



Universidade de Brasília

Física Experimental 4

Experimento VI-a

O caráter quântico da luz e a constante de Planck

26 de Julho de 2013

Professora Nadia Maria de Liz Koche
Alunos:

Juarez A.S.F
Jedhai Pimentel

11/0032829
09/0007883



Conteúdo

1	Objetivos	3
2	Materiais	3
3	Introdução	4
4	Procedimentos	6
5	Dados	7
6	Análise de Dados	8
7	Conclusão	11



1 Objetivos

Verificar a validade das hipóteses quânticas e clássica da luz estudando o efeito fotoelétrico. Determinar a constante de Planck e a função trabalho do fotodiodo.

2 Materiais

Para o experimento utiliza-se:

- Voltímetro digital
- Módulo h/e (AP-9368) da Pasco
- Kit de acessórios para o módulo h/e (AP-9368) da Pasco
- Fonte de luz de vapor de mercúrio (OS-9286) da Pasco
- filtros de verde e de amarelo
- filtro de transmissão variável com percentagens de 100%, 60%, 40% e 20%



3 Introdução

O entendimento físico da luz como uma onda eletromagnética explica vários fenômenos como a refração, reflexão, difração e interferência. No entanto, um modelo puramente ondulatório falha em descrever corretamente algumas outras propriedades e efeitos da luz. Uma dessas falhas do modelo ondulatório é explicar o efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico ocorre quando sólidos, líquidos ou gases emitem elétrons ao absorverem energia da luz. Tais elétrons são chamados de fotoelétrons. O modelo ondulatório prevê que a energia cinética desses elétrons, e portanto sua velocidade, dependem exclusivamente da intensidade da luz incidente. Ou seja, dadas duas ondas incidentes em um material o modelo clássico diz que a onda que possuir maior amplitude irá liberar elétrons com maior energia. Tal previsão, no entanto, não se verifica experimentalmente. Para explicar corretamente o efeito é preciso adotar o modelo quântico para a luz.

O modelo quântico diz que a emissão de luz ocorre de forma discreta em pacotes de energia, os fótons, e que a energia E que cada pacote desse possui está relacionada com a frequência ν da onda pela fórmula:

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

onde h é uma constante universal conhecida como constante de Planck. Por exemplo, em uma luz monocromática todos os fótons terão a mesma energia individual e uma luz mais intensa carregará apenas uma quantidade maior de fótons. É justamente esse entendimento que irá explicar o efeito fotoelétrico. A liberação de elétrons pelos átomos de um material nesse efeito ocorre devido a interação individual de um elétron com um fóton. Quando a energia absorvida pelo elétron for maior do que aquela que o prende ao átomo, o elétron será liberado e o restante da energia, se houver, será convertido em energia cinética. Veja que se existirem mais fótons colidindo com o material teremos mais das mesmas interações de um fóton com um elétron, de modo que teremos mais elétrons liberados e todos com a mesma energia. Dessa forma, a energia dos elétrons liberados depende da energia dos fótons incidentes e portanto da frequência da luz incidente e não da sua intensidade.

Seja $h\nu$ a energia do fóton incidente e W_0 a energia necessária para arrancar o elétron do átomo, conhecida como função trabalho. A energia cinética com que o fotoelétron de massa m deixa o átomo após absorver o fóton é:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W_0 \quad (2)$$

Vamos usar essa equação para determinar a constante de Planck. Considere a figura 1. Se os fótons incidentes tiverem energia o suficiente para que os elétrons arrancados da superfície do catodo consigam chegar ao anodo temos uma corrente fotoelétrica no interior do tubo. Se o circuito se mantiver aberto a medida que isso ocorre começaremos a ter um acúmulo de carga no anodo, gerando uma ddp que tende a frear os elétrons da corrente fotoelétrica. Quando esse potencial acumulado for alto o suficiente para que a energia potencial eV iguale a energia cinética $\frac{1}{2}mv^2$ com que os elétrons deixam o catodo teremos equilíbrio e a corrente fotoelétrica cessa. Medindo o potencial V_{max} em que a corrente cessa e usando a fórmula 2 podemos obter:

$$V_{max} = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_0}{e} \quad (3)$$

Vemos que de um gráfico da tensão de parada da corrente pela frequência incidente pode-se obter a constante de Planck, uma vez que se conheça a carga do elétron. Nessa análise consideramos que o circuito é deixado em aberto para que toda carga que chegue ao anodo seja acumulada, no entanto, se colocarmos um voltímetro real nas extremidades para medir o dado necessário para a construção do gráfico estaremos fechando um circuito e as cargas negativas do anodo podem retornar ao catodo. Como a resistência do voltímetro deve ser muito grande, essa volta de cargas ocorre de maneira lenta, de modo que ainda assim é possível observar o fim da corrente fotoelétrica. Esse fato, no entanto, deve ser levado em consideração para melhor entender os dados experimentais.

