

Efeito Fotoelétrico

Victor Pierre - Físico de Materiais / UNESP-Bauru

Mestrado / IFUSP – *tokamak* TCABR

victorpierre@usp.br

victorpierre06@hotmail.com

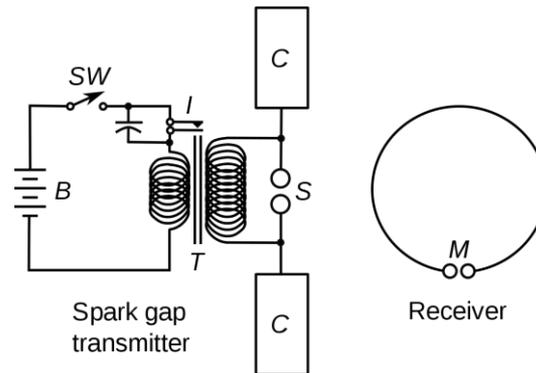
Contexto

Heinrich Hertz elaborou um experimento que comprovou a existência das ondas eletromagnéticas propostas por James C. Maxwell.



Contexto

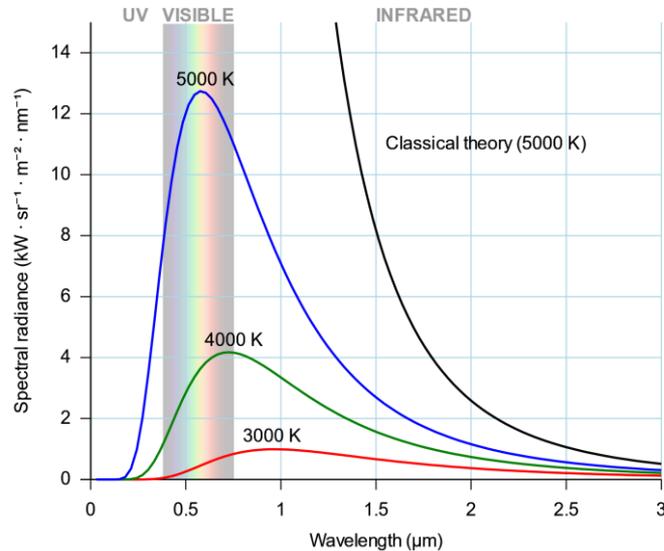
Utilizando o mesmo protótipo transmissor/receptor, Hertz observou que as pequenas descargas elétricas entre os polos (metálicos) ocorriam com maior facilidade sob incidência de luz UV.



Contexto

- Max Planck tentou resolver a “catástrofe do ultravioleta” (Rayleigh-Jeans) no espectro emitido por um corpo negro;
- Obteve êxito ao postular a quantização da energia dos elétrons acoplados à radiação estacionária dentro de uma cavidade;
- No caso, os elétrons das paredes da cavidade oscilariam na forma OHS em frequências distribuídas discretamente.

Contexto



$$B_{\nu}(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Contexto

- Pelo postulado de Planck, haveria uma proporção entre a energia e a frequência, regida pela constante batizada com seu nome:

$$E = nh\nu \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Por lançar mão de um artifício matemático, Planck não vislumbrou de imediato as mais importantes implicações desse seu trabalho;
- Coube a Albert Einstein a nova interpretação dos resultados obtidos até então.

Contexto

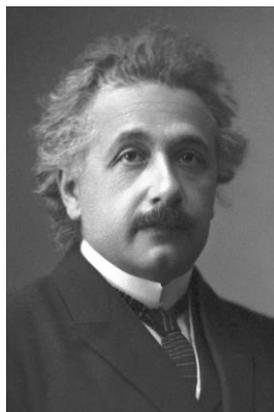
- A partir de todo o conjunto de resultados conhecidos até então sobre a emissão de elétrons devido a incidência de radiação UV sobre metais (Hertz, Hallwachs, Lenard etc) – Einstein elaborou uma teoria que explicava o que viria a se tornar conhecido como “efeito fotoelétrico”;
- A teoria de Einstein, proposta em 1905, levaria muitos anos até ser aceita pela comunidade científica, devido ao seu caráter “revolucionário”.

