

EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ

Material e métodos

- 1 válvula tetrodo [Leybold 55585](#) acoplada a um forno elétrico
- 1 fonte de tensão regulável corrente alternada (CA) – transformador variável (Varivolt) 0-260 V, 0,5A, para forno elétrico – conectado a 110 V.
- 1 termômetro (do tipo termopar)
- 1 fonte de tensão corrente contínua (CC) regulável 0-30 V ($G_2 - V_3$)
- 1 eletrômetro Keithley
- Interface de controle - sistema com o circuito das ligações elétrica e controle de 3 fontes de tensão CC reguláveis (V_1 , V_2 e V_4) - conecta ao computador e software de controle e leitura (manual e detalhes em documento anexo).

A figura 1 apresenta um diagrama detalhado da válvula tetrodo utilizada.

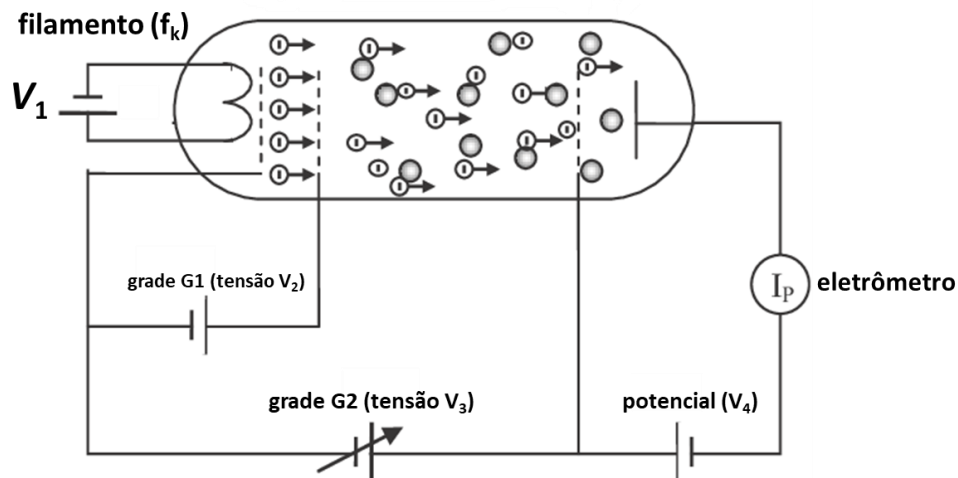


Figura 1 - esquema da válvula tetrodo, com indicação do filamento, grades 1 e 2 e ânodo.

No interior do tubo, há mercúrio (Hg) no estado líquido a temperatura ambiente. Para que haja átomos de Hg no estado vapor, é necessário aquecer a ampola/tubo/válvula. Dessa forma, cria-se uma atmosfera de vapor de mercúrio por onde elétrons (emitidos por um filamento aquecido) podem se deslocar.

1. Filamento (f_k) / Cátodo (C)

- Alimentado pela tensão V_1 para aquecimento.
- Emite elétrons por efeito termiônico.
- Forma-se em torno dele uma “nuvem de elétrons”, chamada *gás de elétrons*.
- A distribuição de energia dos elétrons emitidos pelo cátodo é larga

2. Grade G1 (tensão V_2)

- Controla a quantidade de elétrons que conseguem sair dessa nuvem e seguir adiante no tubo.
- Ajustando V_2 , aumentamos ou reduzimos o fluxo de elétrons rumo à próxima região.

3. Grade G2 (tensão V_3)

- Responsável por **acelerar** os elétrons em direção ao ânodo.
- É a tensão V_3 que define a **energia cinética** dos elétrons ao colidirem com os átomos de Hg.
- No experimento, fazemos uma **varredura** de V_3 (por exemplo, de 0 V até 30 V) para observar como a corrente no ânodo muda de acordo com a energia que o elétron adquire.

4. Ânodo (A) e Potencial de Retardo (V_4)

- Aplica-se um pequeno **potencial negativo** no ânodo, em relação a G2, conhecido como “**potencial de retardo**”. No processo de **ionização** esse potencial é máximo (negativo).
- Elétrons com energia muito baixa (devido a distribuição inicial de energia, bem como terem sofrido colisões e perdido energia) são “barrados” e não chegam ao ânodo.
- Portanto, apenas os elétrons com energia **suficiente** para superar essa barreira contribuem para a corrente medida.

