

Laboratório de Física Moderna

EXPERIÊNCIAS HISTÓRICAS SOBRE QUANTIZAÇÃO NA FÍSICA

EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ (Experiência B.3)

PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

A segunda experiência histórica sobre quantização, de grande interesse para a Física, é aqui abordada. Esse experimento se refere à famosa experiência de Franck-Hertz, em que a quantização dos níveis atômicos de energia é verificada experimentalmente. Colisões de elétrons acelerados em um tubo contendo vapor de mercúrio (Hg) transferem energia para o sistema atômico, promovendo excitação elementar de estados atômicos livres, disponíveis acima da energia do estado fundamental. Nesse processo, a corrente eletrônica que seria normalmente observada sofre alterações por causa da perda de energia dos elétrons. A energia de excitação do Hg é, então, determinada a partir da separação entre os vales observados na corrente eletrônica como função da tensão de aceleração aplicada.

TÓPICOS RELACIONADOS

Comportamento corpuscular de uma partícula subatômica, constante de Planck, níveis de energia excitados atômicos, quanta de energia, colisões eletrônicas, transições eletrônicas, primeira energia de excitação de um sistema atômico quântico, emissão de radiação por átomos excitados, verificação da quantização dos níveis de energia eletrônicos de um átomo isolado.

EQUIPAMENTO

Tubo selado a vácuo com átomos de mercúrio evaporados em seu interior, quando aquecido, composto com filamento (catodo) para emissão termiônica, grades de aceleração (tensão de anodo) e placa coletora de elétrons, além de placa de aquecimento. Unidade para alimentação do tubo de Franck-Hertz, composta de fonte de tensão com 2 saídas independentes: 0 a 50 Vdc (tensão de aceleração dos elétrons); 0 a -12 Vdc (tensão de retardo, para eliminação de ruído na corrente do tubo); 6,3 Vac (tensão de alimentação do filamento). Unidade de chaveamento para conexão e desconexão da rampa de aceleração dos elétrons emitidos. Forno para aquecimento do tubo de Franck-Hertz. Transformador variável (Variac) para controle da temperatura final do tubo. Interface analógico-digital Cobra de 10 bits e dois canais para aquisição automatizada de dados (corrente do coletor versus tensão de aceleração). Computador PC com saídas USB e RS-232C para comunicação com a interface analógico-digital. Termopar com mostrador digital, com faixa até 1.000 °C. Amplificador de medição corrente-voltagem, com sensibilidade de até 10 pA e saída normalizada de 0 a 10 V, para qualquer escolha de sensibilidade de amplificação. Multímetros digitais. Cabos coaxiais blindados e cabos de alimentação.

TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Registrar a corrente eletrônica em um tubo de Franck-Hertz, preenchido com vapor de Hg (quando aquecido), em função da tensão de aceleração, para diferentes temperaturas e para diferentes valores da tensão de retardo.
2. Obter a energia de excitação do gás de mercúrio atômico.

PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

1. O arranjo experimental está ilustrado na Fig. 1, e as conexões elétricas envolvidas encontram-se nas Figs. 2 e 3. Verifique atentamente esses esquemas e procure entender a montagem em detalhe.

