

Universidade de São Paulo Instituto de Física

EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS DA NATUREZA QUÂNTICA DA
RADIAÇÃO E DA MATÉRIA

AULA 04

Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br

2º. Semestre de 2023

Monitores: Rodrigo Fernandes de Almeida
Samuel Pizzol

Teoria de Planck

A densidade de energia na cavidade, em função da frequência ou do comprimento de onda é dada por:

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT \cdot d\lambda \quad \bar{\varepsilon} = \frac{e^{-\Delta\varepsilon/kT} \Delta\varepsilon}{(1 - e^{-\Delta\varepsilon/kT})} = \frac{\Delta\varepsilon}{e^{\Delta\varepsilon/kT} - 1}$$

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} \bar{\varepsilon} d\lambda$$

Deve ser a função que Wien procurava

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{\lambda\Delta\varepsilon}{e^{\Delta\varepsilon/kT} - 1} \cdot d\lambda$$

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{hc}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda$$

Escrevendo $\Delta\varepsilon = h\nu$ e $\lambda\nu = c$

c é a velocidade da luz

h = constante de Planck

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

$\Delta\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$

$hc = 12,4 \times 10^{-7} \text{ eV}\cdot\text{m} = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$

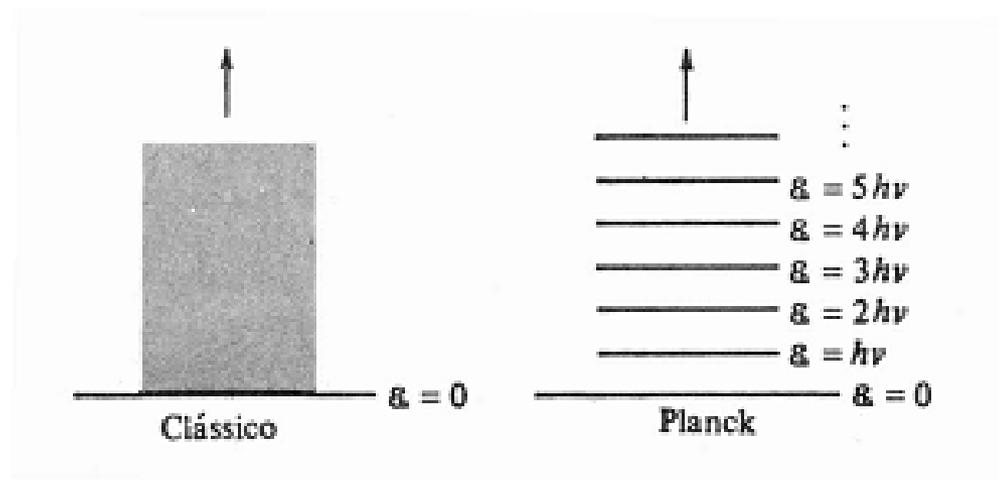
$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^5}{c^5} \frac{ch\nu}{\nu e^{h\nu/kT} - 1} \cdot \frac{c}{\nu^2} d\nu$$

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \cdot d\nu$$

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:

$$E = nh\nu$$



Natureza da luz: onda ou partículas?

- Polêmica que envolveu grandes físicos e durou vários séculos
- Newton acreditava que a luz constituía-se de feixes de corpúsculos que se deslocam no vácuo em linha reta
- Christiaan Huygens era um dos que defendia a ideia de que a luz era uma onda (era contrário à Newton). se propagando em algum meio (qual?)
- Somente no início do século XIX, com experimentos de Young e Fresnel sobre a interferência e difração da luz é que a natureza ondulatória prevaleceu

Interferência e difração da luz

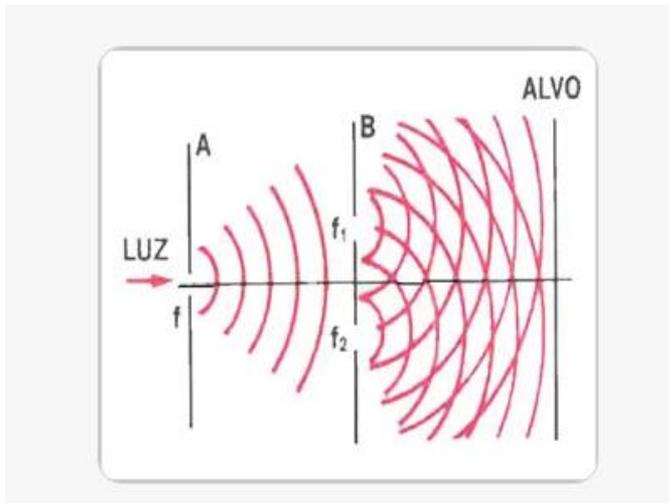
Thomas Young fez com a luz produzida por uma fonte luminosa fosse difratada ao passar por um pequeno orifício.

Após ser difratada, a onda luminosa se propagava em direção a dois outros pequenos orifícios, onde sofria novamente o fenômeno da difração.

Com isso, surgiam duas novas ondas luminosas que se propagavam com fases constantes.

Finalmente, essas duas ondas atingiam um anteparo (alvo) onde era possível ver a existência de regiões claras e escuras.

As regiões escuras correspondiam às interferências destrutivas, enquanto que as regiões claras correspondiam às interferências construtivas



ele mostrou que é possível obter interferência com a luz, e dessa forma **demonstrou, de forma quase definitiva**, que a luz é um fenômeno ondulatório

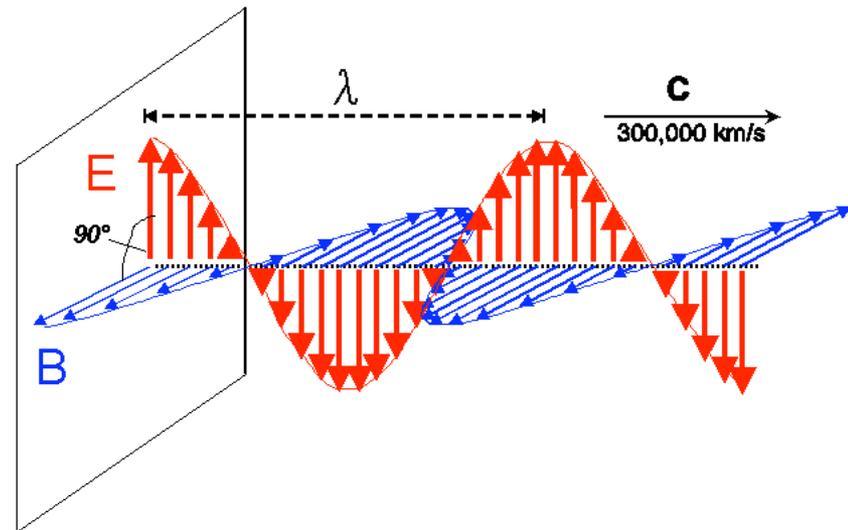
Ondas eletromagnéticas

- James Clerk Maxwell

estuda o efeito de correntes oscilantes em circuitos

- Essas correntes

geram campos elétricos e magnéticos que variam com o tempo



Simulação de ondas eletromagnéticas :

