

Experimento de Frank-Hertz **2**

META:

Verificar a natureza quântica dos níveis de energia do átomo.

OBJETIVOS:

Ao fim desta aula o aluno deverá:

- Compreender a natureza quântica da matéria.
- Compreender o modelo atômico de Bohr.
- Compreender os mecanismos para transferência de energia

PRÉ-REQUISITOS

- Curso introdutório de mecânica quântica.

2.1 Introdução

Nesta aula reproduziremos o experimento realizado por Franck e Hertz em 1914 para verificar a natureza quântica dos níveis de energia do átomo assim como o modelo proposto pelo modelo de Bohr. James Franck e Gustav Ludwig Hertz ganharam o prêmio Nobel de física em 1925 pelos resultados de seu experimento.

O início do século XX houve uma série de revoluções na Física. As teorias há muito tempo aceitas, como as Leis de Newton, não se mostravam suficientes para descrever todas as propriedades observadas na matéria tais como a radiação de corpo negro. As teorias que surgiam tais como a teoria da relatividade e a Mecânica Quântica mostravam que as Leis de Newton não se aplicava a escalas muito pequenas nem em situações onde a velocidade fosse muito grande. Para fundamentar estas novas teorias foram necessários muitos estudos sobre a matéria, dentre estes destacamos o experimento de Franck e Hertz que comprovou alguns postulados proposto por Bohr em seu modelo atômico mostrando de forma clara que os átomos só podiam absorver energia quando esta fosse um múltiplo inteiro de um valor constante, é que este valor constante varia conforme o material estudado podendo então ser usado como uma espécie de identidade do material.

Modelo de Bohr O modelo proposto por Niels Bohr em 1913, já incluía muitas propriedades observadas na matéria no início do século XX inseridas gradativamente por vários modelos dentre eles destacamos o modelo do pudim de passas de J. J. Thomson (1904) e o modelo de Rutherford (1911) . Este

modelo já levava em conta que os átomos possuíam um núcleo pequeno, positivo e denso com elétrons viajando em órbitas circulares entorno do núcleo. Os principais ingredientes do modelo de Bohr pode ser resumidos nos postulados.

- Os elétrons viajam em torno do núcleo em órbitas estáveis com energia quantizada.
- Para mudar de órbita o elétron precisa ganhar ou perder energia através da absorção ou emissão da energia de um fóton, respectivamente. A energia absorvida ou emitida é igual a diferença de energia dos estados envolvidos e é dada pela relação de Planck,

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu, \quad (2.10)$$

onde h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação emitida.

- A frequência da radiação emitida ou absorvida para uma órbita de período T pode ser dada como na mecânica clássica,

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (2.11)$$

- As órbitas permitidas depende de valores quantizados do momento angular dado por,

$$L = n \cdot \hbar = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \quad (2.12)$$

onde $n = 1, 2, \dots$ é chamado de número quântico principal e h é a constante de Planck.

- A energia do um estado atômico é dada por:

$$E_n = -\frac{mZ^2e^4}{(4\pi\epsilon_o)^22\hbar} \frac{1}{n^2}, \quad (2.13)$$

onde m é a massa do elétron, ϵ_o é a permissividade elétrica do vácuo e Z é o número atômico. Para o átomo de hidrogênio, esta expressão se reduz para,

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{eV} \quad n=1,2,3,\dots, \quad (2.14)$$

O modelo de Bohr teve sucesso em explicar as linhas de emissão do átomo de hidrogênio e pode ser recuperado da teoria quântica como uma aproximação em primeira ordem.

2.2 Descrição do experimento

O experimento de Franck e Hertz consiste em acelerar elétrons de baixa energia emitidos termicamente (efeito termoiônico) por cátodo **C** e acelerados na direção de um ânodo **A** por uma diferença de potencial V . Alguns elétrons passam através dos buracos localizados no ânodo e conseguem chegar até uma placa **P** desde que sua energia cinética seja suficiente para vencer o potencial de retardo V_r aplicado entre a placa **P** e o ânodo **A**.

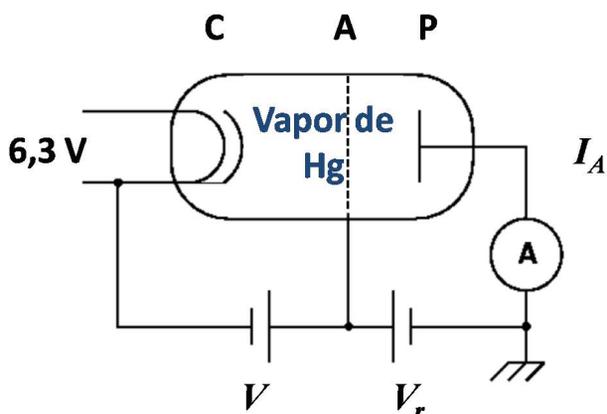


Figura 2.1: Figura mostrando os componentes de um tubo para realização do experimento de Franck e Hertz. 1- Uma tensão de 6,3 V aplicada ao cátodo **C** para aquecer o filamento e liberar elétrons através do efeito termoiônico que são acelerados por uma diferença de potencial V entre o cátodo **C** e o ânodo **A**, os elétrons que conseguem passar pelo ânodo **A** com energia cinética suficiente para chegar até a placa **A** vencendo o potencial de retardo V_r contribuem para a corrente medida pelo amperímetro **A**. O tubo é cheio de um gás ou vapor neste caso o Hg.

