

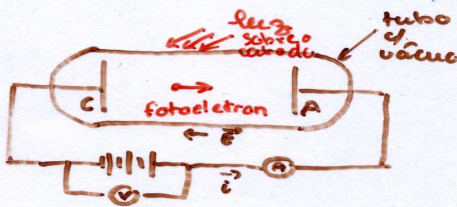
O efeito fotoelétrico (§40-3)

É a emissão de elétrons por uma superfície metálica sobre a qual incide luz, em certas condições.

Os elétrons absorvem energia da radiação incidente, portanto podem superar a atração das cargas positivas do metal e serem liberados da superfície.

Este efeito foi descoberto (acidentalmente) por Hertz em 1887 quando estudava as ondas eletromagnéticas.

Um esquema de experiência para estudar este efeito é o seguinte:

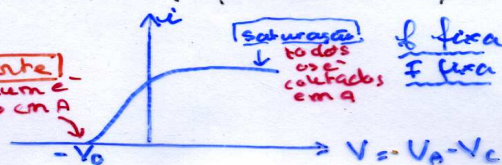


Existe uma diferença de potencial entre o catodo C e o anodo A. Na ausência de luz, não tem corrente. Com luz, pode haver corrente.

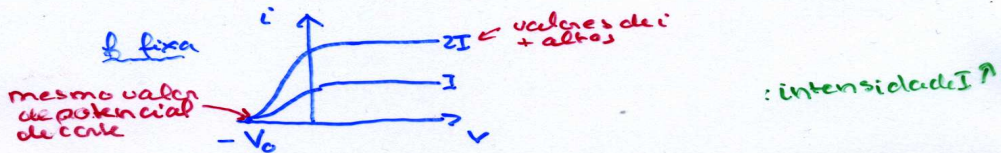
As características principais do efeito fotoelétrico são as seguintes:

- A corrente atinge um valor de saturação para V grandes positivas (= todos os elétrons emitidos pelo catodo são coletados pelo anodo) e a corrente vai para zero se V vai para $-V_0$ ($= V$ negativo significa que os elétrons emitidos são freados pois E aponta de C para A; quando $V = -V_0$, nenhum elétron atinge A).

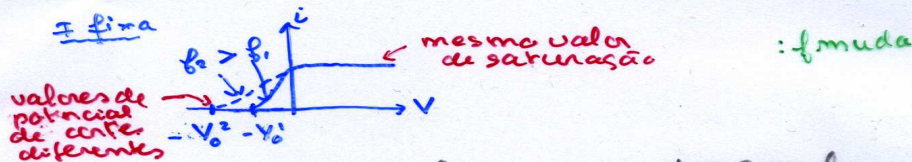
Potencial de corte: nenhum e coletado em A



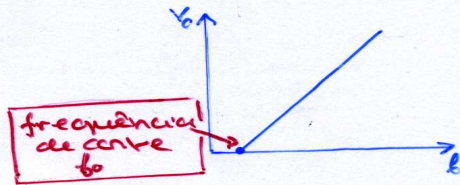
② Para uma frequência f da luz fixa
 a intensidade I da luz: pode-se aumentar
 a corrente fotoelétrica (= mais elétrons podem ser arrancados
 dec.) mas o valor de corte $-V_0$ não muda.



③ Para uma intensidade I da luz fixa
 pode-se mudar a frequência. A corrente foto-
 elétrica atinge o mesmo valor de saturação
 mas o valor de corte muda.



④ De fato V_0 varia linearmente com f
 e abaixo de um certo valor de f , chamado
 frequência de corte, nenhum elétron é emitido
 : potencial de corte vs. frequência da luz



f_0 depende
 do material
 (em geral -
 3 a 4 eV UV!)

Quando $V_p - V_c = -V_0$ os elétrons de energia cinética máxima $K_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2$ possuem energia cinética nula ^{chegando ao ânodo}. Usando o teorema do Trabalho-energia:

$$W = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

↑
trabalho de c.a.a. ⇒ $K_{max} = eV_0$

Por outro lado, K_{max} corresponde à energia E fornecida pela onda menos o trabalho ϕ para extrair o elétron: $K_{max} = E - \phi$

assim:

$$K_{max} = eV_0 = E - \phi$$

com ϕ função de trabalho (depende do material) não de f ou λ

Teoria ondulatória (clássica)

Tem vários problemas:

(i) Problema da intensidade:
se $I \uparrow$, a energia $E \uparrow$ assim $K_{max} \uparrow$?
mas experimentalmente $K_{max} = eV_0$, não depende de I (cf. 2)

(ii) Problema da frequência de corte:
classicamente não há explicações para sua existência (cf. 4) 4

(iii) Problema do tempo de emissão:
classicamente espera-se que os elétrons precisem tempo para absorver energia da radiação incidente antes de ter energia cinética suficiente para escapar do metal. Experimentalmente a emissão é instantânea ($\leq 10^{-9}$ s).]