<https://www.youtube.com/watch?v=nYolqH169k0>

<https://www.geogebra.org/m/pwux2qkn>

Equações de Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- Unificaram os feitos elétricos e magnéticos
- Ondas eletromagnéticas tem o mesmo comportamento que a luz!

- Equação das ondas eletromagnéticas:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

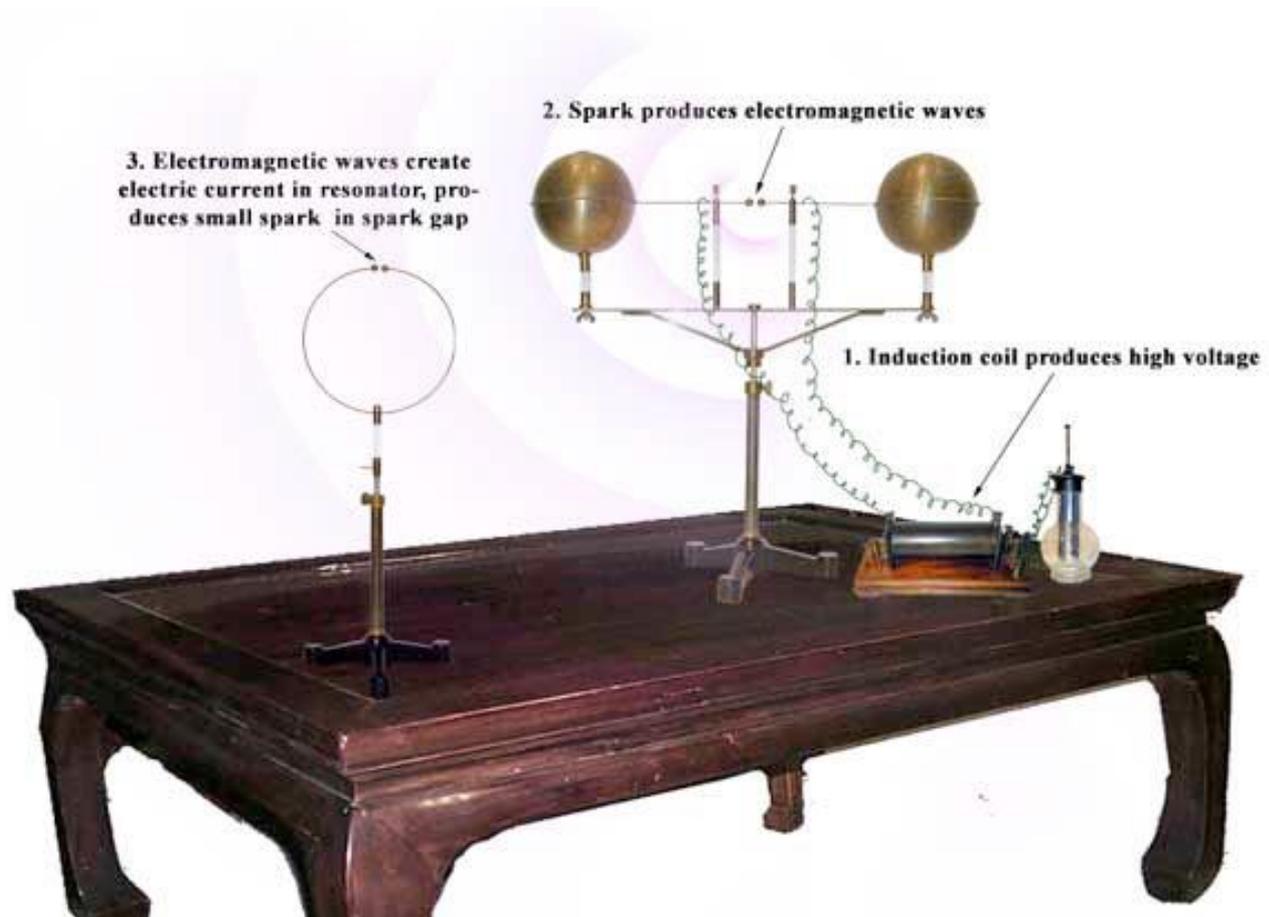
- Que são equivalentes a equação de uma onda genérica

$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

- Como um dos resultados derivados das equações de Maxwell surge a velocidade das [ondas eletromagnéticas](#), dada por $v = \sqrt{1/\mu_0 \epsilon_0} = c$, onde c é a velocidade da luz

O que são essas ondas eletromagnéticas

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)

