

EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ

Parte 1 – uma excitação, ionização, múltiplas excitações

I- Introdução

O clássico experimento de J. Franck e G. Hertz, realizado em 1914 e que lhes valeu o Prêmio Nobel em 1925, teve como fundamental consequência a confirmação de uma suposição um tanto radical proposta na época: a quantização da energia.

No final do século XIX foram realizados intensos estudos da radiação característica emitida por átomos em um gás excitado por descarga elétrica: a radiação quando analisada por um espectroscópio apresentava-se como um conjunto de linhas discretas. Em 1885, **Balmer** apresenta uma fórmula empírica para o espectro do **Hidrogênio**. A partir de então muitos esforços foram feitos para construir um modelo de átomo cujo espectro de radiação seguisse essa fórmula.

Em 1913, Niels Bohr propõe um modelo para o átomo de hidrogênio: o elétron move-se em órbita circular (ou elíptica) em torno do núcleo, positivo, devido à atração Coulombiana. Apesar de ser mecanicamente estável, o modelo é eletricamente instável, pois uma carga continuamente acelerada irradiará na frequência igual ao movimento periódico, perdendo energia. Portanto, além do elétron colapsar com o núcleo num tempo muito curto, o espectro emitido seria contínuo. Bohr então propõe os seguintes **postulados**:

- 1º) O elétron move-se em órbitas estáveis, denominadas estados estacionários, sem irradiar, possuindo energias bem definidas;
- 2º) O átomo irradia quando o elétron passa de uma órbita estável a outra órbita estável, com frequência de radiação proporcional à diferença de energia entre as órbitas $E = hf$;
- 3º) O movimento angular é quantizado $mvr = nh$, onde h é a constante de Planck.

Para a conexão com a mecânica clássica, cria o **princípio de correspondência**: no limite de órbitas grandes (grandes energias) cálculos quânticos devem concordar com cálculos clássicos. Com esses 3 postulados, Bohr reproduz o espectro do hidrogênio.

Os modelos atômicos até então previstos conseguiam prever a ionização do átomo em função de seu raio. Originalmente, Franck e Hertz pretendiam comprovar essas relações, determinando experimentalmente o que pensavam ser a energia de ionização para vários elementos:

1ª montagem: mediram a (suposta) energia de ionização para vários gases, entre eles o Hélio. Tinham pouca precisão, da ordem de **1 Volt**, devido às baixas correntes resultantes.

2ª montagem: adequada para a medida de metais (raio atômico maior), conseguiram uma precisão muito melhor, da ordem de **0,1 Volts**. Aproveitam então a boa precisão para testar uma teoria: que a energia da suposta ionização seja igual à hf onde f é frequência do movimento próprio do elétron. Para o átomo de **Mercúrio** comparam com o valor de comprimento de onda $\lambda = 2536 \text{ \AA}$ conhecido na época, correspondendo ao valor experimentalmente por eles encontrado de **4,84 Volts**. A essa altura, animados com os excelentes resultados obtidos, começam a especular: talvez os elétrons percam sua energia não em um processo de ionização e sim em forma de **radiação**.

3ª montagem: substituem a válvula de vidro por uma válvula de quartzo, e observam a emissão de luz ultravioleta de $\lambda = 2536 \text{ \AA}$. Curiosamente essa é a única radiação emitida, à mesma energia da suposta ionização, apesar de o espectro do mercúrio possuir outras linhas (por exemplo, $\lambda = 1849 \text{ \AA}$, referente a 6,7 V).

Continuam convictos de que em algumas colisões a energia do elétron seja convertida em radiação, e em outras colisões, em ionização (à mesma energia). A explicação verdadeira, que lhes valeu o Prêmio Nobel de 1925, é que o observado se deve na realidade a **excitações dos átomos** (transições entre níveis). A grande lição que advém do experimento de Franck-Hertz é, portanto a existência de somente **estados estacionários com energia bem definida**, confirmando as propostas radicais de Bohr e Planck.

II- Aparelhagem

- 1 válvula tetrodo Leybold 55580
- 1 forno elétrico
- 1 termômetro
- 1 fonte de alimentação regulável 0-120 V, 0,5A, para forno elétrico
- 1 fonte de alimentação regulável 0-75 V (G_2)
- 1 conjunto de 3 fontes reguláveis ($f - f_k, G_1, S$) 0-6 V; 0-3 V; 0-6 V
- 1 eletrômetro Keithley
- 1 multímetro
- 1 plotter HP (usado como registrador XY)
- 1 caixa com o circuito das ligações elétricas

Existe a eventualidade de utilizar um sistema de aquisição de dados fornecendo os mesmos parâmetros requeridos para o experimento em suas diferentes situações.

