

# **Espalhamento elástico de elétrons por átomos de mercúrio**

## **F 809- Instrumentação para o ensino**

### **Relatório Final**

**Aluno: Bruno Vieira da Cunha Martins RA:970326**

**Orientador: Prof. Richard Landers**

#### **Introdução:**

Em 1925 o prêmio Nobel de física foi recebido conjuntamente por James Franck e Gustav Hertz pela descoberta das leis que governam o impacto de um elétron sobre um átomo. Franck e Hertz realizaram o experimento em 1914, doze anos antes do desenvolvimento da mecânica quântica. O experimento comprovou o postulado de Bohr que afirmava que os estados de energia de um átomo são quantizados e que a absorção ou emissão de radiação é sempre feita de maneira discreta.

Neste experimento, elétrons de energia próxima a um valor crítico de 4,9 eV são usados para excitar átomos em um vapor de mercúrio através de colisões inelásticas. Desta maneira foi demonstrado que a transferência de energia de elétrons para átomos possui valores discretos. Posteriormente o mesmo aparato experimental foi utilizado para a medição do potencial de ionização do mercúrio, utilizando-se elétrons com energia maior que 10,14eV. Esta medição é o objetivo principal da montagem.

#### **Espalhamento de elétrons por átomos de mercúrio:**

Os experimentos de excitação e ionização de átomos de mercúrio são realizados em um triodo que consiste em um envelope de vidro selado à vácuo contendo três eletrodos e mercúrio em seu interior. O mercúrio é utilizado pelo fato de seu vapor ser monoatômico e de pressão controlável no intervalo de temperatura do experimento. Os três eletrodos são: um polo positivo (catodo) ligado a um filamento emissor de elétrons, um polo negativo (anodo) e uma grade metálica entre os dois, funcionando como um filtro de elétrons de baixa energia. A emissão de elétrons pelo filamento ocorre através do efeito de emissão termoiônica. O anodo está ligado a um eletrômetro que mede correntes elétricas positivas e negativas. Por sua vez, o catodo e a grade estão ligados a um voltímetro que fornece o valor do potencial acelerador. Com os dados vindos desses dois instrumentos é que será possível a análise dos experimentos através de gráficos feitos num plotter (impressora x-y).

O experimento fornece o controle de quatro parâmetros: a voltagem do filamento ( $V_f$ ), que controla a temperatura no catodo; a voltagem aceleradora ( $V_a$ ) entre o catodo e a grade; a voltagem retardadora ( $V_r$ ) entre a grade e o anodo e a temperatura do aquecedor (T) que regula a pressão do vapor de mercúrio. O aparato eletrônico construído permite o controle dos quatro parâmetros com boa precisão. Sua vantagem em relação ao utilizado

atualmente reside no fato de permitir o controle do experimento de ionização, que atualmente não é realizado.

Os elétrons são emitidos pelo filamento através do efeito termoiônico. Um elétron emitido termoionicamente possui energia em torno de  $E=KT$ , onde  $T$  é a temperatura absoluta do metal e  $K$  é a constante de Boltzmann. Elétrons energéticos podem atravessar a grade e se chocar com átomos de mercúrio na região entre a grade e o anodo. A colisão pode ser elástica ou inelástica. Colisões elásticas resultam em ions de mercúrio que são coletados pelo anodo e colisões inelásticas resultam em excitação dos níveis de energia do átomo de mercúrio. A teoria quântica prediz que o átomo pode absorver energia apenas em valores discretos. Posteriormente o átomo irá irradiar a energia absorvida e retornará ao seu estado fundamental através da emissão de um fóton de frequência  $f$  dada por :

$$E_e - E_f = hf$$

Onde  $E_e - E_f$  é a diferença de energia entre o estado excitado e o estado fundamental e  $h$  é a constante de Planck. O elétron incidente perde essa diferença de energia em uma colisão inelástica e portanto não terá condições de vencer o potencial retardador, sendo por fim coletados pela grade. Os resultados do experimento original foram:

- 1) A frequência de qualquer linha do espectro de emissão é independente do potencial acelerador  $V_a$
- 2) Qualquer linha particular irá aparecer somente se o potencial acelerador  $V_a$  é maior que um valor crítico diferente para diferentes linhas.

