

## BLOCO X - O EFEITO FOTOELÉTRICO

### Recurso de Ensino 1

#### O EFEITO FOTOELÉTRICO E O ABALO NO MODELO ONDULATÓRIO DA LUZ

Entre os anos de 1886 e 1887, o físico Heinrich Hertz confirmou pela primeira vez a existência das ondas eletromagnéticas, e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz, com seus experimentos. Hertz descobriu que uma descarga elétrica entre duas esferas de zinco (também chamadas de “eletrodos”) ocorria de maneira muito mais fácil quando uma delas era iluminada por luz ultravioleta.

Em outras palavras, o que ele descobriu foi que a luz pode interferir nas propriedades elétricas dos objetos, já que a luz ultravioleta facilitava a descarga elétrica ao fazer com que elétrons fossem emitidos pela superfície do catodo.

No ano de 1889, Thomson explicou esse efeito (hoje conhecido como “efeito fotoelétrico”), que podia ser facilmente explicado pela física clássica: a emissão de elétrons por uma superfície, quando iluminada por luz apropriada, ocorreria porque a luz é uma onda eletromagnética que, ao atingir os átomos da rede cristalina do metal, faria com que os elétrons livres em seu interior passassem a vibrar conforme sua frequência de oscilação; alguns desses elétrons, então, poderiam ganhar energia suficiente para conseguir escapar do metal. Pois muito bem: era o final do século XIX e, com isso, o modelo ondulatório para a luz estava consolidado! Estava resolvida a antiga contenda entre Newton e Huygens, com a vitória (tardia, é verdade) do modelo ondulatório.

Com isso, tudo estava resolvido e finalmente os cientistas poderiam se dedicar exclusivamente a outras atividades; quem sabe alguns pudessem até mesmo tirar umas férias com a família? A compreensão da essência da luz, através da teoria eletromagnética, indicava que sim!

...ou não! Pouquíssimo tempo depois, em 1902, Lenard realizou alguns experimentos para certificar se a emissão de elétrons pelo metal estava de acordo com o previsto pela teoria clássica. Ele fez com que luz branca composta por diversos espectros de cores (portanto, ondas eletromagnéticas de diferentes frequências ( $\nu$ )) sobre uma placa de metal (a quem caberia o papel de “emissora”, por emitir os elétrons) dentro de um recipiente de vidro, isolada pelo vácuo. Com isso, foi capaz de medir a velocidade dos elétrons, ao carregar uma segunda placa de metal (receptora) com carga negativa, o que repelia os elétrons emitidos pela placa emissora: assim, apenas os elétrons mais velozes seriam capazes de atingí-la.

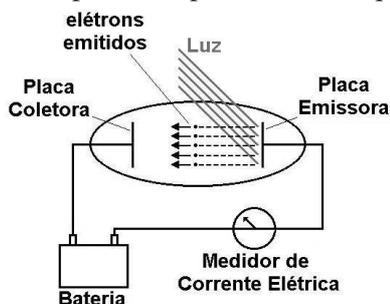
Pela lógica (e de acordo com o previsto pela física clássica), se Lenard aumentasse a intensidade da luz incidente, os elétrons seriam ejetados pela placa emissora com mais energia. Seriam, portanto, mais rápidos, certo? O Efeito Fotoelétrico também deveria ser observado para qualquer frequência de luz, desde que a energia da onda eletromagnética incidente fosse intensa o bastante para arrancar os elétrons da superfície do metal. Ainda mais: se a intensidade da luz fosse baixa (ou seja, houvesse uma menor amplitude de onda) a ejeção dos elétrons pela placa metálica deveria demorar um pouco, afinal, os elétrons precisariam acumular a energia necessária para conseguir sair do metal. Em uma analogia, você pode pensar nos antigos carros movidos à álcool: para poder sair com o carro da garagem em uma fria manhã de inverno, era necessário dar a partida e ficar acelerando - “esquentar” o motor, para que pudesse funcionar normalmente na rua. Entendeu?

Resumindo: de acordo com a teoria clássica, a energia fornecida aos elétrons aumentaria se fosse aumentada a intensidade (que depende apenas da amplitude de onda) da radiação (luz) incidente. Algo parecido com o que acontece com um carrinho de brinquedo movido à pilha: quando a pilha está nova, o carrinho funciona normalmente, mas na medida em que a pilha vai ficando “gasta”, ele passa a se mover mais lentamente.

