
O EFEITO FOTOELÉTRICO NO SEGUNDO GRAU VIA MICROCOMPUTADOR¹

Eliane Ângela Veit
Gilberto Thomas
Suzana Gomes Fries
Rolando Axt
Liége Fonseca
Instituto de Física – UFRGS
Porto Alegre – RS

Introdução

Com a finalidade de adquirir experiência no uso de micro-computadores no ensino médio, para posteriormente transferi-la aos alunos do curso de Licenciatura em Física e de, ao mesmo tempo, poder orientar atuais professores daquele nível de ensino para o uso do computador como recurso em suas aulas, um grupo de professores do Departamento de Física da UFRGS está desenvolvendo um projeto para construção de “software” educacional na área de Física Moderna.

Essa área foi escolhida porque, de um modo geral, é omitida da programação curricular, prejudicando assim os estudantes; também por não possuir uma tradição de ensino e não ser suprida com equipamento e outros materiais instrucionais como, por exemplo, textos adequados. Justifica-se, pois, melhor, a utilização de um recurso não convencional como o microcomputador para veicular textos e simular experimentos, do que se justificaria nas áreas costumeiramente ensinadas nas escolas, muitas vezes num nível satisfatório, inclusive com reais experimentos de laboratório e nas quais o uso do micro para simulação talvez deva ser encarado com parcimônia.

O programa

¹ Trabalho parcialmente financiado pelo FINEP e CNPq.

Este programa-aula sobre efeito fotoelétrico é o primeiro construído no referido projeto e destina-se tanto a alunos interessados em adquirir ou aprofundar conhecimento sobre o assunto quanto a professores do ensino médio que queiram atualizar-se ou aperfeiçoar-se.

Apresentamos, a seguir, uma seleção dos principais textos, gráficos, algumas tabelas e conclusões, com o intuito de divulgar o conteúdo desse programa, para que possa vir a ser aproveitado por alunos e professores, já que é escassa a bibliografia sobre Física Moderna para o ensino médio disponível em língua portuguesa. Não pretendemos, com isso, dar ao leitor uma visão completa do que seja o programa, sua dinâmica e sua especial característica de propiciar uma interação individualizada com o aluno, com erros e acertos próprios dessa interação. Pretendemos, sim, divulgar um aspecto particular da Física Moderna e possibilitar de algum modo, àqueles que não têm contato direto com o programa, o acesso às informações que ele contém.

As anotações à margem da seqüência de textos referem-se a particularidades omitidas do resumo apresentado neste trabalho ou a detalhes que eventualmente possam interessar aos professores.

Este programa destina-se a alunos de segundo grau interessados em aprofundar seus conhecimentos em Física Moderna. Estuda-se o efeito fotoelétrico e confrontam-se os modelos ondulatório e corpuscular da luz.

Apresentação e definição da população alvo.

A metodologia envolve o controle de variáveis e a identificação de variáveis relevantes e irrelevantes.

O programa também pretende ser útil aos professores como elemento motivador para revisão do tema.

Se você nunca utilizou este programa faça as 'experiências' na seqüência apresentada.

Quando lhe for solicitada alguma resposta, digite-a e depois aperte a tecla <RETURN>.

EFEITO FOTOELÉTRICO - OPÇÕES

0 – Introdução

1 – Corrente e diferença de potencial

2 – Corrente e intensidade luminosa

Na primeira utilização do programa recomenda-se 3 – Energia máxima e freqüência

4 – Freqüência limite e material

a seqüência apresenta-
da. Numa segunda oportu-
nidade, o aluno poderá
escolher outra seriação.

5 – Conclusões e interpretação

6 – Encerrar o programa

Digite a opção escolhida: 0

QUE É O EFEITO FOTOELÉTRICO?

Descrição qualitativa do
efeito fotoelétrico.

A remoção de elétrons da superfície polida de certos materiais, quando iluminada com radiação eletromagnética de determinada freqüência, é denominada efeito fotoelétrico. Esse fenômeno pode ser mostrado, por exemplo, montando-se sobre um eletroscópio uma placa polida de zinco.

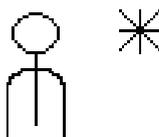
A remoção de elétrons também acontece se a placa de zinco não está carregada. Neste caso ela adquire carga positiva. Por isso a remoção de elétrons se estabiliza, após um certo tempo, pois os elétrons liberados são atraídos pela placa e muitos deles retornam a ela.



Quando luz com radiação ultravioleta incide sobre a placa de Zn, o eletroscópio, previamente carregado com carga negativa, se descarrega, indicando que elétrons são arrancados da superfície metálica.

