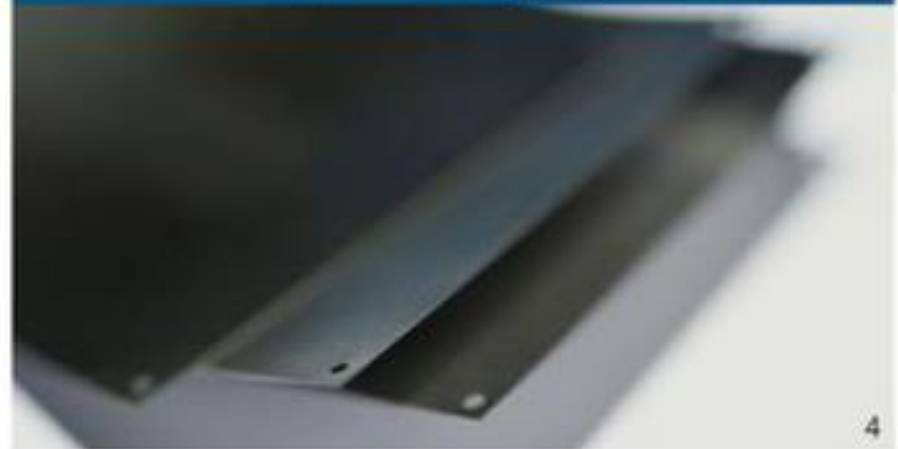
Leves e flexíveis, essas células fazem o aproveitamento de fótons via nanotecnologia

**MATERIAL** Semicondutor à base de carbono

**FOTOCONVERSÃO MÁXIMA** 12%

**PARTICIPAÇÃO NO MERCADO** não é comercializada

### Célula sensibilizada por corantes



Também chamadas de híbridas, as células DSSC usam materiais orgânicos e inorgânicos

**MATERIAL** Corantes e eletrólito

**FOTOCONVERSÃO MÁXIMA** 11,4%

**PARTICIPAÇÃO NO MERCADO** não é comercializada



# REFERÊNCIAS UTILIZADAS NESTA AULA

- Halliday, Resnick e Walker - **Fundamentos de Física** –Vol. III e IV – 9ª ed.
- Sears e Zemansky - **Fundamentos de Física** Vol. III e IV – 12ª ed.
- H. Moysés Nussenzveig - **Curso de Física Básica** – Vol. 3 e 4
- R. Eisberg e R. Resnick, 4a edição, Ed. Campus Ltda., RJ, Brasil, 1986. *Física Quântica*,
- F. Caruso e V. Oguri, Ed. Campus, RJ, 2006. *Física Moderna, origens clássicas e fundamentos quânticos*,
- P. A. Tipler e R. A. Llewellyn, 3a edição, LTC editora, RJ, Brasil, 2001. *Física Moderna*,
- Serway, Moses and Moyern -**Modern Physics**
- S.T. Thornton e A. Rex, Thomson Brooks/Cole, USA, Third Edition. *Modern Physics*
- <http://hyperphysics.phy.astr.gsu.edu/hbase/mod1.html>
- <http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico>
- solarenergyusages.com - <http://on3dprinting.com/tag/renewable-energy/>
- [http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2013/05/072-075\\_CelulasOrganicas\\_207-1.jpg](http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2013/05/072-075_CelulasOrganicas_207-1.jpg)