III- Descrição do sistema

Na figura 1 vemos um esquema da válvula tetrodo utilizada:

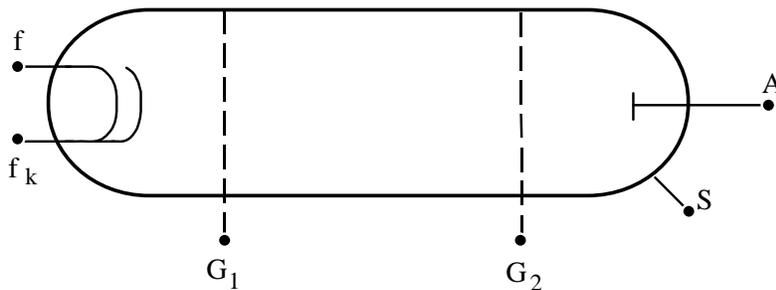


Figura 1: válvula tetrodo Leybold.

Dentro do tubo existe uma quantidade de mercúrio que deve ser aquecida para ficar num estado de vapor. Ao aplicar um tensão (max. 6V) no filamento f , poderemos admitir a existência de um gás de elétrons ao redor do cátodo f_k . A grade G_1 controla o número de elétrons que serão atraídos desse gás, enquanto que a grade G_2 é responsável

pela aceleração do elétron. Durante o trajeto dos elétrons haverá colisões com os átomos de Hg. Ao ânodo A é aplicado em geral um pequeno potencial negativo (potencial de retardo) para impedir que elétrons de baixa energia contribuam para a corrente total. Registra-se a corrente em A em função do potencial aplicado entre f_k e G_2 .

Três situações distintas serão exploradas neste experimento, esquematizadas na figura 2, que mostra os respectivos potenciais em cada eletrodo. Os respectivos esquemas elétricos são mostrados a seguir.

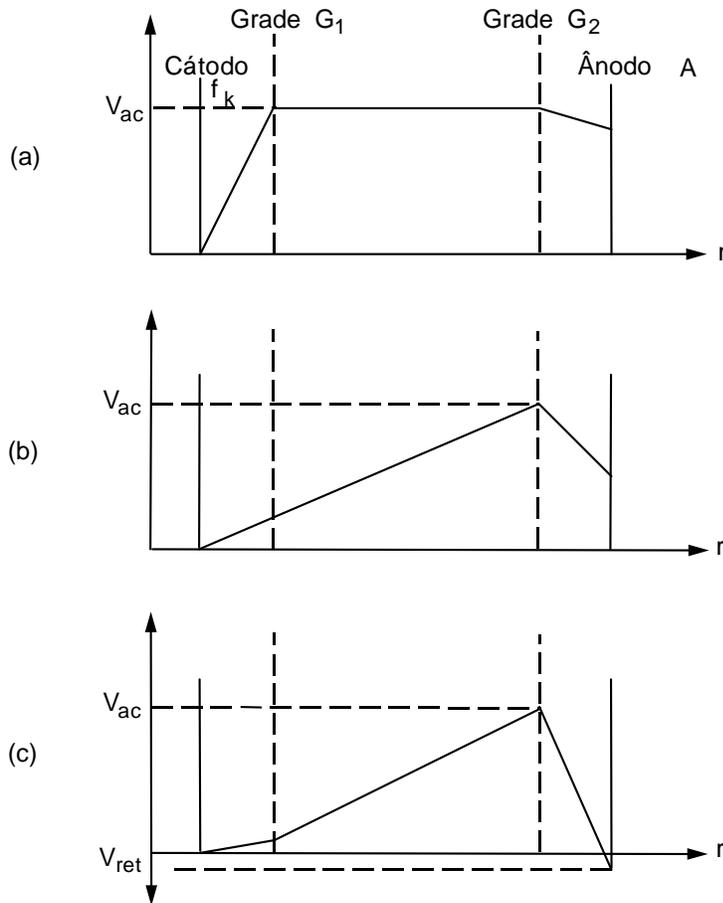


Figura 2: representação esquemática: (a) uma excitação, (b) múltiplas excitações, (c) ionização.

(a) 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 um queda brusca de corrente devido à perda brusca 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. Na figura 3 vemos o esquema para observarmos uma excitação.

