

# Franck-Hertz

DINDARA S. GALVÃO, PEDRO MARIANO, RENAN DE ASSIS, THAIS ABELHA

Instituto de Física, Universidade de São Paulo -SP

## Resumo

*Baseado no experimento de Franck-Hertz, este trabalho teve por objetivo caracterizar a quantização de energia a partir da obtenção do valor da diferença de energia característica entre níveis do átomo de mercúrio (Hg). Para isso foi usado um arranjo com três eletrodos (um cátodo, um ânodo e uma grade) dentro de um tubo com gás de Hg onde seria variado o potencial aplicado entre os eletrodos. Assim, foram coletadas curvas de corrente por tensão de aceleração dos elétrons, as quais possuíam picos periódicos de corrente. Foram utilizados três métodos para determinar as diferenças entre os níveis de energia, os quais nos permitiram obter um valor para a energia de excitação e determinar o estado mais provável de excitação para o átomo de Hg.*

## I. INTRODUÇÃO

O estudo a seguir trata-se de uma análise do experimento de Franck-Hertz o qual foi realizado pela primeira vez em 1914, treze anos após a teoria de Planck sobre a radiação do corpo negro e um ano após os postulados de Bohr sobre o átomo de hidrogênio.

A teoria de Planck resolveu o problema da catástrofe ultravioleta assumindo que o corpo negro deve emitir e absorver a radiação em pequenos pacotes de energia conhecidos como quanta, rompendo dessa forma com a teoria clássica. Suas contribuições para a física quântica lhe renderam um prêmio Nobel de Física em 1918. A teoria de Bohr do átomo utiliza a quantização dos níveis de energia nas camadas atômicas. Com seus postulados, considerando essa quantização da energia dos elétrons de um átomo, Bohr pôde explicar a estabilidade e o espectro deste fazendo uso de um conceito não clássico.

James Franck e Gustav Ludwig Hertz estavam buscando estudar colisões de elétrons com átomos de elevado número atômico, para isso utilizaram vapor de mercúrio. A ideia era estudar as colisões dos átomos e entender a ionização do mercúrio, com isso acabaram encontrando propriedades da quantização dos níveis de energia do átomo, confirmando experimentalmente o modelo atômico de Bohr, esse experimento rendeu a eles o prêmio Nobel de 1925. Essa descoberta teve importância fundamental, pois, revelou empiricamente a propriedade da quantização dos níveis de energia atômicos, dando direção para o posterior desenvolvimento da mecânica quântica. Para uma breve história dos modelos atômicos e uma explicação do arranjo utilizado por Franck e Hertz consultar a referência

[1].

No experimento em questão, os elétrons acelerados por diferentes potenciais colidem com átomos de Mercúrio e isso produz picos periódicos em um gráfico de corrente pela tensão de aceleração. A explicação dada para esse fenômeno é a de que, quando os elétrons adquirem energia cinética compatível com a diferença entre o estado fundamental e um determinado estado de energia quantizado, eles perdem totalmente sua energia cinética em uma colisão, o que mostra a quantização dos estados de energia do átomo. Enquanto essa energia não é atingida, ocorre apenas uma colisão elástica com o átomo de massa muito superior ao elétron.

Esses valores específicos de energia para o átomo de Mercúrio são mostrados na Tabela 1[2]. O segundo estado excitado ( $^3P_1$ ) é o de maior probabilidade.

| Estado  | Valor(eV) |
|---------|-----------|
| $^3P_0$ | 4,67      |
| $^3P_1$ | 4,89      |
| $^3P_2$ | 5,50      |

**Tabela 1:** Valores de referência para as transições de energia aos primeiros estados do mercúrio (Hg)

No estudo realizado tivemos como objetivo reproduzir tal experimento com o propósito de encontrar resultados semelhantes aos de Franck e Hertz para a quantização da energia.