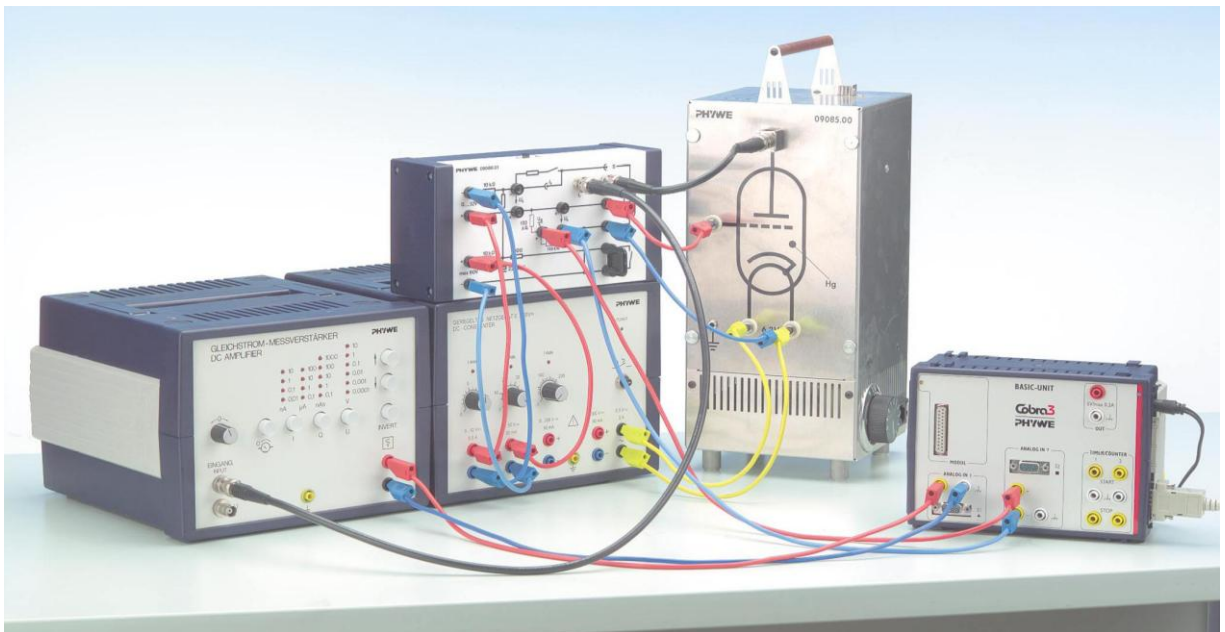


Fig. 1: Ilustração da montagem experimental para realização da experiência de Franck-Hertz.

2. O tubo de Franck-Hertz (onde ocorrem as colisões dos elétrons com os átomos de Hg) consiste em um triodo formado por eletrodos planos e paralelos: um catodo (C), um eletrodo em forma de grade (A) para aceleração dos elétrons e um eletrodo coletor (S). A distância entre o catodo e a grade A é grande em comparação com o livre caminho médio dos elétrons no vapor de Hg para as temperaturas de trabalho (em torno de 160 °C), de modo que a probabilidade de colisão neste trecho é elevada. Já a distância entre a grade e o eletrodo coletor é pequena.

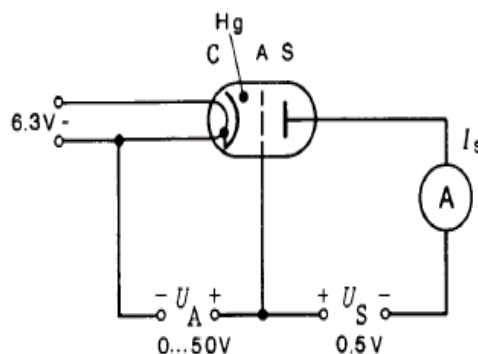


Fig. 2: Conexões elétricas para alimentação do tubo de Franck-Hertz.

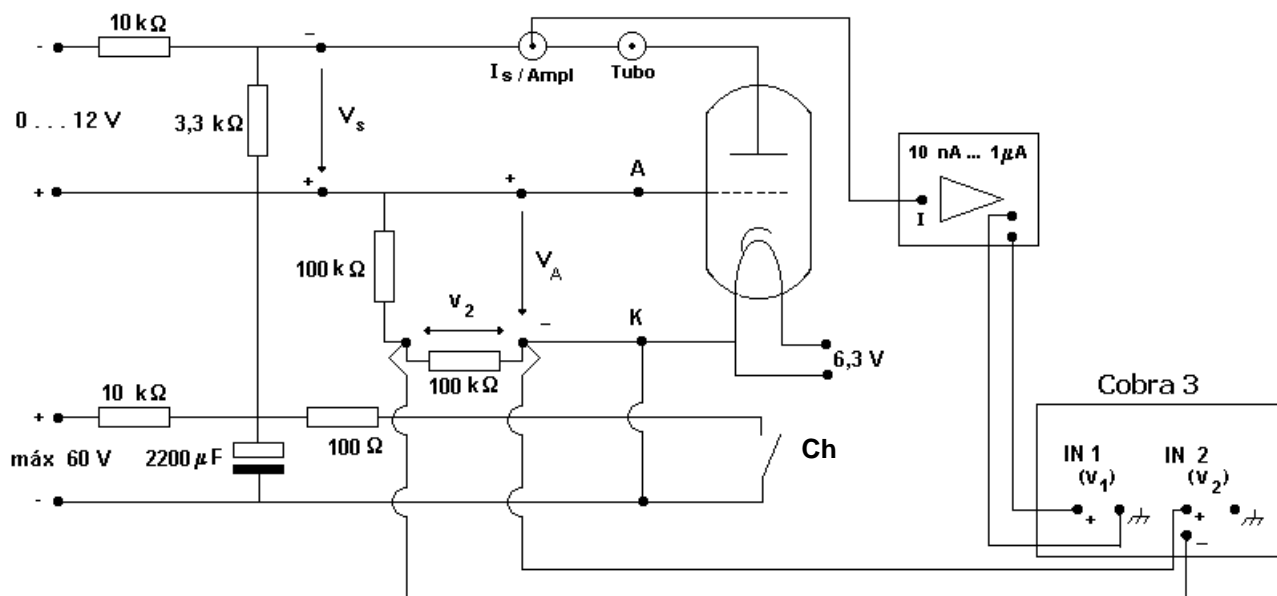


Fig. 3: Esquema de ligações da unidade de alimentação do tubo de Franck-Hertz. São indicadas as conexões para medidas proporcionais à corrente eletrônica I_S (posição **IN 1**) e à tensão de aceleração V_A (posição **IN 2**).