O tubo contendo o cátodo, ânodo e a placa esta cheio de gás ou vapor, em baixa pressão, dos átomos que queremos investigar. A experiência envolve a medida da corrente elétrica que atinge **P** como uma função da voltagem aceleradora V . Para visualizar e entender melhor vocês podem acessar o site:

<http://phys.educ.ksu.edu/vqm/free/FranckHertz.html>

(acessado em 20/02/2012).

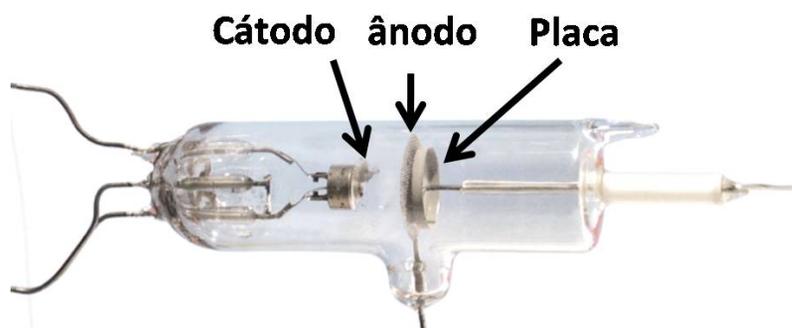


Figura 2.2: Figura mostrando uma válvula triodo usada no experimento de Franck e Hertz.

A primeira medidas foi realizada em um tubo contendo vapor de Hg. Para uma baixa voltagem, observa-se I cresce quando V cresce. quando V chega a 4,9 V a corrente cai abruptamente. Isto foi interpretado como sendo uma interação entre os elétrons e os átomos de Hg que tem um inicio repentino quando os elétrons adquirem uma energia cinética de 4,9 eV. Aparentemente uma parcela significativa dos elétrons excita os átomos de Hg e perdem totalmente sua energia cinética. Se V for apenas ligeiramente maior que 4,9 V o processo de excitação dos átomos de Hg ocorre exatamente em frente ao anodo **A**, após este processo os elétrons não conseguem mais ganhar energia suficiente para superar

o potencial de retardo e chegar até a placa **P**, por isso observamos uma forte queda na corrente que chega até a placa **P**. Para V um pouco maior que $4,9\text{ V}$ os elétrons após o processo de excitação ainda conseguem ganhar energia suficiente para superar V_r e chegar até a placa **P**. Os elétrons com energia menor que $4,9\text{ eV}$ não são capazes de transferir sua energia para os átomos de Hg. Esta interpretação é consistente com a existência de estados de energias discretos para o átomo de Hg.

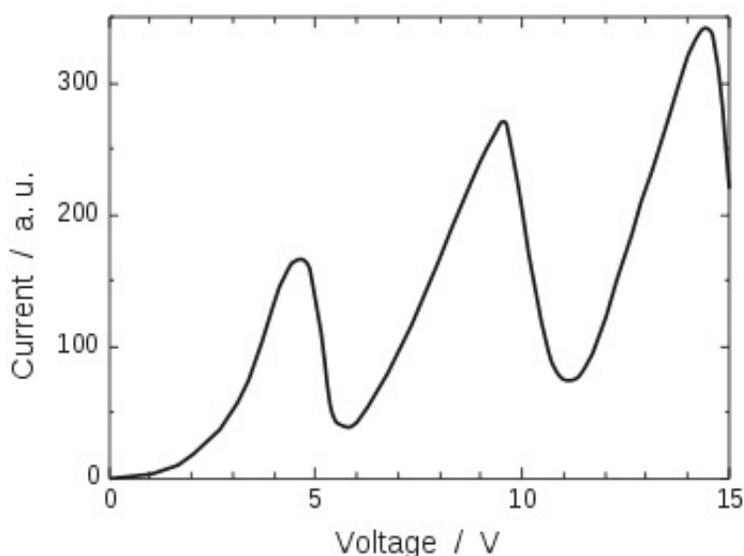


Figura 2.3: Figura mostrando um gráfico típico obtido em um experimento de Franck e Hertz. Gráfico ilustrativo obtido do site: pt.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Franck_Hertz (acessado em 20/02/2012)

Franck e Hertz verificaram que quando a energia dos elétrons do feixe é menor do que $4,9\text{ eV}$, nenhuma linha espectral do vapor de Hg no tubo é emitida e quando a energia não é mais que uns poucos elétrons-volt maior do que esse valor, apenas uma linha é

vista no espectro. Essa linha tem comprimento de onda 2536 \AA , que corresponde exatamente a um fóton com $4,9 \text{ eV}$. Desta forma a experiência de Franck e Hertz forneceu evidências marcante da quantização de energia dos átomos e também forneceu um método para medir diretamente a diferença de energia entre estados quânticos de um átomo.

