

Efeito Fotoelétrico.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Instituto de Física. Departamento de Física. Física do Século XXA (FIS1056). Prof. César Augusto Zen Vasconcelos. **Lista 4** (Site: www.cesarzen.com)

Tópicos. Quantização da Luz e da Energia. Efeito Fotoelétrico. Teoria dos Fótons de Einstein (Albert Einstein, Alemanha, 1879-1955).

Efeito Fotoelétrico: uma introdução ao tema

Para explicar a frequência da distribuição da radiação de uma cavidade de corpo negro, Max Planck propôs, como vimos, em 1901, de maneira *ad hoc*, que a energia da radiação poderia existir somente em estados discretos de energia que são proporcionais à frequência¹, sendo a radiação eletromagnética composta portanto por *quanta de luz*² ou *fótons*³. Para compreender o alcance da hipótese de Planck, é importante lembrar que a energia média dos quanta de luz é dada, na teoria de Planck, por

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} E_n P(E_n)}{\sum_{n=0}^{\infty} P(E_n)} \\ &= \frac{h\nu}{\exp^{h\nu/k_B T} - 1} = \frac{hc/\lambda}{\exp^{hc/k_B T\lambda} - 1} \quad (1) \end{aligned}$$

¹Ver artigo original de Max Planck, em português, em <http://www.cesarzen.com/LeideMaxPlanck.pdf>.

²Denominação proposta por Albert Einstein em 1905.

³Denominação proposta em 1926 pelo químico Gilbert Newton Lewis (EUA, 1875-1946), o descobridor da ligação química covalente.

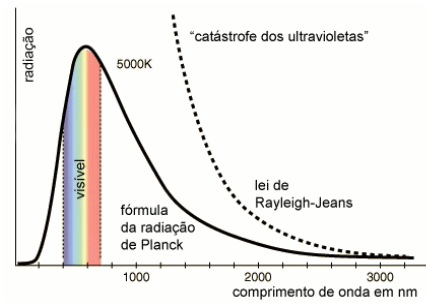


Figura 1: Catástrofe dos Ultravioletas.

Créditos: <http://cftc.cii.fc.ul.pt/>

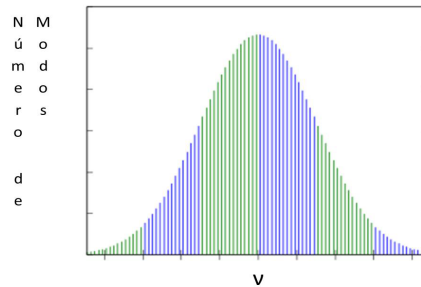


Figura 2: Distribuição Estatística de Planck.

Créditos: <http://astro1.panet.utoledo.edu/>

onde $P(E_n)$ representa a distribuição *discretizada* de Boltzmann⁴ (distribuição de Planck). Esta suposição implica em que os modos mais altos de frequência seriam menos populados de modo a evitar a catástrofe dos ultravioletas da Lei de Rayleigh-Jeans.

O efeito fotoelétrico é provavelmente a mais direta e mais convincente demonstração da existência dos fótons bem como da natureza

⁴Conhecida também como distribuição de Maxwell-Boltzmann.

corpúscular da luz, na medida em que este efeito fornece evidências inquestionáveis da quantização do campo eletromagnético e das limitações da teoria clássica de Maxwell.

Albert Einstein recebeu o Prêmio Nobel em Física em 1921 por sua explicação do efeito fotoelétrico e por suas contribuições à física teórica.

Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico se refere à emissão (ejeção) de elétrons da superfície de um material, geralmente metálico, devido à incidência de ondas eletromagnéticas (luz). Energia contida na luz incidente é absorvida pelos elétrons no metal que adquirem assim energia suficiente para serem ejetados da superfície do material⁵. Este efeito foi observado pela primeira vez por Heinrich Hertz em 1887, sendo também conhecido como efeito Herz. Hertz observou que eletrodos iluminados com luz de comprimento de onda na faixa ultravioleta criavam faíscas elétricas.