3. O forno, dentro do qual é inserido o tubo de Franck-Hertz, é alimentado através de um Variac. A temperatura de operação (máximo de 320°C) pode ser ajustada com alta estabilidade mantendo no máximo o seletor rotatório localizado na parte traseira do forno e ajustando o valor desejado de potência no seletor do Variac. A temperatura é lida com uso de um termopar (NiCr-Ni) que deve ser posicionado próximo ao eletrodo coletor sem tocar nas paredes do forno, nem no tubo.
4. O catodo (C) é indiretamente aquecido através de uma tensão de 6,3 Vac aplicada a um filamento, a qual é fornecida diretamente pela fonte de tensão. É recomendável acionar a tensão de alimentação do filamento alguns minutos antes de aplicar as tensões nos outros elementos e principalmente antes de iniciar o aquecimento do forno, de modo a evitar precipitação de mercúrio sobre a superfície do catodo. Na hora de desligar o equipamento tem-se de fazer o processo na ordem invertida.
5. A tensão de aceleração V_A (variável entre 0 e 50 V) é estabelecida entre o catodo C e o anodo em forma de grade A, sendo a corrente eletrônica I_S detectada no eletrodo coletor S (ver Fig. 2).
6. Uma pequena tensão de retardo V_S é aplicada com polaridade invertida entre A e S, de modo a evitar que elétrons de baixa energia atinjam o coletor. Essa tensão provém da saída 0 a -12 V da fonte de alimentação através de um divisor de tensão (localizado na unidade de alimentação indicada na Fig. 3) que a reduz por um fator 4. Assim V_S pode ser ajustada entre 0 e 3 V.
7. Ajuste a tensão V_S inicialmente em torno de 0,5 V, medindo-a com um voltímetro digital.
8. Quando a chave indicada por **Ch** na Fig. 3 está fechada, a tensão V_A fica limitada a aproximadamente 0,5 V. Quando a chave **Ch** é aberta, entra em operação um circuito RC que permite a tensão V_A aumentar de acordo com uma função do tipo $V_A(t) = V_0 (1 - e^{-t/RC})$, com $R = 10 \text{ k}\Omega$ e $C = 2.200 \mu\text{F}$ (ver Fig. 3), e portanto correspondente a uma constante de tempo $\tau = RC = 22 \text{ s}$. O valor V_0 (máximo de V_A) pode ser ajustado diretamente na fonte de alimentação entre 0 e 50 V.

9. A tensão V_A pode ser lida diretamente com um voltímetro digital conectado na posição correspondente na unidade de alimentação do tubo de Franck-Hertz, como indicado na Fig. 3. Através de um divisor de tensão integrado à unidade de alimentação, pode-se obter uma tensão reduzida (por um fator próximo de 2). Essa é denominada V_2 , e serve para ser conectada à entrada da interface Cobra indicada por **IN 2** na Fig. 3. Dessa forma a tensão a ser registrada no computador pode ser medida na escala de ± 30 V disponível no programa de controle (ver Fig. 4). Lembre-se entretanto que a tensão real entre o catodo e a grade é igual a V_A , diferente portanto do valor registrado no programa (por isso é necessário efetuar um procedimento de calibração, descrito mais adiante, para determinar o valor exato do fator de redução descrito acima).
10. A corrente I_S (da ordem nA) é medida com auxílio de um amplificador de corrente contínua, sendo a saída deste conectada diretamente à interface Cobra (posição **IN 1** na Fig. 2). Essa tensão de saída (denominada V_1) pode ser facilmente convertida em I_S por uma regra de três simples, tendo em conta que o fundo de escala escolhido no amplificador de corrente contínua ($0,1 \mu\text{A}$, por exemplo) corresponde a uma tensão máxima sempre de 10 V medida na saída do amplificador. Observe que a tensão de saída do amplificador não deve portanto jamais ser superior a 10 V; se for registrado um valor dessa ordem é necessário mudar a escala no amplificador, porque a corrente I_S apresentada no experimento aparecerá saturada.
11. Ajuste o amplificador na configuração “I” (medida de corrente) e na escala $0,1 \mu\text{A}$. Essa escala poderá ser modificada quando necessário, dependendo do valor da corrente lida (lembre-se de que deve-se anotar sempre a escala efetivamente utilizada nas medidas).
12. Acione o forno e regule a temperatura de operação em $\approx 180^\circ\text{C}$, com tolerância da $\sim \pm 2^\circ\text{C}$.
13. Uma quantidade suficiente de vapor de Hg terá sido produzida após cerca de 20 a 30 minutos na temperatura de 180°C . Após esse tempo, com a estabilização da temperatura, o tubo estará pronto para a realização das medidas.
14. Para obter a relação exata entre V_A e V_2 é necessário efetuar um procedimento de calibração.
15. Uma primeira alternativa é conectar um voltímetro diretamente entre os pontos cuja ddp é V_A e um segundo voltímetro na posição indicada na Fig. 5 para medida de V_2 . Lembre-se de manter a tensão de retardo V_S no valor previamente ajustado (em torno de $0,5$ V). Selecione um valor máximo de V_A em torno de 5 V na fonte de alimentação, abra a chave **Ch** e aguarde a estabilização dos valores medidos, o que ocorre segundo um comportamento exponencial típico de um circuito RC . Registre a seguir as leituras dos dois voltímetros. Aumente progressivamente o valor máximo de V_A selecionado na fonte de alimentação e repita o procedimento acima. Registre em torno de 12 pontos para V_A entre 5 e 50 V. Essa alternativa é tediosa, pois consome um precioso tempo experimental (a tensão no circuito RC se estabiliza em $\approx 5 \tau$, ou seja, quase 2 minutos; para 12 medidas, ajustes de tensão V_A , etc., está-se falando aqui de ≈ 40 minutos ou mais).