Para acender a luz, aperte a tecla L.

A lâmpada acende e o
eletroscópio descarrega
gradativamente.



O aluno pode repetir o
'experimento'.

Você quer ver esse efeito novamente? (S ou N) N

COMO SE EXPLICA O EFEITO FOTOELÉTRICO?

A resposta a essa pergunta é um pouco mais complexa. Ela tem implicações inclusive na descrição que a Física Clássica faz sobre a natureza da luz. Isto nos obriga a ampliar nossos conhecimentos sobre o efeito fotoelétrico. Faremos isso simulando alguns experimentos os quais, na verdade, seriam bastante difíceis de se

realizar na prática. Simulando a realidade, não pretendemos substituí-la, mas buscar informações úteis e, ao final, uma explicação plausível para o efeito fotoelétrico.

HISTÓRICO

Em 1887, enquanto trabalhava em seus aparelhos de radiotransmissão de descarga elétrica, Hertz descobriu que a incidência de radiação ultravioleta sobre os elementos de descarga facilitava a produção da faísca.

Estudos mostraram que tal comportamento era devido aos elétrons liberados pelas superfícies dos eletrodos ao absorverem a radiação.

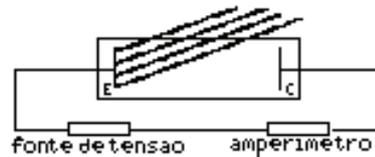
Uma vez liberados esses elétrons podiam iniciar a descarga elétrica responsável pela faísca.

Elétrons emitidos por materiais iluminados são chamados de fotolétrons, e o fenômeno que você estudará agora e conhecido como efeito fotoelétrico.

A figura é mantida na tela enquanto os textos se sucedem.

Após um breve histórico, são descritos os componentes básicos de um circuito para estudo do efeito fotoelétrico bem como a função de cada um.

É feita uma introdução ao 1º 'experimento'.



Esquema do circuito utilizado numa experiência de efeito fotoelétrico.

Na figura interessa para o nosso estudo que os dois eletrodos 'C' e 'E' encontram-se num recipiente evacuado e de quartzo. Esse material é transparente à radiação ultravioleta.

O dispositivo chamado fonte de tensão nos permite variar o módulo e a polaridade de $V_C - V_E$.

O dispositivo chamado amperímetro é um instrumento muito sensível que nos permite comparar as intensidades da corrente fotoelétrica à medida que variamos $V_C - V_E$.

Fazendo-se incidir luz sobre o emissor 'E' são arrancados fotolétrons. Para que estes sejam atraídos pelo coletor 'C' e, conseqüentemente, apareça corrente

fotoelétrica no circuito, é preciso que o potencial elétrico deste seja mais positivo do que o do emissor ($V_C - V_E > 0$). Para você ter uma idéia, um valor típico para $V_C - V_E$ é 2V. A esta diferença de potencial corresponde uma corrente elétrica i no circuito.

Será que a corrente elétrica gerada no circuito permanece inalterada se $V_C - V_E$ for mudado para 1V, para 0V ou para -1V? O experimento que segue (alternativa 1) nos responderá esta pergunta e ainda nos dará várias informações adicionais.

Nas opções o aluno escolheu a alternativa 1.

O aluno é instruído para variar a tensão $V_C - V_E$ entre as placas utilizando valores compreendidos entre -2V e +3V. Ele deve ler a corrente elétrica no amperímetro e anotá-la na tabela. Essa operação é repetida até completar a tabela.

EFEITO FOTOELÉTRICO
1 – RELAÇÃO ENTRE: CORRENTE
FOTOELÉTRICA E DDP DAS PLACAS

Você agora irá descobrir como a corrente fotoelétrica varia com a diferença de potencial (DDP) aplicada entre as placas 'C' e 'E' pela fonte de tensão.

Na tela, aparecerão o mostrador do amperímetro e a tabela que você preencherá.



TABELA 1 x V

V(V)	-1,5	-1,0	-0,5	-0,2	0,0	+0,3	+0,7	+1,0	+2,0	+3,0
i(μA)	0,00	0,00	0,12	0,32	0,55	1,08	1,85	2,22	2,50	2,50

Embora posteriormente seja mostrado o gráfico, discutem-se aqui influências da tabela e do gráfico traçado pelo aluno.

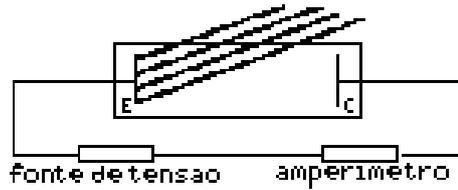
Faça um gráfico qualitativo de $i \times V$ em uma folha de papel, durante a gravação de seus 'dados'.