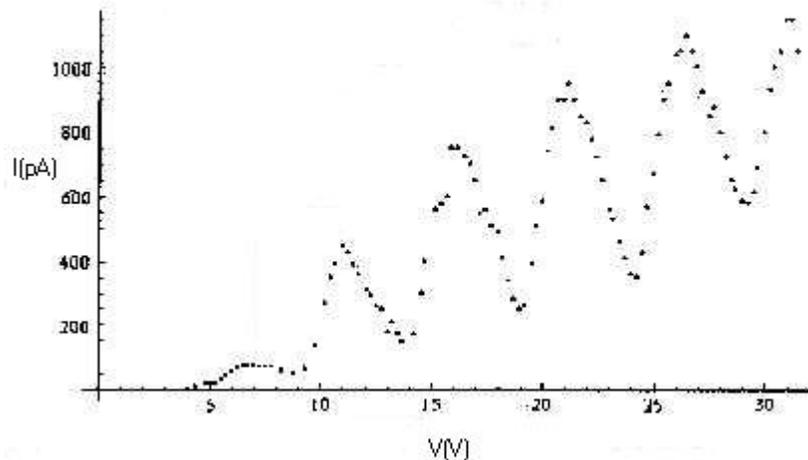


Figura 1: Gráfico esperado para o experimento de excitação.

O gráfico da corrente no anodo ( $I_a$ ) pela tensão aceleradora  $V_a$  mostra picos sucessivos de corrente. A separação entre máximos ou mínimos sucessivos é igual ao potencial de excitação do primeiro estado excitado do mercúrio (linha de 0,2536 nm de comprimento de onda). A largura dos mínimos é determinada pelo potencial retardador entre a grade e o anodo. A diferença entre a tensão aceleradora na primeira queda e o

potencial de excitação é a diferença entre as funções trabalho dos metais do catodo e da grade (potencial de contato entre os dois metais).

A temperatura do vapor de mercúrio determina o livre caminho médio dos elétrons. Quanto maior a temperatura, menor o livre caminho médio e maior o número de colisões com átomos de mercúrio. Logo para temperaturas mais altas, o elétron colide mais vezes mas com baixas energias, suficientes apenas para a excitação. Para temperaturas mais baixas, o elétron tem um livre caminho médio maior, e devido a isso, consegue colidir de forma elástica transferindo energias mais altas, suficientes para provocar a ionização do mercúrio. Para o potencial de ionização do mercúrio espera-se que a corrente de íons medida no eletrômetro permaneça constante e nula até um certo valor crítico da voltagem aceleradora, a partir do qual a corrente positiva irá crescer muito rapidamente.

### **Potencial de excitação do mercúrio:**

Para o experimento de excitação do mercúrio (figura 1), os quatro parâmetros de controle devem ser selecionados do seguinte modo:

- 1) A temperatura do aquecedor (T) deve estar em aproximadamente 170°C. Nesta temperatura, o livre caminho médio dos elétrons é pequeno comparado à distância entre o catodo e a grade.
- 2) A voltagem retardadora ( $V_r$ ) deve ser ajustada num valor constante entre 0,1V a 2V.
- 3) A voltagem aceleradora ( $V_a$ ) deve variar entre 0 e 60V.
- 4) A voltagem do filamento ( $V_f$ ) deve ser ajustada de modo que a corrente de saturação do tubo (grade+anodo) medida no eletrômetro esteja entre 0,1 a 1,0  $\mu$ A.

Os elétrons que atravessam a grade com energia menor do que a necessária para vencer o potencial retardador, são atraídos de volta e coletados pela grade. Elétrons mais energéticos que não colidem com átomos de mercúrio possuem energia suficiente para alcançar o anodo e são registrados como uma corrente negativa no eletrômetro. Utilizando-se um plotter, pode-se desenhar um gráfico da corrente pela voltagem aceleradora, semelhante ao apresentado acima.

### **Potencial de Ionização do mercúrio**

Para a determinação do potencial de ionização do mercúrio, o experimento deve ser montado como na figura 2. Deve-se notar que o anodo está em um potencial negativo em relação ao catodo, o que torna energeticamente impossível que elétrons alcancem o anodo. Elétrons acelerados pelo potencial entre o catodo e a grade e que possuem energia suficiente para penetrar no espaço entre a grade e o anodo onde o potencial é negativo, são capazes de ionizar átomos de mercúrio. Os íons positivos resultantes são atraídos para o anodo e registrados pelo eletrometro como uma corrente positiva. O experimento consiste em medir a corrente no anodo como função do potencial acelerador. O gráfico irá mostrar o potencial de ionização do mercúrio.