16. A segunda, e mais razoável, alternativa de calibração é conectar a tensão V_A na interface Cobra na entrada **IN 1**, mantendo V_2 na entrada **IN 2**. Daí deixe o circuito RC operar, abrindo a chave **Ch**. Ter-se-á, com isso, uma reta $V_A = m V_2$, cuja declividade determinará exatamente o fator m que converte as leituras posteriores, de $I_S \times V_2$ em $I_S \times V_A$. Observe que o gráfico satura porque V_A ultrapassa 30 V, mas isso não afeta a declividade da reta que se obtém até esse limite.
17. Em consequência da ionização de átomos de Hg no interior do tubo de Franck-Hertz (energia de ionização de 10,4 eV), pode ocorrer eventualmente uma ignição no tubo, observada na forma de uma descarga elétrica luminosa azulada, a partir de uma dada tensão de aceleração crítica (dependente da temperatura), o que pode causar danos ao funcionamento de catodo. Em tal situação, a corrente I_S cresce abruptamente e excede a faixa de trabalho do amplificador. Portanto, se ocorrer tal descarga a chave **Ch** deve ser fechada imediatamente e a tensão de aceleração V_A deve ser reduzida até que a descarga cesse. Se a descarga persistir mesmo para tensões mais baixas, a temperatura de operação do forno deve ser aumentada (quanto maior a temperatura maior a tensão em que ocorre a ignição, diminuindo a probabilidade de sua ocorrência).
18. A relação entre V_A e V_2 pode depender da tensão de retardo V_S utilizada, pois as três tensões são fornecidas pela mesma unidade, como indicado na Fig. 3. Para investigar, repita o procedimento de calibração acima para dois outros valores de V_S , em torno de 1,0 e 2,0 V (valor máximo 3,0 V).
19. Após concluído o procedimento de calibração, feche a chave **Ch**, reduza a tensão V_A a zero e reajuste V_S igual ao primeiro valor utilizado na calibração (em torno de 0,5 V). Mantenha um voltímetro registrando o valor de V_A durante a seqüência de medidas.
20. Para obter a curva corrente \times tensão ($I_S \times V_A$) no tubo de Franck-Hertz, é utilizado o programa *Measure* da PHYWE. Inicie o programa e selecione a opção “*Universal Writer*” no item “*Gauge*” na barra de ferramentas.
21. Para iniciar o registro das medidas, escolha a opção “*File*” e depois “*New Measurement*”. Uma nova janela se abrirá permitindo que sejam realizados alguns ajustes iniciais em uma caixa de diálogo como a mostrada na Fig. 4. As opções presentes incluem, entre outras, as escolhas das escalas de leitura das tensões V_1 (proporcional a I_S) e V_2 , conectadas respectivamente às entradas analógicas **IN 1** e **IN 2** da interface Cobra, e a escolha do intervalo de tempo entre medidas sucessivas.
22. No item “*Display*”, após selecionar a opção “*Diagram 1*”, é possível escolher a escala em que será exibido o gráfico de V_1 em função do tempo. O mesmo pode ser feito com relação a V_2 selecionando a opção “*Diagram 2*”. Essas escalas deverão ser sempre otimizadas para melhor observação das variações de V_1 e V_2 em tempo real.
23. Para iniciar as medidas clique em “*Continue*”; as tensões V_1 e V_2 poderão ser observadas no monitor através das janelas “*Digital Display 1*” e “*Digital Display 2*”, respectivamente.