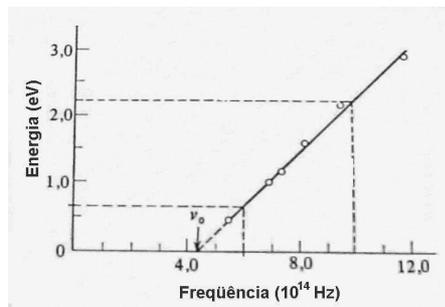
Infelizmente para o modelo ondulatório (e para os físicos que já estavam com as malas prontas para sua tão sonhada viagem de férias), nada disso foi constatado por Lenard em suas experiências. Para falar a verdade, os resultados foram muito, muito diferentes do esperado: ao aumentar um pouco mais a tensão na placa, não foi observada a chegada de NENHUM elétron no receptor! Quando a corrente medida era “zero”, a energia cinética dos elétrons (diretamente relacionada com sua velocidade) medida era igual à energia de repulsão da placa. E, ao dobrar a intensidade da luz, tudo o que se conseguiu foi dobrar o número de elétrons emitido pela placa – mas sem afetar sua velocidade...

É isso mesmo: absolutamente NENHUM dos resultados obtidos estava de acordo com as previsões da Física Clássica! O efeito fotoelétrico também não foi observado para qualquer frequência de luz, ao contrário, ele só ocorria para luz com frequência acima de determinado valor, para cada tipo de metal utilizado na placa de

emissão. Por exemplo, a luz vermelha (que, como você já sabe, possui uma baixa frequência ( $\nu$ )) não consegue arrancar elétrons da superfície de alguns metais, que quando iluminados por luz ultravioleta (que possui alta frequência ( $\nu$ )) não só ejetavam elétrons, como também fornecia a eles uma velocidade maior. Ou seja: os elétrons tinham sua velocidade alterada de acordo com o aumento da frequência ( $\nu$ ), e não da intensidade da luz incidente, como se pensava até então, e mesmo sob uma luz de baixa intensidade, os elétrons eram emitidos de maneira imediata (sem precisar “esquentar seus motores”). E não havia ninguém, em nenhuma universidade ou centro de pesquisa da época, capaz de responder a essas questões...



Esquema do experimento para análise do Efeito Fotoelétrico



Variação da energia do elétron emitido com a mudança da frequência da luz. (Eisberg & Renick, 1994, p. 53)

### Uma Outra Sugestão

Tudo bem, não se preocupe se estiver realmente confuso agora: afinal, se as experiências de Hertz foram utilizadas para validar o modelo ondulatório da luz, como as experiências de Lenard não podiam não apresentar nenhum resultado compatível com o que era previsto pela Física Clássica? Se havia algo com que todos os cientistas concordavam, na época, é o fato da luz ser uma onda eletromagnética. E como assim “não havia ninguém, em nenhuma universidade ou centro de pesquisa da época” que fosse capaz de elaborar uma explicação que fosse satisfatória?

Na verdade, a solução para toda essa confusão só seria apresentada em 1905, por um jovem físico de 26 anos nascido em Ulm, na Alemanha, mas que residia em Berna, na Suíça, onde trabalhava no escritório de patentes, pesquisando em casa, nas horas vagas. Como você pode ver, ele não fazia parte de nenhuma universidade ou centro de pesquisa da época (portanto, ninguém mentiu para você naqueles parágrafos ali em cima). E também não usava meias. Seu nome era Albert Einstein, e seu artigo intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico concernindo a geração e a conversão de luz” (publicado em junho daquele ano pela revista científica alemã *Annalen der Physik*), colocou em questão a teoria clássica da luz e propôs um novo modelo, citando o efeito fotoelétrico como um amaneira de testar qual das duas seria a correta.

Einstein conseguiu explicar os resultados obtidos nos experimentos com efeito fotoelétrico, sugerindo que nesse caso a luz não se comportava como uma *onda*, mas sim como uma *partícula*, a quem chamou de **fóton**. Influenciado pelo trabalho de Lenard, ele observou que as experiências envolvendo interferência e difração da luz somente haviam sido feitas em situações que envolviam um número muito grande de *fótons*; portanto, o resultado fornecido por essas experiências representava a média do comportamento dos fótons individuais envolvidos.

