



*Mundo Macroscópico - Mecânica Clássica*

*Mundo muito veloz - Teoria da Relatividade*

*Mundo microscópico - Mecânica Quântica*

*Mundo NANO - ??????*

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

\* Tradução e adaptação livre das aulas do Professor Rick Trebino em: [www.physics.gatech.edu/frog](http://www.physics.gatech.edu/frog)

## Unidade 1

### Introdução à Teoria Quântica\*



- 1.1 Ondas e Partículas
  - Descobrimto do raio X e do Elétron
  - Determinação da Carga do Elétron
  - Espectro de linha
- 1.2 Quantização
- 1.3 Radiação de Corpo Negro
- 1.4 Efeito Fotoelétrico
- 1.5 Efeito Compton



**“Scientific discovery and scientific knowledge have been achieved only by those who have gone in pursuit of it without any practical purpose whatsoever in view”**

Max Karl Ernst Ludwig Planck  
(1858-1947)

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## 1.1: Ondas e Partículas

Fim do século XIX:

- Som, luz, ondas de rádio, etc... → ONDAS
- Elétrons, prótons, átomos → PARTÍCULAS

Primeiros 30 anos do século XX - desenvolvimentos teóricos e experimentais revelaram que:

- a LUZ transfere energia em pacotes (ou quanta) → PARTÍCULA!!
- ELÉTRONS sofrem difração → ONDAS!!

# Dualidade Onda-Partícula

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## 1.1: Ondas e Partículas

### **Propagação de ondas através do espaço ≠ da propagação de partículas**

- Ondas contornam obstáculos e interferem entre si.
- Partículas viajam em linha reta até colidirem com algo, retomando a trajetória retilínea logo após a colisão: se dois feixes de partículas se encontram no espaço, nunca vão produzir um padrão de interferência.

### **Partículas e ondas trocam energia de maneira diferente**

- Partículas trocam energia em colisões que ocorrem em pontos específicos no espaço e no tempo.
- Ondas são espalhadas no espaço e são distribuídas continuamente quando as frentes de onda interagem com a matéria.

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## 1.1: Ondas e Partículas

### **PORÉM.....**

As vezes a propagação de uma onda não pode ser distinguida da propagação de um feixe de partículas!

Para  $\lambda \ll$  que as distâncias das bordas dos objetos, efeitos de difração são insignificantes - onda viaja em linha reta e os máximos e mínimos de interferência estão tão próximos entre si no espaço que sua observação é impossível!



Onda interage com um detector, como se fosse um feixe de numerosas e pequenas partículas onde cada uma troca uma pequena quantidade de energia; nesta troca de energia não se consegue diferenciar ondas de partículas.

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## - Descobrimto do Raio X → ONDA



Wilhelm Röntgen  
(1845-1923)



J. J. Thomson  
(1856-1940)

Em 1890 os cientistas e engenheiros conheciam os “raios catódicos”. Estes raios eram gerados por placas metálicas dentro de um tubo com vácuo e no qual era aplicado uma grande diferença de potencial.

Havia conjecturas de que estes raios catódicos tinham alguma coisa a ver com átomos!

Era bem conhecido que os raios catódicos podiam penetrar a matéria e podiam ser desviados por campos magnéticos e elétricos.

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Observação de Raios X

Wilhelm Röntgen estudou os efeitos dos raios catódicos fazendo-os passar através de diferentes materiais. Ele notou que uma tela fosforescente perto do tubo brilhava durante alguns destes experimentos. Estes novos raios não eram afetados por campos magnéticos e eram mais penetrantes do que os raios catódicos.

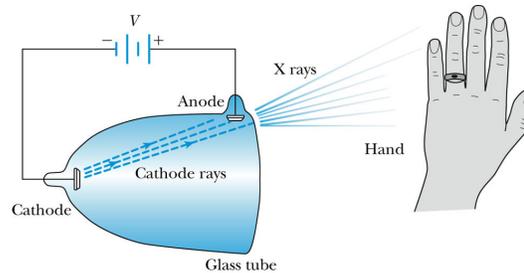
Ele chamou estes raios de **raios X** e deduziu que eles eram produzidos pelos raios catódicos que bombardeavam as paredes de vidro do tubo com vácuo.