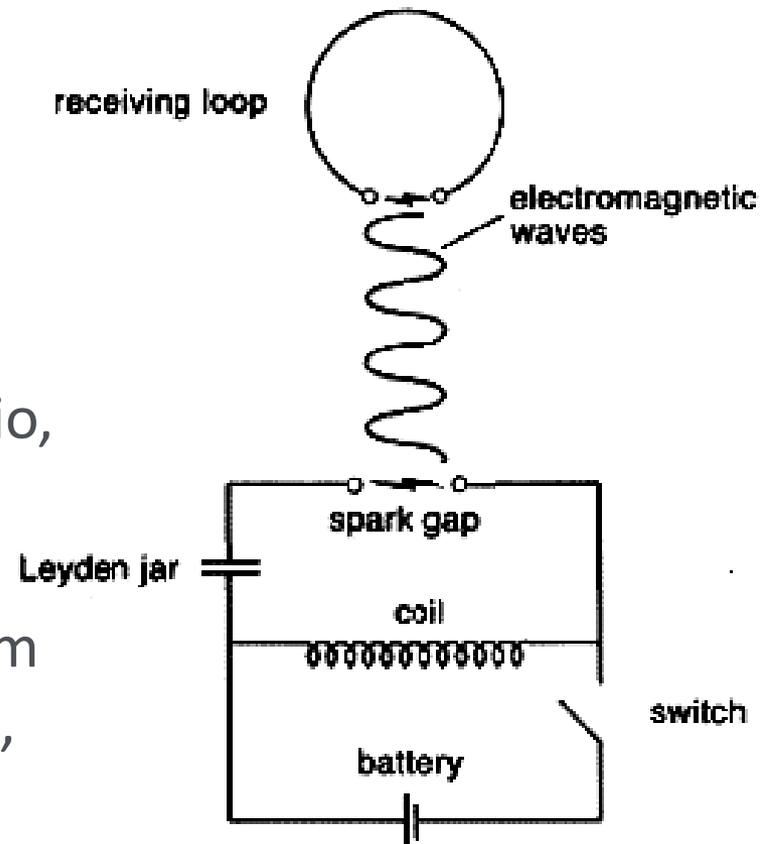


O que são ondas eletromagnéticas

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)

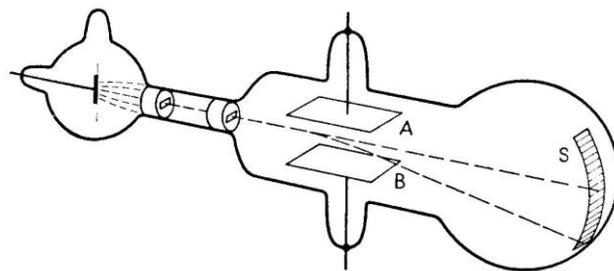
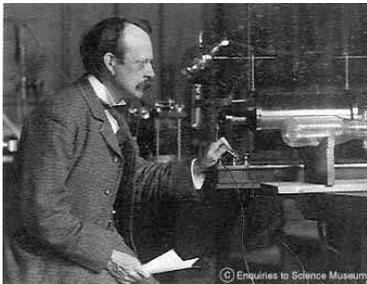


A proposta para o experimento foi montar um circuito oscilatório, com um pequeno espaço (gap) para a produção de uma faísca forte o suficiente para induzir em um circuito externo outra faísca, assim provando a existência de ondas eletromagnéticas.



J. J. Thomson descobre o elétron (1897)

- Thomson também estudava descargas elétricas em gases utilizando tubos de raios catódicos
- Através de um experimento e princípios simples de eletromagnetismo, ele mediu a razão e/m do elétron



Efeito fotoelétrico

- Ponto de partida para a confirmação da existência de ondas eletromagnéticas foram os experimentos de Hertz (1886-1887).
- No entanto Hertz já havia notado em seu experimento que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorria mais facilmente quando havia incidência de luz ultravioleta (UV) sobre um dos eletrodos.



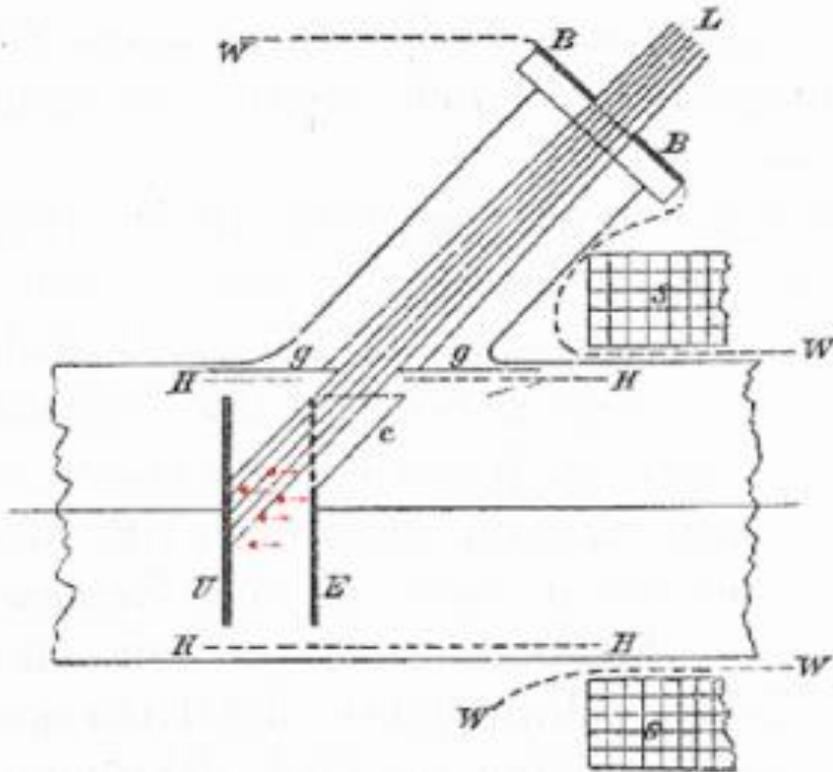
- Este efeito foi utilizado por Einstein mais tarde para contradizer outros aspectos da teoria eletromagnética clássica



- Lenard (antecessor a Einstein) realizando experimentos com luz UV observou esta facilidade de descarga devido a luz e que elétrons eram emitidos da superfície do catodo