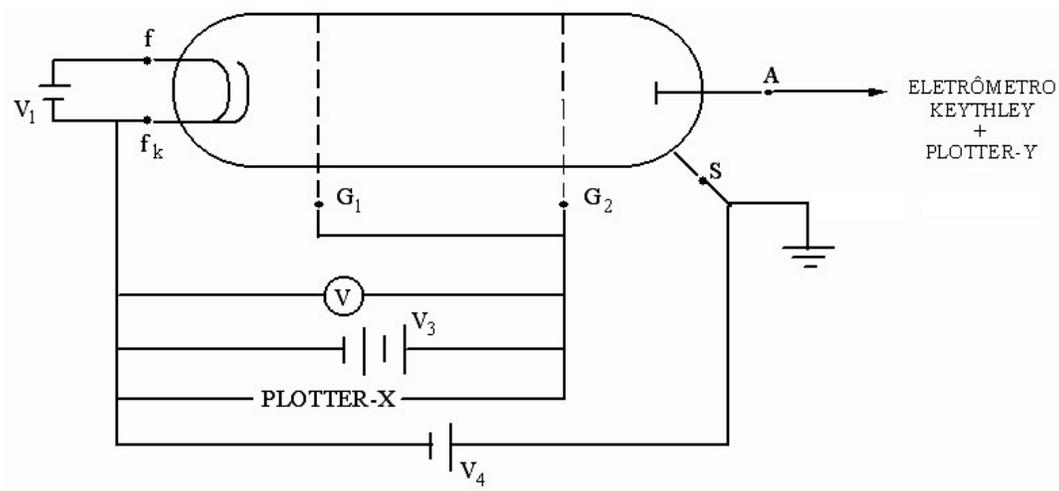


Figura 3: uma excitação.

(b) múltiplas excitações

A figura 4 mostra o esquema elétrico para obter o padrão de múltiplas excitações:

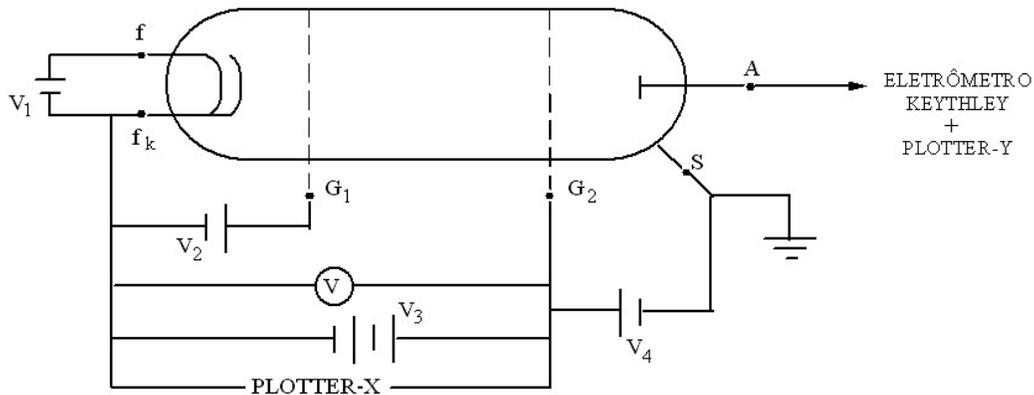


Figura 4: múltiplas excitações.

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. Se entre o cátodo F_k e a grade G_2 2 houver uma diferença de potencial de 80 volts aparecerão 14 picos referentes a 14 colisões inelásticas de um mesmo elétron! Como se trata sempre da mesma transição, a medida da separação entre picos dá o valor da diferença de energia entre os dois níveis envolvidos.

