

Estudo da quantização dos estados de energia internos em átomos de Hg: Experimento de Franck-Hertz

A. M. Honorato,* A. C. M. Padilha,† e F. Marques‡

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

(Data: 2 de maio de 2007)

Em 1914, J. Franck e G. L. Hertz realizaram um experimento que comprovou o modelo de discretização de energias nos átomos e moléculas, proposto por N. Bohr em 1913 e como conseqüência, receberam o prêmio nobel em 1925. No presente trabalho, uma reprodução do *experimento de Franck-Hertz*[1] é realizada utilizando-se equipamentos mais modernos. Novamente observou-se que é possível excitar átomos pela colisão com elétrons de baixa energia, que a energia transferida aos átomos por este processo de colisão tem sempre valores discretos, sendo o valor obtido próximo do valor esperado, 4,9 eV e que tais valores, encontram-se em concordância com os valores obtidos através da espectroscopia [2]. Além desses resultados, determinou-se também o *potencial de ionização* do Hg, sendo 10,02(18) eV o valor obtido.

I. INTRODUÇÃO

Este experimento consistiu em uma reprodução do *experimento de Franck-Hertz*. Realizado em 1914 pelos físicos James Franck e Gustav Ludwig Hertz, esse experimento confirmou a idéia do modelo atômico de Bohr de que os estados de energia interna de um átomo são quantizados. Além disso foi verificado que a energia transferida na colisão entre átomos e elétrons assume sempre valores discretos [3], o que confirma resultados já obtidos através da espectroscopia [2].

A montagem da experiência encontra-se esquematizada na figura 1. Elétrons são emitidos por um cátodo aquecido C e acelerados para a grade G por um potencial V, passando através de uma nuvem de vapor de mercúrio. Ao atravessar a grade, somente os elétrons com energia suficiente para vencer um potencial retardador V_R , chegam à placa coletora A, onde são detectados, na forma de corrente I, por um amperímetro.

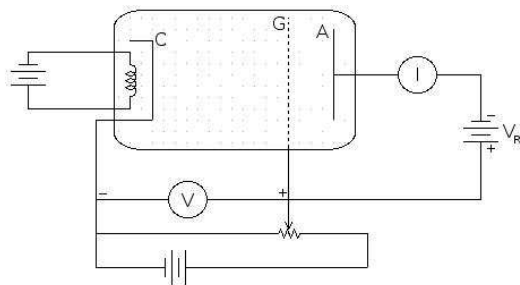


Figura 1: Esquema de montagem para a experiência de Franck-Hertz.

Aumentando gradativamente a tensão, observou-se um aumento correspondente na corrente, entretanto, notou-

se que a partir de um determinado valor de tensão, a corrente passava a cair, voltando a crescer depois de atingir um valor mínimo. Isso se repetia em intervalos de tensão aproximadamente iguais.

Esse fato foi interpretado dizendo-se que, um elétron acelerado, ao colidir com um átomo de mercúrio, pode transferir toda a sua energia ao mesmo, deixando-o em um estado excitado, porém, isso ocorreria somente se o elétron possuísse a energia correspondente à excitação do átomo, ou seja:

$$E_{e^-} = h\nu \quad (1)$$

onde $h\nu$ é a energia do fóton emitido por um átomo de Hg excitado ao voltar ao seu estado fundamental.

Nessa energia específica, que corresponde ao *potencial de excitação* do Hg, os elétrons são desacelerados ao colidir inelasticamente com átomos de Hg, antes de passar pela grade e, não conseguindo vencer o potencial V_R , não contribuem com a corrente. Se o potencial for tal, que, por exemplo, o elétron possa adquirir uma energia que seja o dobro desta energia, este pode então excitar um átomo de Hg e, antes de chegar à grade G, ser acelerado novamente, até que tenha energia suficiente para excitar um outro átomo. Com isso, múltiplos inteiros de $h\nu$, estão associados aos múltiplos inteiros do intervalo de tensão onde se observa a queda na corrente I. Observou-se que estes intervalos de tensão eram sempre os mesmos, portanto, isso forneceu uma evidência direta de que os estados de energia dos átomos são quantizados. Entretanto, se a densidade de átomos no caminho dos elétrons for pequena, os últimos podem ser acelerados sem que colidam com os primeiros logo ao atingir a energia correspondente ao *potencial de excitação*, fazendo com que uma energia maior que a energia de excitação fosse transferida aos mesmos. Se a energia dos elétrons atinge o valor correspondente ao *potencial de ionização* do Hg, elétrons são arrancados dos mesmos, levando à formação de íons positivos. Se houver uma leve diferença de potencial entre C e A, de modo que esses íons sejam atraídos para a placa coletora A, observa-se um salto na