Você pode entender melhor se comparar a existência dos fótons isolados em um feixe de luz com as gotas d’água que há em um jato de mangueira, para entender como é grande o número de gotas (fótons) de água (luz) com que lidamos! Em seu trabalho, Einstein, propôs que a energia ( $E$ ) correspondente a cada partícula de luz (fóton) poderia então ser obtida multiplicando-se o valor da frequência ( $\nu$ ) da luz incidente por um valor constante ( $4,2 \times 10^{-15}$  eV), que seria então chamada de “Constante de Planck” e representado pela letra ( $h$ ). Ou seja:

$$E = h \times \nu$$

Também levou em conta a energia necessária para arrancar os elétrons de uma superfície, chamada **função trabalho** e representada por ( $W$ ). Essa energia seria dispersa na superfície cristalina quando houvesse a ejeção de elétrons pelo metal. Segundo as leis de conservação de energia, seria possível então obter o valor da energia cinética ( $E_c$ ) medida para cada elétron que chegasse à placa receptora, subtraindo-se o valor da função trabalho do metal da energia que o elétron receberia do fóton incidente, de forma que:

$$E = h \nu - W$$

É por isso que a energia dos elétrons não depende da intensidade da luz, mas sim de sua frequência, o que fica ainda mais fácil de entender se você imaginar a luz como sendo constituída por muitas, mas muitas mesmo, partículas (os fótons): quanto mais intensa for a luz, maior o número de fótons (igualzinho ao exemplo do jato d'água na mangueira!). Se a energia do fóton incidente for menor que a função trabalho do metal, ele não conseguirá arrancar nenhum elétron de sua superfície porque a energia cinética de um elétron não poderia ser menor do que “zero” - o efeito fotoelétrico não ocorre para luz de baixa frequência...

O conceito de fóton com partícula da luz também explica a ejeção imediata de elétrons pelo metal: não há a necessidade de se ficar absorvendo a energia de uma onda eletromagnética até acumular o necessário para escapar do metal; o elétron absorve a energia do fóton de uma única vez, da mesma maneira que em um jogo de bilhar, uma bola em movimento transmite energia a outra em repouso quando se chocam. Ou em uma partida de bolinhas de gude.

Esta é a explicação para o efeito fotoelétrico apresentada por Albert Einstein: a luz é composta por partículas que, incidindo sobre certos metais, levam à emissão de elétrons, cuja energia não depende da intensidade da luz, mas sim de sua frequência.

Você pode estar imaginando que agora sim, os cientistas poderiam tirar férias, certo? Mas ainda não: essa nova teoria não foi aceita por toda a comunidade científica de “forma imediata”. Para dizer a verdade, muita gente discordou dessas idéias – principalmente o físico norte-americano Robert A. Millikan, que se dedicou a realizar experimentos com o efeito fotoelétrico que pudessem derrubar a teoria proposta por Einstein. Após dez anos de tentativas, Millikan finalmente obteve seus resultados, chegando a conclusão de que Einstein estava... com a razão. Por ironia do destino, o trabalho de *comprovação* do efeito fotoelétrico renderia a Millikan o prêmio Nobel de Física em 1916. Já Einstein seria agraciado com o Nobel em 1922 por “suas diversas contribuições à Física e, em especial, pela descoberta do Efeito Fotoelétrico”.

Mas (e aqui cabe um grande “MAS”), se a luz se comporta como partícula no efeito fotoelétrico, mas apresenta as propriedades de interferência e difração de uma onda, como sua natureza é interpretada pela Física Quântica?

Essa resposta você irá descobrir um pouco mais adiante: por hora, que tal voltarmos no tempo até 1665, época das discussões sobre a natureza da luz, e considerarmos o resultado final da briga entre Newton e Huygens... um empate?

## QUESTÕES

1 - Preencha o quadro abaixo com três das previsões da teoria clássica que não foram confirmadas pela experiência do Efeito Fotoelétrico.

Previsão da Teoria ondulatória para a Luz no Efeito Fotoelétrico (clássica)	A experiência do Efeito Fotoelétrico

2 - Simplificadamente relate o que significa, em termos práticos, aumentar a intensidade da luz no modelo ondulatório e no corpuscular?

3 - Uma luz mais intensa sobre uma superfície metálica arrancará mais elétrons que uma luz com pouca intensidade? Como isso é explicado pelo modelo corpuscular (fóton)?

4 - Por que existe uma frequência mínima da luz para que o efeito fotoelétrico ocorra?

5 - Por que uma luz vermelha muito intensa não transfere mais energia a um elétron ejetado do que um fraco feixe de luz ultravioleta?

6 - Queimaduras solares produzem danos às células da pele. Por que a radiação ultravioleta é capaz de produzir tais danos, enquanto a radiação visível, ainda que muito intensa não é capaz?

