

## EFEITO FOTO ELÉTRICO

### Introdução

O fenômeno no qual elétrons são emitidos de uma superfície metálica quando incide nesta um feixe de luz é chamado de efeito fotoelétrico, e os elétrons emitidos são chamados fotoelétrons. Este fenômeno foi descoberto por Hertz em 1887, e explicado pela teoria quântica de Einstein em 1905.

As propriedades observadas do efeito fotoelétrico divergem das previsões da teoria ondulatória clássica, onde a radiação eletromagnética se comporta como uma onda no processo de ejeção de fotoelétrons de uma superfície onde ela incide. Nessa teoria ondulatória do efeito fotoelétrico, a energia cinética adquirida pelos elétrons, proveniente da radiação incidente sobre elas, deveria aumentar à medida que aumenta a intensidade da radiação. A experiência mostrou que esta energia cinética máxima dos fotoelétrons independe da intensidade da radiação. Uma segunda divergência reside na existência de uma frequência de corte  $\nu_0$  abaixo da qual nenhum fotoelétron é liberado pelo material. Na teoria ondulatória, a radiação incide de qualquer frequência  $\nu$  deve ter condições de fornecer energia suficiente aos elétrons de modo a facilitar o seu escape do material. Finalmente surge uma terceira divergência baseada na inexistência de atraso mensurável entre o instante em que a radiação começa a iluminar a superfície e o instante em que o primeiro fotoelétron é ejetado.

Foi em 1905 que Einstein formulou sua teoria quântica do efeito fotoelétrico em que explicou completamente todos os pontos não explicados pela Física Clássica. Einstein usou a teoria de Planck (1901) como aspecto fundamental ao afirmar que a radiação eletromagnética é quantizada, isto é, a energia da radiação é dada em forma de pacotes de energia.

$$E = h\nu \quad (1)$$

chamado de “Quantum de energia” (ou fóton) associado à frequência  $\nu$  da radiação e  $h$  é a constante de Planck.

Na teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico, toda a energia do fóton ou quantum de energia é transferida a um único elétron do metal e quando este sai da superfície do metal, terá uma energia cinética  $E_c$  dada por

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = h\nu - e\phi \quad (2)$$

onde o termo  $e\phi$  é a correção da energia necessária para liberar o elétron da superfície metálica.  $\phi$  é chamada de “função trabalho” ou seja, sempre que  $h\nu > e\phi$  será possível a emissão de fotoelétrons da superfície do metal. A função trabalho é característica de cada metal irradiado.

Nesta prática será usada a técnica do “Potencial de retardo” para medir experimentalmente a energia dos fotoelétrons em função da frequência da radiação.

A equação (2) dá uma reta. A função trabalho  $\phi$ , que normalmente não é conhecida, é obtida quando  $h\nu_0 = e\phi$ , onde  $\nu_0$  é a frequência mínima necessária para a liberação de elétrons da superfície metálica, (a frequência de corte).

Experimentalmente o que é medido é o potencial de retardo. Neste caso  $E_c = eV_0$ , então a equação (2) pode ser reescrita como sendo

$$V_0 = (h/e)\nu - \phi \quad (3)$$

Agora  $\phi$  pode ser medido diretamente da experiência ao extrapolar a equação (3) para  $\nu = 0$ . A confirmação experimental da teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico, contida na equação (3), foi feita por Millikan em 1914.

A figura 1 mostra o esquema elétrico para a medida da fotocorrentes usando um eletrômetro sensível  $G$ . A fotocélula é composta de uma superfície limpa do metal que será estudado (cátodo  $K$ ) e um ânodo de platina  $P$ , ambos selados à vácuo. A fotocorrente surge quando a radiação incide sobre o cátodo.