(c) ionização

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

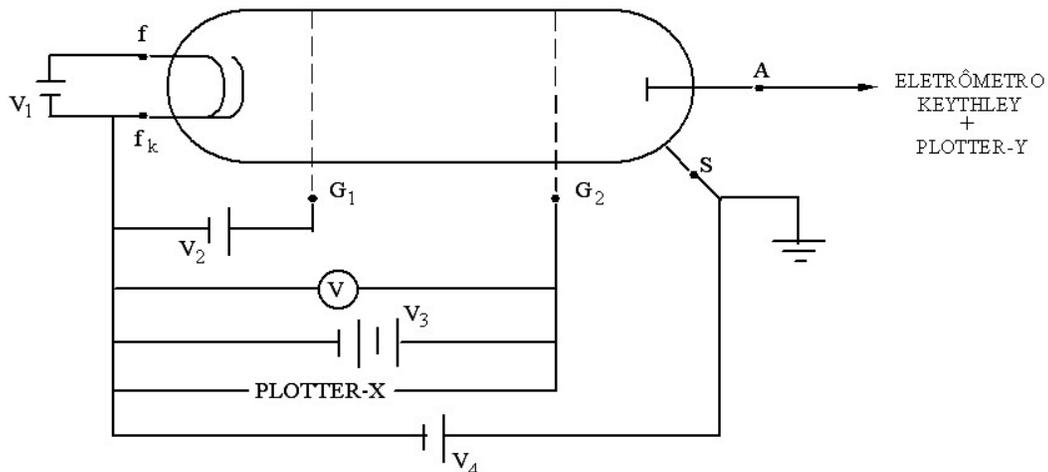


Figura 5: ionização.

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.

IV- Procedimento

Ligue a fonte de tensão (varivolt) que controla o forno, inicialmente a 110 V. A temperatura atingirá por volta de 160°C aproximadamente uma hora depois, subindo rapidamente no início. Procure manter a temperatura constante manipulando a fonte do forno.

Faça as ligações especificadas na caixa que contém o circuito. A caixa dispõe de um gerador de rampa cuja velocidade pode ser regulada, possuindo também um botão de “reset” para descarregar mais rapidamente o capacitor deste gerador (após desligada a rampa). Ligue A ao eletrômetro e conecte a saída deste no plotter-Y (canal 1). Leia com atenção o manual do plotter.

Atenção: Enquanto o tubo não tiver atingido a temperatura do forno (120 - 160 °C) não ligue a alimentação do filamento $f - f_k$ (V_1), caso contrário não há vapor de mercúrio, sendo que no estado metálico poderá curto-circuitar o tubo de Franck-Hertz. Procure não aplicar a tensão V_3 por tempo prolongado (desligue e reinicie a rampa logo depois de realizado o registro).

(a) ***múltiplas excitações:*** selecione as chaves; coloque inicialmente V_1 e V_2 na tensão máxima, V_4 por volta de 0,5V e V_3 em 50V. Faça um estudo da dependência do padrão com a temperatura (120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C). Interprete.

Fixe a temperatura em 160°C (mantendo a fonte de alimentação do forno a aproximadamente 110V) e estude agora a variação do padrão com o potencial de retardo V_4 . Interprete. Repita, variando agora a tensão de filamento, e interprete.

Por fim faça um registro do padrão de múltiplas excitações, para as condições inicialmente dadas, à temperatura de 170°C. Calcule a energia da excitação observada, e o potencial de contato.

Não se esqueça de anotar nos registros TODOS os parâmetros envolvidos! (V's e escala de corrente).

(b) ***uma excitação:*** selecione as chaves para essa opção; coloque V_1 na tensão máxima, V_4 por volta de 2V e V_3 em 10 ou 15V. Registre, disparando a rampa a uma velocidade conveniente, para as seguintes temperaturas: 40°C, 60°C, 80°C, 100°C e 130°C. Explique **bem** o comportamento da curva.

Atenção: não mantenha a temperatura tão elevada por um tempo prolongado, para não danificar a válvula.

(c) ***ionização:*** selecione as chaves; coloque V_1 e V_4 à tensão máxima, V_2 a 3V e V_3 em 25V. Registre o padrão nas temperaturas: 130°C, 115°C e 100°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).

V- Questionário

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. Como seria a curva $I \times V$ se não houvesse vapor de mercúrio?
4. Por que os picos obtidos não são abruptos, se a energia de transição é bem definida?
5. Explique os tipos de colisões eletrônicas que ocorrem no experimento.

VI- Bibliografia

1. Melissinos, A. C., *Experiments in Modern Physics*, Academic Press, 1966.
2. Eisberg R. e Resnick R., *Física Quântica (Átomos, Moléculas, sólidos, núcleos e partículas)* Guanabara Dois, 1979.
3. Tipler P. A., *Física Moderna*, Guanabara Dois, 1981.
4. Trig, G. L., *Crucial Experiments in Modern Physics*, Crane, Russac & Company, Inc., 1975.
5. Alonso M. e Finn. E. J., *Quantum and Statistical Physics*, Fundamental University Press, 1968.
6. Fowles G. R., *Introductions to Modern Optics*, Holt, Rinehart and Wiston, Inc., 1968.
7. Henne G. F., “*What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?*”, Am. J. Phys. 56 (8), 1988, 696-700.

Versão atualizada de outras apostilas: M. A. Aegerter, M. Siu Li, C. E. Munte, H. C. Basso, R. A. Carvalho.