Wilhelm Röntgen

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Tubo de Raios X de Röntgen

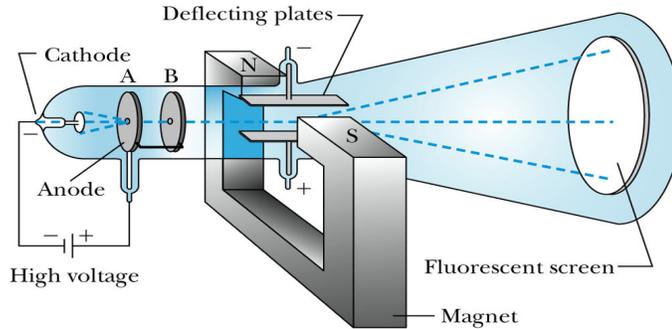


Röntgen construiu então um tubo de raios X fazendo com que os raios catódicos atravessassem a parede de vidro do tubo e deste modo produzissem os raios X. Para mostrar a penetração destes raios, ele produziu a imagem dos ossos de uma mão usando uma tela fosforescente.

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Experimento de Raios Catódicos de Thomson Partícula

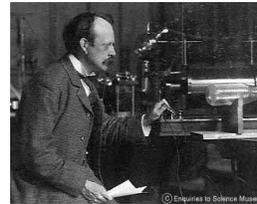
Thomson usou um tubo de raios catódicos evacuado para mostrar que os raios catódicos eram de fato **PARTÍCULAS** negativamente carregadas (elétrons) desviando estes “raios “ através de campos magnéticos e elétricos.



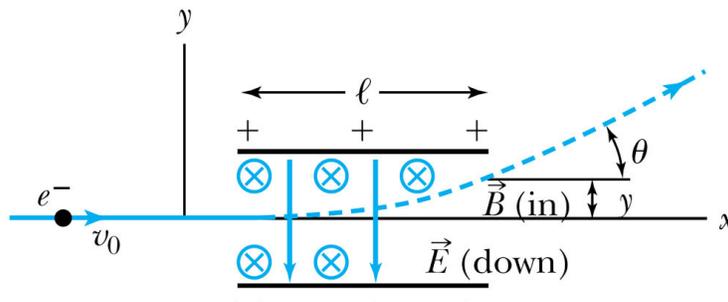
Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Experimento de Thomson: $e/m$

O método de Thomson para medir a razão entre a carga dos elétrons e a sua massa consistia em fazer os elétrons passarem através de uma região onde havia um campo magnético e um campo elétrico perpendiculares entre si.



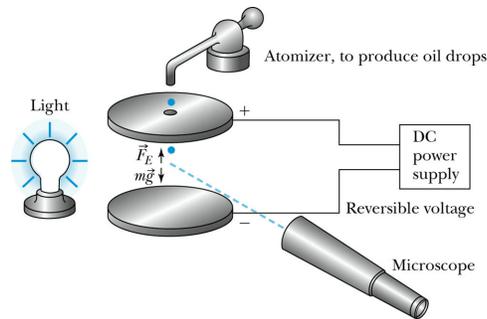
J. J. Thomson



Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## - Determinação da Carga do Elétron

Experimento da gota de óleo de Millikan



Robert Andrews Millikan  
(1868 – 1953)

Existe uma quantidade básica de carga para o elétron e este valor é quantizado, isto é, temos valores discretos de carga:

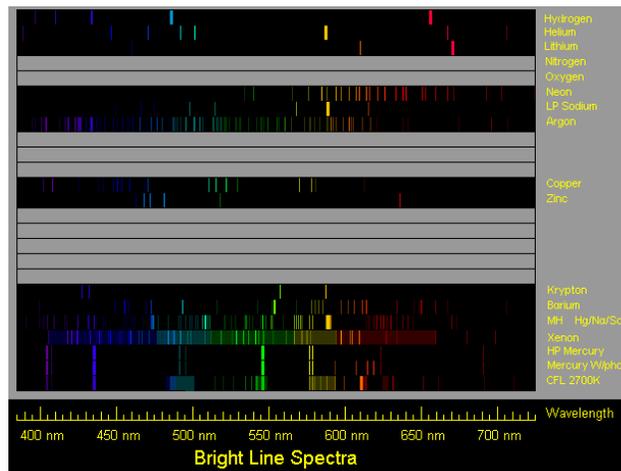
$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## - Espectros de Linha – Raias Espectrais

Foi observado que elementos químicos quando queimados ou excitados por uma descarga elétrica produzem comprimentos de onda únicos que dependiam de cada elemento!

