

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.

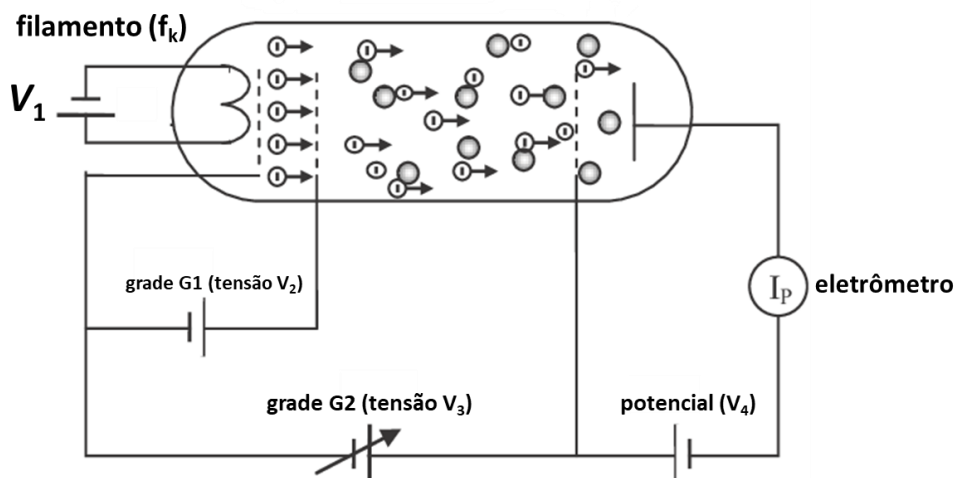


Figura 1 - esquema da válvula tetrodo, com indicação do filamento, grades 1 e 2 e ânodo.

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*.

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**”. Também podemos aplicar um **potencial positivo** para detectarmos íons, no processo de **ionização**.
- Elétrons com energia muito baixa (por 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 respectivos potenciais em cada eletrodo.

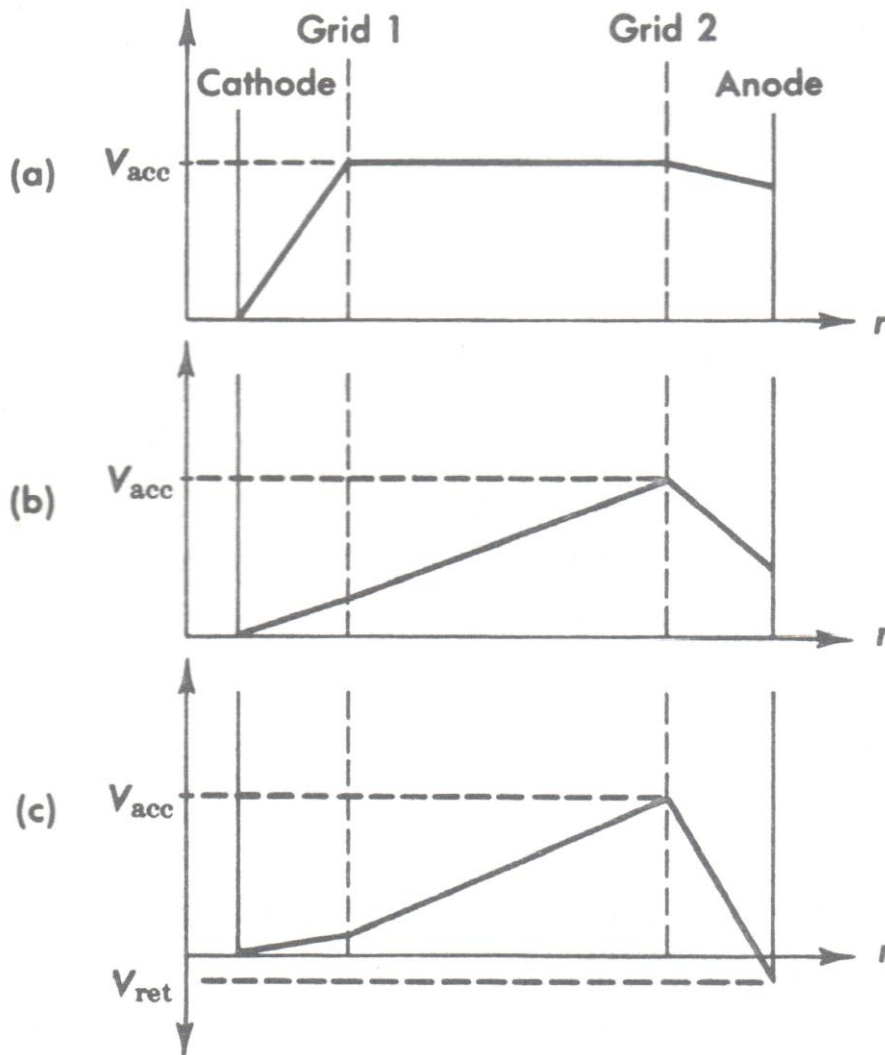


Figura 3 – variação espacial dos potenciais saindo do filamento/cátodo, passando pelas grades (grids) 1 e 2 e chegando ao ânodo. Nas situações de (a) excitação única (b) múltiplas excitações (c) ionização. Adaptado de Melissinos.

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. Caso contrário, sem vapor de mercúrio, poderá ocorrer curto-circuito na válvula devido ao mercúrio líquido.

Não se esqueça de anotar CORRETAMENTE todos os parâmetros envolvidos – especialmente a temperatura da válvula e a 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.

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).
 - *Efeito da variação na tensão do filamento* - coloque $V_2 = 6V$ e V_3 na tensão máxima (~30 V – 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 por volta de 0,5V até o máximo. Intérprete.
 - *Efeito da variação na tensão grade 1 de coleta dos elétrons* - ajuste $V_1 = 3,5 V$ e $V_4 = 0,5V$ e V_3 na tensão máxima. Verifique o que ocorre ao altera o potencial de V_2 iniciando por volta de 0,5V até o máximo. Intérprete.
 - *Efeito da variação do potencial de retardo V_4 dos elétrons* - com $V_1 = 3,5 V$, $V_2 = 6V$ e V_3 na tensão máxima. O que ocorre ao alterar o potencial de retardo V_4 iniciando por volta de 0,5V até o máximo. Intérprete.
-
- ✓ 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.
-
- ✓ Repita, os procedimentos anteriores para as temperaturas de 150°C, 140°C, 130°C, 120°C. Essa diminuição de temperatura pode ser obtida diminuindo a tensão no transformador variável e ligando a ventoinha (cooler). Intérprete os resultados obtidos.
 - ✓ 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.

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 ~30°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.