O equipamento experimental para o efeito fotoelétrico consiste tipicamente em um tubo transparente (de vidro ou quartzo) mantido em vácuo e contendo uma placa de um metal alcalino⁶, que é denominada de placa emissora ou

⁵Hoje sabemos que os elétrons que orbitam no átomo sofrem forças de atração. Mas, se receberem energia suficiente, poderão abandonar suas orbitais. O efeito fotoelétrico ocorre devido à incidência de um feixe de radiação com energia superior à energia de remoção dos elétrons orbitais do metal. A energia cinética destes elétrons corresponde ao excesso de energia para sua remoção.

⁶Metais alcalinos: lítio, sódio, potássio, rubídio, célio e frâncio. A palavra *álcali* é derivada de um termo arábico que quer dizer *cinza de platina*. Uma das características mais importantes dos metais alcalinos é a semelhança de suas propriedades químicas, sendo metais leves e pouco rígidos; possuem pontos de fusão, de ebulição e densidade baixos e são altamente reativos, não sendo encontrados livres na natureza. Todavia, seus compostos estão entre os mais estáveis ao calor de modo que sua decomposição térmica é altamente

cátodo e outra, denominada de placa coletora ou ânodo, que consiste de um metal nobre⁷. O experimento consiste em iluminar a placa emissora com luz de uma frequência ν suficientemente alta e bem definida (e portanto com um comprimento de onda λ da mesma forma bem definido) e medir a eventual corrente elétrica que pode ocorrer entre o cátodo e o ânodo, como mostra a figura (3).

O emissor e o coletor são mantidos a uma diferença de potencial V . Se os elétrons emitidos (hoje conhecidos como *fotolétrons*) forem suficientemente energéticos para atingir o coletor, serão por ele capturados, captura esta que se manifestará na forma de uma corrente elétrica, i , que passa pelo amperímetro μA . A frequência ν , a intensidade I da luz, a diferença de potencial V e o material do emissor podem ser variados.

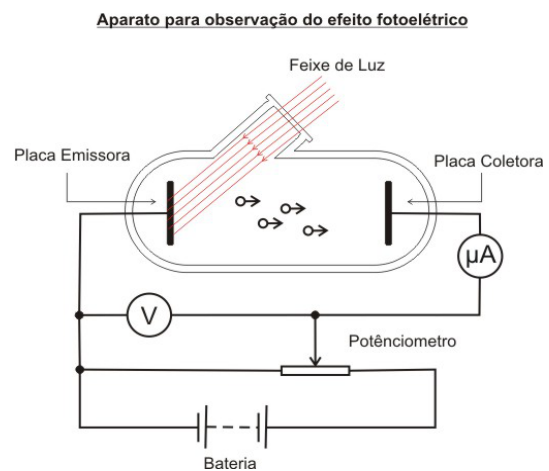


Figura 3: Experimento do efeito fotoelétrico.

Créditos: <http://pt.wikipedia.org/>

improvável.

⁷Metais nobres, são metais resistentes à corrosão e oxidação (por exemplo, rutênio, ródio, paládio, prata, ósmio, irídio, platina, ouro).

Resultados Experimentais do Efeito Fotoelétrico

Os resultados experimentais do efeito fotoelétrico podem ser sintetizados na seguinte forma:

1. A corrente elétrica medida no amperímetro surge quase que instantaneamente ao processo de iluminação do emissor, mesmo para luz incidente de baixa intensidade; o atraso entre o tempo de iluminação e o do surgimento de corrente elétrica é da ordem de $10^{-9}s$, ou seja, o processo é praticamente instantâneo, e é independente da intensidade da luz incidente.
2. Fixadas a frequência e a diferença de potencial, a corrente elétrica mostra-se diretamente proporcional à intensidade da luz incidente. Portanto, ao aumentar a intensidade da radiação incidente, aumenta o número de elétrons ejetados do cátodo.
3. Fixadas a frequência e a intensidade da luz incidente, a corrente elétrica decresce à medida em que a diferença de potencial cresce; a corrente elétrica então cessa para um certo valor de V , o chamado potencial elétrico de frenagem ou de corte, V_0 ; esta quantidade, que é independente da intensidade da luz incidente, representa a diferença de potencial necessária para impedir que os fotoelétrons mais rápidos atinjam o coletor, reduzindo assim a corrente a zero.
4. Para um dado material emissor, o potencial de frenagem varia linearmente com a frequência na seguinte forma funcional