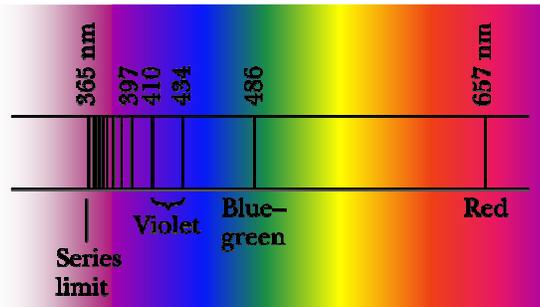


Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Série de Balmer

Em 1885, Johann Balmer encontrou uma fórmula empírica para determinar o comprimento de onda no visível das linhas espectrais para o átomo de hidrogênio em nm:

$$\lambda = 364.56 \frac{k^2}{k^2 - 4} \text{ nm} \quad (\text{onde } k = 3, 4, 5, \dots)$$



Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Equação de Rydberg

Quanto mais cientistas descobriam novas linhas de emissão no infravermelho e ultravioleta, a equação para a série de Balmer foi estendida para a equação de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad R_H = 1.096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

### Hydrogen Series of Spectral Lines

Discoverer (year)	Wavelength	$n$	$k$
Lyman (1916)	Ultraviolet	1	>1
Balmer (1885)	Visible, ultraviolet	2	>2
Paschen (1908)	Infrared	3	>3
Brackett (1922)	Infrared	4	>4
Pfund (1924)	Infrared	5	>5

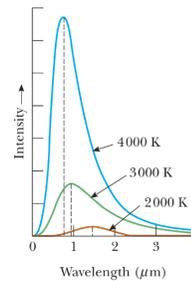
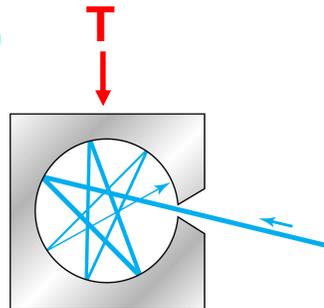
Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## 1.2: Radiação de Corpo Negro

Quando a matéria é aquecida, ela não só absorve luz, mas também emite luz espontaneamente.

Um corpo negro é um meio que pode espontaneamente emitir e absorver todas as cores.

Corpos negros são interessantes porque suas propriedades ópticas são independente do material e somente dependem da temperatura.

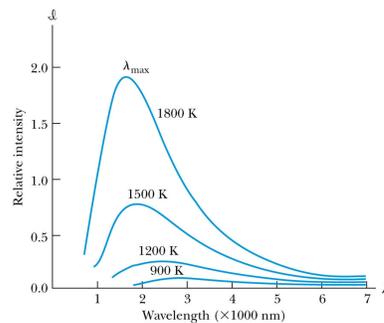


Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Lei de Wien

A intensidade espectral  $I(\lambda, T)$  é a potência total irradiada por unidade de área, por unidade de comprimento de onda, para uma dada temperatura.

**Lei do deslocamento de Wien:** o ponto de máxima intensidade do espectro se desloca para menores comprimentos de onda quando a temperatura aumenta.



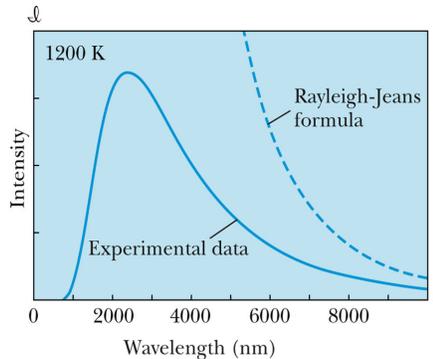
$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Fórmula 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:

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



Esta expressão ajusta os dados experimentais para comprimentos de onda grandes porém falha totalmente para pequenos comprimentos de onda. Esta falha ficou conhecida como **catástrofe do ultravioleta** e foi uma das notáveis exceções que a física clássica não conseguiu explicar.