*E-mail: amhonorato@zipmail.com.br

†E-mail: padilha.claudio@gmail.com

‡E-mail: fabriciomarques@usp.br

corrente I . Tal *potencial de ionização* pode ser medido, medindo-se o valor de tensão na qual este salto de corrente é observado. Entretanto, um último detalhe a ser observado é a presença de um *potencial de contato*, ou seja, uma energia que teria que ser fornecida ao elétron para que este vencesse a barreira potencial que o mantém no metal do circuito. Com isto, a energia de ionização E_i dos átomos de mercúrio seria dada de acordo com

$$E_i = E_a - E_c \quad (2)$$

onde E_a é a energia dos elétrons acelerados contra os átomos pelo potencial rampa e E_c é a energia do *potencial de contato*.

II. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

A. Equipamento

O equipamento utilizado encontra-se esquematizado na figura 2.

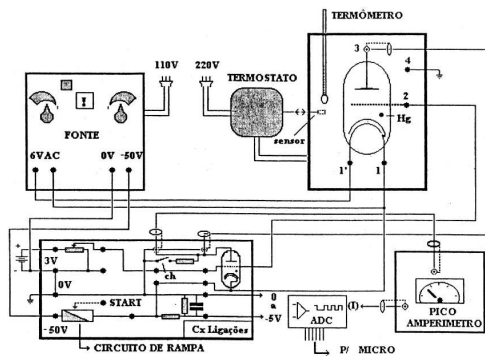
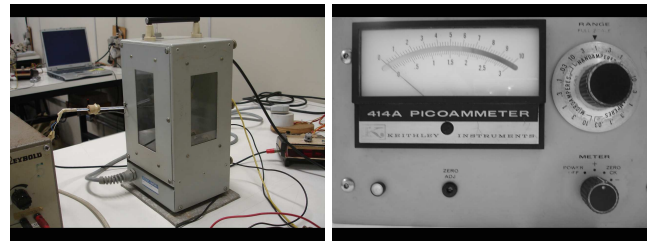


Figura 2: Diagrama do equipamento utilizado.

O tubo de Franck-Hertz utilizado (fig.3(a)) foi um modelo 09086.93 da marca Phywe. Esse tubo era equipado com uma resistência elétrica para o aquecimento do mesmo e três eletrodos planos, paralelos entre si: um cátodo de aquecimento indireto, um eletrodo de aceleração em forma de grade e um ânodo coletor. A separação entre o cátodo e a grade era grande se comparada ao livre caminho médio dos elétrons no vapor de Hg, de modo a favorecer a probabilidade de haver choque[3]. O tubo possuía um termômetro acoplado a ele e a temperatura podia ser controlada entre 95 °C e 250 °C, com o auxílio de um potenciômetro ligado no circuito da resistência elétrica aquecedora e outro dispositivo de controle automático da temperatura, que desligava o circuito aquecedor quando este atingia uma certa temperatura. Com isso, variando-se a temperatura do tubo, poderia-se aumentar ou diminuir a densidade do vapor de Hg no interior do mesmo.

A corrente podia ser monitorada por meio de um picoamperímetro modelo 414A da marca Keithley Instru-

ments (fig.3(b)), cuja saída foi conectada a um ADC, por sua vez conectado ao computador. Como saída do ADC, tinha-se três colunas de dados. A primeira era o canal referente à tensão de rampa no tubo, obtida através de uma curva de calibração, (figura 4) que foi construída medindo-se a tensão no multímetro e observando-se o canal referente à mesma na leitura do ADC no *software* FH32. A segunda coluna era a corrente no tubo, em porcentagem do fundo de escala, que era obtido da observação da chave de fundo de escala no picoamperímetro e era digitado na calibração do *software* utilizado. Finalmente, a terceira coluna era a incerteza no valor da corrente, também dada em porcentagem do fundo de escala, e cujo tratamento era o mesmo para os valores da coluna anterior.



(a)

(b)

Figura 3: (a) Tubo de Franck-Hertz, (b) Picoamperímetro

B. Procedimento

Para a obtenção dos dados, a contagem no *software* FH32 era disparada simultaneamente ao aumento em rampa da tensão.