## II. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Este experimento consiste em um tubo preenchido de gás de mercúrio (Hg) com três eletrodos em seu interior: um cátodo, um ânodo e uma grade. O cátodo, através do efeito termoiônico, emite elétrons que são acelerados pela tensão de aceleração ( $V_a$ ) escolhida entre a grade e o cátodo. Em que a temperatura do sistema foi controlada e medida com um termômetro acoplado ao tubo. Após atravessar a grade, o elétron entra em uma zona com um potencial invertido, ou seja, um potencial de desaceleração ( $V_r$ ) e só os elétrons com energia suficiente, após interagirem com os átomos de mercúrio, chegam ao ânodo. O aparato é mostrado na Figura 1.

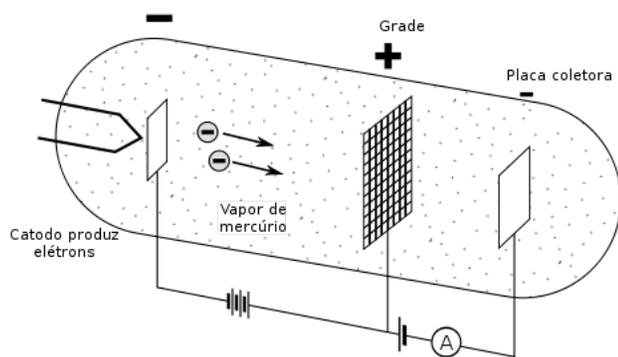


Figura 1: Aparato para o experimento de Franck-Hertz

Os elétrons que não interagem ou interagem, mas conservam uma energia suficiente para atingir o ânodo, constituem uma corrente ( $A$ ) medida em um pico-amperímetro. Tal sinal é processado pelo *software* do aparato e convertido numa curva de corrente por tensão de aceleração. O valor da corrente medida depende tanto da temperatura da placa, quanto da tensão de retardo.

É esperado que a quantização dos níveis atômicos do Hg independe das configurações do sistema em questão, portanto os parâmetros ( $V_r$  e temperatura) foram variados diversas vezes de forma a encontrar as melhores configurações. Essas seriam as quais mostrassem o maior número de picos de maneira mais evidente e sem saturar em nenhum ponto da curva. Tendo em vista isso, foram obtidas vinte curvas de corrente por tensão de aceleração ( $I \times V_a$ ) com diferentes configurações e em seguida, fixando uma dada configuração, foram obtidas dez curvas da mesma.

Em geral, os gráficos apresentam 8 máximos, caso a curva esteja bem definida. Tanto pelo caráter probabilístico da física quântica, como pelo princípio de incerteza de Heisenberg ou pelos diferentes valores de energia para

cada estado, a curva não apresenta vales como um delta de Dirac, e sim vales parecidos com uma gaussiana. Portanto, é necessário a escolha de um método para definir as diferenças entre os vales (cabe aqui uma analogia: é como se se quisesse medir o comprimento de onda do gráfico). Essa diferença corresponde a diferença entre os níveis de energia do Hg. Pode-se tomar o valor em que a derivada fornece o ponto de inflexão, ou o valor em que começa a diminuir a corrente, ou ainda quando termina o vale. Como a busca é pela diferença entre estruturas consecutivas, a princípio o ponto em que se considera é irrelevante. Optou-se pela utilização dos pontos de máximo.

O método para se obter os máximos foi um ajuste polinomial de segunda ordem em cada pico no programa Origin [3], exemplificado na Figura 2.

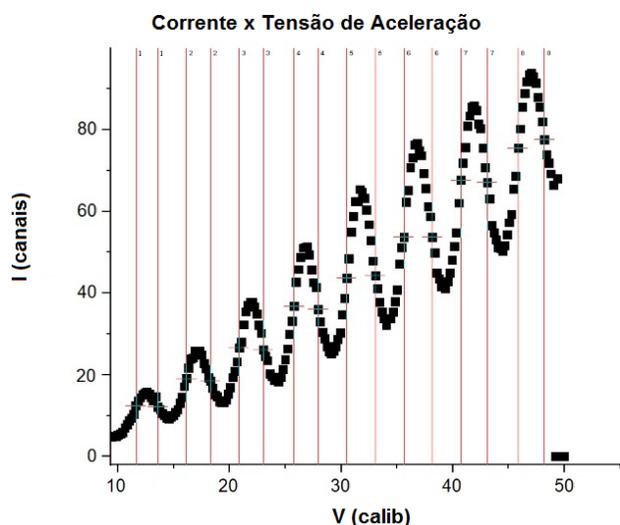


Figura 2: Intervalo de ajuste polinomial no gráfico de  $I$  por  $V_a$

Foram testados três métodos diferentes para obter o valor da diferença nos níveis de energia.