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Lei da Radiação de Planck

Aplicação prática:  
Pirômetro óptico

Planck assumiu que a radiação numa cavidade de corpo negro era emitida (e absorvida) por algum tipo de “oscilador”. Ele usou a estatística de Boltzman para chegar na seguinte fórmula que ajustava os dados experimentais da radiação de corpo negro.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad \text{Lei da Radiação de Planck}$$

Planck fez duas modificações na teoria clássica:

- Os osciladores (de origem eletromagnética) podem ter apenas certas energias discretas,  $E_n = nh\nu$ , onde  $n$  é um número inteiro,  $\nu$  é a frequência, e  $h$  é chamada de constante de Planck:

$$h = 6.6261 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s.}$$

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

$$\Delta E = h\nu$$

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## 1.6: Efeito Fotoelétrico

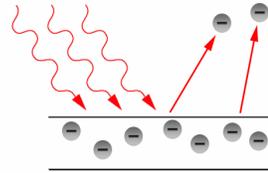
Métodos de emissão de elétrons:

Emissão Termiônica: Aplicação de calor permite que os elétrons ganhem energia suficiente para escapar do material.

Emissão Secundária: O elétron do material ganha energia através de transferência de energia num processo de colisão com uma partícula de alta velocidade que incide neste material.

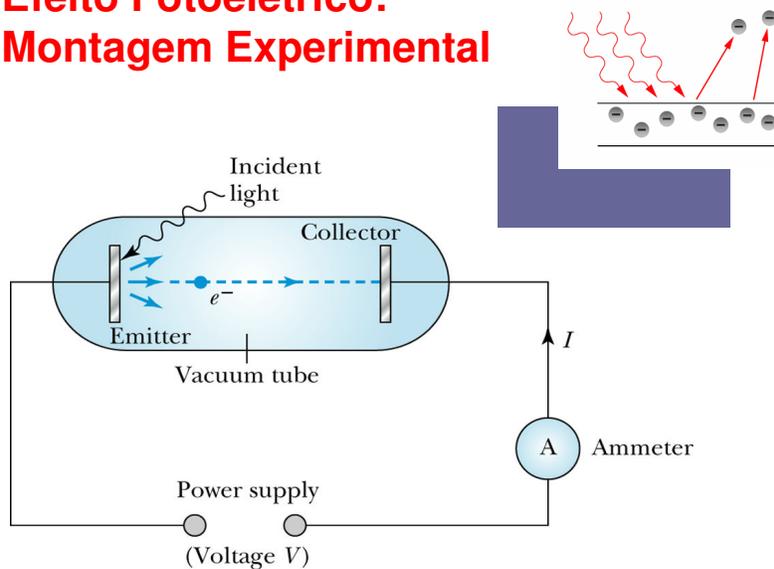
Emissão de campo: Um campo elétrico externo intenso arranca o elétron para fora do material.

Efeito fotoelétrico: Luz incidente (radiação eletromagnética) iluminando o material transfere energia para os elétrons, permitindo que eles escapem do material. Chamamos a estes elétrons ejetados de **fotoelétrons**.



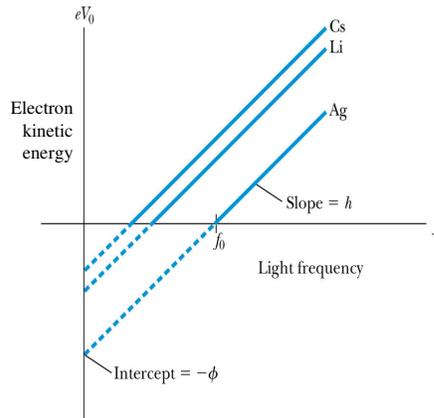
Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Efeito Fotoelétrico: Montagem Experimental



Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Efeito Fotoelétrico: observações



Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

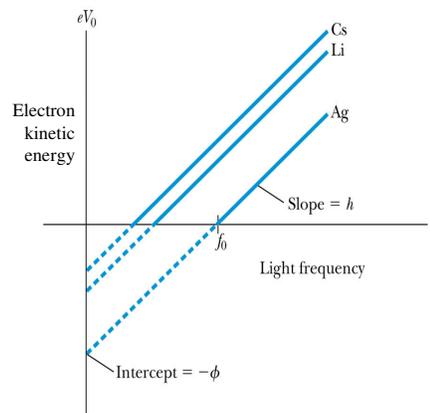
A energia cinética dos fotoelétrons é **independente da intensidade da luz**.

A energia cinética dos fotoelétrons, para um dado material emissor, depende somente da **freqüência da luz**.

Classicamente, a energia cinética dos fotoelétrons deveria aumentar com a intensidade da luz e não depender da freqüência.

## Efeito Fotoelétrico: mais observações

Existe uma **freqüência de corte** para a luz, abaixo da qual nenhum fotoelétron é ejetado (relacionado à função trabalho  $\phi$  do material emissor).



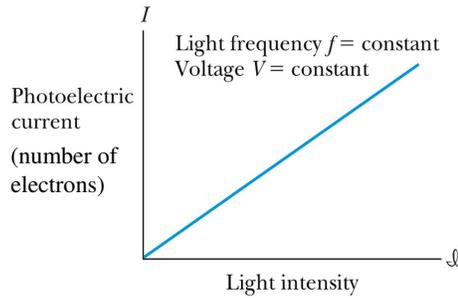
A existência de uma freqüência de corte é completamente inexplicável pela teoria clássica.

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Efeito Fotoelétrico: mais observações

Quando fotoelétrons são produzidos, seu **número** é proporcional a intensidade da luz.

Também, os fotoelétrons são emitidos quase **instantaneamente** assim que o foto cátodo é iluminado, independente da intensidade da luz.



Teoria clássica prediz que, para intensidades extremamente baixas da luz, um tempo longo deveria passar antes que qualquer elétron pudesse obter energia suficiente para escapar do foto cátodo. Foi observado, entretanto, que os fotoelétrons eram ejetados quase que imediatamente.

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Teoria de Einstein: Fótons



Einstein sugeriu que o campo da radiação eletromagnética é quantizado em partículas chamadas de **fótons**. Cada fóton carrega um quantum de energia:

$$\nu = f \text{ (frequência)}$$

$$E = h\nu$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

onde  $\nu$  é a frequência da luz e  $h$  é a constante de Planck.

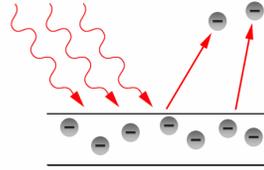
Alternativamente,  $E = \hbar\omega$

$$\hbar \equiv h / 2\pi$$

Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Teoria de Einstein

Conservação de energia permite escrever:



**Energia antes (fóton) = Energia depois (elétron)**

$$h\nu = \phi + \frac{1}{2}mv^2$$

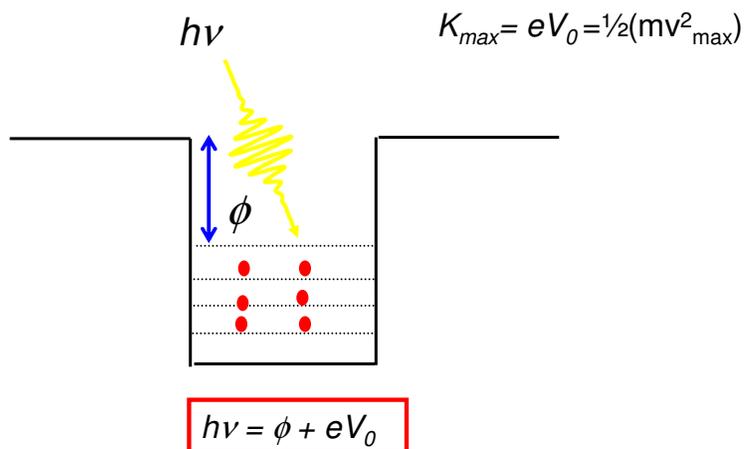
onde  $\phi$  é a função trabalho do metal (energia potencial a ser superada antes do elétron poder escapar).