Contexto

- Entre 1914 e 1919, Robert Millikan testou a teoria de Einstein e obteve a constante de Planck experimentalmente;
- Millikan, como muitos físicos da época, reconhecia a validade das equações de Einstein para o efeito fotoelétrico, mas desconsiderava a interpretação da radiação eletromagnética como partícula (fóton).

Contexto

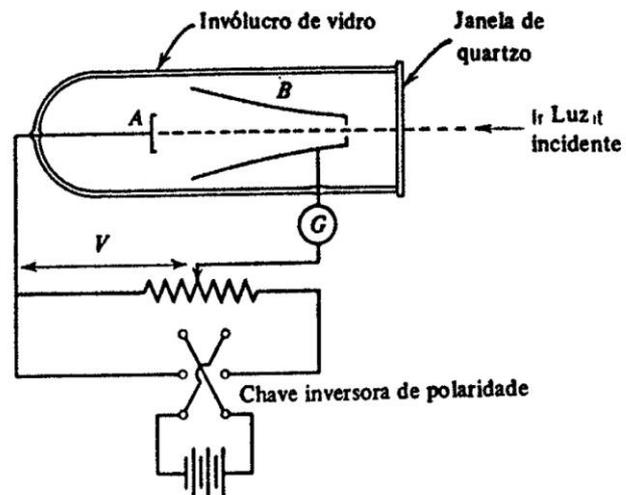
O efeito fotoelétrico renderia o prêmio Nobel tanto para Einstein (1921), quanto para Millikan (1923).



Experimento

- O aparato básico para a observação quantitativa e sistemática do efeito fotoelétrico consiste num invólucro (vácuo) contendo dois eletrodos (metálicos) separados por uma pequena distância. Devido à polaridade, eles estabelecem uma diferença de potencial análoga a um capacitor;
- A radiação eletromagnética deve incidir sobre um dos eletrodos (fotocátodo), a fim de que este emita fotoelétrons em direção ao outro (ânodo).

Experimento



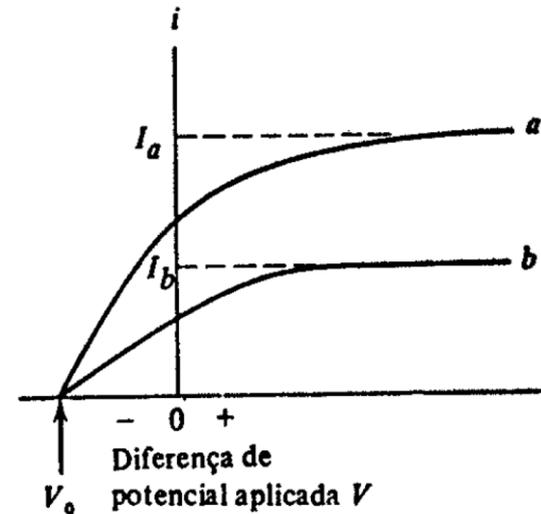
Experimento

- O gerador compõe um circuito de tal forma que define a polaridade dos eletrodos, bem como possibilita a medição da corrente de fotoelétrons;
- A polaridade entre os eletrodos deve se inverter no decorrer do experimento;
- A metodologia consiste em medir curvas de corrente (i) \times tensão aplicada (V) para cada frequência (ν) de radiação eletromagnética com intensidade específica.

Experimento

A partir das curvas obtidas, observa-se alguns comportamentos peculiares:

- a convergência das curvas de mesma frequência para um mesmo valor de tensão;
- a corrente de saturação;
- presença de corrente mesmo quando os eletrodos têm suas polaridades invertidas.



Teoria

- Einstein interpretou os resultados observados introduzindo o conceito de “pacotes de energia” concentrados no espaço, os *quanta* (fótons);
- Em suma, a energia propagada pela onda eletromagnética, na verdade, é carregada pelos fótons;
- Segundo Einstein, a manifestação ondulatória da radiação eletromagnética se faz presente apenas em termos estatísticos (grande número de fótons).

Teoria

Processo de transição discreta da fonte:

$$E_{fonte} = nh\nu \rightarrow E'_{fonte} = (n - 1)h\nu$$

- Cada fóton sempre tem energia $E = h\nu$.