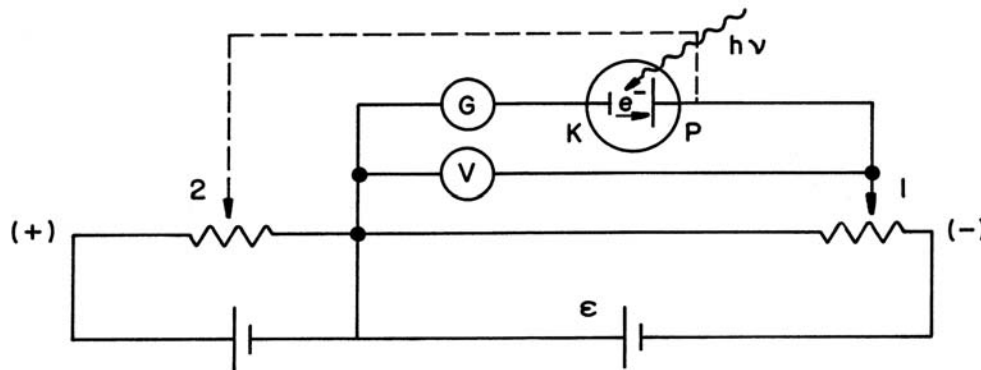


Figura 1: Circuito elétrico para a medida das fotocorrentes. O ânodo  $P$  pode ficar com polaridade negativa (1) ou positiva (2) com respeito ao cátodo  $K$ .

Se um potencial negativo  $V$  é aplicado no ânodo, só os elétrons com energia  $E_c > eV$  atingirão o ânodo, sendo que, para algum potencial  $V_0$  nenhum elétron atingirá o ânodo. Este potencial de retardo  $V_0$  multiplicado pela carga do elétron é igual à energia de emissão dos elétrons mais rápidos. Na prática os elétrons não são emitidos com a mesma energia e portanto, o limiar para  $V_0$  não é abrupto. Além disso, efeitos de carga superficial reduzem ainda mais a definição do limiar.

A figura 2 mostra a curva característica corrente-voltagem da fotocélula para um determinado  $\nu$ .

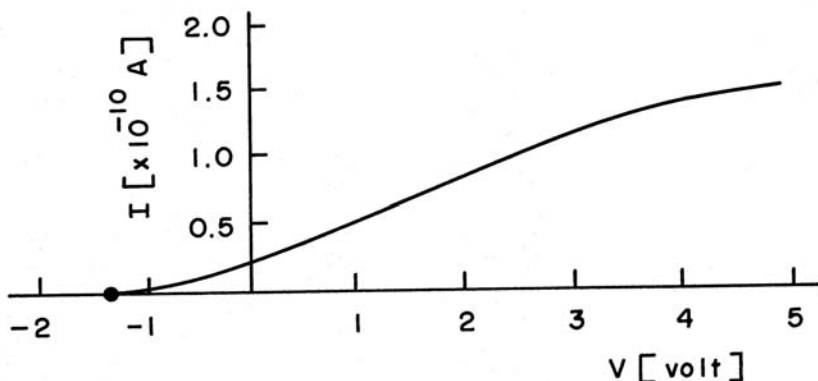


Figura 2: Curva característica corrente-voltagem para uma luz de intensidade  $I$  e frequência  $\nu$ .

Uma observação importante é que o potencial de retardo determinado em (3) não considera um esquema de circuito fechado como mostra a figura 1. Isto é, as considerações tomadas para chegar na eq. (3) foi apenas na forma de circuito aberto. No entanto, é necessário considerar para efeito mensuráveis um circuito fechado em que os elétrons que vão do cátodo ao ânodo “sentem” um potencial diferente daqueles que foi aplicado. Este fenômeno é devido à diferença de potencial de contato que pode ser obtida usando o diagrama da figura 3.  $\phi_c$  e  $\phi_A$  são as funções trabalho do cátodo e do ânodo respectivamente e  $\phi_c \neq \phi_A$  (ver ref. 6).