A corrente se torna constante a partir de algum valor de V? (S ou N) S

Dizemos que a corrente ficou saturada. Por que acontece isto?

Porque todos os fotoelétrons atingem o coletor quando este se torna suficientemente atrativo.

Quando $V_C > V_E$ a função da diferença de potencial é apenas a de atrair os fotoelétrons para o coletor.



A diferença de potencial não é responsável pela remoção dos elétrons.

A corrente diminui quando $V_C - V_E$ se torna mais negativo? (S ou N) S

De fato, observa-se que a corrente diminui e pode até se anular.

Como podemos entender isto?

Discute-se a polaridade das placas e seu efeito sobre os fotoelétrons.

Quando $V_C - V_E < 0$, o potencial em 'C' é menor do que o potencial em 'E'. Neste caso 'C' repele os elétrons e 'E', o próprio terminal de onde são arrancados, os atrai. Logo, para que os elétrons emitidos em 'E' atinjam o coletor 'C', devem possuir energia cinética suficiente para vencer a DDP entre as placas, ou seja, devem realizar um trabalho contra a ação do campo elétrico.

Energia cinética máxima dos fotoelétrons e potencial de corte.

Podemos, assim, determinar a energia cinética máxima dos fotoelétrons arrancados em 'E'. Para isso, basta determinar qual é o potencial menos negativo para o qual a corrente já é nula.

Aparece o amperímetro na tela e o aluno varia o potencial até descobrir o potencial de corte.

Chamaremos este potencial de potencial de corte.

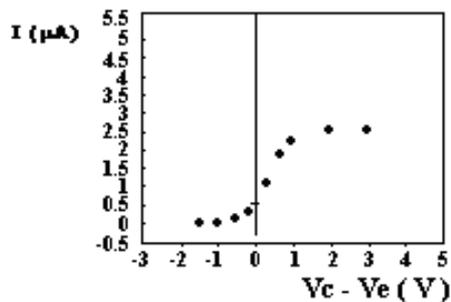
Você vai agora descobrir qual é o potencial de corte, procurando pelo valor menos negativo de $V_C - V_E$ para o qual a corrente no circuito deixa de existir.

Você agora poderá ver o gráfico.

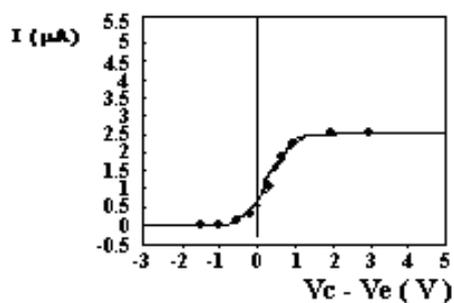
Buscando seus 'dados'

GRÁFICO

1- Corrente x diferença de potencial



No gráfico você vê seus 'pontos experimentais'.



A curva mostra o resultado esperado.

CONCLUSÃO: CORRENTE X DDP

A corrente depende da diferença de potencial como mostra a figura. V_ϕ é o potencial de corte.



Para $V < V_\phi$, nenhum fotoelétron tem energia suficiente para vencer o potencial retardador e a corrente é nula.

Para $V \geq V_\phi$, à medida que V cresce, os fotoelétrons com maior energia começam a atingir o coletor 'C'.

Quando 'C' se torna suficientemente positivo e todos os fotoelétrons emitidos o atingem, a corrente se torna constante.

EFEITO FOTOELÉTRICO

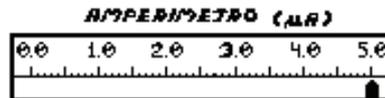
2 – RELAÇÃO ENTRE: CORRENTE E DDP PARA DIFERENTES INTENSIDADES LUMINOSAS

Nas opções, o aluno escolheu a alternativa 2.

Você agora descobrirá como a corrente fotoelétrica varia com a intensidade da luz incidente no emissor.

Variar a intensidade da luz é equivalente a, por exemplo, variar a potência da fonte luminosa ou o número de lâmpadas desta fonte, mantendo, no experimento atual, a frequência emitida constante.

Na tela aparecerão o amperímetro e uma tabela contendo intensidades maiores do que a da primeira 'experiência'. Para preenchê-la, proceda da seguinte forma: forneça um valor de tensão e leia, no amperímetro, o valor da corrente fotoelétrica correspondente a cada intensidade luminosa 'I'.



O procedimento para preencher a tabela é análogo ao 'experimento 1'.