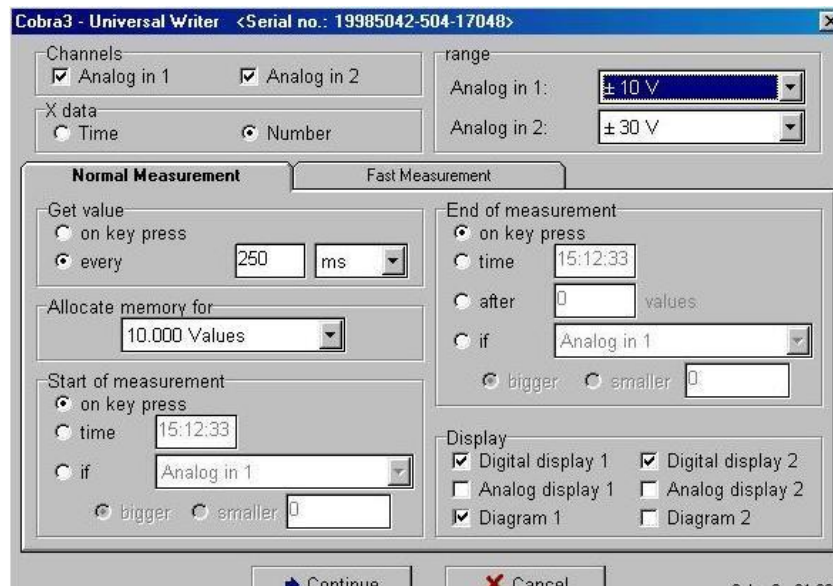


Fig. 4: Caixa de diálogo mostrando os ajustes iniciais do programa para registro da curva ($I_S \times V_A$).

24. Para iniciar a varredura de V_1 e V_2 (que fornecem a curva $I_S \times V_A$), clique em “*Start Measurement*” na janela de controle.
25. Selecione na fonte de alimentação um valor máximo de V_A em torno de 50 V. Abra a chave **Ch** e acompanhe a evolução das tensões na tela do monitor.
26. Durante toda a varredura, um dos alunos deve ficar monitorando o tubo. Se ocorrer ignição, a chave **Ch** deve ser imediatamente fechada e deve-se anotar em que valor de V_A (observado com um voltímetro) iniciou-se a ignição. Reduza então o valor máximo de V_A na fonte, de modo que a varredura possa ser repetida com segurança.
27. Realize algumas varreduras iniciais de teste (para uma dada temperatura e um dado valor de V_S), antes de registrar a curva definitiva (que será exportada). Além do ajuste do máximo valor de V_A descrito acima, utilize essas varreduras de teste para escolher a melhor escala de amplificação no amplificador de corrente contínua (de modo a maximizar os valores medidos de V_1 sem atingir o máximo de 10 V) e a melhor escala para observação nos dados na tela do computador.
28. Observe ainda se a temperatura se mantém uniforme nessas varreduras e se o perfil da curva registrada é reprodutível. Caso ocorram variações significativas no perfil da curva entre uma e outra varredura (para a mesma temperatura) ou se a curva não apresentar o perfil esperado (com vales sucessivos, emulando “máximos” e “mínimos”) da experiência, é recomendável desligar o forno e aguardar seu resfriamento, mantendo acionado o filamento do tubo, já que pode ter ocorrido alguma deposição de mercúrio sobre o catodo, o que dificulta a realização de medidas reprodutíveis.
29. Dependendo dos valores de temperatura e de V_S , a tensão de retardo, pode ocorrer um aumento muito grande de V_1 , excedendo o máximo de 10 V, mesmo para tensões de aceleração ainda longe do valor máximo. Se isso ocorrer, apenas alguns máximos serão detectados na curva e logo será observada uma saturação de V_1 . Neste caso, é conveniente efetuar uma varredura com uma dada

escala (0,1 μA , por exemplo) no amplificador de corrente para registrar os primeiros máximos e a seguir aumentar a escala para o próximo fundo de escala (1 μA , nesse exemplo) para registrar uma nova curva com os máximos mais intensos. Essas curvas poderão ser reunidas posteriormente utilizando os devidos fatores de conversão. Para isso, é essencial anotar os valores das escalas utilizadas no amplificador para cada curva registrada.

30. A varredura automática de V_1 e V_2 poderá ser encerrada a qualquer momento clicando em “Stop” na janela de controle. Conclua a varredura quando for observada estabilização dos valores de V_2 (ou seja, de V_A), quando a resposta do circuito RC fica lenta, ou se ameaçar haver saturação em V_2 .
31. Para salvar as medidas registradas basta, na barra de ferramentas, ir até a opção “Measurement” e, então, “Export Data”. Selecione a opção “Save to File” e “Export As Number” para que suas medidas sejam guardadas em um arquivo de texto (formato “.txt”, que poderá ser acessado por qualquer programa capaz de criar gráficos). O arquivo de saída possuirá três colunas: um contador de medidas, a tensão V_1 e a tensão V_2 . Atribua um nome apropriado para cada arquivo, associando-o aos valores de temperatura e de V_S empregados na varredura.
32. Repita as varreduras descritas acima mantendo a mesma temperatura e reajustando a tensão de retardo V_S nos dois outros valores utilizados no procedimento de calibração (1,0 e 2,0 V).
33. Repita todas as medidas indicadas em duas ou três temperaturas, pelo menos uma acima (por exemplo, a 200 °C) e outra abaixo (por exemplo, a 160 °C) da temperatura inicialmente escolhida.
34. Lembre-se de sempre reajustar a escala de amplificação de corrente de forma a obter os máximos valores possíveis de V_1 , uma vez que a magnitude da corrente I_S depende diretamente da temperatura do forno e de V_S .

CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. No caso da experiência de Franck-Hertz, para evitar precipitação de mercúrio sobre a superfície do catodo, é recomendável acionar a tensão de alimentação do filamento presente no catodo alguns minutos antes de aplicar as tensões nos outros elementos e principalmente antes de iniciar o aquecimento do forno. Da mesma forma, deve-se desligar a alimentação do catodo apenas após o forno ter seu aquecimento desligado, e sua temperatura ter retornado à temperatura ambiente.
2. Observe atentamente a possível ocorrência de ignição no tubo de Franck-Hertz em decorrência da ionização dos átomos de Hg. Se isso ocorrer, a chave **Ch** deve ser fechada e a tensão de aceleração V_A deve ser imediatamente reduzida a 0 V até que a descarga luminosa cesse. Se a descarga persistir mesmo para tensões baixas, a temperatura de operação do forno deve ser aumentada, conforme já explicado.
3. O invólucro do forno assim como os conectores posicionados no seu painel frontal podem ficar extremamente quentes durante a realização da experiência, não devendo portanto ser tocados nessa situação, evitando queimaduras leves na pele.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. No tubo de Franck-Hertz, elétrons são emitidos pelo catodo aquecido, processo esse denominado *emissão termiônica*, e atravessam um meio contendo com átomos de Hg, sofrendo sucessivas colisões. Muitas dessas colisões são elásticas, ou seja, a energia cinética dos elétrons permanece inalterada após a colisão.
2. A partir de uma certa tensão de aceleração mínima, entretanto, os elétrons passam a possuir energia cinética suficiente para excitar transições eletrônicas entre os níveis de energia atômicos do Hg, e, portanto, podem ocorrer colisões inelásticas, com transferência de energia dos elétrons para os átomos de Hg.
3. O estado excitado do átomo de Hg com energia mais baixa e com maior probabilidade de ser populado por meio dessas colisões encontra-se a 4,89 eV acima do estado fundamental. Esse estado é usualmente designado por 3P_1 , em notação espectroscópica, e corresponde à configuração $6s6p$ para os elétrons de valência do Hg (no estado fundamental a configuração eletrônica é $6s^2$, ou 1S_0 em notação espectroscópica).
4. Os elétrons emitidos pelo catodo possuem um *ensemble* de energias cinéticas aproximadamente dada pela distribuição de Maxwell-Boltzmann, com energia média de $\sim k_B T_C$ (sendo k_B a constante de Boltzmann e T_C a temperatura do catodo, a qual *não* coincide com a temperatura do forno).
5. Tais elétrons são continuamente acelerados na região entre o catodo C e o anodo A pelo campo elétrico associado à tensão de aceleração V_A (ver Fig. 2). Só contribuem para a corrente eletrônica detectada no eletrodo coletor S aqueles elétrons que atingem a grade com energia cinética suficiente para vencer o campo elétrico oposto associado à tensão de retardo V_S . Elétrons com energia cinética insuficiente são atraídos de volta para a grade e não atingem o eletrodo coletor.
6. Assim, sempre que a tensão de aceleração V_A for suficiente para que elétrons do feixe em algum ponto de sua trajetória transfiram energia para os átomos de Hg (excitando transições eletrônicas nos átomos), haverá um decréscimo abrupto na corrente eletrônica. É importante lembrar que, na ausência de colisões inelásticas, a energia dos elétrons aumenta continuamente entre o catodo e a grade, de forma que para um dado valor de V_A elétrons em diferentes posições possuirão energias cinéticas distintas e poderão transferir diferentes quantidades de energia para os átomos de Hg.
7. Se apenas o estado localizado 4,89 eV acima do estado fundamental for excitado por essas colisões, aparecerão na curva $I_S \times V_A$ picos equidistantes correspondentes à excitação de 1, 2, 3, 4... átomos de Hg no percurso do feixe eletrônico. A separação entre esses picos fornecerá assim uma medida da energia (por unidade de carga) do estado excitado em questão.
8. Devido à diferença de potencial de contato entre o catodo e o anodo, a diferença de potencial real entre os dois (que é portanto a tensão de aceleração real) difere do valor medido diretamente de acordo com a expressão

$$V_A^{\text{real}} = V_A^{\text{medido}} + (\phi_A - \phi_C) , \quad (1)$$

sendo ϕ_A e ϕ_C as funções trabalho associadas ao anodo e ao catodo, respectivamente. Dessa forma, a primeira queda da corrente na curva $I_S \times V_A$ não ocorre em torno de 4,9 V mas cerca de 2,0 V acima. A separação entre os picos na curva $I_S \times V_A$ não tem influência da ddp de contato (consulte as Refs. 2-4 para discussões detalhadas sobre potenciais de contato).