Com isso, foram construídas curvas de I por V para diversas temperaturas, entre 106 °C e 196 °C. Medindo-se as diferenças de tensão correspondentes aos valores mínimos consecutivos na corrente, que correspondiam justamente à energia de excitação do mercúrio, para cada temperatura utilizada, os valores de ΔV_m em função de T foram obtidos e com isso, a influência da temperatura na energia de excitação dos átomos do vapor pode ser averiguada através da confecção de um gráfico. A seguir, duas curvas foram feitas utilizando-se a mesma temperatura, $T = 104^\circ\text{C}$, com diferentes valores de tensão freadora, $V_R = 0,0\text{ V}$ e $V_R = 1,5\text{ V}$. Estas curvas tornaram possível observar a influência do potencial freador V_R na leitura da corrente detectada no ânodo do tubo. Para verificar a faixa de temperatura na qual o experimento funciona, uma curva em baixa temperatura foi obtida. Para altas temperaturas, tal curva não foi obtida, pois não foi possível chegar a uma temperatura alta o suficiente para a qual o experimento não funcionasse mais.

O *potencial de contato* O *potencial de contato* foi obtido de cada um dos gráficos $I \times V$ obtidos em diferentes temperaturas (figura 6). Numerando-se os vales dos gráficos de $I \times V$, a partir do número 1, pôde-se determinar o valor do vale anterior ao primeiro pico, que era dado pelo coeficiente linear do ajuste do número do vale em função de seu valor em V . Subtraindo-se o valor de ΔV_m correspondente à mesma temperatura, o valor do *potencial de contato* foi obtido, para cada uma das temperaturas

Para a obtenção do *potencial de ionização* do mercúrio, seguiu-se o mesmo procedimento utilizado para a obtenção dos gráficos de $I \times V$ utilizado anteriormente, mas criando-se uma diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo, ligando-se uma bateria ao circuito da figura 1 de modo que o ânodo ficasse levemente negativo em relação ao cátodo, fazendo assim com que os íons positivos formados fossem atraídos para o ânodo, gerando uma corrente positiva detectada pelo amperímetro. Com isso, gráficos de $I \times V$, sendo I a corrente iônica, foram feitos. Para obter o valor do *potencial de ionização* do mercúrio, o procedimento adotado foi o seguinte: cada curva foi dividida em dois trechos, sendo um aproximadamente horizontal correspondente aos baixos valores de potencial acelerador; o outro trecho, aproximadamente vertical correspondente aos altos valores do potencial acelerador. Para cada um destes trechos foi feita uma linearização e o potencial de ionização foi definido como sendo o ponto de intersecção entre as duas linearizações, subtraído do valor obtido para o potencial *potencial de contato*, de acordo com a equação 2.

III. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS

A. Potencial Retardador

A curva de calibração utilizada no experimento encontra-se na figura 4 a seguir.

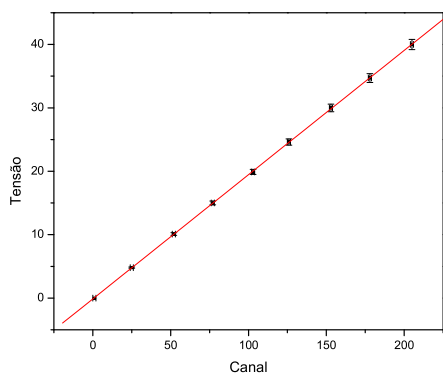


Figura 4: Curva de calibração do equipamento usado

Do coeficiente angular a do ajuste na figura 4, tirou-se que a relação entre canal e tensão era

$$a = 0,1960(5) \text{ V/canal}$$

Foram comparados os comportamentos de duas curvas $I \times V$, sendo uma com $V_R = 0$, outra com $V_R = 1,5V$ e ambas à uma temperatura $T = 140(3)^\circ\text{C}$. Essas curvas encontram-se sobrepostas na figura 5.

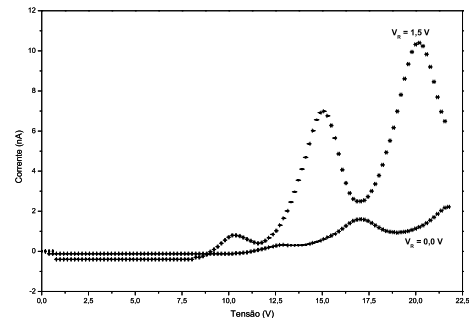


Figura 5: Curvas da corrente I em função da tensão aceleradora V para potenciais retardadores $V_R = 0$ e $V_R = 1,5V$.