Se for aplicado um potencial externo  $V'$  entre as junções metálicas, então os elétrons do ânodo estarão a um potencial  $V'$  mais alto que os elétrons do cátodo e as perdas de energia no circuito fechado da figura 3 é zero. Se  $V$  é o potencial sentido pelo elétron, então

$$-e\phi_c + eV + e\phi_A - eV' = 0$$

ou

$$V = V' - (\phi_A - \phi_c) \quad (4)$$

$(\phi_A - \phi_c)$  é a diferença de potencial de contato (dpc) (em geral  $\phi_A > \phi_c$ ) que também é o fator de correção para o potencial  $V'$ .

Combinando as equações 2 e 4 no caso em que a emissão cessa ao aplicar um potencial de retardo  $V_0$ , obtém-se

$$V_0 = V'_0 + (\phi_A - \phi_c) \quad (5)$$

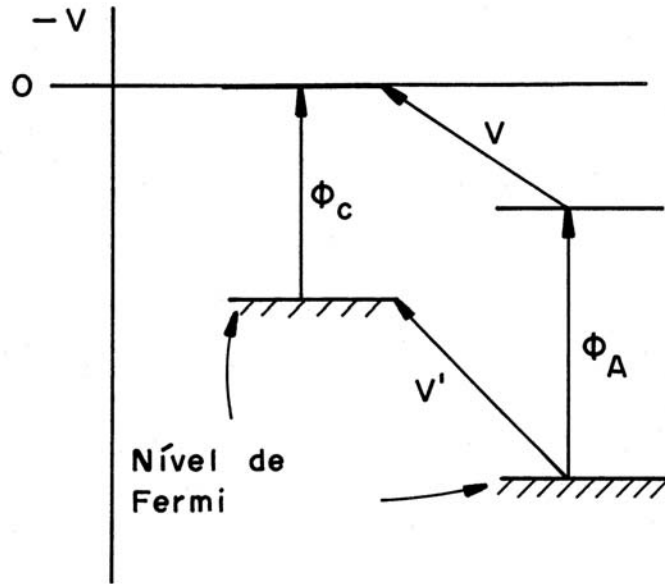


Figura 3: Diagrama dos potenciais do cátodo e do ânodo. As setas indicam a direção em que os elétrons perdem energia.

$$e|V_0| = \frac{1}{2} m v^2 = h\nu - e\phi_c \quad (6)$$

tal que

$$|V_0| = (h/e)\nu - \phi_A \quad (7)$$

Um gráfico do potencial de retardo aplicado  $V'$ , em função de  $\nu$ , sem a correção da diferença de potencial de contato, resulta numa reta de coeficiente angular  $h/e$ , mas com a interseção em  $\nu = 0$  igual a  $\phi_A$  em vez de  $\phi_c$  como previsto na equação 3, (veja também a ref. 6).

Utilizando os dados relativos à absorção de radiação eletromagnética numa superfície, pode-se calcular o valor da constante de Planck  $h$  (veja ref. 4). O valor comumente aceito é  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ joules} - \text{s}$ .

## EXPERIÊNCIA

### Objetivo

O objetivo desta experiência é observar o efeito fotoelétrico devido à incidência de luz de um determinado comprimento de onda sobre uma superfície (cátodo) de potássio. A partir desses dados são determinados os valores da razão ( $h/e$ ), a função trabalho, e a velocidade máxima com que os elétrons saem do metal.