Combinando os conhecimentos

- O Experimento de Lenard, Annales de Physique, Leipzig 8, 1902 pp149,



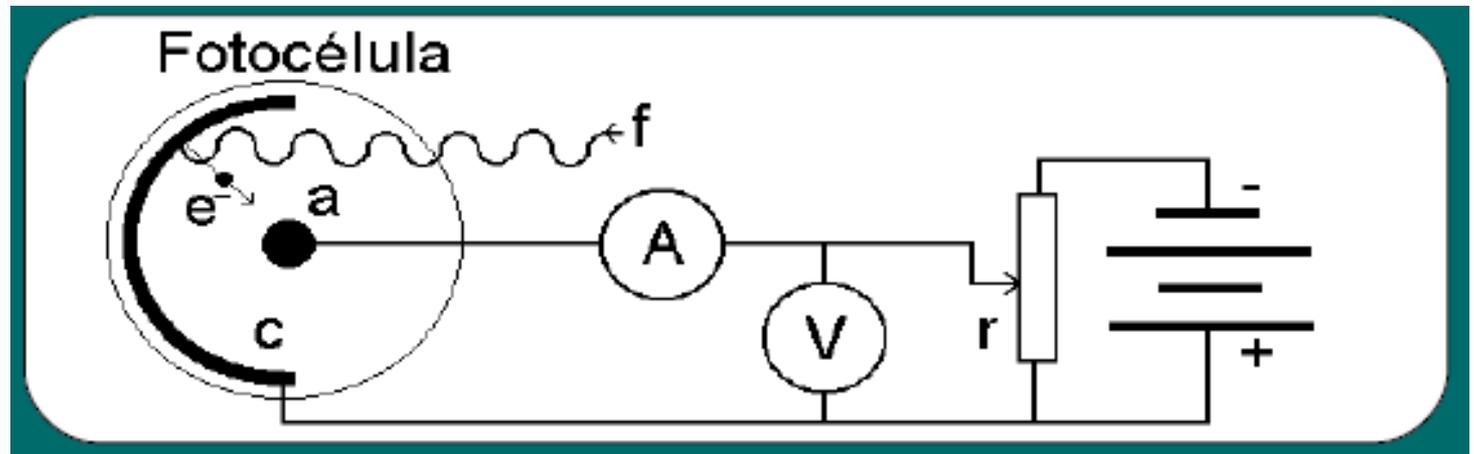
- Realizou um experimento onde ele faz incidir luz em um eletrodo e mede a corrente gerada entre os eletrodos e a energia cinética dos recém descobertos elétrons (1897) quando emitidos pelo efeito da luz do Eletrodo



- O que podemos esperar deste experimento – física clássica explica?

Medida da Energia Cinética dos elétrons

- Esta é a medida chave do estudo de Lenard
- Como medir E_c ?
- Aplicar uma tensão no circuito que retarda a velocidade dos elétrons. Quando eles param ($i = 0$), tem-se: $e \cdot V_0 = E_c$

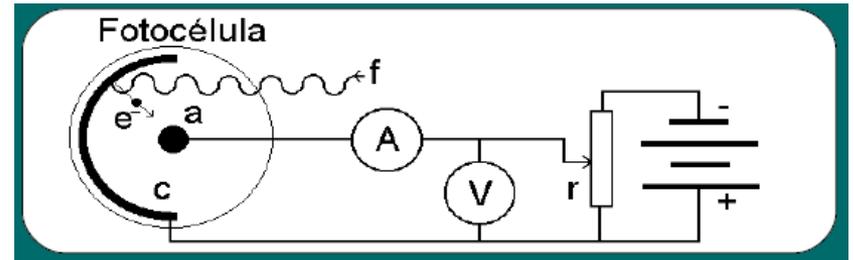


Previsão da física clássica

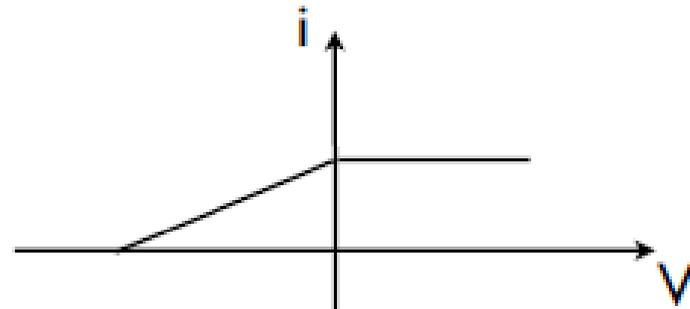
- A intensidade do campo é proporcional a sua amplitude ao quadrado ($I \propto E^2$). Como a força sobre um elétron é proporcional à amplitude do campo ($F = eE$), a energia cinética dos mesmos deve aumentar com a intensidade da luz
- este efeito deve ocorrer para qualquer frequência de luz, sendo importante apenas a intensidade da mesma
- deve haver um intervalo de tempo finito entre a incidência da luz e o início da emissão de elétrons

Resultados observados por Lenard

- Quando $V > 0$ $\Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$

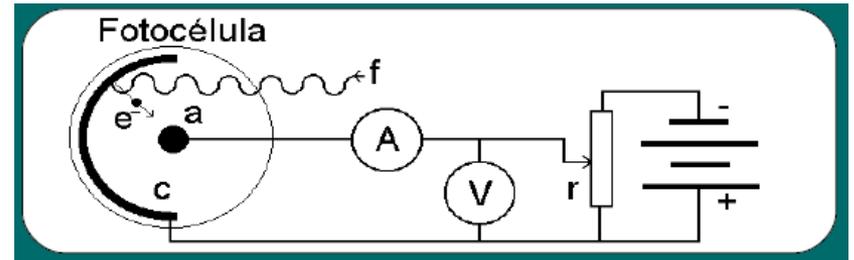


- Quando $V < 0$ $\Rightarrow i \rightarrow 0$



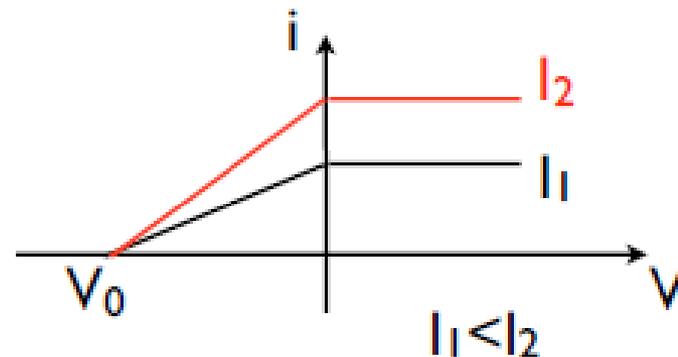
Resultados observados por Lenard

- Quando $V > 0$ $\Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$



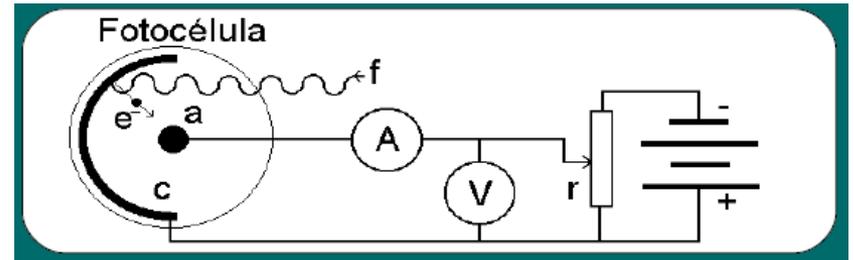
- Quando $V < 0$ $\Rightarrow i \rightarrow 0$

