

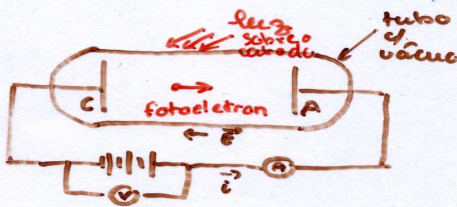
## O efeito fotoelétrico (§40-3)

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:

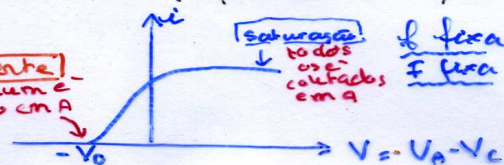


Existe uma diferença de potencial entre o catodo C e o anodo A. Na ausência de luz, não tem corrente. Com luz, pode haver corrente.

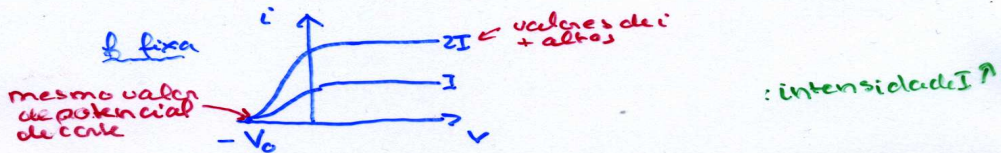
As características principais do efeito fotoelétrico são as seguintes:

- 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).

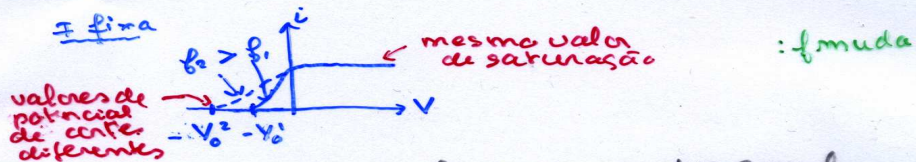
Potencial de corte: nenhum é coletado em A



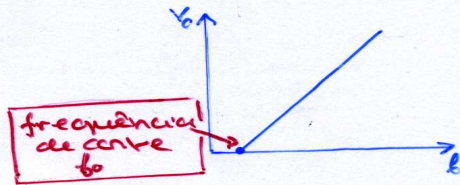
② Para uma frequência  $f$  da luz fixa  
 a intensidade  $I$  da luz: pode-se aumentar  
 a corrente fotoelétrica (= mais elétrons podem ser arrancados  
 dec.) mas o valor de corte  $-V_0$  não muda.



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 -> raio para 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 <sup>chegando ao ânodo</sup>. Usando o teorema do Trabalho-energia:

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

↑  
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:

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

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  $5 \text{ eV}$  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

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

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

Exemplo 2:

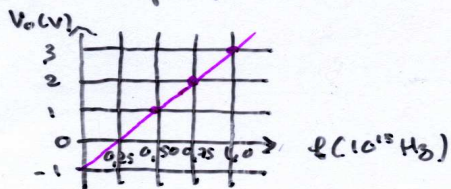
Para um certo material do catodo de uma experiência do efeito fotoelétrico, verifica-se um potencial de corte 1,0 V para  $\lambda = 600 \text{ nm}$

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  $f = c/\lambda$ :



daí:

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

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

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

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 (ex. lâmp)
- 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)