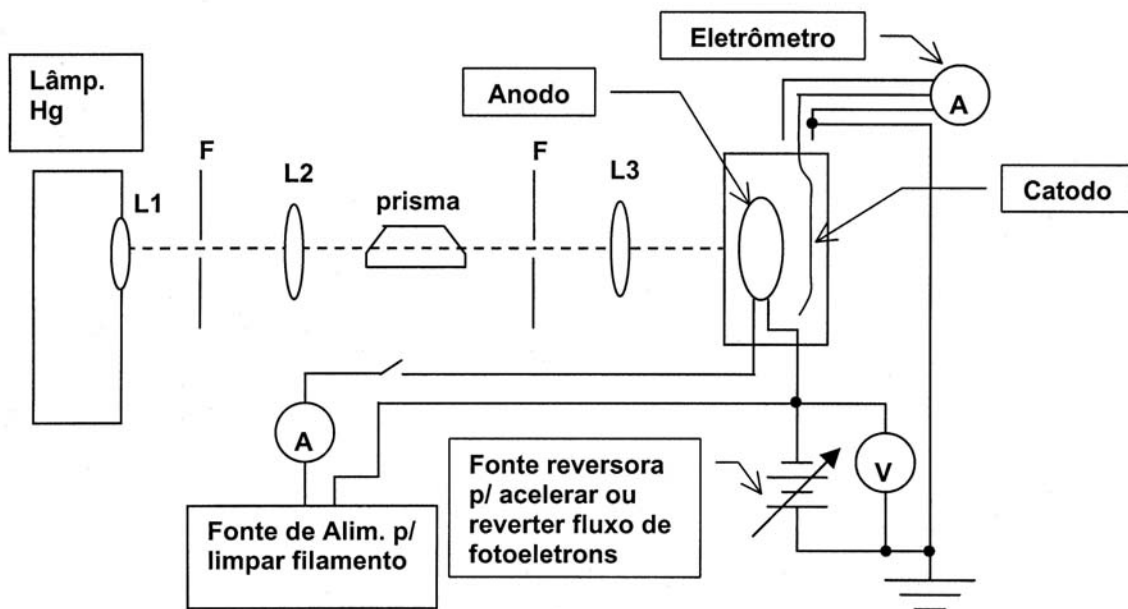


Figura 4: Montagem para medidas do efeito fotoelétrico.

### Equipamento utilizado

- 1- fotocélula
- 2- lâmpada de mercúrio
- 3- fonte de alimentação para lâmpada, tomada da rede elétrica
- 4- prisma de visão direta
- 5- fendas reguláveis ou fixas
- 6- lentes
- 7- eletrômetro Keithley 610C
- 8- fonte de tensão DC regulável
- 9- voltímetro DC
- 10- trilhos, cabo coaxial, fios de conexão

A célula fotoelétrica usada neste laboratório consiste de um cátodo de potássio (polido) e um ânodo de fio de platina em forma de anel. O sistema ótico que deve ser montado é mostrado, esquematicamente, na figura 4.

O esquema do circuito elétrico para a fotocélula é mostrado na figura 1 e também na figura 4 e como a corrente medida é muito pequena, recomenda-se usar um cabo coaxial para ligar a fotocélula ao eletrômetro. A lâmpada de mercúrio deve ser coberta para evitar que a luz branca espalhada incida sobre a fotocélula.

Uma vez feito o alinhamento da figura 4 deve-se verificar se a luz (tênue) incide sobre a superfície fotossensível da fotocélula, observe que a posição da fotocélula pode ser deslocada horizontalmente e perpendicular ao feixe de luz, é importante que a luz passe pela fenda que precede a fotocélula e incida sobre a superfície de potássio. Esta superfície quase plana de potássio é a parte fotossensível e encontra-se ligada a um contato metálico, na forma de chapéu na parte superior da fotocélula servindo de contato elétrico (catodo), o qual deve estar limpo antes de realizar a experiência. O mesmo deve ser feito com o eletrodo (anodo) de platina que deve ser eventualmente limpo de quaisquer traços de potássio (ver apêndice A).

Com as montagens das figuras 1 e 4 em funcionamento, poderão ser realizadas as medidas da corrente  $I$  (normalizada em relação à intensidade da linha amarela do espectro de Hg) em função da voltagem aplicada  $V'$  (tanto para  $V' > 0$  e  $V' < 0$ ) para cada uma das linhas espectrais da lâmpada de Hg indicadas na tabela I.