TABELA I x V (LUMINOSIDADES DIFERENTES)

	V(V)	-1.0	-0.5	0.0	+0.5	+1.0	+2.5
3 x I	I(µA)	0.00	0.12	0.60	1.88	3.15	3.75
4 x I	I(µA)	0.00	0.12	0.62	2.12	4.00	5.00

Trace, qualitativamente, as duas curvas $i \times V$, enquanto seus dados são armazenados.

Observando a tabela você pode dizer que a corrente varia com a intensidade luminosa? (S ou N) S

A corrente fotoelétrica é maior quando a intensidade luminosa aumenta. Em outras palavras, o número

de elétrons emitidos por 'E' aumenta. No gráfico a seguir você verá se houve variação no potencial de corte.

BUSCANDO SEUS 'DADOS'

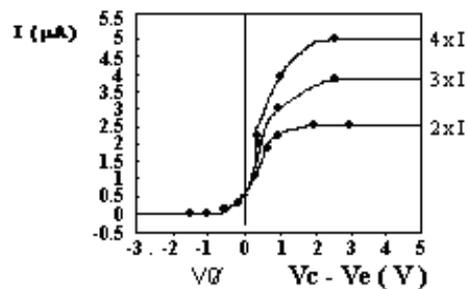
GRÁFICO:

2 - CORRENTE x DDP PARA DIFERENTES INTENSIDADES DA LUZ

No gráfico a seguir estarão traçadas 3 curvas para efeito de comparação: aquela da primeira 'experiência' mais as 2 que você acabou de obter.

Observe bem o comportamento da corrente fotoelétrica e do potencial de corte com a variação da intensidade da luz incidente.

Analogamente ao gráfico do 'experimento' 1 inicialmente são mostrados os pontos 'experimentais' e, posteriormente, são traçadas as curvas.



O gráfico mostra as curvas com os resultados esperados.

$2 \times I$ corresponde à intensidade luminosa utilizada na 'experiência' 1.

O gráfico mostra claramente que a corrente fotoelétrica aumenta com a intensidade luminosa.

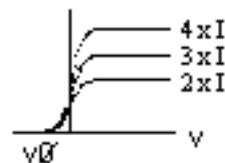
O potencial de corte V_0 não depende da intensidade luminosa.

CONCLUSÃO: CORRENTE x DDP

DIFERENTES INTENSIDADES DA LUZ

Nas opções o aluno escolheu a alternativa 3.

A corrente depende da diferença de potencial e da intensidade luminosa I . Veja a figura.



O potencial de corte, $V\phi$, independe de I . A corrente elétrica depende de I .

Nota: Só há corrente para $V \geq V\phi$.

EFEITO FOTOELÉTRICO

3 – RELAÇÃO ENTRE: ENERGIA MÁXIMA E FREQUÊNCIA INCIDENTE PARA UMA INTENSIDADE LUMINOSA FIXA

O aluno é instruído para verificar se o galvanômetro acusa corrente para todas as frequências do espectro. Descobrimos que não, ele passa a determinar a relação entre o potencial de corte e a frequência. O estudante utiliza três frequências diferentes incidindo sobre sódio e determina, para cada uma, o potencial de corte.

Você agora verá como a energia máxima dos fotoelétrons varia com a frequência da luz incidente no emissor.

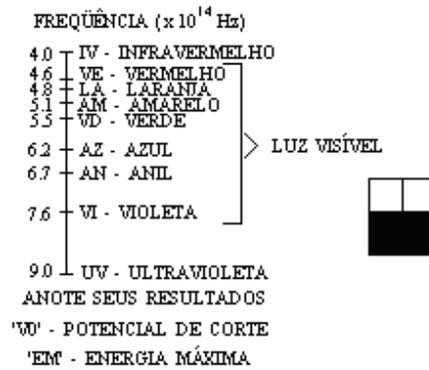
Variar a frequência da luz é equivalente a, por exemplo, variar a cor da luz emitida pela fonte, mantendo, agora, a intensidade da luz constante.

Na tela aparecerão a figura de um galvanômetro, que serve para detectar corrente elétrica no circuito, e um espectro de frequências que vai do infravermelho ao ultravioleta.

	$'V_0'$ (VOLT)	$'E_M'$ (ELÉTRON-VOLT)
ULTRAVIOLETA	-1.5	1.5
ANIL	-0.6	0.6
VERDE	-0.1	0.1

MATERIAL: SÓDIO

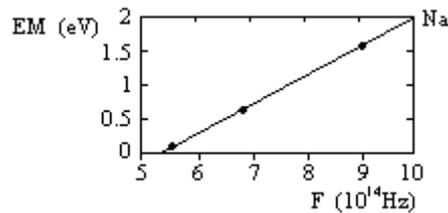
A tabela mostra os resultados obtidos para o sódio e relaciona o potencial de corte com a energia cinética máxima dos fotoelétrons. Solicita-se ao aluno o traçado de um gráfico qualitativo. Em continuação é mostrado o gráfico relativo a esses dados. Inicialmente são mostrados os pontos e a seguir é traçada a reta.