Na verdade, os dados são um pouco mais complexos, porque a energia dos elétrons pode ser reduzida pelo material emissor (foto cátodo). Considere  $v_{\max}$  como a velocidade máxima dos fotoelétrons (não  $v$ ) e escrevemos:

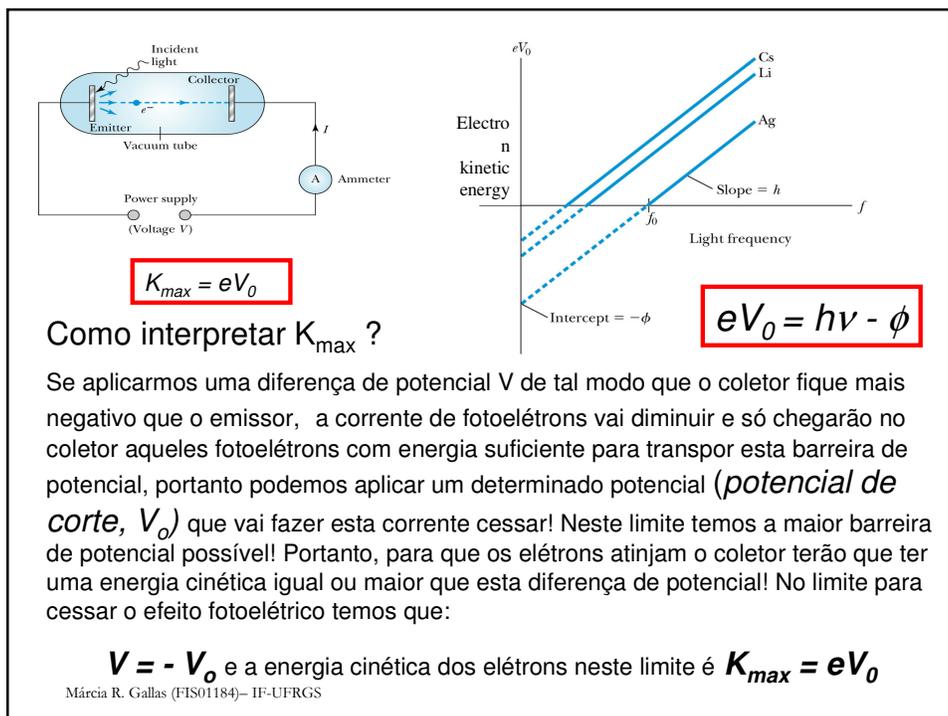
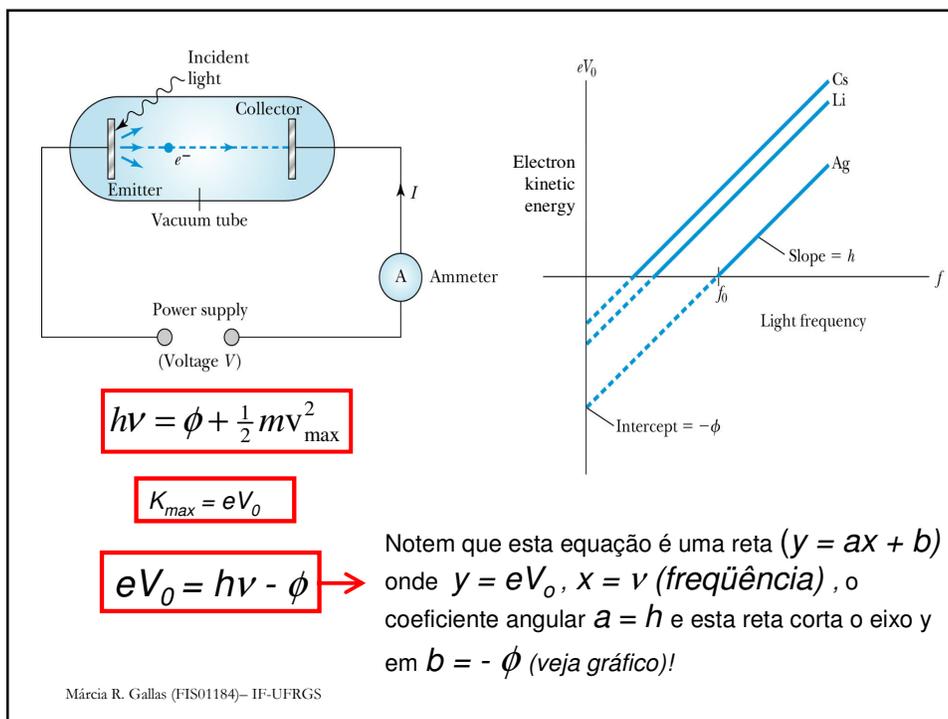
$$h\nu = \phi + \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