Pode-se notar que entre os gráficos, há uma defasagem de aproximadamente $1,5V$, devido justamente à presença do potencial freador. Outro fato a ser notado é que os picos do gráfico em que a tensão freadora foi aplicada apresentaram uma maior acentuação, uma vez que somente os elétrons com uma energia suficiente para vencer o potencial gerado por tal tensão conseguiram chegar ao detector, fazendo com que outros elétrons de menor energia não contribuíssem para a corrente.

B. Potencial de Excitação

Foram construídas curvas da corrente I em função da tensão aceleradora V para diversas temperaturas. As medidas associadas a temperaturas mais baixas e mais elevadas, permitiram verificar a influência da densidade do vapor de Hg no experimento. Uma figura com as curvas, correspondentes a três das temperaturas utilizadas, sobrepostas, (o valor mínimo, um valor intermediário e o valor máximo) encontra-se na figura 6

Para cada uma dessas curvas, foi medida a diferença de potencial ΔV entre cada par de mínimos locais consecutivos, correspondentes aos valores de tensão nos mínimos locais da corrente. Na tabela I encontram-se os valores médios de ΔV , associados às curvas correspondentes a cada temperatura.

Com os dados da tabela I, o gráfico de ΔV_m em função de T foi obtido.

Observando-se o gráfico 7 pode-se notar que a diferença entre as tensões de dois mínimos consecutivos no gráfico

C. Temperatura de trabalho

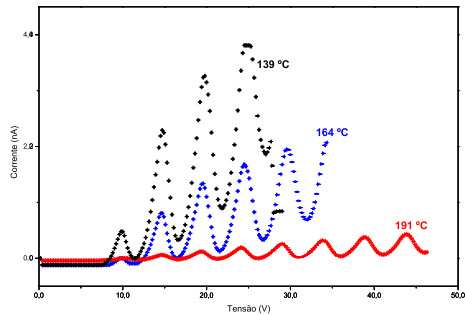


Figura 6: Curvas de $I \times V$ com potencial retardador $V_R = 1,5 V$.

Tabela I: Potencial de excitação ΔV do Hg medido para diversas temperaturas T e respectivo desvio em relação ao valor esperado (4,9 V).

$T(^{\circ}C)$	$\Delta V_m(V)$	$\delta(\%)^a$
139(3)	5,2(6)	6,73
144(3)	5,2(6)	6,73
147(3)	5,2(6)	6,73
150(3)	5,2(6)	6,73
164(3)	5,2(6)	5,31
174(3)	5,1(5)	3,06
185(3)	4,9(8)	1,63
191(3)	4,9(6)	0,61
196(3)	4,9(6)	0,61

^aDesvio relativo ao valor teórico 4,9V.

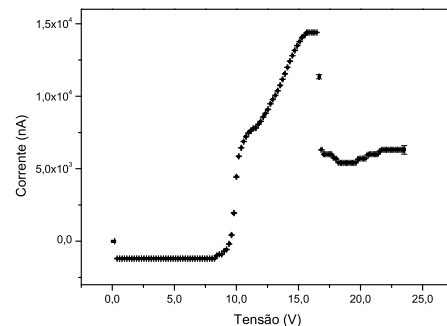


Figura 8: Gráfico de $I \times V$ para temperatura baixa.

Nota-se que, para temperaturas baixas não é possível observar os picos característicos da excitação dos átomos de mercúrio, pois o sistema ioniza-se muito facilmente, criando uma corrente de plasma que não tem nenhuma utilidade para a observação dos fenômenos de interesse no experimento. Como já dito anteriormente, para temperaturas mais altas, ocorre uma sensível diminuição da corrente detectada, pois a densidade elevada de átomos de mercúrio presentes no caminho dos elétrons ejetados faz com que uma quantidade muito pequena destes chegasse ao ânodo. Logo, o experimento foi realizado em uma faixa de temperaturas que ia de $T = 139^{\circ}C$ a $T = 196^{\circ}C$.

D. Potencial de Contato

O valor obtido para esta grandeza, utilizando-se o procedimento descrito na seção II foi obtido da média dos valores de cada temperatura, uma vez que este não apresentou uma variação sensível com a temperatura, correspondendo a:

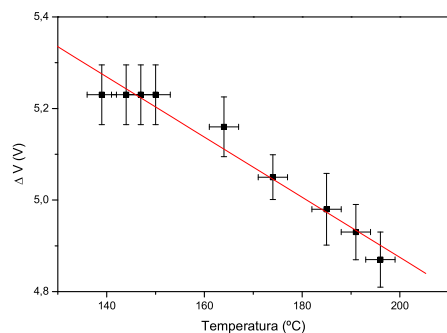


Figura 7: Gráfico de $\Delta V_m \times T$.