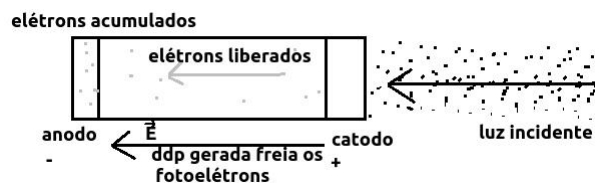


Figura 1: Modelo para efeito fotoelétrico: lembre que os elétrons são empurrados na direção contrária ao campo \vec{E}



4 Procedimentos

O procedimento é dividido em duas etapas: na primeira verificamos o comportamento da tensão máxima em função da intensidade incidente e na segunda em função da frequência incidente.

Inicialmente deve-se ajustar a montagem para que a fenda e o fotodiodo estejam alinhados. Considere a montagem na figura 2. Liga-se a lâmpada de mercúrio e remove-se o cano do fotodiodo. Posiciona-se o braço móvel para que uma das raias espectrais atinja a fenda de entrada. Nessa posição deve-se posicionar o fotodiodo girando-o em torno de seu eixo de forma que a luz que passa da fenda cubra toda a área sensível do fotodiodo. Feito isso fecha-se o cano e mantém-se essa configuração do fotodiodo para o resto do experimento.

Relação com a intensidade Agora posiciona-se o braço móvel de forma que a primeira raia espectral(violeta forte) atinja a fenda de entrada do fotodiodo. Prende-se então o filtro de intensidade na fenda de entrada. Primeiramente posiciona-se o filtro para que sua porção de transmissão de 100% esteja sobre a fenda. Zera-se o potencial do fotodiodo com o botão em sua lateral e, depois de soltado o botão, espera-se para que o potencial se estabilize. O potencial estabilizado é anotado e o procedimento é refeito para todas as percentagens do filtro. Repete-se o procedimento para todas as faixas de primeira ordem do espectro(até o primeiro amarelo). Na medição da faixa verde deve-se acoplar ainda o filtro verde, e na amarela um filtro amarelo. Isso é feito para evitar interferências de frequências próximas. O acoplamento desses filtros pode ser feito colocando-se um suporte para filtros no caminho do feixe correspondente.

Relação com a intensidade Retira-se agora o filtro de intensidade da fenda. Posiciona-se o braço fixo na primeira raia espectral(violeta forte) ¹ e, depois de zerado o potencial, mede-se o potencial máximo mostrado pelo multímetro. O procedimento é refeito para todas as raias de primeira ordem. Novamente usam-se os filtros de verde a amarelo nas medidas relativas a essas cores.

¹De fato essa primeira raia corresponde ao ultravioleta emitido pela fonte de mercúrio. Essa frequência, no entanto, sofre alteração pela rede de difração e aparece aqui como visível

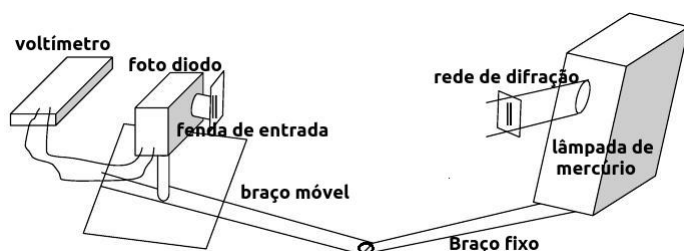


Figura 2: Montagem do procedimento

5 Dados

Os dados do primeiro procedimento são mostrados na tabela 1 e do segundo na tabela 2. Na tabela dois os comprimentos de onda aparecem na mesma ordem em que as cores da tabela 1 e foram obtidos do fabricante da lâmpada de mercúrio.