3- ENERGIA MÁXIMA (EM) x FREQÜÊNCIA (F) PARA O SÓDIO (Na)

No gráfico estão seus 'dados experimentais'.

Em instantes, você verá a reta que descreve estes pontos.



Para freqüência incidente menor do que certo valor, não há elétrons emitidos. Essa freqüência é chamada freqüência limite. Nesse caso a freqüência limite é: $F\phi = 5.3 \times 10^{14}$ Hz.

A partir da freqüência limite, a energia máxima dos fotoelétrons é linearmente proporcional à freqüência incidente.

Procure entender que a energia máxima é dada, então, pela relação:

$$EM = H \times (F - F\phi)$$

onde H é a inclinação da reta e o produto $H \times F\phi$ é uma constante.

A relação $EM = H \times (F - F\phi)$ mostra que:

- para freqüências maiores do que $F\phi$, 'EM' cresce linearmente com F;
- para a freqüência limite $F\phi$, $EM = 0$.

Nota: Essa relação não vale para F menor do que $F\phi$.

A energia máxima também pode ser escrita como:

$$M = H \times F - W\phi,$$

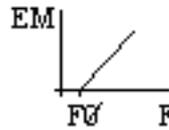
em que $W\phi = H \times F\phi$.

$W\phi$ é chamado de função-trabalho do material.

A função-trabalho do material ($W\phi$) é assim chamada porque essa é a energia mínima necessária para realizar o trabalho de remover um elétron do material.

CONCLUSÃO: ENERGIA MÁXIMA x FREQÜÊNCIA

A energia máxima dos fotoelétrons arrancados do material varia como mostra a figura:



na qual $F\phi$ é a freqüência limite.

Assim, para $F < F\phi$ não há corrente para $F \geq F\phi$,

'EM' cresce linearmente:

$$EM(F) = H \times (F - F\phi).$$

Note, ainda, que a energia máxima não depende da intensidade luminosa.

Nas opções o aluno escolheu a alternativa 4.

EFEITO FOTOELÉTRICO

4 – RELAÇÃO ENTRE:

FREQÜÊNCIA LIMITE E MATERIAL

PARA UMA INTENSIDADE LUMINOSA FIXA

Na 'experiência' 3, você viu a relação entre a energia máxima dos fotoelétrons e a freqüência da luz incidente em um emissor de sódio. Com isso foi possível determinar a freqüência limite para o sódio. Abaixo desta não há liberação de fotoelétrons.

Será a frequência limite a mesma para outros materiais?

Ao final desta 'experiência' você será capaz de responder essa questão.

É mostrado o mesmo espectro de frequências do experimento 3. O aluno utiliza 3 frequências diferentes incidindo sobre bário e determina, para cada uma, o potencial de corte. A tabela mostra os resultados obtidos.

O procedimento a ser seguido é análogo ao da 'experiência' 3.

ANOTE SEUS RESULTADOS:

'V0' - POTENCIAL DE CORTE

'EM' - ENERGIA MÁXIMA

	'V0' (VOLT)	'EM' (ELÉTRON-VOLT)
ULTRAVIOLETA	-1.2	1.2
VIOLETA	-0.6	0.6
ANIL	-0.3	0.3

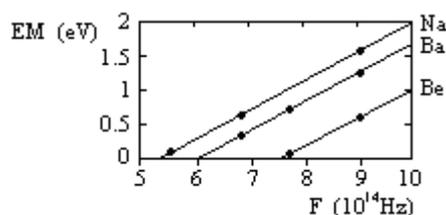
MATERIAL: BÁRIO

Inicialmente solicita-se ao aluno o traçado de um gráfico qualitativo.

O gráfico mostra a relação entre energia máxima dos fotoelétrons e a frequência para o sódio, o bário e o berílio. Os dados para esse último são obtidos pelo aluno.

GRÁFICO:

4- ENERGIA MÁXIMA (EM) x FREQUÊNCIA (F) PARA O BÁRIO (Ba).



Para o berílio, obter-se-iam os resultados que serão mostrados.

Do gráfico se pode ver que: a frequência limite depende do material, por exemplo, para o bário $F\phi = 6 \times 10^{14}$ Hz. Para o berílio, $F\phi = 7,4 \times 10^{14}$ Hz.