$I \times V$ decresce com a temperatura, porém sem apresentar um desvio significativo do valor teórico 4,9 eV, de acordo com a terceira coluna da tabela I. Este fato curioso poderia ser explicado observando-se o estudo feito em [4] em relação à seção de choque dos diferentes níveis eletrônicos do mercúrio.

$$\Phi_c = 1,23(12) \text{ V}$$

E. Potencial de Ionização

Duas das curvas de corrente de íons em função da tensão aceleradora V para temperaturas entre 83°C e 122°C estão apresentadas nas figuras 9 e 10 a seguir.

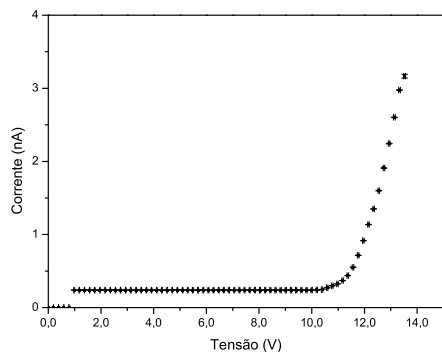


Figura 9: Gráfico de $I \times V$, no regime de ionização, para $T = 113^\circ\text{C}$.

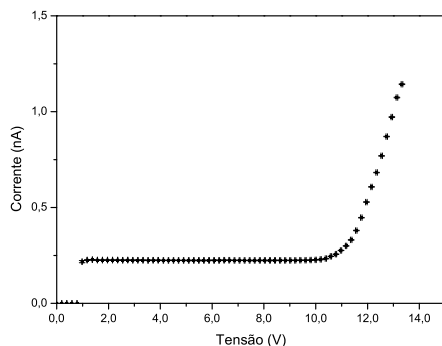


Figura 10: Gráfico de $I \times V$, no regime de ionização, para $T = 122^\circ\text{C}$.

Para cada uma destas curvas, obteve-se um valor para o *potencial de ionização*, e o valor de tal grandeza foi então obtido da média destes, resultando em:

$$\Phi_e = 10,02(18) \text{ V}$$

Tal valor mostrou-se compatível com o valor esperado, que era de $10,39 \text{ V}$, dentro de três incertezas.

IV. CONCLUSÃO

Pode-se dizer que a presença do potencial retardador V_R é um fator importante para a realização do experimento, uma vez que este tornou possível observar mais claramente o comportamento dos elétrons que participaram efetivamente das colisões com os átomos de mercúrio.

O potencial de excitação foi obtido de maneira satisfatória, uma vez que se mostrou compatível com o valor esperado, tendo um desvio relativo pequeno (6,73% no máximo). Porém o fato deste variar com a temperatura, (figura 7) à primeira vista parece ser uma contradição ao modelo de quantização do átomo. Isto, contudo, pode ser explicado devido ao fato de que o átomo de mercúrio possui diversos níveis de excitação, tendo até um tripleto ($6^3P_{0,1,2}$) cujas diferenças de energia são bem pequenas, comparadas às energias de excitação de outros níveis, como o singlete (6^1P_1). Estes níveis, por sua vez, possuem diferentes seções de choque σ , que dependem da energia dos elétrons incidentes. Porém, como uma aproximação do comportamento dos elétrons, a energia destes obedece à uma distribuição chamada de *distribuição de Maxwell de energias*, logo, para um mesmo valor de tensão aceleradora, pode-se ter elétrons de diferentes energias, excitando diferentes transições do átomo de mercúrio. Com o aumento da temperatura, entretanto, estas grandezas em questão sofreriam uma variação, resultando em um favorecimento de uma excitação em detrimento de outras, resultando em uma variação do valor de ΔV_m observado. Outras hipóteses, como a formação de estados ligados entre o átomo de mercúrio e o elétron também poderiam ser utilizadas para explicar esta aparente contradição com o modelo de Bohr. Esta discussão encontra-se em [4].

A energia de ionização do átomo de mercúrio obtida encontrou-se compatível com o valor esperado, o que era esperado.

- [1] J. Franck and G. Hertz, Verh. Deutsche Phys. Ges. **16**, 457 (1914).
 [2] R. Eisberg and R. Resnick, *Física Quântica* (Ed. Campus, 1979).

- [3] R. V. Ribas and M. A. Rizzutto, *Franck & hertz*, Lab. de Est. da Matéria II, FNC-314.
 [4] G. F. Hanne, Am. J. Phys. **56**, 696 (1988).