Teoria

- Segundo a teoria de Einstein, o fóton deve ser integralmente absorvido pelo elétron;
- Além disso, o elétron absorvente do fóton deve estar ligado a um átomo ou sólido, para que o processo conserve energia e momento relativísticos. Portanto, elétrons livres não participam do efeito fotoelétrico.

Teoria

Sob os pressupostos anteriores, definidos por Einstein, assim são interpretados os resultados obtidos experimentalmente:

- Após absorver um fóton, o elétron é emitido com a seguinte energia cinética:

$$K = h\nu - w$$

Teoria

- w representa o trabalho necessário para desprender o elétron da superfície. Isto engloba forças atrativas e perdas por colisões;
- No caso da ligação mais fraca e na ausência de perdas energéticas, o processo se resume a:

$$K_{max} = h\nu - w_0$$

- Nesse contexto, w_0 passa a representar uma energia característica do material, denominada função trabalho.

Teoria

- Por outro lado, observando a tensão de corte (V_0), conclui-se que ela esteja relacionada aos elétrons de energia cinética mais alta, ou seja, os últimos elétrons a serem freados pela polaridade invertida:

$$K_{max} = h\nu - w_0 = eV_0$$

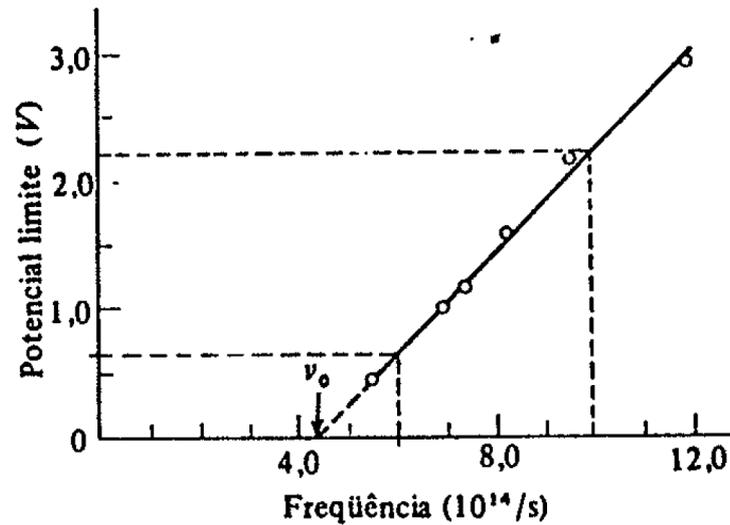
Teoria

Rearranjando a equação:

$$V_0 = \frac{h}{e} \nu - \frac{w_0}{e}$$

- Assim, conhecendo a função trabalho (w_0) de um material, é possível obter a constante de Planck (h) a partir da inclinação de uma reta do gráfico tensão de corte (V_0) × frequência (ν).

Teoria



Teoria

- A frequência de corte é obtida considerando a situação em que os elétrons adquiram energia somente para se desprender, sem excedentes na forma de energia cinética. Isto corresponde a:

$$K_{max} = 0 = h\nu_0 - w_0$$

$$\nu_0 = \frac{w_0}{h}$$

Teoria

A teoria de Einstein conseguiu explicar três características do efeito fotoelétrico não determinadas pela teoria ondulatória:

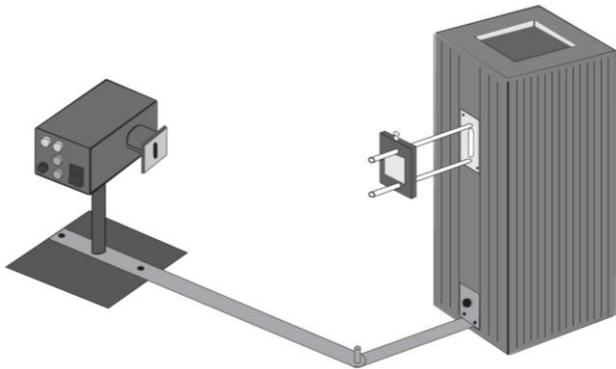
- O aumento da intensidade da radiação apenas eleva a corrente de saturação, não implicando em mudança na energia cinética máxima do fotoelétron (tensão de corte);
- A existência da frequência de corte.
- A inexistência de retardamento da emissão.