$$eV_0 = h\nu - eW_0; \quad (2)$$

para atingirem a placa coletora, os fotoelétrons devem ter uma energia cinética

$K_e \geq eV$; V_0 corresponde ao valor do potencial de frenagem para o qual $K_e < eV = eV_0$; fixado o material, eW_0 é uma constante; eW_0 varia porém de material para material; mas o valor de h permanece sempre constante para todos os materiais.

Predições da Teoria de Maxwell para o Efeito Fotoelétrico

A teoria de Maxwell era baseada no conceito de propagação ondulatória da luz e na idéia, clássica, de que a energia transportada pela onda apresentava uma distribuição contínua. Assim, segundo Maxwell, a energia incidente seria distribuída uniformemente sobre a superfície metálica do emissor.

Portanto, com respeito ao primeiro item referente aos resultados experimentais do efeito fotoelétrico, a corrente elétrica medida no amperímetro não deveria surgir, — segundo a física clássica —, quase que instantaneamente ao processo de iluminação do emissor, mesmo para luz incidente de baixa intensidade. Ou seja, a expectativa dos físicos à época era de que o atraso entre o tempo de iluminação do cátodo e o surgimento de corrente elétrica não poderia ser da ordem de $10^{-9}s$ e nem ser independente da intensidade da luz incidente. Isto porque o tempo necessário para que houvesse energia suficiente, em uma área equivalente a um átomo, para ejeção de elétrons podia ser calculado. E o resultado levava a um tempo de cerca de $60s$, ou seja, muito maior do que o valor determinado experimentalmente, de cerca de $10^{-9}s$. Portanto, o tempo necessário para que um átomo irradiado por uma fonte acumule energia suficiente para emissão eletrônica é, do ponto de vista clássico, muito maior do que o valor determinado experimentalmente. Este resultado experimental não era portanto explicado pela física clássica.

Ademais, usando a teoria clássica de Maxwell, quanto mais intensa for a luz in-

cidente, mais energia se distribuiria sobre o cátodo e maior seria a energia cinética dos elétrons ejetados pois absorveriam maior quantidade de energia e isto se refletiria em uma maior energia cinética de emissão. Assim, a energia cinética média dos elétrons emitidos cresceria, segundo a teoria clássica, com a intensidade da luz incidente.

Esta predição da teoria clássica também não era observada experimentalmente. Isto porque, quando examinamos o segundo item dos resultados experimentais referentes ao efeito fotoelétrico, este resultado indica que ao aumentarmos a intensidade da luz incidente, ao contrário do que era esperado na física clássica, a luz incidente não arranca os elétrons do metal com maior energia cinética. O que realmente acontece é que uma maior quantidade de elétrons é ejetada.

A Teoria dos Quanta de Luz de Albert Einstein

Einstein, em 1905, resolveu de maneira bem sucedida ambos os paradoxos acima enumerados, propondo que a luz incidente consiste de porções discretas (quanta) de matéria (ou fótons), que interagem com os elétrons no metal de maneira similar a partículas elementares, em substituição à concepção de Maxwell de ondas contínuas.

Na visão quântica, a energia carregada por um fóton é absorvida inteiramente por um único elétron. Se o elétron é ejetado do material, a diferença entre a energia absorvida pelo elétron e a energia com a qual o elétron estava ligado à superfície do material aparece como energia cinética do elétron.

Na mecânica quântica, para uma dada frequência ν , cada fóton carrega energia

$$E = h\nu, \quad (3)$$

onde h é a constante de Planck.