- O cobre só apresenta a emissão de elétrons quando irradiado com luz de comprimento de onda abaixo de  $2,93 \times 10^{-7}$  m. Calcule a função trabalho do cobre lembrando que o comprimento de onda  $\lambda$  e a frequência  $\nu$  estão relacionadas por:  $\lambda \nu = 3 \times 10^8$  m/s.

2 - Utilizando o resultado do exercício anterior, calcule a energia máxima, em eV, de um elétron emitido pelo cobre, quando esse material é exposto a luz de  $2 \times 10^{-7}$  m.

3 - Qual você **acha** que seja a verdadeira natureza da luz: ondulatória ou corpuscular? Justifique.

## Recurso de Ensino 2

### ROTEIRO PARA O USO DA SIMULAÇÃO SOBRE EFEITO FOTOELÉTRICO

1- Acesse o site <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>

2 - Para realizar a simulação você terá que ajustar os seguintes parâmetros:

- **Cátodo:** aqui você escolhe do que é feito o material da placa emissora de elétrons.
- **Longitud de onda (Å):** representa o equivalente em português ao comprimento de onda da luz emitida pela lâmpada. As unidades estão em angströms (Å), que equivale a  $10^{-10}$  m. Para saber a frequência  $\nu$  da luz em Hz, você deve utilizar a seguinte expressão:  $\nu = c/\lambda$ , na qual  $c$  ( $=3 \times 10^8$  m/s) representa a velocidade da luz, e  $\lambda$  o comprimento de onda em metros.
- **Intensidad de la luz:** representa quantos fótons (ou conjunto de fótons) são emitidos pela lâmpada.
- **Diferencia de potencial (V):** representa a tensão que você ajusta para “frear” os elétrons. Uma tensão de 1V equivale a “frear” um elétron de energia 1 eV ( $=1,6 \times 10^{-19}$  J). Atenção, no programa, você deve utilizar *ponto* ao invés de *vírgula* para separar as casas decimais.
- Depois de ajustados os parâmetros, você deverá apertar o botão **Fóton** para rodar a simulação.

3 - Escolha o material Césio, 4000 Å para o comprimento de onda (que equivale a cor violeta) e 1,35 V para a diferença de potencial. Varie o número de fótons emitidos pela lâmpada (Intensidad de la luz) e anote para cada caso quantos elétrons são emitidos. Observe o marcador de corrente conectado à placa que absorve os elétrons. Com o aumento da intensidade da luz, houve aumento do sinal da corrente? Explique isso pelo modelo corpuscular da luz.

Tabela 01		Tabela 02	
Intensidade	Número de elétrons emitidos	Comprimento de onda (Å)	Houve emissão?
0		200	
1		1000	
2		3000	
3		5000	
4		7000	
5		9000	

4 - Deixe a lâmpada com 5 fótons de emissão e faça a simulação para os comprimentos de onda da tabela 02. Note que quando não há emissão aparece a mensagem “No hay emisión”. Com isso observamos que o efeito fotoelétrico não ocorre para qualquer frequência. Determine experimentalmente através de tentativa e erro o valor do máximo do comprimento de onda em que há emissão (sem utilizar as casas decimais). Anote esse valor.

5 - Repita o experimento anterior da tabela 2, e analise o que acontece com a velocidade dos elétrons com o aumento do comprimento de onda? Explique esse resultado usando o conceito de fóton.

6 - Deixe o comprimento de onda em 4000 Å e faça a simulação comparando diferentes valores de diferença de potencial entre 0.5 e 2.0 V. Note que para baixos valores de tensão, os elétrons não conseguem ser freados e atingem a outra placa, enquanto que para altos valores de tensão eles voltam à placa emissora.

- a) Encontre o valor mínimo (com até duas casas decimais) para o qual os elétrons emitidos não são absorvidos, retornando a placa. Isso representa a energia cinética máxima dos elétrons.
  - b) Repita o procedimento anterior e calcule a energia cinética máxima dos elétrons, para um comprimento de 3000 Å.
  - c) Explique a diferença de resultados dos itens (a) e (b) usando o modelo corpuscular para a luz
- 7 -** Deixe a diferença de potencial em qualquer valor, e varie o material da placa.
- a) Para cada um deles, encontre o valor mínimo do comprimento de onda em que não há emissão.
  - e) Qual desses elementos tem maior função trabalho, ou seja, é mais difícil arrancar um elétron?