

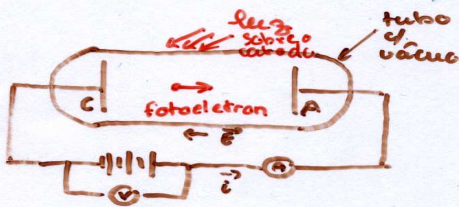
## O efeito fotoelétrico (§40-3)

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:

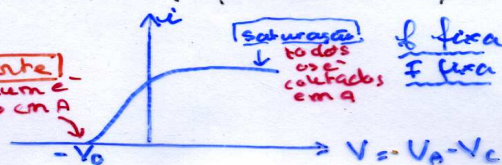


Existe uma diferença de potencial entre o catodo C e o anodo A. Na ausência de luz, não tem corrente. Com luz, pode haver corrente.

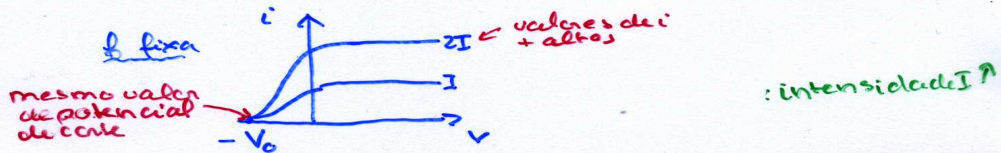
As características principais do efeito fotoelétrico são as seguintes:

- 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  $\vec{E}$  aponta de C para A; quando  $V = -V_0$ , nenhum elétron atinge A).

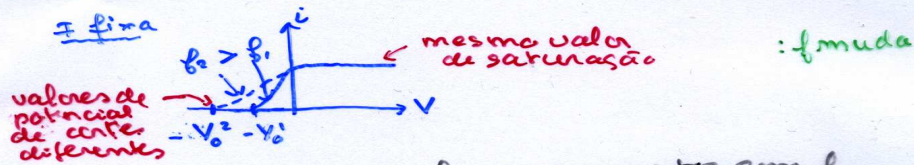
Potencial de corte: nenhum é coletado em A



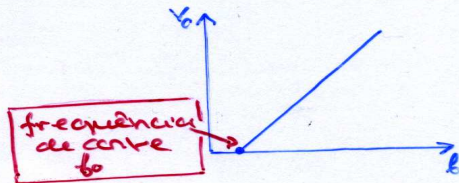
② Para uma frequência  $f$  da luz fixa  
 a intensidade  $I$  da luz: pode-se aumentar  
 A corrente fotoelétrica aumenta (= mais elétrons podem ser arrancados:  
 dec.) mas o valor de corte  $-V_0$  não muda.



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 -  
 3ª faixa a UV!)

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

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

$\uparrow$  trabalho de c.a.  $\Rightarrow K_{max} = eV_0$

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

assim:

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

com  $\phi$  função de trabalho (depende do material) não de  $f$  ou  $\lambda$

### 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 explicação 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:

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

Isso resolve os problemas anteriores:

- (i)  $K_{\text{max}}$  não depende de  $I$
- (ii)  $K_{\text{max}} = 0$  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  $5 \text{ eV}$  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:

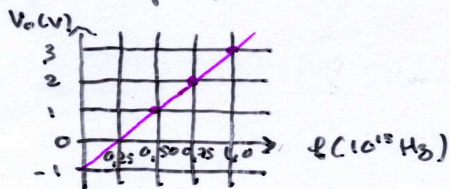
Para um certo material do catodo de uma experiência do efeito fotoelétrico, verifica-se um potencial de corte 1,0 V para  $\lambda = 600 \text{ nm}$

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

Determine a função trabalho e o valor de  $h$ .

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

Usando  $f = c/\lambda$ :



deix:

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

$$\frac{h}{e} = \frac{\Delta V_0}{\Delta f} = \frac{3 - (-1)}{1,00 \cdot 10^{15} - 0} = 4,0 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{C}}$$

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

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<sup>-</sup> transferidas)
- sensores de movimento (ex. alarme)
- visão noturna (esp. 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)

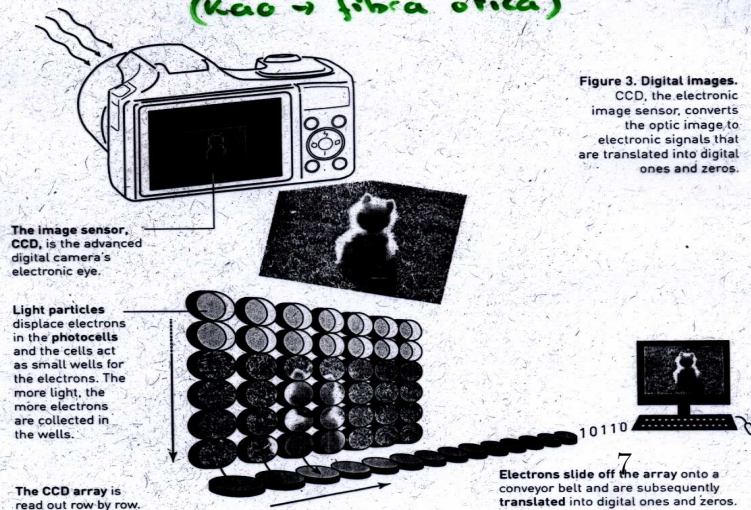


Figure 3. Digital Images. CCD, the electronic image sensor, converts the optic image to electronic signals that are translated into digital ones and zeros.

Photo: A.C. Reinhardt

2010

**Questão 4**

Numa célula fotoelétrica, luz de intensidade  $10 \text{ watts/m}^2$  incide normalmente sobre o catodo com área de  $1 \text{ cm}^2$  e função de trabalho de  $2 \text{ eV}$ . A luz possui um comprimento de onda de  $500 \text{ nm}$  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.