$i_{\max 1} < i_{\max 2}$ se $l_1 < l_2$



Resultados observados por Lenard

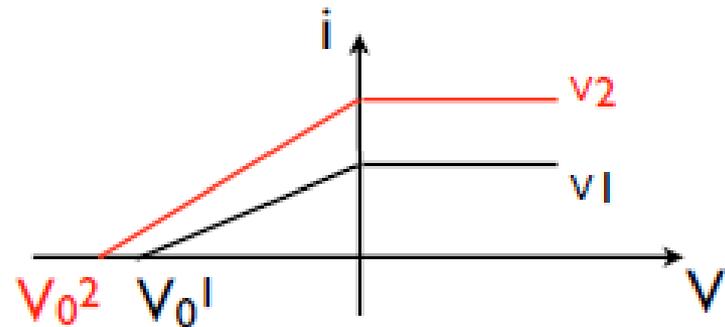
• Quando $V > 0 \Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$



• Quando $V < 0 \Rightarrow i \rightarrow 0$

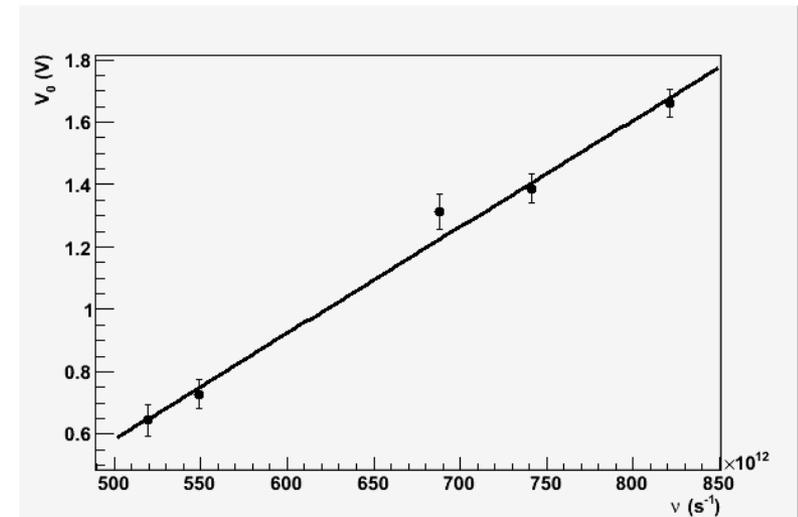
$i_{\max 1} < i_{\max 2}$ se $\lambda_1 < \lambda_2$

$V_0^1 < V_0^2$ se $\nu_1 < \nu_2$



Resultados observados por Lenard

- E_c apresenta uma dependência linear com ν
- Não há atraso entre o início da incidência de luz no eletrodo e a emissão de elétrons



- Applet: https://phet.colorado.edu/sims/photoelectric/photoelectric_pt_BR.jar

Teoria Quântica

Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig 17, p. 132, 1905*

Nova e revolucionária descrição teórica!

□ A quantização de energia é postulado por Einstein em 1905 – 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 ν da radiação:

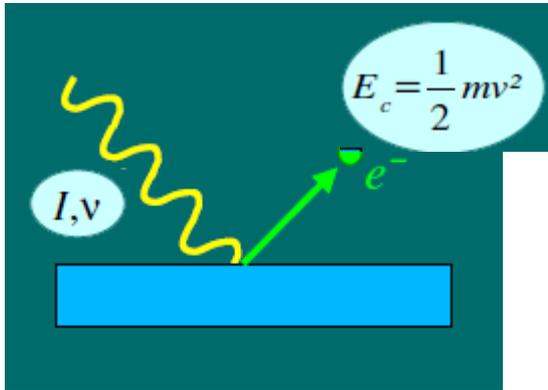
$$E_f = h\nu$$

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

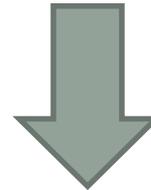
□ um quantum de luz transfere toda sua energia para um único elétron ...

□ devemos assumir que ao deixar o metal, cada elétron deve realizar uma quantidade de trabalho e_ϕ característico da substância.”

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)

Contradições da física ondulatória clássica:

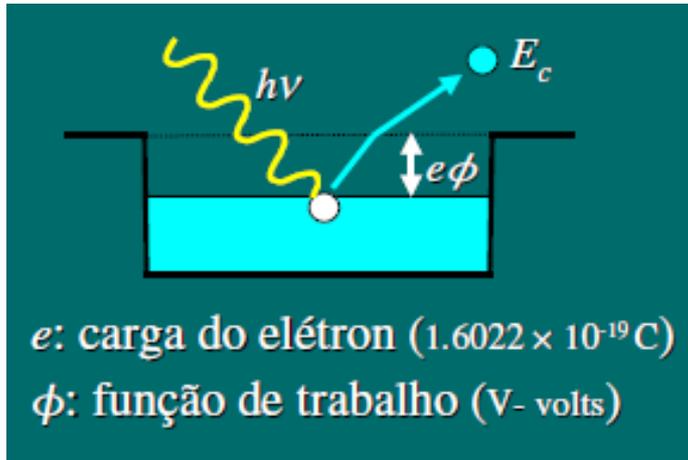
<i>Previsões:</i>	<i>Observações experim.:</i>
1) A energia cinética dos elétrons (E_c) deveria aumentar com a intensidade (I) da onda E-M.	✗ \Rightarrow 1) E_c não varia com I .
2) Deveria “demorar” para haver emissão de elétrons, dependendo de I .	✗ \Rightarrow 2) Não há atraso perceptível.
3) E_c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

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

Teoria Quântica

□ 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:



$$E_c^{m\acute{a}x} = h\nu - e\phi$$

□ 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 fotoelétrica), 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