Esta interpretação física explica porque a corrente elétrica medida no amperímetro, em uma experiência do efeito fotoelétrico, surge quase que instantaneamente ao processo de iluminação do emissor, mesmo para luz incidente de baixa intensidade: como os fótons se propagam à velocidade da luz, o intervalo de tempo Δt entre o processo de absorção de um fóton com energia $h\nu$ pelo átomo e a correspondente ejeção de um elétron é inversamente proporcional a c , pois

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{\Delta x}{fc}, \quad (4)$$

onde $v = fc$ é a velocidade do elétron e Δx caracteriza a distância entre o cátodo e o ânodo sendo f um valor fracionário. Um valor típico de f é 10^{-2} . Usando portanto por simplicidade $\Delta x/f = 0,0299m$, e para a velocidade da luz⁸ $c \simeq 2,99 \times 10^8 m/s$ obtemos respectivamente $\Delta t \simeq 10^{-9}s$ e $\Delta t \simeq 10^{-10}s$.

O aumento da intensidade da luz incidente por sua vez corresponde, na teoria de Einstein, ao aumento do número de fótons incidentes por unidade de tempo (fluxo), enquanto a energia de cada fóton permanece constante à medida em que a frequência da radiação permaneça constante.

Assim, na teoria de Einstein, ao aumentar a intensidade da radiação incidente, aumentaria o número de elétrons ejetados do cátodo devido ao correspondente aumento de fótons incidentes, supondo cada fóton como sendo responsável pela ejeção de um único elétron, explicando assim o segundo resultado experimental do efeito fotoelétrico anteriormente apresentado. Mas cada elétron teria a mesma energia cinética dos demais (supondo ademais elétrons sendo ejetados de orbitais equivalentes).

Da mesma forma, na teoria de Einstein, ao aumentarmos a frequência da radiação

⁸A velocidade da luz no vácuo é igual a $c = 2,99792458 \times 10^8 m/s$.

incidente, mas mantendo a intensidade da radiação inalterada, ocorreria aumento correspondente na energia cinética média dos elétrons ejetados, pois o número de fótons da radiação permaneceria o mesmo, — ejetando portanto o mesmo número de elétrons do caso anterior —, mas as energias dos fótons que seriam absorvidos pelos elétrons seriam maiores.

Além disso, a determinação experimental da taxa de crescimento da energia dos elétrons ejetados em função do crescimento correspondente da frequência permite inferir-se a lei

$$eV_0 = h\nu - eW_0$$

bem como a determinação da constante de Planck, h .

Albert Einstein recebeu o Prêmio Nobel em Física em 1921 por sua explicação do efeito fotoelétrico e por suas contribuições à física teórica.

Problemas

1. Azuis versus vermelhos. A afirmação a seguir está certa ou errada? Responda por quê? A luz vermelha, de baixa frequência, provoca a ejeção de elétrons de uma peça de metal. Na visão clássica, a luz é representada por uma onda contínua cuja energia está *distribuída* por toda a extensão da onda. É fato, porém, que quando aumentamos a intensidade da luz incidente, uma quantidade maior de elétrons é ejetada da peça de metal, contradizendo assim a visão da teoria de Maxwell que sugere que os elétrons ejetados deveriam mover-se, neste caso, mais rapidamente. Quando a luz incidente é de cor azul, os elétrons ejetados são muito mais rápidos e, portanto, têm muito maior energia cinética do que no caso anterior da incidência de luz de cor vermelha. A razão para tal é que a luz pode se comportar não apenas como uma onda contínua, mas também
 2. Afirmamos no corpo do texto que “A teoria de Maxwell era baseada no conceito de propagação ondulatória da luz e na idéia, clássica, de que a energia transportada pela onda apresentava uma distribuição contínua. Assim, segundo Maxwell, a energia incidente seria distribuída uniformemente sobre a superfície metálica do emissor”.
- Se a afirmação do item anterior (vermelhos versus azuis) for totalmente verdadeira, então o problema da teoria de Maxwell em explicar o efeito fotoelétrico se resumiria a considerar que a energia transportada pela onda apresentava uma distribuição contínua. Maxwell não estaria portanto equivocado em considerar que a luz podia ser representada por uma onda. Certo ou errado? Por quê?
3. Quando se faz incidir luz monocromática pode observar-se ou não o efeito fotoelétrico, ou seja somente se observa efeito fotoelétrico a partir de um comprimento de onda mínimo incidente, valor esse que depende do metal. Este é um aspecto para o qual a teoria clássica da radiação não apresentava explicação. Certo ou errado? Por quê?
 4. Considere uma superfície de potássio localizada a uma distância igual a 75cm de um bulbo de uma lâmpada de 100W . Suponha que a energia irradiada pelo bulbo corresponde a cerca de 5% da potência de entrada do sistema. Tratando cada átomo de potássio como um disco circular de diâmetro igual a 1\AA , determine o tempo necessário para cada átomo absorver uma quantidade de energia igual à sua função trabalho de 2.0eV ,