Se o aluno não acertar, recebe auxílio para fazer o cálculo.

A inclinação das retas é a mesma para os três materiais.

Para determinar a inclinação H basta lembrar que:

$EM = H \times (F - F\phi)$. Logo, $H = EM/(F - F\phi)$.

Calcule o valor de H usando:

$$H = EM/(F - F\phi).$$

Você deve ter obtido para H aproximadamente:

$4,1 \times 10^{-15}$ elétron-volt segundo.

Você obteve o valor correto? (S ou N) S

Assim, $H = 4,1 \times 10^{-15} \text{eVs}$, ou $H = 6,6 \times 10^{-34} \text{Js}$.

O gráfico mostra resultados para três materiais diferentes. Experiências semelhantes com outros materiais mostrariam que:

– para todos os materiais que apresentam efeito fotoelétrico, $H = 4,1 \times 10^{-15} \text{eVs}$.

Em outra parte deste programa a função-trabalho (W_0) de um material foi definida como a energia mínima necessária para realizar o trabalho de remover um elétron do material. Também foi visto que $W_0 = h \times F_0$, na qual:

$H = 4,1 \times 10^{-15} \text{eVs}$.

Você deve agora calcular a função-trabalho para o bário, lembrando que $W_0 = h \times F_0$, na qual

$F_0 = 6 \times 10^{14} \text{Hz}$ ou $0,6 \times 10^{15} \text{Hz}$.

($H = 4,1 \times 10^{-15} \text{eVs}$).

A função-trabalho para o bário é, em elétron-volt:

(A) 24.6 (B) 2.46 (c) 0.246

Digite a alternativa correta: B.

Certo, isso significa que é preciso fornecer no mínimo 2,46 elétron-volt para liberar algum elétron do bário.

Para o sódio e o berílio você obteria:

W_0 do sódio = 2,17 elétron-volt.

W_0 do berílio = 3,03 elétron-volt.

Neste exemplo, o sódio possui a menor função-trabalho. Logo, é mais fácil arrancar elétrons do sódio do que do bário ou do berílio.

CONCLUSÃO: ENERGIA MÁXIMA x FREQUÊNCIA
PARA
DIFERENTES
MATERIAIS



A energia cinética máxima dos

fotoelétrons é dada por:

$$EM = h \times (F - F\phi)$$

ou

$$EM = h \times F - W\phi$$

Sendo: – $F\phi$ a frequência limite (F_1, F_2, F_3);

– $W\phi (= h \times F\phi)$ a função-trabalho.

Do gráfico vemos que:

– $F\phi (W_0)$ depende do material;

– h , a inclinação das retas, independe.

Nota:

– O efeito fotoelétrico só ocorre quando $F \geq F\phi$;

– A energia máxima 'EM' independe da intensidade da luz.

CONCLUSÃO GERAL

Efeito fotoelétrico é o fenômeno que consiste na remoção de elétrons da superfície polida de certos materiais, quando iluminada com radiação eletromagnética de determinada frequência.

A energia cinética máxima dos fotoelétrons depende da frequência da luz e do material iluminado. Para um mesmo material quanto maior a frequência da luz, maior a energia dos fotoelétrons.

A energia dos fotoelétrons independe da intensidade luminosa. Luz mais intensa apenas arranca mais elétrons, gerando maior corrente fotoelétrica.

INTERPRETAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Alguns fenômenos da ótica Física, como a difração e a interferência da luz, são explicados admitindo-se que a luz possui natureza ondulatória. Já o efeito fotoelétrico não se explica com esse modelo. Por exemplo:

No efeito fotoelétrico apenas são liberados elétrons a partir de uma determinada frequência da radiação incidente. Assim, luz de cor vermelha não libera

fotoelétrons do sódio ao passo que luz azul (cuja frequência é maior) libera. Além disso, quando a frequência da luz é suficientemente alta para arrancá-los, são liberados quase imediatamente.

Temos aí dois problemas que o modelo ondulatório da luz não explica:

1) A questão da frequência mínima não deveria existir, pois bastaria aguardar o tempo necessário para que a energia acumulada fosse suficiente para arrancar os elétrons. Mas isto não acontece. Abaixo de uma determinada frequência não vai haver fotoelétrons qualquer que seja o tempo de espera.

2) A energia distribuída numa frente de onda de luz é insuficiente para ocasionar a liberação quase imediata de fotoelétrons. Assim, deveríamos esperar algum tempo para que o elétron absorvesse a energia necessária para ser liberado.