Instruções



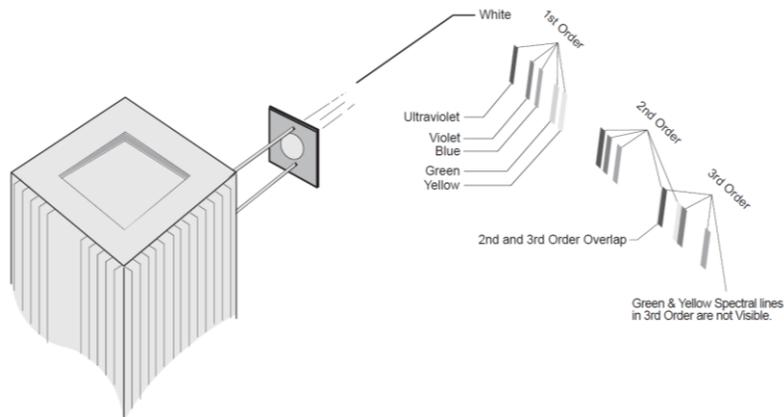
Recomendo a leitura do manual do equipamento (disponibilizado no site da disciplina). Nele, encontram-se especificações do aparato utilizado.

Instruções



- A figura ao lado ilustra a fonte luminosa (lâmpada de mercúrio) à direita, e a fotocélula à esquerda;
- O braço que conecta ambas as estruturas funciona como seletor de frequências.

Instruções



- As componentes do espectro da lâmpada são separadas por meio de uma rede de difração interna;
- Cada uma é, então, projetada à frente da fenda de saída. Há projeções simétricas (direita/esquerda) de diferentes ordens;
- Optamos sempre pelo lado com maior intensidade, restringindo-se à primeira ordem.
- Serão medidas as componentes, UV, violeta, azul, verde, amarelo e vermelho (omitido).

Instruções

- Ligue o computador e a fonte/medidor;
- Verifique o idioma do Windows. Selecione inglês EUA.
- Abra o software ProKeithley;
- Defina:
 - $V_{min} = -10.00 V$
 - $V_{max} = 10.00 V$
 - $Passo = 0.05 V$
 - $V_{out} = 0 V$

Instruções

- Apague a luz da sala;
- Tape a entrada da fotocélula com o tecido preto;
- Resete o medidor clicando em “resetar amperímetro”;

Instruções

- Com a entrada da fotocélula ainda tapada, execute o experimento pela primeira vez, clicando em “executar rampa rápida”;
- Ao término, clique em “salvar dados” e salve-os de forma organizada. Esta medição representa o ruído com a fenda fechada;
- Repita o procedimento com a abertura da fotocélula descoberta.

Instruções

- Após as primeiras duas medições, ligue a lâmpada;
- Identifique o lado onde a luz projetada é mais intensa;
- Inicie a medição pela emissão UV;
- Tome cuidado, utilize óculos se possível, ou evite longa exposição;
- Olhe para o interior da fotocélula e alinhe o sistema para que a luz cubra todo o fotocátodo;

Instruções

- Após o alinhamento, insira o cilindro de isolamento externo e o filtro no nível 100%;
- Clique em “executar rampa rápida” novamente;
- Salve os dados;
- Repita o procedimento trocando o nível do filtro até 40%;
- Verifique sempre o alinhamento.

Instruções

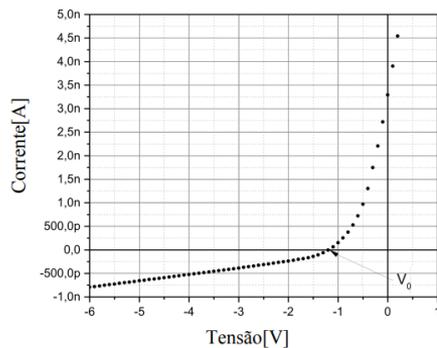
- Repita o experimento para as outras cores;
- No caso do verde e do amarelo, utilize também os filtros adicionais respectivos;
- Tenha especial cuidado com a precisão do vermelho.