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

$$h\nu < e\phi$$

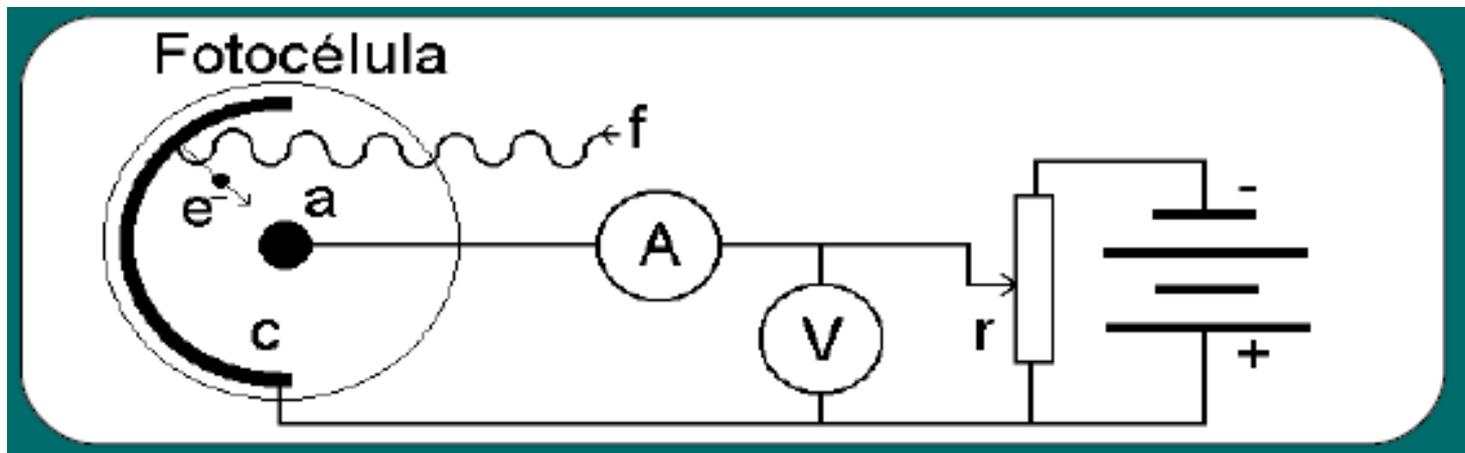
□ Não há atrasos na emissão dos fotoelétrons, mesmo baixa I (há fótons incidente) ejetando elétrons, o elétron não fica acumulando energia para depois escapar.

- 1) ✓
- 2) ✓
- 3) ✓

Arranjo Experimental

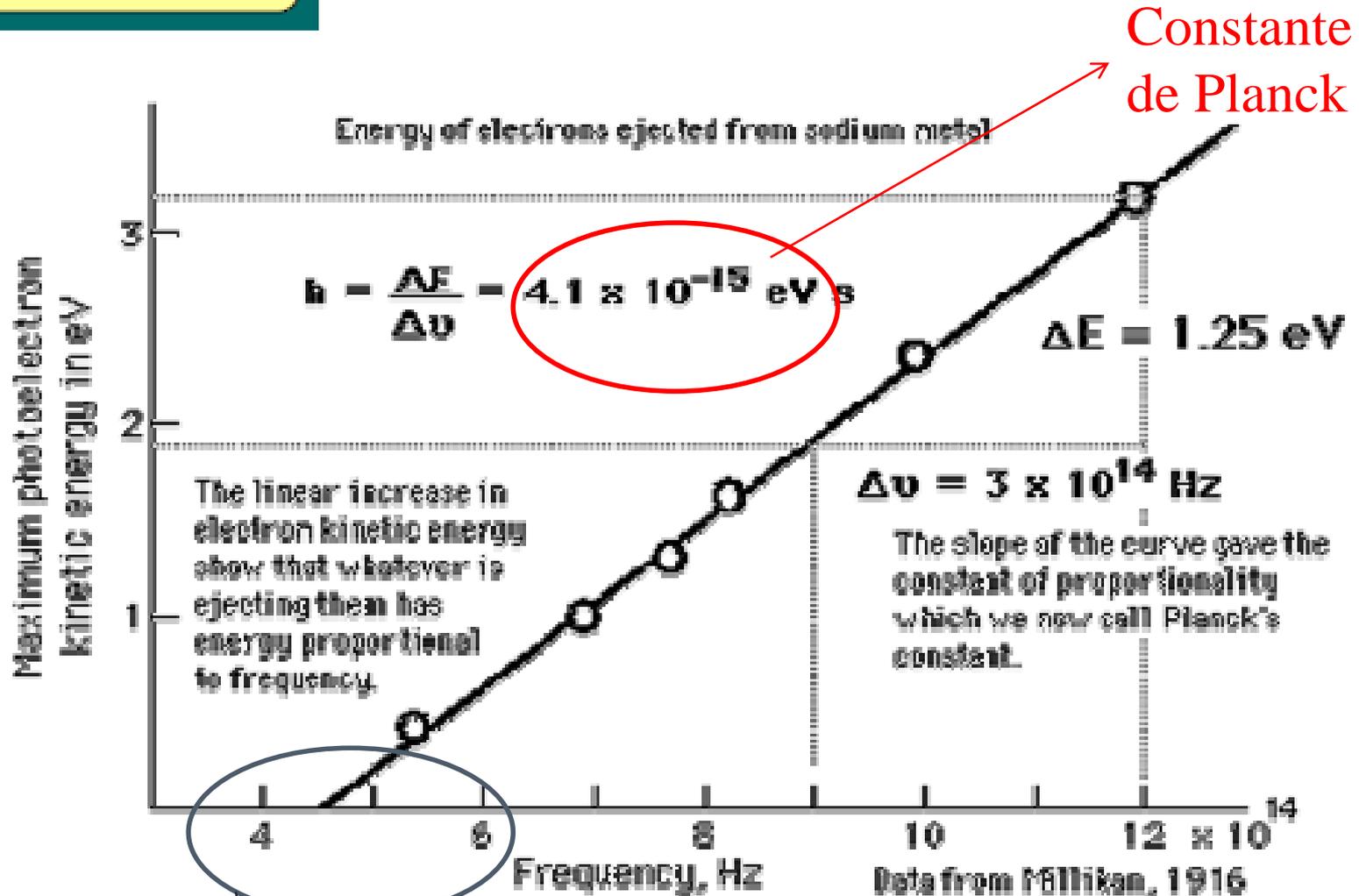
$$E_c^{m\acute{a}x} = h\nu - e\phi$$

- ❑ A teoria prevê uma relação linear entre a energia máxima dos fotoelétrons e a frequência da radiação incidente
- ❑ Verificado experimentalmente por Millikan em 1916
 - ❑ Usou uma célula fotoelétrica



$$E_c^{m\acute{a}x} = h\nu - e\phi$$

Resultados para V_{xf}



Só a partir de um certo valor de frequência (ν) que começa a ocorrer o efeito fotoelétrico (independente da intensidade)

$$E_c^{m\acute{a}x} = h\nu - e\phi$$

Trabalho necessário para remover o elétron do metal (este trabalho é necessário para superar os campos atrativos dos átomos na superfície)