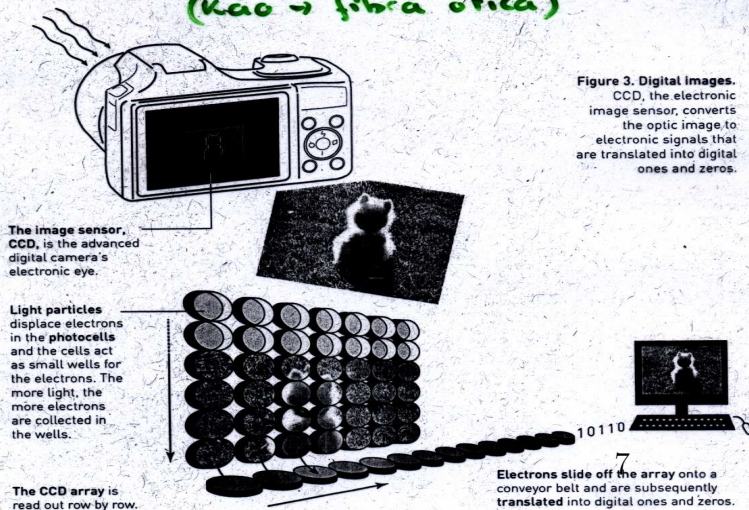


Figure 3. Digital Images. CCD, the electronic image sensor, converts the optic image to electronic signals that are translated into digital ones and zeros.

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:

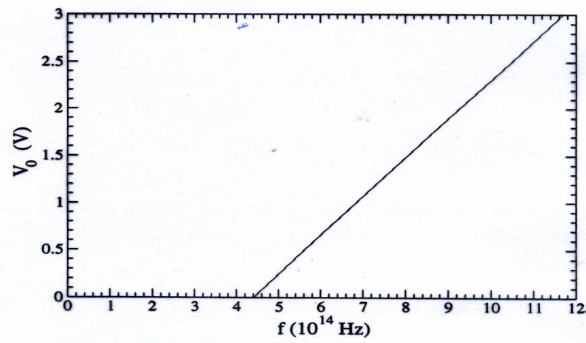
- (a) (1,0 ponto) o número de fótons por segundo que incide no alvo;
- (b) (1,0 ponto) a corrente fotoelétrica máxima que pode ser obtida nesta célula sabendo-se que apenas 5% dos fótons incidentes são absorvidos pelos elétrons;
- (c) (0,5 ponto) o potencial de corte para frear os elétrons mais energéticos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





**Questão 4**

Nos itens abaixo, considere  $h$  e  $c$  dados.

- (a) (1,0 ponto) A função de trabalho de um metal é  $\phi$ . Calcule o maior comprimento de onda  $\lambda_0$  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  $\lambda_m$  para o qual a emitância espectral (potência irradiada por unidade de área por unidade de comprimento de onda) é máxima seja igual a  $\lambda_0$ , calculado no item (a). Determine  $T$  em termos de  $\phi$ .
- (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)?

**Questão 4**

- (I) (1,0 ponto) A superfície do Sol está a uma temperatura de 6000 K, enquanto a superfície da supergigante vermelha Betelgeuse está a uma temperatura de 3000 K. Sabendo que a potência irradiada por Betelgeuse é 40 000 vezes a potência irradiada pelo Sol, determine a razão entre o raio de Betelgeuse e o raio do Sol. Admita que as duas estrelas possam ser tratadas como corpos negros.
- (II) Uma lâmpada de luz ultravioleta é coberta com um filtro que permite apenas a passagem de luz de comprimento de onda igual a 400 nm. Quando a luz transmitida incide sobre uma superfície metálica, observa-se um fluxo de elétrons emergindo do metal.
- (a) (1,0 ponto) Se a intensidade da luz que atinge a superfície é dobrada,
1. mais elétrons são emitidos por unidade de tempo.
  2. os elétrons emitidos têm maior energia.
  3. as afirmativas 1 e 2 são falsas.
  4. as afirmativas 1 e 2 são verdadeiras.

**Justifique** sua resposta. Não basta indicar a alternativa correta.

- (b) (1,0 ponto) O filtro é substituído por outro que transmite apenas luz com comprimento de onda de 300 nm e a lâmpada é ajustada para que a intensidade luminosa incidindo sobre a superfície permaneça a mesma que para luz de comprimento de onda de 400 nm. Com a luz de comprimento de onda de 300 nm,
1. mais elétrons são emitidos por unidade de tempo.
  2. os elétrons emitidos têm maior energia.
  3. as afirmativas 1 e 2 são falsas.
  4. as afirmativas 1 e 2 são verdadeiras.

**Justifique** sua resposta. Não basta indicar a alternativa correta.