Análise

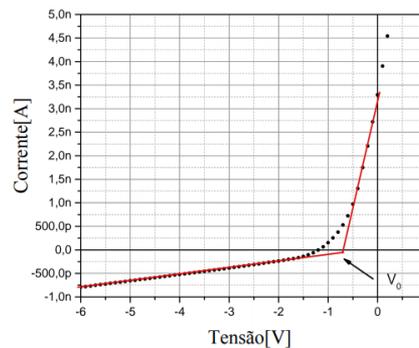
- Analise as curvas corrente \times tensão por meio do *Origin*;
- A tensão de corte pode ser estimada a partir de quatro métodos de análise.

Análise

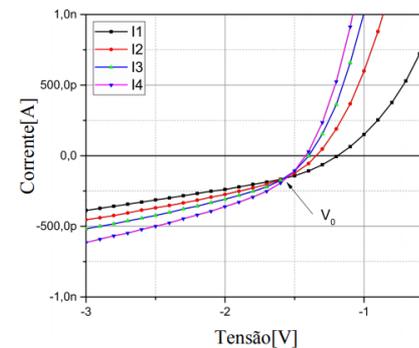
Método 1



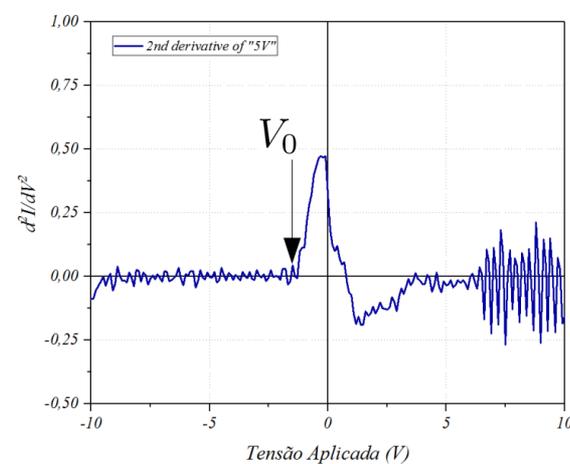
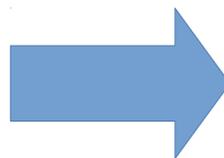
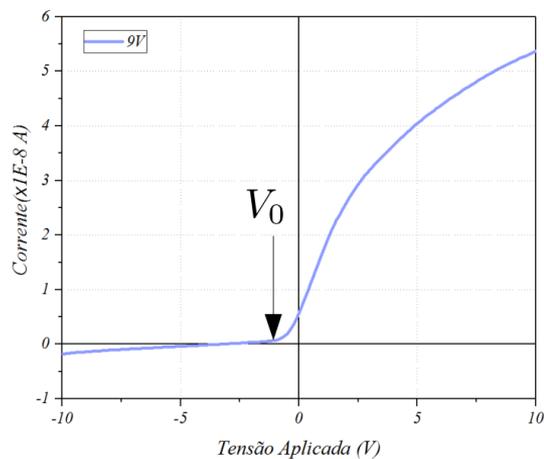
Método 2