□ A frequência mínima para que o efeito fotoelétrico seja observado, $V_0=0$

$$0 = h\nu - \phi$$

$$h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

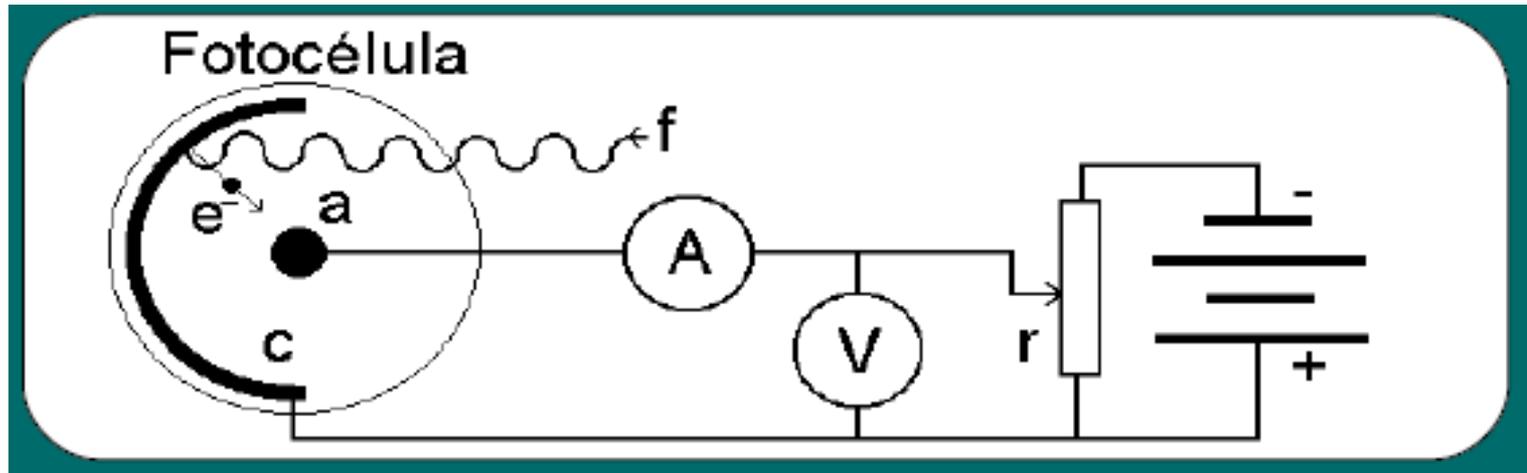
$$\nu_0 = \frac{\phi}{h}$$

□ Os fótons com frequência menores que ν_0 não têm energia suficiente para ejetar elétrons do metal

□ Para a maioria dos metais a função trabalho é da ordem de alguns elétrons-volts

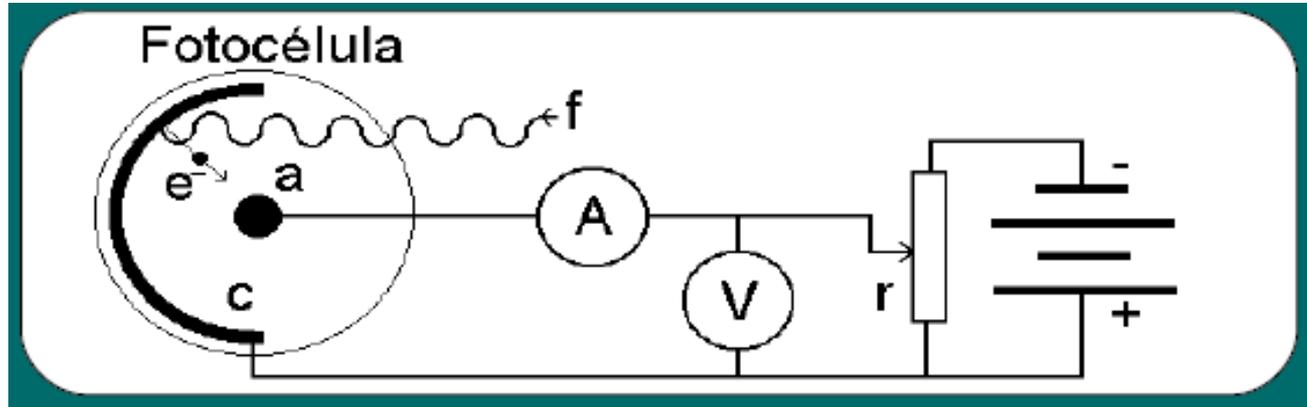
elemento	Φ (ev)
Na	2,28
Cd	4,07
Al	4,08
Pt	6,35
Ni	5,01
Pb	4,14

Arranjo Experimental



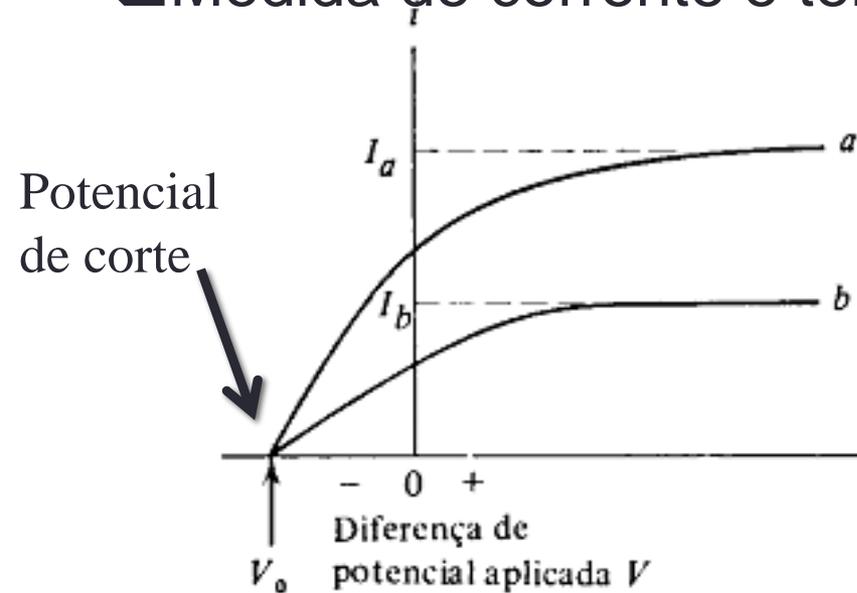
- Pico-amperímetro (A)
- Voltímetro (V)
- Fonte de tensão variável
- Na fotocélula temos:
 - Catodo feito de metal de baixa função trabalho
 - Ânodo com metal de alta função trabalho
- Fonte de luz monocromática (iluminar o catodo), visível, Infravermelho