A interface/caixa de controle dispõe de um gerador de rampa para V_3 . Enquanto o controle das tensões (V_1 , V_2 e V_4) é feito de forma manual com um potenciômetro e leitura através de um multímetro conectado a caixa. A tensão V_3 será ajustada em uma fonte de tensão externa, nessa fonte ajustaremos o valor máximo de V_3 . Na figura 2, uma visão geral dos equipamentos.



Figura 2 - Visão geral do experimento, da esquerda para direita, multímetro de controle da tensão de saída do Varivolt, Varivolt, eletrômetro, multímetro de leitura de temperatura da válvula, válvula e ventoinha, interface de controle e multímetro para ajuste das tensões (V_1 , V_2 e V_4), fonte de tensão e multímetro para ajuste de V_3 e microcomputador de controle.

O mercúrio metálico dentro do tubo precisa estar parcialmente no estado de vapor para disponibilizar átomos com os quais os elétrons possam colidir e promover excitações. Em temperatura ambiente, a pressão de vapor do Hg é muito baixa, resultando em poucas colisões; quando se aquece a ampola, essa pressão sobe, e o aumento na densidade de átomos no estado gasoso torna as colisões mais frequentes. No entanto, se a pressão for excessiva, os elétrons sofrem tantas colisões que não conseguem acumular a energia suficiente para excitar o átomo de Hg. Por isso, busca-se condições de número de elétrons (V_1 , V_2) e uma faixa de temperatura ideal em que a pressão de vapor e o livre caminho médio dos elétrons sejam adequados para que as perdas de energia características do processo de excitação fiquem evidentes.

O livre caminho médio, por sua vez, é a distância média que um elétron percorre antes de sofrer uma colisão inelástica com um átomo de Hg e depende diretamente da densidade de átomos no vapor; conforme a pressão aumenta, a distância média entre colisões diminui. Dessa forma, tanto pressões muito altas quanto muito baixas dificultam a observação clara dos picos de excitação característicos do experimento de Franck-Hertz.

Três situações distintas serão exploradas neste experimento, esquematizadas na figura 3, que mostra os potenciais em função da posição entre o catodo e o anodo, para cada tensão aplicada na grade 1 (V_2), grade 2 (V_3) e no anodo (V_4).