Método 3



Análise

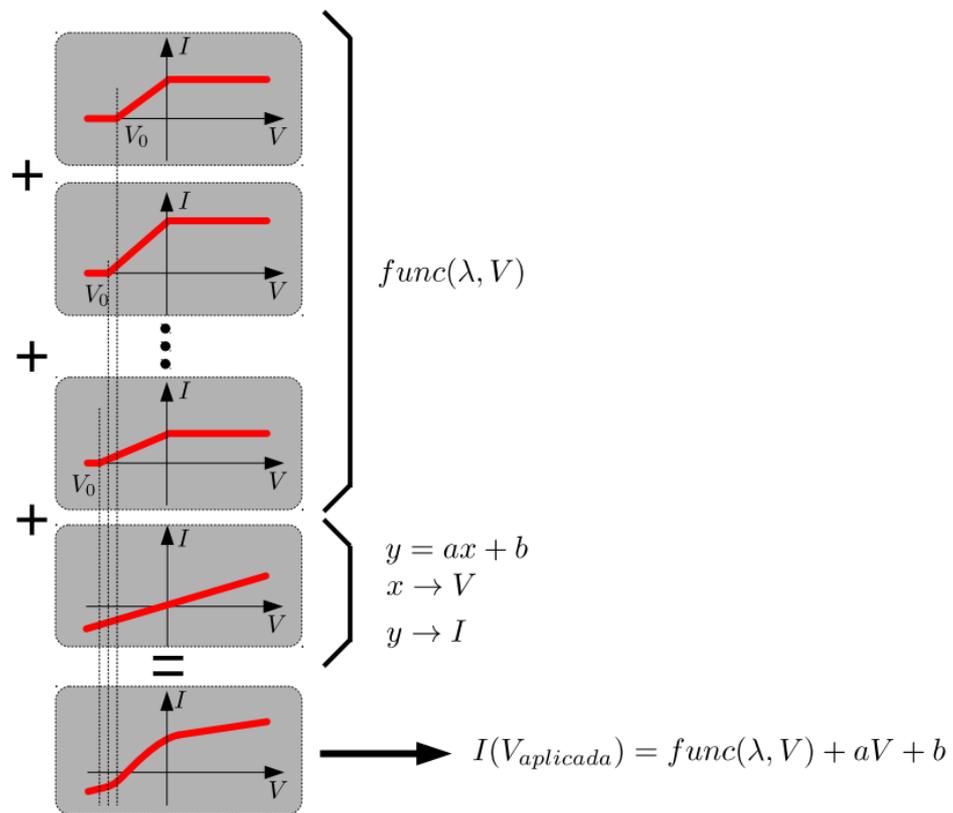


Análise

- Método 1: ponto de intersecção de uma curva de corrente com o eixo da tensão;
- Método 2: ponto de intersecção das retas assintóticas com o eixo da tensão;
- Método 3: abscissa da intersecção das curvas de mesma frequência;
- Método 4: análise da segunda derivada da corrente em relação à tensão.

Análise

- Utilizaremos o método 4:
- O método 4 consiste em assumir que todos os “ruídos” captados na medição sejam lineares;
- Assim, a diferenciação dupla da curva de corrente deve eliminar os termos de ruído.



$$I(V_{aplicada}) = func(\lambda, V) + aV + b$$

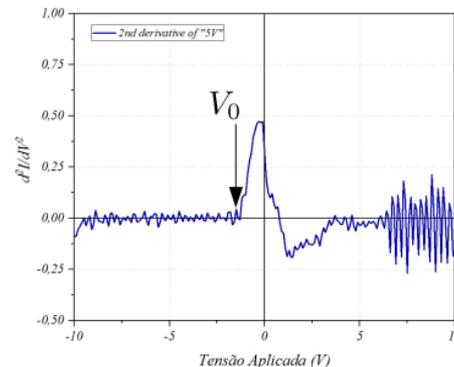
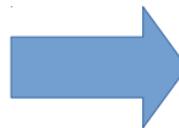
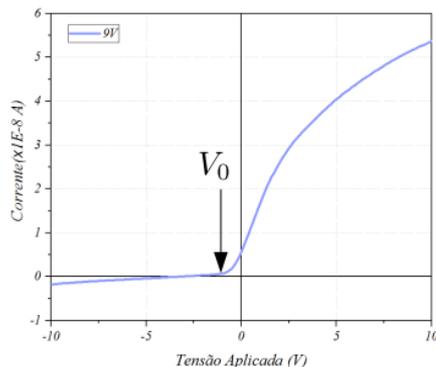
$$\frac{dI(V_{aplicada})}{dV} = \frac{dfunc(\lambda, V)}{dV} + a$$