2.3 Procedimento Experimental

Para a execução desta experiência utilizaremos um dispositivo especial conhecido como tubo de Franck-Hertz. Este tubo nada mais é do que uma válvula triodo (ver Figura 2.2) de eletrodos planos dispostos paralelamente entre si: um catodo de aquecimento indireto, um eletrodo ou grade de aceleração e um coletor ânodo). O mercúrio colocado dentro da válvula é aquecido com o auxílio de um forno criando o vapor de mercúrio necessário a experiência.



Figura 2.4: Arranjo experimental da Phywe para realização do experimento de Franck e Hertz. Foto obtida o catalogo da Phywe.

Utilizaremos o arranjo da Phywe, mod. 9056 (ver Figura 2.4), que já vem equipado com um forno e painel de conexão para a válvula. O aquecimento é obtido por intermédio de um transformador variador de voltagem (VARIAC) conectado a entrada do forno. A temperatura de operação do tubo é em torno de 160 a 200 °C o que corresponde a tensões de cerca de 60 – 70 V na saída do variac. A temperatura deverá ser medida com o auxílio de um TERMOPAR conectado a um medidor apropriado.

A distribuição de potencial ao longo do tubo pode ser representado pelo gráfico da Figura 2.5.

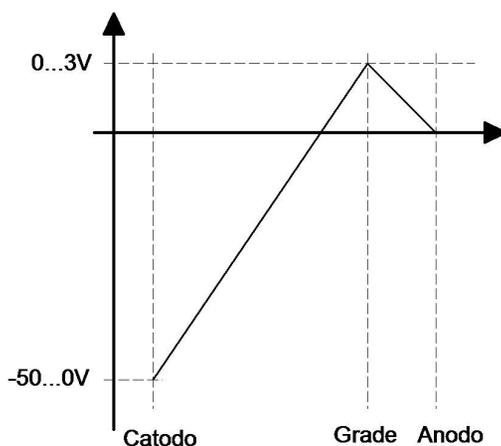


Figura 2.5: Gráfico da distribuição do potencial elétrico dentro do tubo de Franck-Hertz de acordo com o circuito esquematizado na Figura 2.1.

ATIVIDADES

- 1- Descreva o princípio de funcionamento de um termopar.



Um picoamperímetro será utilizado para medir a corrente entre o ânodo e a placa em função da tensão aplicada entre o cátodo e o ânodo medida com o auxílio do voltímetro DC. A Figura 2.1 mostra o esquema do circuito que deverá ser montado.

OBS: A diferença de potencial entre a grade e a placa ou coletor deverá ser ajustada para obter picos de corrente o mais nítidos possível.

1. Lista de materiais utilizado

- Válvula Triodo (Tubo de Franck-Hertz);
- Forno;
- Termômetro digital com termopar;
- Interface Cobra 3;
- Conversor corrente-voltagem;
- Fonte de tensão $-50\text{ V} \dots 0\text{ V DC}$;
- Fonte de tensão $0\text{ V} \dots 3\text{ V DC}$;
- Fonte de tensão $6,3\text{ V AC}$;
- Multímetros;
- Microcomputador;
- Cabos para conexões.

2. Procedimento

(a) Antes de fazer as medidas é preciso tomar alguns cuidados:

- Não se aproxime muito do forno. As paredes externas chegam à temperaturas relativamente alta.
- Verifique se as ligações estão corretas antes de ligar o equipamento.
- Preste atenção no tubo de Franck-Hertz, Caso apareça uma **luz azulada, interrompa a medida imediatamente**, Curto circuitando a chave de alimentação do circuito elétrico. Caso apareça uma luz esverdeada não se preocupe.

(b) Introduza o termopar através do orifício na parte superior do forno deixe a extremidade do termopar em contato com o tubo de Franck-Hertz.

(c) Ligue o Forno na tomada.

- Para promover a total evaporação do mercúrio no interior do tubo de Franck-Hertz, mantenha a chave localizada na parte lateral do forno na posição máxima (10) por pelo menos 10 min.

(d) Com a chave S fechada (curto circuitada) ligue o restante dos equipamentos.