9. A temperatura no tubo de Franck-Hertz exerce influência nos valores de corrente detectados devido à variação na densidade do vapor de Hg e à distribuição estatística de velocidades dos átomos de Hg. De um modo geral, os primeiros mínimos são mais facilmente observados em baixas temperaturas, enquanto que um número maior de picos pode ser obtido em temperaturas mais altas (já que a tensão de ignição aumenta com o aumento na temperatura). As variações de temperatura que ocorrem durante as medidas modificam os valores de corrente medidos para uma dada tensão de aceleração, mas as posições em que ocorrem os picos permanecem inalteradas.
10. Com relação à tensão de retardo, as posições dos máximos não são alteradas quando V_S muda, mas os mínimos são ligeiramente deslocados. Por outro lado, os valores médios de corrente sempre diminuem com o aumento da magnitude de V_S .
11. Uma análise mais aprofundada do mecanismo pelo qual os elétrons transferem energia para átomos de Hg no tubo de Franck-Hertz mostra que este é um processo complexo em que tomam parte colisões eletrônicas influenciadas pela interação de troca e envolvendo a formação de íons Hg^- de tempo de vida muito curto. Além disso, outros estados excitados (além daquele 4,89 eV acima do estado fundamental) podem ser populados em decorrência dessas colisões, embora com menor probabilidade, o que significa que o espaçamento entre os picos na curva $I_S \times V_A$ não é sempre o mesmo para diferentes condições experimentais, mas depende de parâmetros como a pressão de vapor de Hg dentro do tubo e a distância entre o catodo e o anodo. Uma discussão bastante detalhada sobre esses aspectos pode ser encontrada na Ref. 7.

QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Utilize o esquema indicado na Fig. 3 (contendo as conexões elétricas envolvidas na unidade de alimentação do tubo de Franck-Hertz) para montar separadamente os circuitos elétricos simplificados que são obtidos quando a chave **Ch** encontra-se aberta ou fechada. Descreva, inclusive com valores numéricos, o comportamento da a tensão V_A em cada uma dessas situações.
2. Esboce como é a forma de variação do potencial elétrico em função da distância na região entre o catodo C, a grade A e o eletrodo coletor S no tubo de Franck-Hertz ilustrado na Fig. 2, para valores fixos de V_A e V_S (sempre com $V_A > V_S$). Discuta o que ocorre com um elétron emitido do catodo (com velocidade inicialmente nula) submetido a esse perfil de potencial elétrico. Se V_A^{real} for

- igual a 4,9 V, em que ponto da sua trajetória o elétron terá energia suficiente para transferir energia para um átomo de Hg? E se V_A^{real} for igual a 9,8 V?
3. Em sua experiência original, Franck e Hertz detectaram a emissão de uma linha espectral associada à transição de um elétron para o estado fundamental a partir do estado excitado do átomo de Hg populado nas colisões com elétrons no tubo (estado localizado 4,89 eV acima do estado fundamental). Determine o comprimento de onda do fóton emitido nessa transição. Em qual faixa do espectro eletromagnético essa radiação se encontra?
 4. Esboce a forma esperada da curva $I_S \times V_A$ obtida em uma experiência de Franck-Hertz realizada com um gás (ou vapor) monoatômico. Explique detalhadamente as características dessa curva e discuta os aspectos quânticos que dela podem ser inferidos. Qual(is) grandeza(s) pode(m) ser obtida(s) a partir dessa curva?

PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

1. Para cada valor de V_S utilizado, construa um gráfico de V_A em função de V_2 a partir do conjunto de medidas efetuadas no procedimento de calibração e determine a relação entre essas grandezas por meio de um ajuste linear, para determinar o respectivo fator de correção de calibração.
2. Para cada valor de temperatura, faça tabelas dos valores medidos para as tensões $V_1 \times V_2$, uma tabela para cada valor de V_S . Inclua nessas tabelas os valores de V_A (obtidos a partir da relação determinada no item 1 acima, para cada valor de V_S) e de I_S (calculados de acordo com a escala empregada no amplificador de corrente contínua, se você tomou o cuidado de anotar). Inclua também as incertezas envolvidas em todos esses dados. Não precisa apresentar tais tabelas no relatório.
3. Faça gráficos de $I_S \times V_A$ para cada temperatura e para cada valor de V_S utilizados. Apresente gráficos com pontos interconectados (linhas contínuas), pois permite melhor inspeção visual.
4. Discuta detalhadamente o comportamento observado nessas curvas, comparando com o que seria esperado com base nas teorias quântica e clássica.
5. Discuta também o efeito exercido pela variação de temperatura para um mesmo valor de V_S .
6. Discuta ainda o efeito exercido pela variação de V_S para uma mesma temperatura.
7. Localize os valores de V_A correspondentes aos máximos e mínimos de corrente em cada curva $I_S \times V_A$ traçada. Avalie as incertezas nesses valores de V_A , levando em conta as incertezas nas medidas e as coordenadas dos pontos imediatamente antes e depois de cada máximo ou mínimo.
8. Obtenha a partir dos valores de V_A correspondentes aos máximos em cada curva $I_S \times V_A$ um valor médio (com incerteza) para a energia do estado excitado do átomo de Hg populado em consequência das colisões com os elétrons no tubo de Franck-Hertz. Esse cálculo pode ser realizado medindo os espaçamentos entre máximos adjacentes e realizando uma média (com o cuidado de evitar o cancelamento de termos consecutivos!). Alternativamente pode ser montado um gráfico

contendo os valores de V_A em função de um índice de contagem dos máximos e a seguir pode ser efetuado um ajuste linear. Qualquer que seja o método adotado, apresente claramente todos os passos envolvidos nos cálculos realizados.