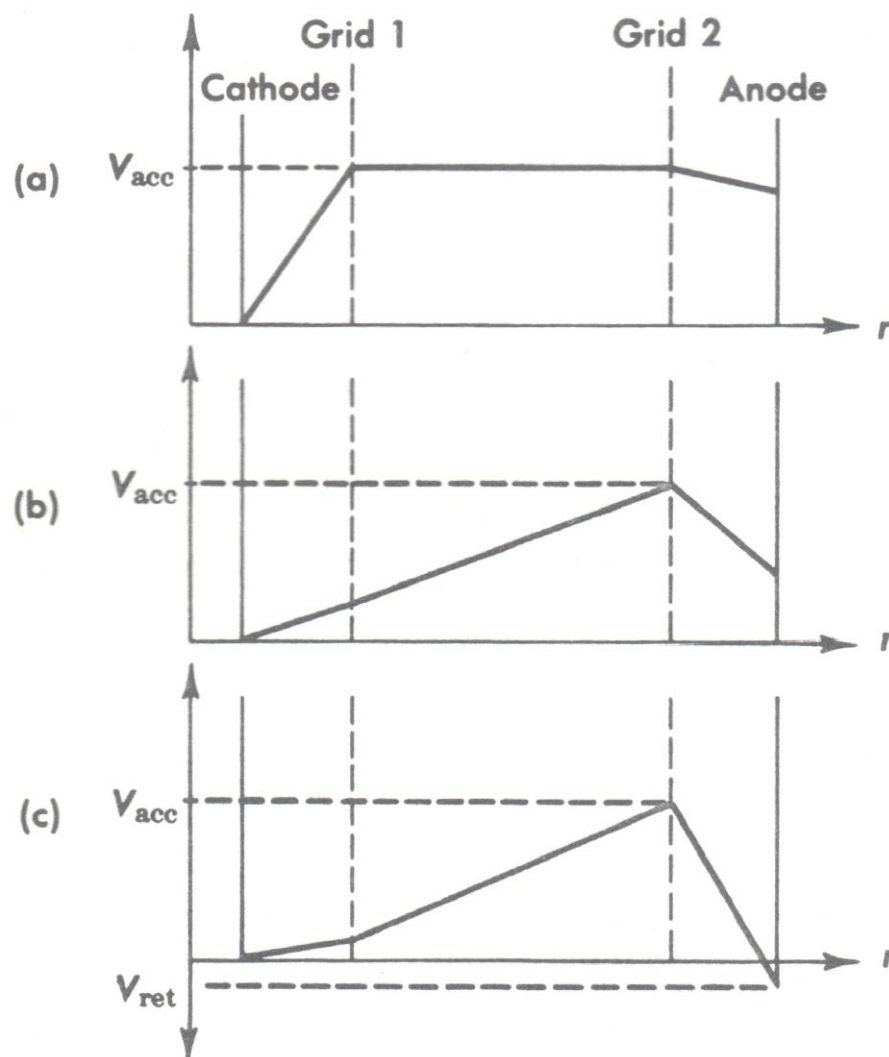


Figura 3 – variação espacial dos potenciais saindo do filamento/cátodo, passando pelas grades (grids) 1 e 2 e chegando ao ânodo, para as situações de (a) excitação única, (b) múltiplas excitações e (c) ionização. Adaptado de Melissinos.

Quando os potenciais são distribuídos como na Fig. 3a, os elétrons são acelerados entre o cátodo e a grade 1; em seguida, se deslocam na região de interação entre as duas grades e deve superar o potencial de retardo entre a grade 2 e o ânodo. Quando o limiar para excitar o primeiro nível é alcançado, observa-se uma queda acentuada na corrente de elétrons, proporcional ao número de colisões que ocorreram (produto da densidade atômica e da seção de choque).

Uma distribuição alternativa de potenciais é mostrada na Fig. 3b, onde V_3 é aplicado à grade 2, de modo que um elétron possa ganhar energia adicional após uma colisão no espaço entre as duas grades. Nesse caso, quando V_3 atinge o primeiro potencial de excitação, colisões inelásticas são novamente possíveis e observa-se uma diminuição na corrente de elétrons no ânodo; entretanto, quando V_3 atinge um valor duas vezes maior que o primeiro potencial de excitação, é possível que um elétron excite um átomo no meio do caminho entre as grades, perca toda a sua energia e, em seguida, ganhe novamente energia suficiente para excitar um segundo átomo e termine com praticamente zero energia na grade 2; assim, ele não é capaz de superar o potencial de retenção e alcançar o ânodo, dando origem a uma segunda queda na corrente. A vantagem desse arranjo é que as quedas de corrente são muito mais pronunciadas, e é fácil obter uma multiplicidade de cinco vezes ou até maior na excitação do primeiro nível. Como antes, um pequeno potencial de retenção é aplicado entre a grade 2 e o ânodo (V_4), e um potencial de aceleração entre o cátodo e a grade 1 (V_2), suficiente para superar os efeitos da carga espacial e fornecer uma corrente de elétrons adequada. A densidade do vapor atômico pelo qual o feixe de elétrons passa afeta fortemente os resultados observados. Densidades baixas resultam em grandes correntes de elétrons, quedas de corrente (vales) muito pequenos; ao contrário, uma alta densidade tem como consequência correntes mais fracas, vales proporcionalmente maiores. O ajuste da temperatura do tubo (vapor de mercúrio) permite o controle da densidade.

O mesmo aparato pode ser usado para a medição do potencial de ionização — ou seja, a energia necessária para remover completamente um elétron do átomo. Nesse caso, em vez de observar o feixe de elétrons após as colisões, é mais fácil detectar os íons formados. A distribuição de potenciais é mostrada na Fig. 3c, onde o ânodo é feito ligeiramente negativo em relação ao cátodo; assim, nenhum elétron pode alcançar o ânodo, que se torna um coletor de íons. O potencial de aceleração é aumentado até que seja observada uma subida acentuada na corrente de íons medida no ânodo.

Em ambos os tipos de medições, os valores obtidos para o potencial de aceleração devem ser corrigidos pela diferença de potencial de contato entre o cátodo e o ânodo. Se no experimento de excitação o mesmo nível foi observado duas ou mais vezes, a diferença de potencial entre picos adjacentes é uma medida exata da energia de excitação, pois a diferença de potencial de contato desloca toda a escala de voltagem. Assim que a energia de excitação for encontrada, a diferença de potencial de contato é determinada pela diferença entre esse valor verdadeiro e o primeiro pico. A diferença de potencial de contato encontrada pode ser usada para corrigir a medição do potencial de ionização.

Atenção: Não ligue nenhuma fonte de tensão, especialmente a do filamento V1, até que o tubo atinja 120 a 160°C.