Arranjo Experimental



❑ Medida de corrente e tensão

❑ Variando a tensão V de freamento é possível determinar a tensão V_0 na qual a corrente fotoelétrica é nula



Quando $V > 0 \Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$

Quando $V < 0 \Rightarrow i \rightarrow 0$

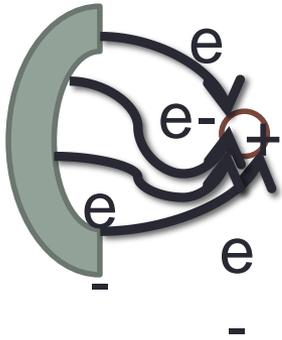
$$I_b < I_a$$

- ❑ Este valor de V_0 independe da intensidade de luz incidente
- ❑ Este valor de V_0 , multiplicado pela carga, mede a energia cinética K_{\max} do mais rápido fotoelétron emitido

$$E_c^{\max} = eV_0$$

Arranjo Experimental

☐ Medida de corrente e tensão

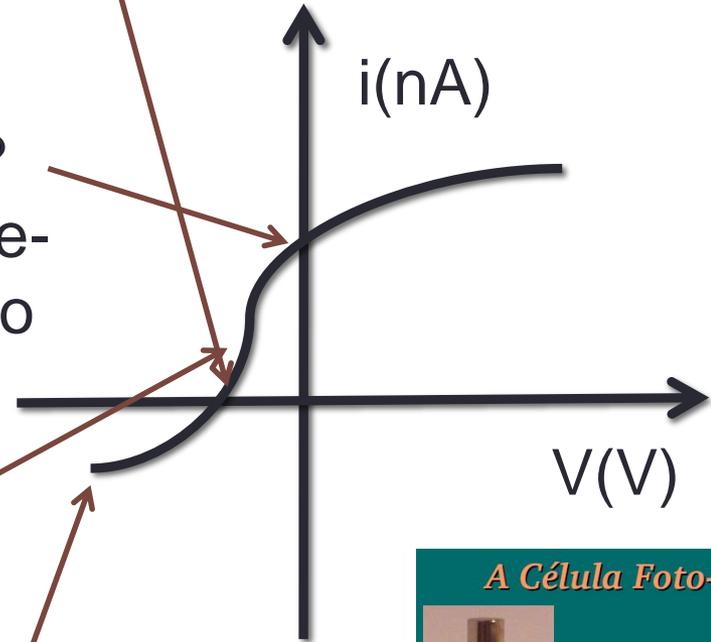


☐ Tensão = 0
Tenho corrente?
Naturalmente os e-
chegam ao ânodo

☐ tensão negativa tenho
freamento dos elétrons até não
ter mais e- do cátodo chegando
no ânodo (V diminui i diminui)

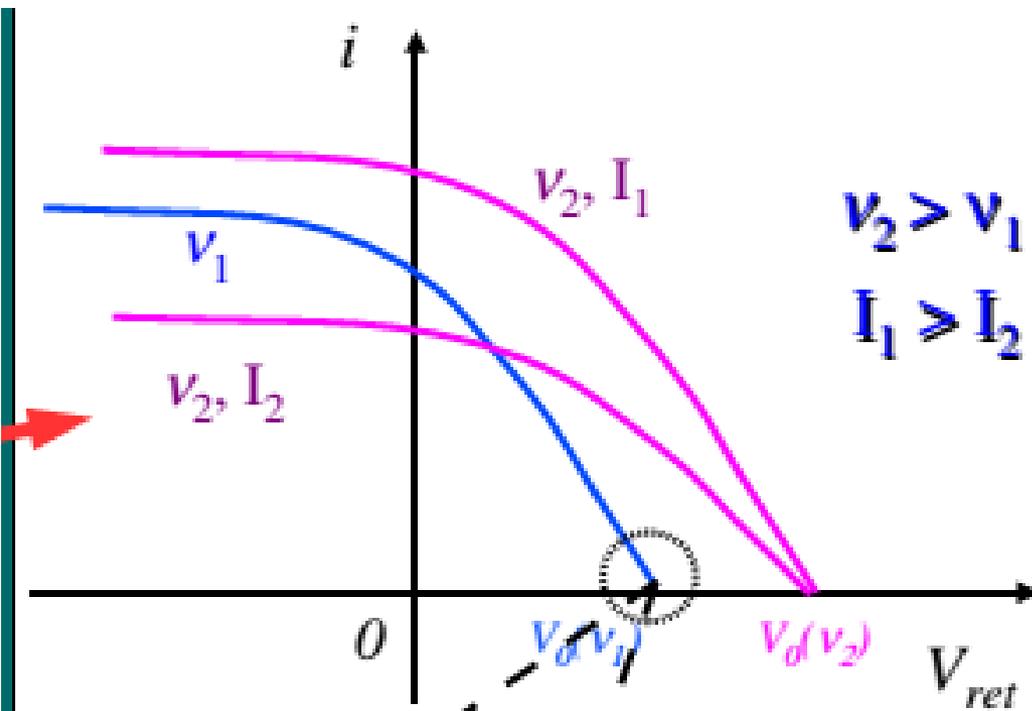
☐ corrente fotoelétrica é negativa devido a
simetria cilíndrica da fotocélula, anodo é
irradiado ao mesmo tempo

☐ a tensão V_0 na qual a
corrente fotoelétrica é nula



Medida $V \times i$ – potencial de corte (V_0)

- Podemos ainda observar que o valor de V_0 independe da intensidade da luz incidente, mas
- Depende da radiação incidente, (λ ou ν)



- O efeito fotoelétrico é um efeito de superfície.
- Este experimento do efeito fotoelétrico mostrou que a radiação eletromagnética comportava-se como corpúsculo.