- Mantenha a escala do amplificador de corrente em 10 nA.
- Deixe um multímetro medindo a diferença de potencial entre o coletor e o ânodo seu valor não deve passar 0,5 V durante todo processo.
- Deixe um multímetro medindo a diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo, esta diferença de potencial é responsável por acelerar os elétrons e varia durante o experimento de 0 até 50 V.
- Deixe um multímetro medindo a corrente elétrica que passa entre o ânodo e a placa coletora.
- A leitura na saída do amplificador da PHYWE utilizado na experiência Varia entre 0 e 10 volts em qualquer de suas escalas (corrente, voltagem, carga). A leitura na saída dependerá da escala escolhida no amplificador. O Valor lido deverá ser multiplicado por um fator (f) obtido da razão entre a escala escolhida e a voltagem máxima de saída que é de 10 V.

$$f = \frac{\text{Escala escolhida}}{10V}, \quad (2.15)$$

neste caso a escala escolhida pode variar de 0.01 nA até 100 μ A.

- Na maioria dos resultados obtidos neste experimento você poderá fixar a escala em 10 nA, com isso a corrente lida corresponderá a própria voltagem expressa em nA.

OBS: NÃO LIGUE AS FONTES AO TUBO DE FRANCK-HERTZ SEM ANTES AQUECÊ-LO. O MERCÚRIO DENTRO DO TUBO PODE PROVOCAR CURTO-CIRCUITO DANIFICANDO OS COMPONENTES !

OBS: Tenha bastante atenção com as POLARIDADES das tensões aplicadas de forma a reproduzir a distribuição de diferenças de potencial da Figura 2.5.

OBS: NÃO LIGUE AS FONTES ANTES DE VERIFICAR SE TUDO ESTÁ CONECTADO CORRETAMENTE.

- (e) Diminua a temperatura do forno gradativamente até um valor da ordem de 190 °C. Espere a temperatura estabilizar isto poderá demorar um pouco!
- (f) Ligue a chave S (remova o curto circuito) e comece a armazenar os dados através da interface cobra simultaneamente. A medida demora aproximadamente 1,5 min,

Após este tempo, quase todo mercúrio deverá estar condensado e a chave S deverá ser fechada (curto circuitada).

- (g) Para cada temperatura escolhida repita o procedimento pelo menos 5 vezes, nas mesmas condições.
- (h) Determine os valores médios da corrente \bar{i} e da voltagem \bar{V} relativo as medidas tomadas acima, determine também os respectivos desvio padrão.
- (i) Mostre os gráficos \bar{i} x \bar{V} juntamente com as barras de erros.
- (j) Repita este procedimento para outras temperaturas (pelo menos mais 5 vezes) no intervalo de temperatura de operação do forno.
- (k) Discuta os resultados obtidos no gráfico e compare suas medidas com as obtidas por Franck e Hertz.
- (l) Mostre que as energias do átomo de mercúrio são quantizadas e múltiplo de um número inteiro e calcule o valor deste número.

OBS: Lembre-se de considerar o ajuste da tensão de freamento entre o ânodo e a placa nos passos de sua experiência!

RESUMO

Na aula de hoje, descrevemos o experimento realizado por Franck e Hertz no início do século XX afim de comprovar as idéias da mecânica quânticas admitidas por Bohr em seu modelo atômico. Estas idéias já eram consideradas por outros pesquisadores como Planck e Einstein para explicar diferentes propriedades da matéria como a radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico. Montamos um aparato similar ao usado por Franck e Hertz em 1914 e obtivemos os valores para os níveis de energia do mercúrio.

**PRÓXIMA AULA**

Em nossa próxima aula realizaremos experimentos afim de verificar o comportamento do efeito fotoelétrico com os parâmetros externos tais como a intensidade e a frequência da radiação incidente.





ATIVIDADES

- 1- Construa os gráficos de I vs. V para as medidas em diferentes temperaturas.
- 2- Obtenha o valor da energia de excitação para o primeiro estado excitado do mercúrio.
- 3- Compare com o valor determinado experimentalmente através da espectroscopia com o diagrama de níveis de energia do mercúrio.
- 4- Construa um relatório nos moldes dado na aula anterior.



AUTO-AVALIAÇÃO

- Eu sei descrever o modelo atômico de Bohr?
- Eu sei descrever o experimento de Franck-Hertz?
- Eu sei quais informação que o experimento de Franck-Hertz pode me fornecer?

LEITURA COMPLEMENTAR



- [1] Manual da Phywe, The Franck-Hertz experiment;
- [2] Notas de aula, curso de laboratório de mecânica quântica e física nuclear, DFI-UFS;
- [3] EISBERG, R. ; RESNICK, R., **Física Quântica**, Editora campus (1979).
- [5] TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A; **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2001.
- [6] BREHM, John J.; MULLIN, Willian J.,**Introduction to the Structure of Matter**, John Willey & Sons.