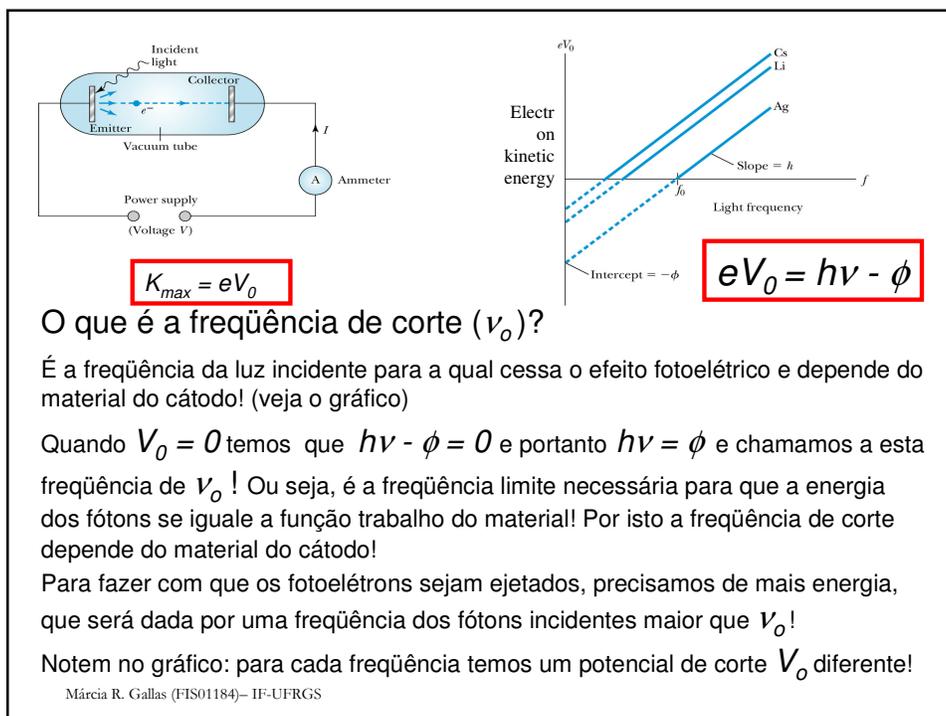
Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS

## Efeito Fotoelétrico: representação esquemática



Márcia R. Gallas (FIS01184)– IF-UFRGS





## Energia dos Fótons para a Luz Visível

Calcule a energia dos fótons para a luz que tem um comprimento de onda de 400 nm (violeta) e para a luz que tem um comprimento de onda igual a 700 nm (vermelho).

Energia dos fótons está relacionada com as frequências e comprimentos de onda dos fótons por

$$E = hf = hc/\lambda$$

Para  $\lambda = 400$  nm, a energia é 3,10 eV

Para  $\lambda = 700$  nm, a energia é 1,77 eV

Quanto menor o comprimento de onda da luz, maior a energia!!

Energia dos fótons para:

- luz visível: entre aproximadamente 1,8 eV e 3,1 eV.

- raios X ( $\lambda \approx 1$  nm): da ordem de keV.

- raios gama (emitidos pelos núcleos -  $\lambda \approx 1$  fm): da ordem de MeV.