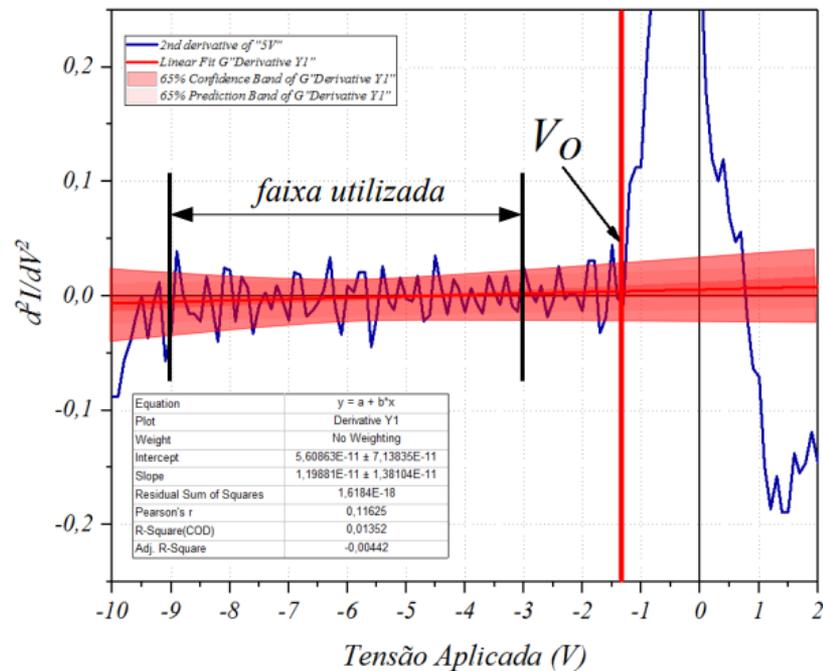
Corrente de fundo

$$\frac{d^2I(V_{aplicada})}{dV^2} = \frac{d^2func(\lambda, V)}{dV^2}$$

Eliminamos a parcela da corrente relativa à corrente de fundo.

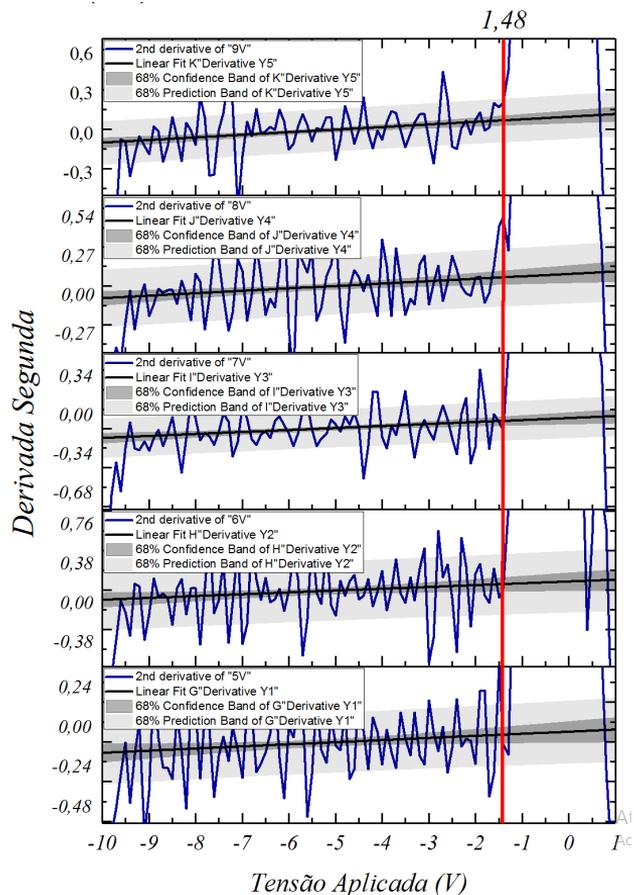
Fazemos isso numericamente, utilizando o Origin:





Por meio do Origin, faça um ajuste linear:

- Para o ajuste, defina o intervalo de [-9V;-3V];
- Defina faixas de confiança e predição de 68% para o intervalo;
- V_0 é obtido no ponto a partir do qual a curva deixa a faixa de confiança de forma consistente.



- Antes de utilizar o método descrito anteriormente, plote as curvas das segundas derivadas de mesma frequência de forma agrupada, por meio do estilo “*stack*”;
- Encontre um valor médio de V_0 por meio de uma reta média, ou calculando a média dos valores localizados em cada curva.

Análise

Após efetuar o procedimento anterior para todas as frequências e obter os respectivos valores médios de V_0 , calcule as incertezas associadas:

$$\sigma_{V_0} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\bar{V}_0 - V_{0i})^2}$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{V_0}}{\sqrt{N}}$$

Análise

$$\sigma_{tot} = \sqrt{(\sigma_{med})^2 + (\sigma_{ins})^2}$$

- Em suma, por meio das equações anteriores, calcula-se em ordem:
 - O desvio padrão associado a cada tensão de corte de uma mesma frequência σ_{V_0} ;
 - O desvio padrão médio σ_{med} ;
 - E, por fim, a incerteza total de tensão σ_{tot} relacionada ao valor médio da tensão de corte de cada frequência. Isto é, considerando tanto desvios estatísticos, quanto associados à precisão do instrumento medidor;