Em caso de resposta incorreta é oferecida nova oportunidade para responder. Havendo reincidência, o aluno é remetido ao início do texto.

RESPONDA:

A teoria ondulatória da luz não explica:

- 1) a questão da frequência mínima;
- 2) a liberação imediata de fotoelétrons;
- 3) a difração e a interferência da luz;
- 4) a relação entre cor e frequência da luz.

Quais as alternativas corretas?

- a) apenas 1 e 3
- b) apenas 1 e 2
- c) apenas 2 e 3
- d) apenas 2 e 4

Digite a opção escolhida: B

Agora que você já conhece alguns dos problemas da teoria ondulatória da luz para explicar o efeito fotoelétrico, vejamos como se pode explicar esse fenômeno com base num modelo novo: o modelo corpuscular (fotônico) da luz.

Segundo este, a luz se comporta como se fosse constituída de corpúsculos portadores de energia: os fótons. Cada fóton tem uma energia dada por:

$$E = h \times F,$$

em que F é a frequência da luz e h a constante que você já determinou:

$$h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J.s.}$$

Um fóton é um pequeno pacote de energia. Logo, não é uma partícula do tipo que você está acostumado a ver na mecânica.

Em comparação com a distribuição uniforme de energia em uma frente de onda de luz, o fóton concentra muito mais energia. Por isso é capaz de, ao colidir com um elétron, liberar energia suficiente para arrancá-lo quase imediatamente.

É como se uma chuva fina e densa desse lugar a uma chuva grossa e rala. A quantidade de água que cai pode até ser a mesma, mas o efeito das gotas é diferente.

Vejamos agora como o modelo corpuscular explica os fenômenos observados nos 'experimentos' que você fez.

1) A questão da existência de uma frequência limite, abaixo da qual não são liberados fotoelétrons.

Pelo modelo corpuscular, se o fóton não possui energia

$(h \times F)$ suficiente para, pelo menos, realizar o trabalho W_ϕ de arrancar o elétron do material, não haverá fotoelétrons. Fótons com energia menor do que W_ϕ definitivamente não liberarão elétrons do material.

2) A questão da intensidade da luz.

Luz mais intensa significa maior número de fótons. Se cada um destes não possuir a energia mínima (W_ϕ) necessária para liberar fotoelétrons, não haverá emissão. Se a energia dos fótons for maior do que W_ϕ , luz mais intensa provocará um aumento no número de fotoelétrons, mas não na energia de cada um deles. Isto nos leva à:

3) Questão da energia dos fotoelétrons.

Se a energia $h \times F$ do fóton for igual a W_ϕ , o má-

ximo que se consegue é liberar o elétron do material, se $h \times f$ for maior do que W_ϕ , o elétron terá, ainda, fora do material, uma energia cinética máxima (EM) igual a

$$EM = h \times f - W_\phi.$$

Em um dado material, para aumentar 'EM', não há outra maneira que não seja a de aumentar f .

Por isso não se consegue fotoelétrons mais energéticos aumentando a intensidade da luz. É preciso uma frequência maior. Luz mais intensa corresponde a mais fotoelétrons. Maior frequência da luz origina fotoelétrons com maior energia.

Anote as alternativas corretas.

Pela teoria corpuscular da luz:

- 1) a liberação de fotoelétrons depende de uma frequência mínima dos fótons;
- 2) fótons com energia inferior a W_ϕ não liberam fotoelétrons;
- 3) a liberação de fotoelétrons independe da frequência dos fótons;
- 4) o aumento da intensidade da luz acarreta um aumento no número de fotoelétrons;
- 5) o aumento da intensidade da luz acarreta um aumento na energia dos fotoelétrons;
- 6) um fóton com energia $h \times f$ pode liberar fotoelétrons num metal e não em outro.

Em caso de resposta incorreta é oferecida nova oportunidade para responder. Havendo reincidência, o aluno é remetido ao início do texto.

Quais as alternativas corretas?

- a) Apenas 1, 2, 5 e 6.
 - b) Apenas 3, 4, 5 e 6.
 - c) Apenas 1, 2, 4 e 6.
 - d) Apenas 1, 2, 3 e 4.
- Digite sua resposta: C

Em 1905, Einstein sugeriu esta teoria para explicar o efeito fotoelétrico. Desde então, aceita-se que em certos fenômenos a luz se comporta como onda e em outros como partícula.

*Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física para o ano de 1921 “em consideração pelo seu trabalho de Física Teórica e, em particular, pela sua descoberta da Lei do Efeito Fotoelétrico.”