No primeiro método foi feita a diferença entre picos consecutivos das vinte primeiras curvas. Com este método esperava-se diminuir a incerteza no resultado obtido utilizando muitos valores. O segundo consiste em plotar o potencial dos máximos em função de sua ordem, do menor para o maior. Com este método esperava-se utilizar diversos pontos para obter um coeficiente angular que corresponderia a diferença nos níveis de energia. A terceira forma foi tirar a média das 10 curvas com a mesma configuração e encontrar a diferença entre os picos consecutivos no ajuste que levava em conta dez curvas semelhantes. Esperava-se com o terceiro método obter um ajuste com menor incerteza devido ao grande número de pontos e assim também diminuir a incerteza do resultado

final.

### III. RESULTADOS E ANÁLISE

Todos os gráficos obtidos seguem o modelo da curva apresentada na Figura 2, obter esse formato para diversos parâmetros já é uma indicação da quantização dos níveis de energia do átomo de Hg, em seguida procuramos quantizar a diferença entre estes níveis.

Utilizando o primeiro método, descrito na seção II, foi possível a construção do histograma das diferenças entre os máximos apresentado na Figura 3.

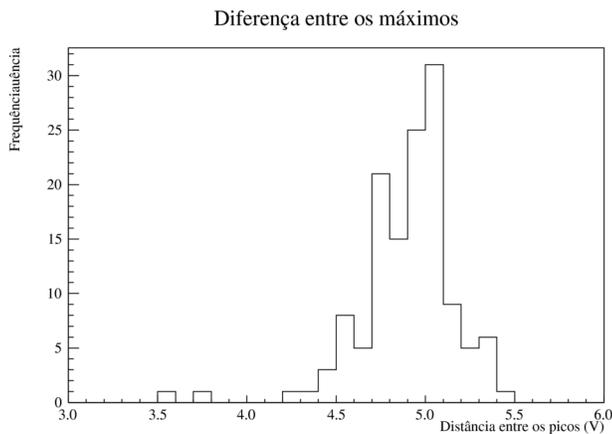


Figura 3: Histograma do valor da diferença entre os picos

Nesse histograma foram utilizadas 133 entradas e o valor estimado para a distância entre os picos foi dada através da média aritmética desses dados. Os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Valores obtidos com o primeiro método

| Média (eV) | $\sigma$ (eV) | Teste Z |
|------------|---------------|---------|
| 4,913      | 0,062         | 0,36    |

A média possui uma incerteza da ordem de 1% de seu valor e um teste Z que indica sua compatibilidade com o esperado.

Para o segundo método, foram utilizados os mesmos dados do primeiro método e foi feito o gráfico da tensão em cada pico pelo número do mesmo, sendo que são 8 picos no total. Tais dados foram ajustados linearmente como descrito no método dois, e podem ser encontrados na Figura 4.

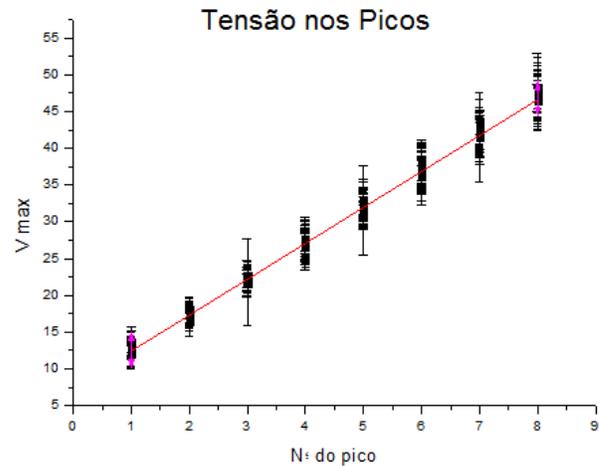


Figura 4: Gráfico de Tensão nos picos

Tal ajuste forneceu o coeficiente angular que se encontra na Tabela 3.