Análise

Já as incertezas de ν :

$$\sigma_\nu = \frac{c}{\lambda^2} \sigma_\lambda$$

- Como não estabelecemos uma precisão sistemática de alinhamento e seleção de emissões, estimamos um valor para a incerteza de comprimento de onda;
- Devido à incapacidade de diferenciar as duas emissões amarelas (dubleto), sabemos que a incerteza não deve ser menor do que 2 nm ;
- Como a diferença média entre as emissões consideradas é em torno de 30 nm , é razoável adotar uma incerteza de $5 \sim 10 \text{ nm}$;
- Padronizando, adotemos 5 nm .

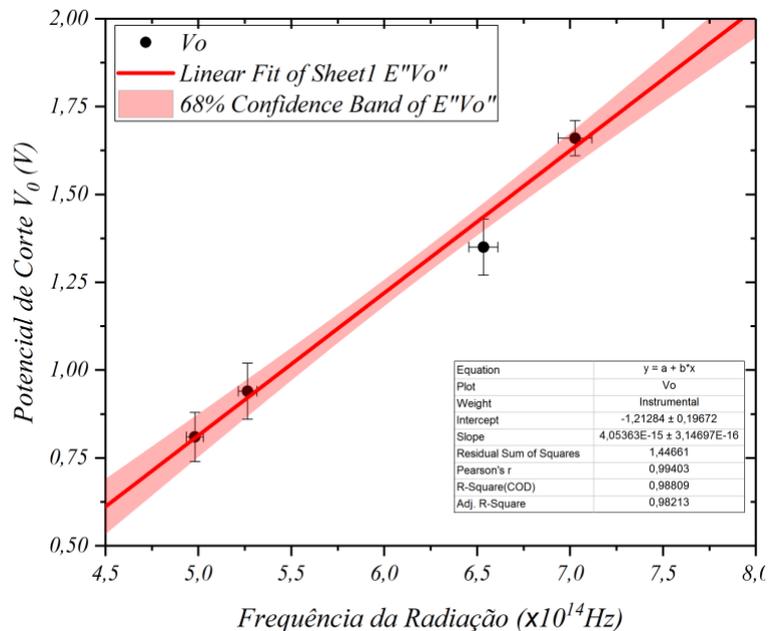
Análise

Color	Frequency (Hz)	Wavelength (nm)
Yellow	5.18672E+14	578
Green	5.48996E+14	546.074
Blue	6.87858E+14	435.835
Violet	7.40858E+14	404.656
Ultraviolet	8.20264E+14	365.483

- A tabela ao lado consta no manual do equipamento (*Pasco*) e indica com alguma precisão as emissões esperadas;
- A emissão amarela foi a única medida pelo fabricante, as outras foram obtidas na literatura;
- A outra emissão amarela, não indicada, corresponde a aproximadamente 577 nm ;
- Já a emissão vermelha, omitida, corresponde a aproximadamente 615 nm .

Análise

Depois de organizar todos os valores médios de V_0 , identificando-os pelas respectivas frequências e incertezas inerentes, plote um gráfico $V_0 \times \nu$.



- NÃO SE ESQUEÇA DE INSERIR AS INCERTEZAS!
- Ao plotar o gráfico, efetue um ajuste linear com faixa de confiança de 68%;
- A constante de Planck e a função trabalho correspondem à inclinação (*slope*) e à interceptação (*intecept*), respectivamente;
- Atenção: os valores são obtidos em unidades $eV \cdot s$ e eV , respectivamente. Para converter para o SI, é necessário multiplicar pela carga elementar;
- Repare: os valores são obtidos já com as respectivas incertezas finais.

Análise

Ao escrever o relatório, siga as instruções no roteiro disponibilizado no site da disciplina.

Referências

- Recomendo a leitura da introdução do segundo capítulo do livro “Física Quântica” (Eisberg/Resnick). Esta apresentação foi baseada em tal trecho;
- Algumas figuras foram retiradas de apresentações de anos anteriores. Por isso, para uma melhor compreensão, também recomendo a consulta das outras apresentações (site).