Não se esqueça de anotar CORRETAMENTE todos os parâmetros envolvidos — especialmente a temperatura da válvula e a *escala e o fator de escala* do eletrômetro! Sempre observe o sinal obtido. Caso este esteja muito ruidoso, repita o procedimento algumas vezes para verificar se o comportamento persiste.

Para comparação entre diversas situações, verifique se a escala de coleta no eletrômetro é a mesma, caso contrário faça a correção na tabela de dados.

Ao mudar de escala do eletrômetro, verifique o zero (situação sem sinal de entrada) da escala, senão estiver, faça o ajuste adequado.

No eletrômetro faremos leituras de corrente na ordem de nanoAmper, no modo negativo (-) para múltiplas e uma excitação. Para o modo de ionização, a corrente será dos íons de mercúrio, nesse caso o modo do eletrômetro será positivo (+).

PROCEDIMENTO

Ligue a fonte de tensão que controla o forno ao transformador variável e o transformador variável em 110 V. Regule o transformador para operar inicialmente a 100 V.

Monitore a temperatura até atingir a temperatura de 160°C, subindo rapidamente no início. Procure manter a temperatura o mais constante possível manipulando a fonte do forno e a ventoinha.

✓ Ligue as interfaces de controle, detalhe mostrado na figura 4.



Figura 4 – detalhe da interface de controle com os botões de liga/desliga e potenciômetros de ajuste e multímetro para ajuste das tensões (V1, V2 e V4).

MÚLTIPLAS EXCITAÇÕES

Neste caso, o elétron é acelerado dentro do tubo até realizar uma colisão inelástica, perdendo sua energia. Como está sob ação do potencial elétrico, é acelerado novamente até realizar nova colisão e assim por diante.

- ✓ Fixe a temperatura em 160°C (ajustando a fonte de tensão CA do forno e ventoinha).
 - ✓ Ligue o Eletrômetro.
 - ✓ Obs.: Desabilite o botão “Lock” somente após ligar o instrumento.
 - ✓ Ligue o microcomputador e espera a inicialização completa.

-
- ✓ Abra o programa clicando no ícone "Frank-Hertz.exe" na área de trabalho e maximize a janela. Em seguida, execute o programa utilizando as setas do teclado.
 - *Efeito da variação na tensão do filamento* - coloque $V_2 = 6V$ e V_3 na tensão máxima ($\sim 30V$ – deixe a fonte de tensão também no máximo de corrente) e $V_4 = 0,5V$. Verifique o que ocorre ao alterar o potencial de V_1 iniciando no máximo valor possível até o mínimo. Interprete.
 - *Efeito da variação na tensão grade 1 de coleta dos elétrons* - ajuste $V_1 = 3,5V$ e $V_4 = 0,5V$ e V_3 na tensão máxima. Verifique o que ocorre ao alterar o potencial de V_2 iniciando no máximo valor possível até o mínimo. Interprete.
 - *Efeito da variação do potencial de retardo V_4 dos elétrons* - com $V_1 = 3,5V$, $V_2 = 6V$ e V_3 na tensão máxima. O que ocorre ao alterar o potencial de retardo V_4 iniciando no máximo valor possível até o mínimo. Interprete.
 - ✓ Repita, os procedimentos anteriores para as temperaturas de $150^\circ C$, $140^\circ C$, $130^\circ C$, $120^\circ C$. Essa diminuição de temperatura pode ser obtida diminuindo a tensão no transformador variável e ligando a ventoinha (cooler). Interprete os resultados obtidos e para cada temperatura estime a concentração de vapor de Hg e livre caminho médio.
 - ✓ Com valores fixos de V_1 , V_2 e V_4 faça uma análise do comportamento para diferentes temperaturas utilizando os resultados anteriores.

Todo o procedimento anterior pode ser repetido, retomando novamente a temperaturas iniciais.

Dica: salve o arquivo com um nome do tipo: "excitaçãoV1_3V2_4V4_05T140", pois, pode facilitar a importação de vários arquivos no Origin ou similar.

UMA EXCITAÇÃO

Se A estiver a uma ddp maior do que f_k de um valor constante (cerca de $3,5V$), não esperamos que haja alteração da corrente até que ocorra uma excitação dos átomos de mercúrio, quando então haverá uma queda brusca de corrente devido à perda de energia dos elétrons (colisão inelástica), que não conseguem vencer o potencial de retardo. A corrente não volta a subir

pois a energia remanescente no elétron após a colisão será sempre menor que o potencial de retardo.