de acordo com a interpretação ondulatória da propagação da luz. Solução: 57,6s.

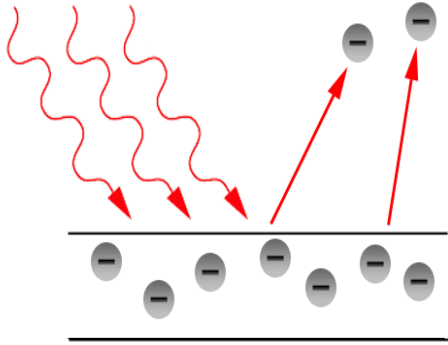


Figura 4: Efeito fotoelétrico.

Créditos: <http://www.physicsforums.com/>

5. O LED é um componente eletrônico do tipo semicondutor (diodo emissor de luz (*L.E.D = Light Emitter Diode*)). A tecnologia utilizada em um LED é similar àquela utilizada nos *chips* dos computadores, transformando energia elétrica em luz, mas de forma diferente daquela que ocorre em lâmpadas convencionais. As lâmpadas utilizam filamentos metálicos, radiação ultravioleta e descarga de gases, entre outras para a geração de luz. Nos LEDs, a transformação de energia elétrica em luz ocorre quando elétrons, na matéria, passam de um nível de maior energia para um outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDs são os que emitem luz de cor vermelha e os que emitem luz de cor verde. Sabe-se que a frequência da luz vermelha é menor do que a da luz verde. Seja λ_{verde} o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e E_{verde} a diferença de energia entre os níveis desse LED enquanto que para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente, $\lambda_{vermelho}$

e $E_{vermelho}$. Considerando-se essas informações, é correto afirmar que: a) $E_{verde} > E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} > \lambda_{vermelho}$; b) $E_{verde} > E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} < \lambda_{vermelho}$; c) $E_{verde} < E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} > \lambda_{vermelho}$; d) $E_{verde} < E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} < \lambda_{vermelho}$;

6. Quando uma experiência do efeito fotoelétrico é realizada usando-se o cálcio como emissor, os seguintes valores para o potencial de frenagem são encontrados:

λ em Å	2536	3132	3650	4047
ν em $\times 10^{15} Hz$	1,18	0,958	0,822	0,741
V_0 em Volts	1,95	0,98	0,50	0,14

Encontre o valor da constante de Planck a partir destes dados. Solução: $6,6 \times 10^{-34} Js$.

7. A energia cinética de fotoelétrons varia entre zero e $4,0 \times 10^{-19} J$, quando luz de comprimento de onda igual a 3000 \AA incide sobre uma superfície. a) Qual é o potencial de frenagem para esta luz? b) Qual é o comprimento de onda limiar para este material? c) O emissor em um tubo fotoelétrico tem um comprimento de onda limiar igual a 6000 \AA . Determine o comprimento de onda da luz incidente em um tubo com potencial de frenagem, para esta luz, igual a $2,5V$. Solução: a) $2,5V$; b) 7590 \AA ; c) 2713 \AA .

8. Suponha que o comprimento de onda de luz incidente em um experimento do efeito fotoelétrico é modificado de 3000 \AA para 3010 \AA . Determine a correspondente modificação no potencial de frenagem. Solução: $-1,38 \times 10^{-2} V$.