Explicação quântica de Einstein

(1905, mesmo ano que a relatividade restrita; cinco anos após a hipótese de Planck)

A luz de frequência f pode ser considerada como uma corrente de pacotes de energia, os fótons, cada um com energia:

$$E_f = hf \quad \text{60}$$

Um fóton transfere toda sua energia hf a um elétron no efeito fotoelétrico. Assim este ganha uma energia cinética:

$$K_{\max} = hf - \phi \\ = eV_0$$

Isso resolve os problemas anteriores:

- (i) K_{\max} não depende de I
- (ii) $K_{\max} = 0$ se $f = f_0 \equiv \phi/h$ 60
Se $f < f_0$, os fótons não tem energia suficiente para arrancar os elétrons
- (iii) Mesmo que haja poucos fótons (i.e. I baixa), um elétron que absorve $hf \geq \phi$ pode ser emitido "sem esperar".]

Obs. 1: muitas vezes é útil usar o 5 eV e não o J :
 $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Obs. 2: os fótons tem massa de repouso nula, assim $E = \sqrt{(m_0 c)^2 + (pc)^2} = pc \Rightarrow$ seu momento $p = \frac{hf}{c}$. A direção e o sentido do momento linear do fóton são os da onda eletromagnética.

Exemplos:

Realizando uma experiência de efeito fotoelétrico com uma luz de determinada frequência, você verifica que é necessário uma diferença de potencial invertida de 1,25 V para anular a corrente. Determine a) a energia cinética máxima b) a velocidade máxima dos fotoelétrons

$$a) K_{\max} = eV_0 = (1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(1,25 \text{ V}) = 2,00 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ (\text{ou } 1,25 \text{ eV})$$

$$b) v_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 2,00 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 6,63 \cdot 10^5 \text{ m/s} \\ (\ll c)$$

Exemplo 2:

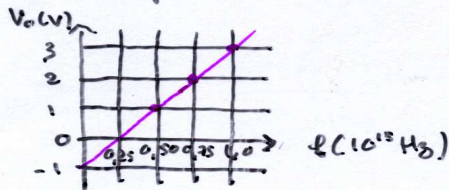
Para um certo material do catodo de uma experiência do efeito fotoelétrico, verifica-se um potencial de corte 1,0 V para $\lambda = 600 \text{ nm}$

2,0 V 400 nm
3,0 V 300 nm.

Determine a função trabalho e o valor de h .

$$V_0 = \frac{h}{e} f - \frac{\phi}{e} \Rightarrow \text{inclinação } = \frac{h}{e} \text{ e interseção com o eixo } = -\frac{\phi}{e}$$

Usando $f = c/\lambda$:



deix:

$$-\frac{\phi}{e} = -1,0 \text{ V} \Rightarrow \phi = 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\frac{h}{e} = \frac{\Delta V_0}{\Delta f} = \frac{3 - (-1)}{4,0 \cdot 10^{15} - 0} = 4,0 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow h = (4,0 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J}}{\text{s}})(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \\ = 6,4 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

não muito longe de $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Aplicações:

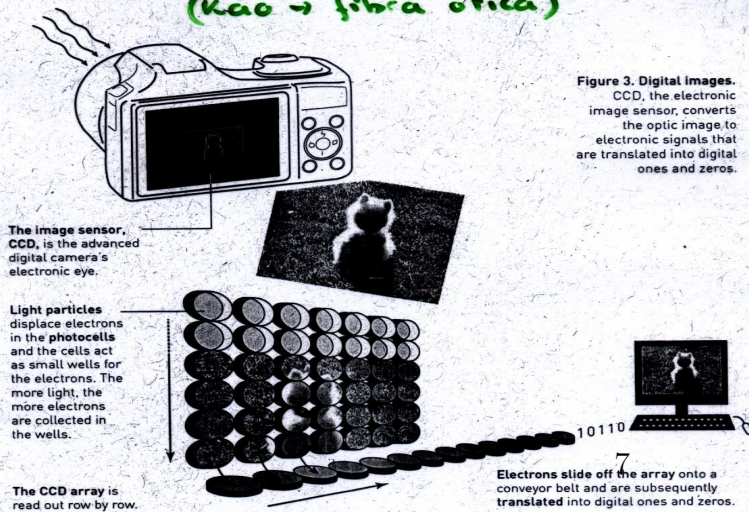
O efeito fotoelétrico foi muito importante na física, para estabelecer o caráter corpuscular da luz. Existe também muitas aplicações

- células solares (e⁻ transferidas)
- sensores de movimento (ex. alarme)
- visão noturna (af. lúna)
- CCD (charge-coupled devices) → NOBEL 2009 usados em máquinas fotográficas digitais medicina, astronomia, ...

= chip capturando fotoelétrons em vários pontos.

Em cada ponto, o número de fotoelétrons é proporcional a I. isto é digitalizado. → alta sensibilidade

NOBEL 2009: Boyle & Smith → CCD
(Kao → fibra ótica)



2010

Questão 4

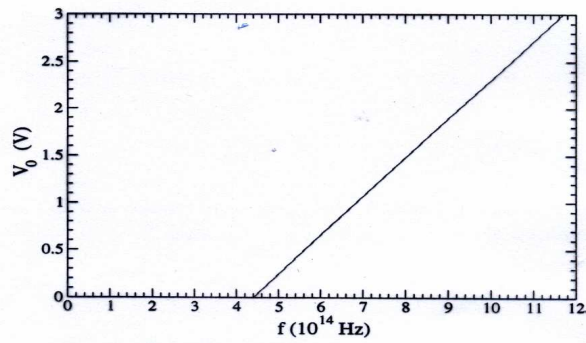
Numa célula fotoelétrica, luz de intensidade 10 watts/m^2 incide normalmente sobre o catodo com área de 1 cm^2 e função de trabalho de 2 eV . A luz possui um comprimento de onda de 500 nm no vácuo. Calcule:

- (a) (1,0 ponto) o número de fótons por segundo que incide no alvo;
- (b) (1,0 ponto) a corrente fotoelétrica máxima que pode ser obtida nesta célula sabendo-se que apenas 5% dos fótons incidentes são absorvidos pelos elétrons;
- (c) (0,5 ponto) o potencial de corte para frear os elétrons mais energéticos emitidos.

Questão 4

No efeito fotoelétrico, elétrons são arrancados da superfície de um material fazendo-se incidir luz sobre esta superfície. A energia cinética máxima destes elétrons, E_{cin}^{max} , pode ser determinada freando-os através de uma diferença de potencial V_0 .

- (a) (1,0 ponto) Calcule E_{cin}^{max} em termos de V_0 e da carga do elétron, q_e .
- (b) (1,5 ponto) Usando o gráfico abaixo de V_0 em função da frequência da luz incidente (medida em unidades de 10^{14} Hz), para o sódio, calcule a função de trabalho do sódio e o comprimento de onda máximo para haver efeito fotoelétrico. Considere $h = 4,1 \times 10^{-15}$ eV.s.



Questão 4

Nos itens abaixo, considere h e c dados.

- (a) (1,0 ponto) A função de trabalho de um metal é ϕ . Calcule o maior comprimento de onda λ_0 da radiação que ao incidir sobre este metal ejeta elétrons da sua superfície.
- (b) (1,0 ponto) Deseja-se que o processo do item (a) seja efetuado com radiação proveniente de uma esfera aquecida a uma temperatura T (em kelvins). Suponha que a esfera irradia como um corpo negro e que o comprimento de onda λ_m para o qual a emitância espectral (potência irradiada por unidade de área por unidade de comprimento de onda) é máxima seja igual a λ_0 , calculado no item (a). Determine T em termos de ϕ .
- (c) (1,0 ponto) Se a esfera tem raio R quantos fótons com comprimento de onda no intervalo $[\lambda_0, \lambda_0 + \Delta\lambda]$ com $\Delta\lambda/\lambda_0 \ll 1$ são emitidos por segundo, nas condições do item (b)?