9. Repita a análise acima para os mínimos nas curvas $I_S \times V_A$.
10. Compare percentualmente os valores obtidos acima para a energia de excitação do átomo de Hg com o valor esperado e faça os comentários que julgar pertinentes (ver Ref. 10).
11. Utilizando os valores obtidos para a energia de excitação e o valor conhecido ($\lambda = 253,6$ nm) para o comprimento de onda da radiação emitida no tubo de Franck-Hertz em consequência da excitação dos átomos de Hg nas condições empregadas na experiência, obtenha um valor para a constante de Planck e comente o resultado encontrado.

DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. A explicação da experiência de Franck-Hertz é considerada marco fundamental no desenvolvimento da antiga teoria quântica. Discuta qual(is) grandeza(s) envolvida(s) nessa experiência possui(m) caráter quantizado.
2. Discuta a importância histórica da experiência de Franck-Hertz (realizada em 1914) em relação ao modelo atômico de Bohr, proposto um ano antes.
3. Explique por que é importante usar gás ou vapor *monoatômico* na experiência de Franck-Hertz.
4. Analise a conservação de momento linear em uma colisão típica envolvendo um elétron no tubo de Franck-Hertz e um átomo de Hg. Mostre a partir de um cálculo simplificado que a energia perdida pelo elétron não é exatamente igual à energia de excitação do átomo de Hg quando a energia de recuo deste é levada em consideração. Utilize valores numéricos para discutir qual a magnitude desse efeito na experiência em questão.
5. Discuta por que os picos registrados na curva $I_S \times V_A$ obtida em uma experiência de Franck-Hertz não são abruptos, embora a energia da transição associada seja uma quantidade bem definida. Lembre-se que os elétrons no tubo não possuem todos a mesma velocidade. Porque?
6. Discuta como a curva $I_S \times V_A$ seria alterada (i) se não houvesse átomos de Hg no caminho dos elétrons e (ii) se os átomos de Hg possuísem distribuição contínua de energia, ao invés de níveis eletrônicos discretos (situação clássica).
7. Por que os picos na curva $I_S \times V_A$ não ocorrem exatamente nas posições correspondentes a múltiplos inteiros da energia de excitação do átomo de Hg? Discuta com base na Eq. 1 e obtenha a partir dos dados experimentais uma estimativa para a ddp de contato entre o catodo e o anodo.
8. Tente uma justificativa sobre qual procedimento é mais adequado para a medida da energia de excitação dos átomos de mercúrio evaporado, se nas posições dos máximos ou se nas posições dos mínimos observados na curva $I_S \times V_A$.

BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4, LTC, 4^a ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.
3. A. C. Melisinos, Experiments in Modern Physics, Academic Press, New York, 1966.
4. J. Rudnick, D. S. Tannhauer, “Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect”, *Am. J. Phys.*, Vol. 44(8), pp. 796-798, 1976.
5. Laboratory Experiments in Physics, 5.1.03, 5.1.04 e 5.1.05, Phywe Systeme GmbH, Göttingen, 1999.
6. J. Goldemberg, Física Geral e Experimental, 3^o Vol, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
7. G. F. Hanne, “What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?”, *Am. J. Phys.*, Vol. 56(8), pp. 696-700, 1988.
8. M. Ference Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, Curso de Física – Eletrônica e Física Moderna, Edgard Blücher Ltda.
9. M. Alonso, E. J. Finn, Fundamental University Physics, Vol. III, Addison-Wesley, Massachusetts, 1971.
10. R. Crane, “The Franck-Hertz experiment: a field-trip through quantization”, documento disponível em <http://www.cce.ufes.br/jair/web/rcrane.rtf>.

Redação: Prof. Jair C. C. Freitas e Rogério N. Suave.

Colaboração: Monitores Danilo Oliveira de Souza e Alan Gomes Bossois.

FOLHA DE DADOS

Registro dos arquivos de texto

RETAS DE CALIBRAÇÃO

Sugestão de nomes: G#.Cal.VaxV2.Vs.#####mV.txt)

(G# = G1, ..., G5; ##### = 0500, 1000, 2000)

DDP (retardo) V_s (mV)	ARQUIVO (retas de calibração) $V_A \times V_2$
0,500	
1,000	
2,000	

CURVAS DE FRANCK-HERTZ

Sugestão de nomes: G#.FH.z.V1xV2.Vs.#####mV.T###C.txt)

(G# = G1, ..., G5; ##### = 0500, 1000, 2000; T###C = 160°C (p.ex.), etc.)

TEMPERATURA (°C)	ESCALA (amplificador)	DDP (retardo) V_s (mV)	ARQUIVO (dados de Franck-Hertz) $V_1 \times V_2$
		0,500	
		1,000	
		2,000	
		0,500	
		1,000	
		2,000	
		0,500	
		1,000	
		2,000	