A evolução da Física acontece assim. A busca de solução para um problema novo conduz ao aprimoramento das imagens que são feitas para explicar os fenômenos da natureza. É isso que mantém os físicos diante de um constante desafio. Nossa expectativa é que este programa tenha conseguido desafiá-lo um pouco também. Se assim tiver ocorrido, esperamos que você nos procure de novo. Obrigado.

Considerações finais

Face à crítica freqüente de que o microcomputador é utilizado apenas para transmitir informações, fazendo o mesmo que o professor faz em aula expositiva, cabe salientar que, no caso do ensino da Física Moderna, com raras exceções, o professor sequer transmite informações. Buscou-se, então, primeiramente, suprir essa lacuna e, além disso, apresentar um programa com potencialidade para levar o aluno a refletir, conduzindo seu raciocínio de maneira que, por intermédio da coleta e da organização de dados, do controle de variáveis, da rápida transposição de relações matemáticas para representações gráficas e, finalmente, do confronto entre as teorias clássica e corpuscular da luz, pudesse aprofundar seus conhecimentos sobre o efeito fotoelétrico, indo além de um conhecimento apenas qualitativo do fenômeno. Nesse sentido, o micro possibilita o tratamento organizado de um conjunto relativamente grande de informações abrindo espaço para que o estudante, sem se perder num emaranhado de cálculos, tabelas, equações matemáticas e gráficos, possa observar melhor as relações entre as diversas variáveis que influem no efeito fotoelétrico e expandir seu conhecimento sobre os modelos teóricos para a natureza da luz. Também no sentido de desafiar o aluno e de não desestimulá-lo diante de eventuais dificuldades que se apresentem no programa, procurou-se construí-lo de forma que o estudante detectasse em seus próprios erros informações úteis para suplantarem tais dificuldades e resolver os problemas que lhe são propostos.

O primeiro teste deste programa ocorreu com alunos do curso de “Física para Secundaristas”, ministrado anualmente em nosso

Departamento. O estudo do efeito fotoelétrico começou pela discussão, em termos qualitativos, de uma demonstração experimental do fenômeno. O programa foi proposto como tarefa de encerramento do curso. No micro-computador os alunos trabalharam, em média, durante 2 horas, com acompanhamento de um observador.

Exclusivamente com base em indícios coletados durante a observação, conclui-se que o programa é capaz de motivar os alunos, de prender sua atenção e de mantê-los em contínua atividade intelectual.

Estas são, em nosso entender, qualidades importantes do programa, pois, conseguindo-se despertar o interesse do estudante, criam-se condições para facilitar a aprendizagem mesmo se ele, diante de dificuldades encontradas nesta aula, tais como excesso de informações, falta de pré-requisitos, grande número de variáveis envolvidas no problema ou até deficiência da própria aula, não for capaz de evocar, comentar, detalhar todas as situações apresentadas. Isto também não seria esperado de uma aula expositiva. No caso do programa, o aluno tem a vantagem adicional de poder repeti-lo tantas vezes quantas achar conveniente.

Considerando-se as diversas dificuldades que o estudante poderá encontrar, ao defrontar-se com o programa, é recomendável que esta aula seja ministrada a alunos que se encontrem em vias de concluir o ensino médio mas, se o professor preferir aproveitar a dimensão motivadora do programa, aplicando-o aos das séries iniciais, poderá fazê-lo, embora neste caso seja conveniente, para compreensão do conteúdo, a discussão preliminar de pré-requisitos que o professor certamente saberá identificar.

Referências Bibliográficas

1. EISBERG, R.; RESNICK, R. Física quântica. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979.
2. GAUTREAU, R.; SAVIN, W. Modern Physics. New York: McGraw Hill, 1978.
3. HANDBOOK of Chemistry and Physics. 56.ed. Cleveland: Chemical Rubber, 1975/6.
4. ALONSO, M.; FINN, E. J. Física. México: Fondo Educativo Interamericano, 1976. v.3.
5. BEISER, A. The mainstream of Physics. Reading: Addison-Wesley, 1963.
6. VIDEIRA, A. L. L. Os oitenta anos da revolução einsteiniana: 1905 o annus mirabilis de Albert Einstein. Ciência e Cultura, v. 38, n. 8, p. 1302-1314, 1986.

Nota: Este programa obteve o 3º lugar em sua categoria no 1º Concurso Nacional de Software Educacional promovido pelo MEC, em 1986. Ele foi escrito em linguagem BASIC para microcomputador compatível com a linha APPLE II PLUS com 48 Kbytes de memória RAM e acionador de disquete. O leitor interessado poderá obter uma cópia enviando um disquete virgem aos autores, incluindo no endereço o CEP 90049.