Além desses dados quantitativos acrescentamos que na primeira etapa quanto menor era a intensidade do filtro mais demorava para o voltímetro estabilizar.

intensidade(%)	$V_{max}(V)$ ultravioleta	$V_{max}(V)$ violeta	V_{max} azul	$V_{max}(V)$ verde	$V_{max}(V)$ amarelo
100	1.97 ± 0.01	1.75 ± 0.01	1.576 ± 0.001	0.945 ± 0.001	0.822 ± 0.001
80	1.97 ± 0.01	1.75 ± 0.01	1.577 ± 0.001	0.945 ± 0.001	0.820 ± 0.001
60	1.97 ± 0.01	1.75 ± 0.01	1.576 ± 0.001	0.940 ± 0.001	0.817 ± 0.001
40	1.96 ± 0.01	1.74 ± 0.01	1.572 ± 0.001	0.927 ± 0.001	0.810 ± 0.001
20	1.91 ± 0.01	1.71 ± 0.01	1.552 ± 0.001	0.900 ± 0.001	0.789 ± 0.001

Tabela 1: V_{max} em função da intensidade

frequência(10^{14} Hz)	$V_{max}(V) \pm 0.001$
5.18672	0.830
5.48996	0.951
6.87858	1.587
7.40858	1.761
8.20264	1.996

Tabela 2: V_{max} em função da frequência



6 Análise de Dados

Os dados da primeira etapa são plotados no gráfico 3a. Os pontos experimentais estão marcados em círculos e a reta pontilhada une os pontos para mostrar o comportamento quase constante de v_{max} , o que já era possível ver da própria tabela 1. Vemos aqui que o comportamento não é o ideal previsto pelo modelo quântico pois quando a intensidade é muito baixa observamos uma queda no potencial de parada para todas as cores observadas. Isso se deve ao fato notado na introdução de que ao ligarmos o voltímetro em paralelo para medir o potencial fechamos o circuito e parte das cargas negativas acumuladas podem voltar para o catodo. Para explicar como isso afeta as medidas vamos fazer uma analogia com uma torneira que enche uma banheira vazada. Em nosso caso a mangueira é a corrente fotoelétrica, a água da banheira é o potencial acumulado e o ralo é o circuito fechado pelo multímetro. Em nossa analogia a banheira estará cheia quando o potencial acumulado for o potencial de parada. Em todos os casos estudados o ralo é o mesmo mas muda a vazão com que a mangueira injeta água na banheira. Ou seja, desde que a vazão de entrada seja maior que a vazão de saída temos certeza de que uma hora a banheira estará cheia, mas quanto menor for a vazão de entrada mais tempo isso demorará para acontecer. É o que ocorre aqui, quanto maior a intensidade da corrente fotoelétrica mais rapidamente o potencial de parada é atingido. Se em nossas medidas tivéssemos esperado tempo suficiente, teríamos todos os V_{max} iguais, independentemente da intensidade incidente.

Para concluir, notamos que esse procedimento mostra que o potencial de parada, e portanto a energia cinética dos fotoelétrons, não depende da intensidade incidente, uma vez que esta se manteve constante para todas as percentagens de transmissão utilizadas. Esse procedimento discorda portanto das previsões da física clássica.

Os dados da segunda etapa são plotados no gráfico 3b. A regressão para os dados do segundo gráfico é:

$$V_{mx} = (0.0000000000000037 \pm 0.0000000000000003)\nu - (1.0 \pm 0.2) \quad (4)$$

comparando com a fórmula 3 da introdução obtemos:

$$\frac{h}{e} = (3.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-15} V \cdot s$$

$$\frac{W_0}{e} = (1 \pm 0.2)V$$

conhecendo a carga do elétron $e = 1.602 \cdot 10^{-19}C$ podemos então determinar a constante de tempo a partir do coeficiente angular.

$$h = (5.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-34} V \cdot C \cdot s \quad (5)$$



onde a propagação do erro foi feita utilizando-se:

$$\Delta h = e \Delta \frac{h}{e} \quad (6)$$

analogamente, obtemos a função trabalho a partir do coeficiente linear:

$$W_0 = (1.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-19} V \cdot C \quad (7)$$

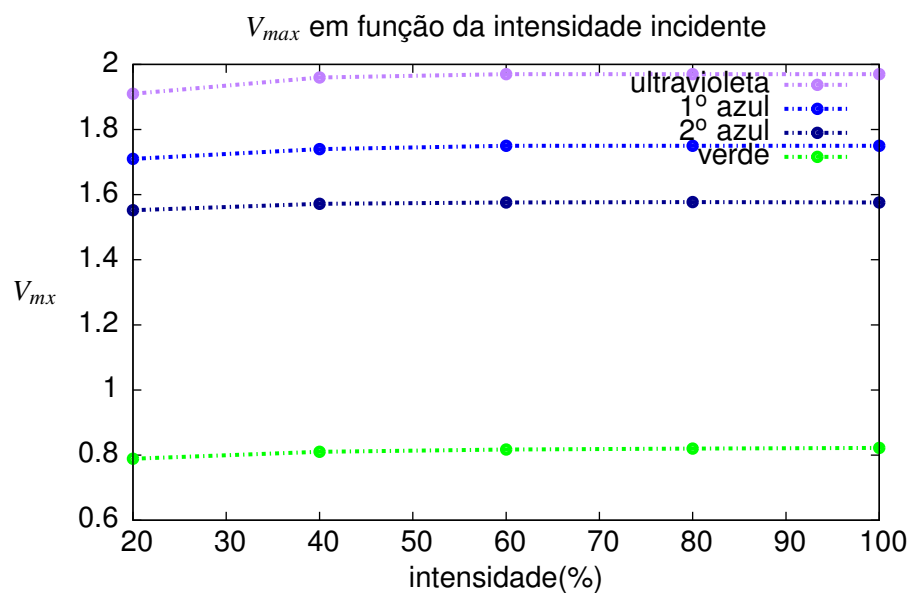
onde a propagação do erro foi feita utilizando-se:

$$\Delta W_0 = e \Delta \frac{W_0}{e} \quad (8)$$

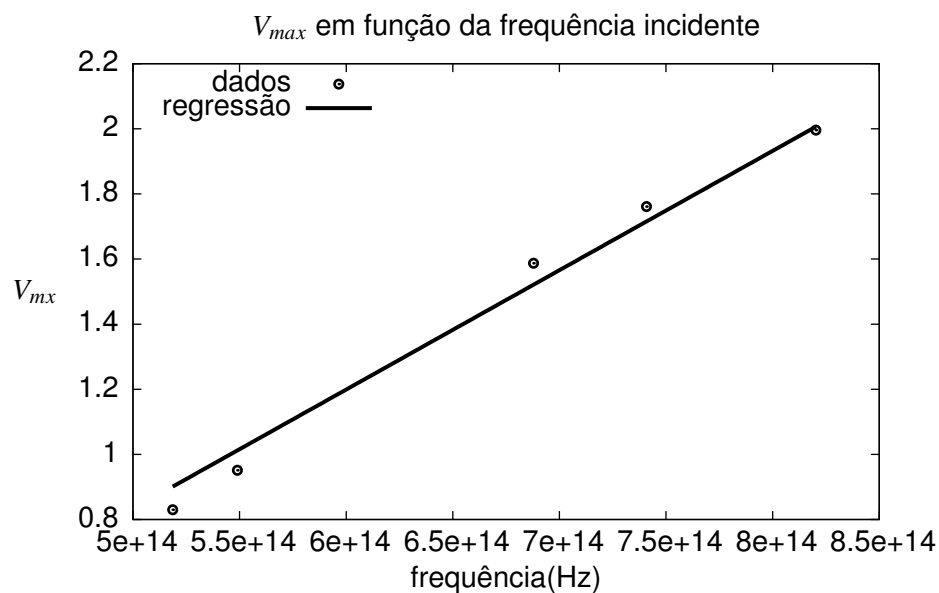
Aqui apresentamos os resultados em unidades SI, mas se quiséssemos apresentar em eV bastaria pegar os próprios coeficientes da reta, uma vez que a equação já está dividida por e.

Os erros percentuais são: 6.76% para a constante de Planck e 18.74% para a função trabalho. O valor tabelado para a constante de Planck é de $6.62606896 \cdot 10^{-34}$, que não cai dentro da margem de erro calculada. Portanto a medida da constante de Planck foi precisa mas não acurada. Quanto a medida da função trabalho esta apresentou uma grande margem de erro, portanto foi não precisa.

Notamos que esse procedimento apoia a teoria quântica ao verificar que o potencial de parada está relacionado de forma linear com a frequência incidente.



(a) V_{max} em função da intensidade



(b) V_{max} em função da frequência

Figura 3: Gráficos



7 Conclusão

O experimento permitiu verificar algumas previsões da física quântica ao mostrar que a energia cinética dos fotoelétrons emitidos no efeito fotoelétrico é proporcional a frequência incidente mas constante em relação a intensidade. Foi possível medir a constante de Planck em $h = (5.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-34} \text{V}$. Essa medida foi precisa, pois o erro é de 6.8%, mas não bateu com o valor tabelado e portanto não foi acurada. Mediu-se também a função trabalho para o catodo utilizado em $W_0 = (1.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-19} \text{V} \cdot \text{C}$. Essa medida não foi precisa por fornecer uma margem de erro de 18.75%.

Referências

- [1] JEWETT, J.W.; SERWAY, R.A. *Física para cientistas e engenheiros* volume 4 : Luz, Óptica e Física Moderna. 8ª ed. São Paulo : Cengage Learning, 2012.