Tabela 3: Valores obtidos com o ajuste linear dos picos

| coef. angular (eV) | $\sigma$ (eV) | Teste Z |
|--------------------|---------------|---------|
| 4,889              | 0,058         | 0,07    |

O coeficiente angular deste ajuste das tensões em cada pico é um outro método interessante para se obter o valor da diferença de energia. O valor obtido foi compatível com o esperado, como se pode ver pelo valor do teste Z. Este segundo método gerou resultados muito parecidos com o primeiro, principalmente apresenta uma incerteza muito próxima da do método um.

Utilizando o terceiro método foram obtidas a média das diferenças entre os picos, sua incerteza e o teste Z com o valor esperado. Esses dados são mostrados na Tabela 3

Tabela 4: Valores obtidos com o terceiro método

| Média (eV) | $\sigma$ (eV) | Teste Z |
|------------|---------------|---------|
| 4,86       | 0,20          | 0,20    |

O terceiro método apresenta uma incerteza aproximadamente 4 vezes maior que os outros dois métodos e mesmo assim um teste Z apenas duas vezes menos que o do primeiro e duas vezes maior que o do segundo, mostra-se um método não tão preciso.

Ao fazer um gráfico de distância entre os picos por temperatura, gráfico 5. Foi observado que existe uma relação entre a temperatura e a distância entre os picos. Esse efeito já foi estudado em um dos artigos consultados

[2] no qual foi constatado que quanto maior a temperatura menor é a distância entre os picos. Foi observado o mesmo comportamento pelo nosso grupo, como mostrado na figura 5.

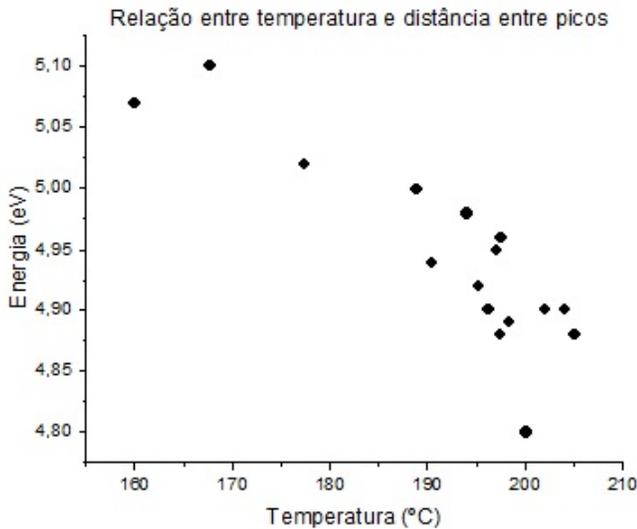


Figura 5: Relação entre a temperatura e diferença entre os picos.

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram desenvolvidos e utilizados três métodos para se obter o valor da diferença entre os níveis de energia do

átomo de Hg. Todos os métodos forneceram resultados compatíveis com o esperado. Entre estes destacam-se os métodos 1 e 2 que, como citado, apresentam incertezas da ordem de 1% do valor, fornecendo resultados com uma certeza que vai até a primeira casa decimal. Lembrando da tabela 1, o nível de precisão obtido permite confirmar que a excitação do elétron ocorre para o estado  $^3P_1$ . Por fim, levando em conta os resultados, consideramos o experimento bem sucedido.

#### REFERÊNCIAS

- [1] L. O. de Castro, P. Tamiasso-Martinhon, A. S. Rocha, and C. Sousa, "Contextualização histórica do experimento de franck-hertz," *História da Ciência e Ensino: construindo interfaces*, vol. 16, pp. 54–66, 2017.
- [2] G. Rapior, K. Sengstock, and V. Baev, "New features of the Franck-Hertz experiment," *American Journal of Physics*, vol. 74, no. 423, 2006.
- [3] O. Corporation, "Origin," 2018. Northampton, MA, USA.