Selecione a chave para essa opção, neste caso teremos o potencial em V_2 que irá acompanhar o potencial V_3 ; coloque V_1 em 3.5V, V_4 em 6V e V_3 em 15V (lembre-se que o software irá controlar V_3 , fazendo a leitura da corrente em função da variação de V_3 de zero até o valor ajustado). Registre o comportamento para as seguintes temperaturas: 150°C, 140°C, 130°C, 120°C e 110°C. Lembre-se de manter a temperatura estável durante a medida. Para uma dada temperatura você pode alterar a tensão no filamento (V_1 : 1-6V) e a tensão de retardado (V_4 : 1-6V). Busque interpretar e entender o observado, explique **bem** o comportamento da curva.

IONIZAÇÃO

Para a ionização, o esquema muda ligeiramente (figura 5):

Uma vez que a tensão em A é mais baixa que em f_k , o potencial de retardo é tão grande que nenhum elétron será detectado. Além disso, por A estar a um potencial negativo, serão detectados os íons positivos quando ocorrer a ionização, e teremos uma corrente **positiva** surgindo repentinamente. No eletrômetro, troque para meter (+) e selecione na interface a chave para ionização; coloque V_1 e V_4 à tensão máxima, V_2 a 3V e V_3 em 15V. Registre o padrão nas temperaturas: 140°C, 130°C, 120°C, 115°C e 110°C, e explique o comportamento da curva com a temperatura. Calcule a energia de ionização, não se esquecendo de considerar o potencial de contato (que pode ser obtido a partir da experiência de múltiplas excitações).

Aprofundamento

1. Faça a leitura dos artigos: - Henne G. F., *"What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?"*, Am. J. Phys. 56 (8), 1988, 696-700; - Rapior, Gerald, Klaus Sengstock, and Valery Baev. *"New features of the Franck-Hertz experiment."* American journal of physics 74.5 (2006): 423-428; Robson, Robert E., Ronald D. White, and Malte Hildebrandt. *"One hundred years of the Franck-Hertz experiment."* The European Physical Journal D 68 (2014): 1-20.

-
1. Qual é o livre caminho médio (λ) de um elétron no tubo de Franck-Hertz a 100°C, 150°C e 190°C. compare com os espaçamentos entre grade e cátodo. (Obs.: à temperatura ambiente existe Hg líquido. A pressão de vapor de Hg pode ser encontrada em Handbooks)
 2. O que é o potencial de contato?
 3. Explique o comportamento da “linha-de-base” da curva de tensão-corrente? Existe relação com o potencial aplicado? Veja o experimento do efeito termiônico.
 4. Como seria a curva $I \times V$ se não houvesse vapor de mercúrio?
 5. É possível comprovar a lei de Child-Langmuir?
 6. Por que os picos obtidos não são abruptos, se a energia de transição é bem definida?
 7. Explique os tipos de colisões eletrônicas que ocorrem no experimento.
 8. Existe uma aplicação tecnológica semelhante a esse experimento?
 9. Por que utilizamos um eletrômetro e o que é termopar?

Obs.: Para que não ocorra falha na comunicação entre a interface e o micro o desligamento deverá ser feito da seguinte forma:

- 1° - Feche o programa;
- 2° - Desligue o micro (espere o desligamento completo);
- 3° - Desligue as fontes. (Obs.: as tensões têm que estar em $V=0$);
- 4° - Desligue a Interface;
- 5° - Desligue o Eletrômetro (após desligar feche o botão “Lock”);
- 6° - Desligue o Varivolt (deixar em $V=0$).

Ao sair da sala observe se a temperatura da válvula atingiu $\sim 30^\circ\text{C}$.

Para acelerar o resfriamento utilize a “ventoinha-cooler” que está localizada no suporte junto a válvula.

Bibliografia

2. Melissinos, A. C., *Experiments in Modern Physics*, Academic Press, 1966.
3. Eisberg R. e Resnick R., *Física Quântica (Átomos, Moléculas, sólidos, núcleos e partículas)* Guanabara Dois, 1979.
4. Tipler P. A., *Física Moderna*, Guanabara Dois, 1981.

-
5. Trig, G. L., *Crucial Experiments in Modern Physics*, Crane, Russac & Company, Inc., 1975.
 6. Alonso M. e Finn. E. J., *Quantum and Statistical Physics*, Fundamental University Press, 1968.
 7. Fowles G. R., *Introductions to Modern Optics*, Holt, Rinehart and Wiston, Inc., 1968.
 8. Henne G. F., “*What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?*”, Am. J. Phys. 56 (8), 1988, 696-700.