

Laboratório de Física Moderna

EXPERIÊNCIAS HISTÓRICAS SOBRE QUANTIZAÇÃO NA FÍSICA

EFEITO FOTOELÉTRICO (Experiência A.3)

PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

A experiência histórica sobre quantização, notabilizada no estudos de Einstein sobre esse fenômeno, é reproduzida nesta prática. O caráter quântico da radiação eletromagnética é investigado através do efeito fotoelétrico, através do uso de uma fotocélula com catodo de PbS. A fotocélula é iluminada por radiações monocromáticas com diferentes comprimentos de onda provenientes de uma lâmpada de mercúrio, selecionados via filtros de interferência. A constante de Planck e a função trabalho característica da fotocélula são, então, obtidas utilizando a teoria de Einstein para interpretação quântica do efeito fotoelétrico.

TÓPICOS RELACIONADOS

Efeito fotoelétrico, modelo corpuscular da radiação, dualidade onda-partícula, fótons, filtros de interferência, rede de difração, função trabalho, potencial de contato, modelo de Einstein, constante de Planck, quanta de energia, colisões entre fótons e elétrons, energia necessária para ejeção de elétrons de uma superfície de sólido metálico, semi-metálico ou semicondutor, corrente fotoelétrica.

EQUIPAMENTO

Fotocélula com fotocátodo de sulfeto de chumbo (PbS), montada em suporte com janela de entrada contendo obturador. Amplificador de alta impedância de entrada ($> 10^{13} \Omega$) e ganho variável ($\times 1$ a $\times 10^5$), com controle de *offset* de entrada e constante de tempo. Multímetro de alta precisão, 4½ dígitos. Fonte de emissão óptica com lâmpada espectral de baixo vapor de mercúrio (Hg). Fonte de tensão de 220 Vac para alimentação da lâmpada espectral. Conjunto de 20 filtros ópticos de interferência de alta qualidade, na faixa de comprimento de onda de 300 a 800 nm. Cabos coaxiais e resistores de terminação de 50 Ω .

TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Iluminar a fotocélula com radiações monocromáticas de diferentes comprimentos de onda, obtidas com uso de filtros óticos.
2. Medir a tensão limite, ou potencial de corte, atingida na fotocélula, com auxílio do amplificador e do multímetro digital.
3. Determinar a constante de Planck e a função trabalho característica da fotocélula.

PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

1. A montagem do experimento utilizando filtros óticos para separação das raias monocromáticas da lâmpada de Hg encontra-se indicada na Fig. 1.
2. Adapte os filtros de interferência ou de absorção à janela de entrada da fotocélula ou à saída da

lâmpada. Anote as especificações de cada filtro para determinação do comprimento de onda da radiação monocromática que o atravessa.



Fig. 1: Ilustração da montagem experimental empregando filtros óticos.

3. As medidas de tensão limite (V_L) são efetuadas diretamente no multímetro conectado à saída do amplificador de medição, estando este conectado à fotocélula. O amplificador deve ser ajustado com as seguintes configurações: (i) modo de operação como eletrômetro; (ii) impedância de entrada $> 10^{13} \Omega$; (iii) amplificação = 10^0 ; e (iv) constante de tempo = 0. O multímetro digital deve ser colocado na função de voltímetro e inicialmente posicionado no fundo de escala de 2 Vdc.
4. Antes de cada série de medidas, onde você percorrerá toda a sequência de filtros disponível no laboratório, descarregue o capacitor conectado à entrada do amplificador de medição pressionando o botão indicado com "0" (botão branco, o primeiro à esquerda no amplificador), tomando o cuidado de manter a janela de abertura da fotocélula fechada. Mantendo esse botão pressionado, verifique o ajuste de zero do amplificador observando a leitura do voltímetro e faça o ajuste adequado no botão central para zerar a leitura do voltímetro.
5. Com o filtro apropriadamente posicionado, abra a janela de abertura da fotocélula, desconecte o terminador de 50Ω e aguarde a leitura do voltímetro atingir um valor estável (*isso requer de 1 a 1½ minuto*). Registre essa leitura e feche a janela. Note que são três tipos de filtros diferentes, cada tipo requerendo um cuidadoso processo de posicionamento na janela da fotocélula. Evite ao máximo qualquer possibilidade de os filtros caírem no chão.
6. Antes de trocar o filtro, reconecte o resistor terminador, pois essa conexão descarregará quase que instantaneamente a fotocélula, de modo a não prejudicar a próxima leitura. Troque de filtro e repita os procedimentos acima para o conjunto de filtros disponíveis. Mantenha o padrão de espera.
7. Repita a sequência de medidas acima no mínimo mais duas vezes, sendo o ideal se fazer um total de cinco séries, reposicionando cada filtro e procurando não alterar a distância entre a lâmpada e a fotocélula, de modo a estimar a incerteza em V_L .

CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. Evite a incidência de luz excessiva sobre a fotocélula; quando não estiver em uso, mantenha-a com a janela fechada.
2. Manipule com cuidado a fotocélula e os filtros óticos, dada a sua fragilidade, e jamais toque nas superfícies transparentes dos filtros. Cuidado especial com os filtros de formato redondo, que não se fixam perfeitamente na saída de luz da lâmpada espectral, pois podem cair e rolar para o chão.
3. Evite olhar diretamente para a lâmpada espectral acesa, o que pode causar danos permanentes ao sistema visual do observador devido à presença de radiação ultravioleta no espectro da lâmpada de Hg, pois esse átomo tem uma emissão de comprimento de onda 366 nm que corresponde a um pico de absorção do olho humano.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. A fotocélula é constituída por um catodo de PbS. Quando iluminada por luz monocromática de energia suficiente, elétrons são ejetados do fotocatodo e coletados no anodo (não iluminado).
2. O modelo de Einstein para explicação quântica do efeito fotoelétrico prevê a seguinte relação:

$$e V_L = K_{\text{máx}} = h \nu - \phi . \quad (1)$$

- Na expressão acima, e é a carga eletrônica, V_L a tensão limite estabelecida entre o catodo e o anodo (muitas vezes chamada de *potencial de corte*), $K_{\text{máx}}$ a energia cinética máxima dos fotoelétrons ejetados, h a importante, conceitualmente falando, constante de Planck, ν a frequência da radiação monocromática empregada e ϕ a função trabalho associada à fotocélula.
3. Diferentemente das montagens clássicas descritas em muitos livros-textos (ver refs. 1–3), na montagem empregada em laboratório a tensão V_L é medida sem o monitoramento da corrente fotoelétrica. Os elétrons ejetados no catodo alcançam o anodo e o carregam negativamente. A diferença de potencial elétrico entre o catodo e o anodo aumenta então até que seja estabelecido o valor limite V_L , o qual corresponde à condição de que a barreira de energia potencial a ser vencida pelos elétrons seja igual à máxima energia cinética com que eles são ejetados do fotocatodo, e daí em diante a tensão do anodo relativa ao catodo não se altera mais.
 4. O par catodo-anodo representa assim uma capacitância cuja ddp final corresponde ao valor da tensão limite desejada. Essa ddp é medida através de um circuito amplificador com ganho unitário e alta impedância de entrada, de modo que uma corrente elétrica desprezível circula através desse circuito, não afetando apreciavelmente os valores medidos.
 5. É importante ressaltar que a ddp efetivamente percebida pelos elétrons, que vão do catodo para o anodo, não é exatamente igual à medida no voltímetro por causa de um efeito denominado diferença de potencial de contato. Esta está associada ao fato de que o catodo e o anodo são constituí-

- dos de materiais diferentes e portanto possuem diferentes funções trabalho, ou seja, as quantidades de energia necessárias para retirar um elétron do catodo ou do anodo são diferentes (ver refs. 2–4).
6. A função trabalho ϕ obtida em experimentos envolvendo catodos feitos de materiais semicondutores como o PbS depende muito das características de fabricação da fotocélula, não possuindo portanto o significado de um parâmetro físico característico do material como ocorre para os metais. Além disso, o método empregado para determinação de V_L envolvendo o uso do amplificador de medição descrito acima faz com que as medidas de ϕ variem de acordo com as condições experimentais empregadas na prática (principalmente em função da intensidade da radiação detectada na fotocélula). Assim, a determinação da função trabalho será efetuada aqui apenas com o sentido de ilustrar o método geral de análise dos dados oriundos da experiência de efeito fotoelétrico.
 7. A Tab. 1 abaixo mostra as principais linhas espectrais correspondentes à lâmpada de Hg. Para o caso das linhas amarelas ocorre o que se conhece como um *dubleto*, com comprimentos de onda muito próximos, de modo que é conveniente trabalhar com o valor médio de comprimento de onda (centro do *dubleto*).

Tab. 1 - Principais linhas espectrais da lâmpada de Hg.

COR	λ (nm)	INTENSIDADE
vermelho	690,75	fraca
amarelo	578,97	forte
amarelo	576,96	forte
verde	546,07	forte
azul	435,84	média
violeta	404,66	média
ultravioleta	365,48	forte

QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Discuta os aspectos do efeito fotoelétrico não explicados pela Física Clássica e que foram resolvidos pelo modelo quântico proposto por Einstein.
2. Justifique cuidadosamente a Eq. 1, utilizando os argumentos do modelo de Einstein para explicação quântica do efeito fotoelétrico.
3. Explique o significado físico da função trabalho. Por que os elétrons não saem todos do fotocatodo com a mesma energia cinética?
4. Explique como se pode determinar a constante de Planck e a função trabalho utilizando os parâmetros medidos na experiência de efeito fotoelétrico.

PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

1. Organize em tabelas os valores de V_L medidos para os diferentes comprimentos de onda da lâmpada de Hg. Apresente todos os dados medidos em laboratório e os valores médios calculados a

partir dos três ou mais conjuntos de medidas efetuados em cada caso. Não esqueça de incluir as incertezas envolvidas nas medidas de V_L e fornecer os dados com a quantidade apropriada de algarismos significativos.

2. Determine as correspondentes frequências (ν) das raias monocromáticas emitidas pela lâmpada.
3. Faça um gráfico de V_L em função de ν para as medidas efetuadas com os filtros de interferência. Obtenha a partir desse gráfico, por ajuste de regressão linear, os valores da constante de Planck e da função trabalho.
4. Se você preferir, ao invés de trabalhar com as médias dos valores de V_L , faça gráficos independentes para cada sequência de medidas e obtenhas os parâmetros de interesse em cada gráfico individual e depois obtenhas as médias adequadas, determinando incertezas a partir daí.
5. Compare o valor obtido para a constante de Planck com o valor atualmente aceito para essa constante. Calcule o respectivo desvio percentual. Comente as principais fontes de erro envolvidas na experiência.
6. Compare os valores obtidos para a função trabalho (em eV) com os valores comumente encontrados para metais como Na, Li e K (veja as refs. 1-3, por exemplo).

DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. A explicação quântica do efeito fotoelétrico é considerada um dos dois marcos fundamentais para o desenvolvimento da antiga teoria quântica. Discuta quais grandezas envolvidas nessa experiência possuem caráter quantizado e comente sobre outras experiências históricas que evidenciam comportamentos quânticos.
2. Como os resultados da experiência de efeito fotoelétrico *da forma como foi realizada* em laboratório servem para ilustrar o aspecto corpuscular da radiação? Dê exemplos de outras experiências históricas onde esse aspecto é evidenciado.
3. A função trabalho obtida na experiência de efeito fotoelétrico corresponde ao valor característico do material do emissor (catodo) ou do coletor (anodo)? Explique, tendo por base o conceito de ddp de contato (veja as refs. 2-4, por exemplo).
4. Explique claramente o significado físico do conceito *frequência de corte* e por que radiações com frequência mais baixa não são capazes de produzir efeito fotoelétrico. Estime o valor da frequência de corte para a fotocélula empregada nesse experimento.
5. Discuta algumas aplicações práticas para uso com fotocélulas.
6. Explique como funcionam *filtros de interferência*, levando em conta o fenômeno de interferência em películas delgadas. Também explique como operam *redes* (ou *grades*) *de difração*, uma alternativa à separação monocromática de uma fonte de luz branca, escrevendo a expressão matemática que permite a determinação dos comprimentos de onda da luz difratada.

BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4, LTC, 4^a ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.
3. A. C. Melisinos, Experiments in Modern Physics, Academic Press, New York, 1966.
4. J. Rudnick, D. S. Tannhauer, “Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect”, *Am. J. Phys.*, Vol. 44(8), pp. 796-798, 1976.
5. Laboratory Experiments in Physics, 5.1.03, 5.1.04 e 5.1.05, Phywe Systeme GmbH, Göttingen, 1999.
6. J. Goldemberg, Física Geral e Experimental, 3^o Vol, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
7. G. F. Hanne, “What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?”, *Am. J. Phys.*, Vol. 56(8), pp. 696-700, 1988.
8. M. Ference Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, Curso de Física – Eletrônica e Física Moderna, Edgard Blücher Ltda.
9. M. Alonso, E. J. Finn, Fundamental University Physics, Vol. III, Addison-Wesley, Massachusetts, 1971.
10. R. Crane, “The Franck-Hertz experiment: a field-trip through quantization”, documento disponível em <http://www.cce.ufes.br/jair/web/rcrane.rtf>.

Redação: Prof. Jair C. C. Freitas e Rogério N. Suave.

Colaboração: Monitores Danilo Oliveira de Souza e Alan Gomes Bossois.

FOLHA DE DADOS

Efeito fotoelétrico: Montagem com filtros ópticos de interferência.

FILTRO (nm)	TIPO	MEDIDAS da tensão limite V_L (V)				
		#1	#2	#3	#4	#5
350	Normal					
366	ESPECIAL					
375	Normal					
400	Normal					
405	ESPECIAL					
425	Normal					
436	Normal					
450	Normal					
475	Normal					
500	Normal					
525	ESPECIAL					
575	Normal					
580	ESPECIAL					
589	Normal					
600	Normal					
625	Normal					
650	Normal					
675	Normal					
700	Normal					