Cor	$\lambda$ (nm)	Energia (eV)	$\nu(10^{14} S^{-1})$
amarelo	577,0	2,149	5,199
	579,0	2,142	5,181
verde	546,1	2,271	5,493
azul-verde	491,6	2,522	6,103
azul	435,8	2,845	6,884
	434,3	2,855	6,908
	433,9	2,858	6,914
violeta	404,7	3,064	7,413

Tabela I: Cores e respectivos valores de comprimentos de onda e energia e frequência de algumas linhas do espectro de Hg.

Para  $V' < 0$  recomenda-se fazer as medidas em intervalos de 0,1 volt o que possibilitará uma melhor determinação do potencial de retardo  $V'_0$ , este pode ser determinado de duas maneiras:<sup>(2)</sup>

- Determinando o ponto de interseção das tangentes dos ramos extremos da curva  $I \times V$  para cada comprimento de onda.
  - Por interpolação, avaliando a voltagem quando a corrente começa a decrescer.
1. Com os resultados de  $V'_0$  para cada comprimento de onda, faça um gráfico, a partir do qual, será possível determinar a relação  $(h/e)$ . Indique o erro experimental. Compare os resultados de ambos os métodos acima. Discuta seus resultados.
  2. Calcule a velocidade máxima com que os elétrons saem do metal, para cada comprimento de onda. Discuta.
  3. Da curva de saturação pode-se determinar  $\phi_A$ . Compare os valores das funções trabalho  $\phi_A$  e  $\phi_c$  com os valores já conhecidos  $\phi_A = 5,29V$  e  $\phi_c = 2,15V$ .

### Perguntas

1. Discuta os aspectos do efeito fotoelétrico que a Física Clássica não consegue explicar e que foram resolvidas com a teoria quântica de Einstein.
2. Sugira um método para determinar a carga específica dos fotoelétrons (veja ref. 5).
3. Porque os elétrons saem do metal com velocidade menor que a sua velocidade máxima?
4. Porque se tem uma corrente negativa com o potencial de retardo?
5. Discuta algumas aplicações práticas da fotocélula.
6. A Espectroscopia fotoeletrônica envolve a medida da distribuição da energia cinética dos fotoelétrons emitidos por uma amostra, a qual é irradiada com fótons de alta energia (raios-X ou uma fonte ultravioleta, He I de 584 Å). Faça um diagrama esquemático de um espectrômetro fotoeletrônico explicando brevemente seu funcionamento, e discuta o espectro fotoeletrônico de um sólido ou uma molécula a sua escolha (veja ref. 7 e 8).

### Nota: Cuidados com a fotocélula

1. Evite a incidência de luz excessiva sobre a fotocélula. Quando esta não estiver em uso, mantenha-a no escuro.
2. Para limpar o eletrodo de platina, desconecte a fotocélula e utilize o circuito mostrado na figura 4 (Peça orientação ao técnico se necessário).

Ligue a fonte e ajuste a corrente até um máximo de 1A durante 1 minuto. Desta maneira são removidos os átomos de potássio ou excessos de carga na superfície do fio de platina.

### Referências

1. Textos de Física Moderna (Biblioteca IFSC)
2. A. C. Melissinos. Experiments in modern physics. Academic Press, New York (1966).
3. H. Semat. Introduction to atomic and nuclear physics, Rinehart and Co., Inc. New York (1958).
4. R. M. Eisberg, Resnick. Física Quântica (Biblioteca IFSC 530.12/E 36).  
R. M. Eisberg, L. S. Lerner. Física, fundamentos e aplicações. Volume 4 seção 30.2 (Biblioteca IFSC 530.071/E 36 f).
5. C. J. Smith, A. R. Stokes. The principles of atomic and nuclear physics. Pág. 212 e 221 (Biblioteca IFSC 539.14/5644).
6. J. Rudnick, D. S. Tannhauser; Amer. J. Phys. 44 (8) 796 (1976).
7. T. L. James; Journal of Chemical Education 48 (11) 712 (1971).  
H. Book e Ph. D. Mollère; J. Chem. Educ. 51 (8) 506 (1974).
8. Introdução à Física do Estado Sólido; C. Kittel (Biblioteca IFSC 530.41/K 62).