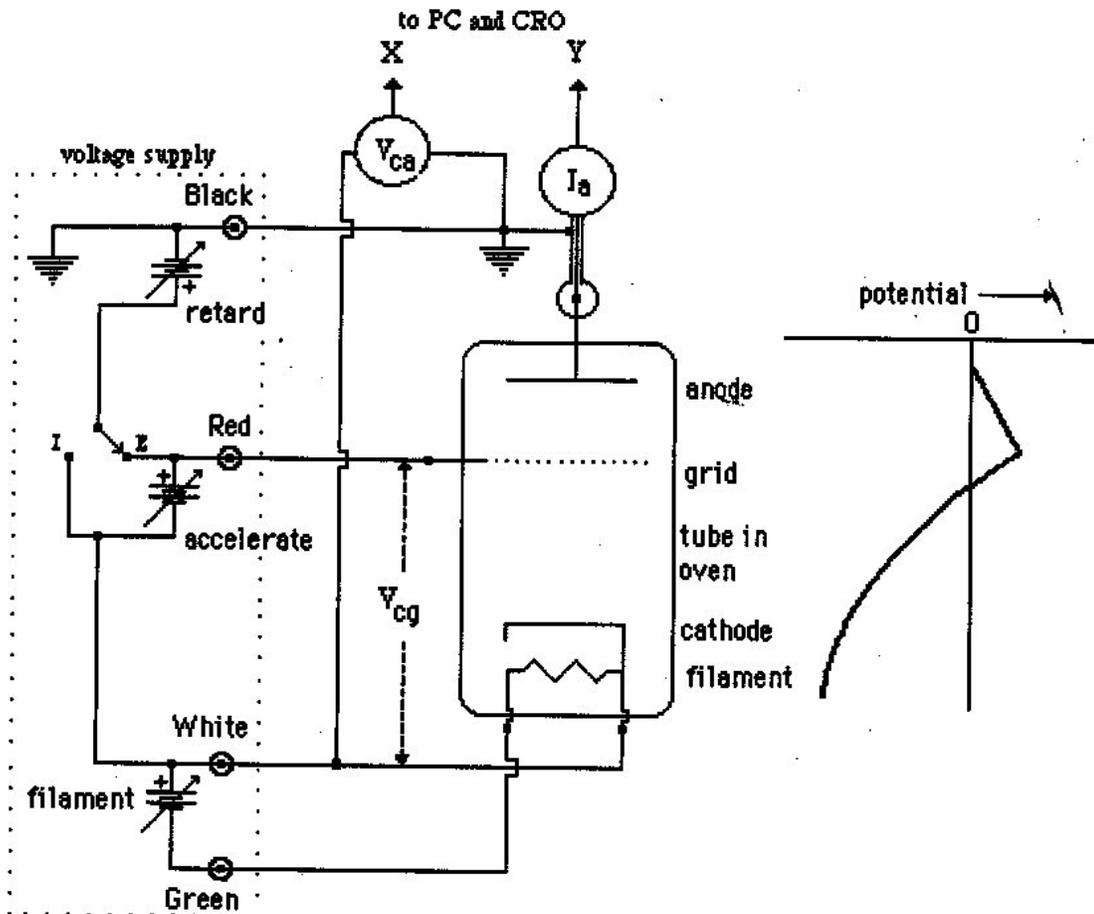


Figura 2: Diagrama do circuito para determinação do potencial de excitação do mercúrio

A preocupação principal neste experimento é o controle da temperatura do aquecedor feita pelo novo controlador de temperatura. Se a pressão de vapor é muito baixa, os elétrons que penetram a região entre a grade e o anodo com energia suficiente para a ionização terão baixa probabilidade de colisão com um átomo, uma vez que seu livre caminho médio é muito grande. Por outro lado, se a pressão de vapor é muito alta, os elétrons sofrerão colisões inelásticas no espaço entre o catodo e a grade excitando os átomos de mercúrio. A perda de energia devido a estas colisões impedirá que o mercúrio chegue à região entre a grade e o anodo com energia suficiente para a ionização.

Os parâmetros de controle devem ser ajustados na seguinte configuração:

- 1) A voltagem do filamento deve ser a mesma usada para o experimento de excitação. É ajustada de acordo com a corrente medida no eletrometro que deve variar entre 0,1 a 1,0  $\mu\text{A}$ .
- 2) A voltagem aceleradora deve ser de 15 V
- 3) A voltagem retardadora deve ser ajustada de modo que o potencial no catodo esteja 2V acima do potencial no anodo.
- 4) A temperatura do aquecedor deve ser ajustada entre 150 e 200°C.

O fenômeno da ionização ocorre de forma repentina como uma descarga devido ao efeito de cascata. Este efeito ocorre quando os elétrons ejetados do átomo possuem energia suficiente para ionizar outros átomos.

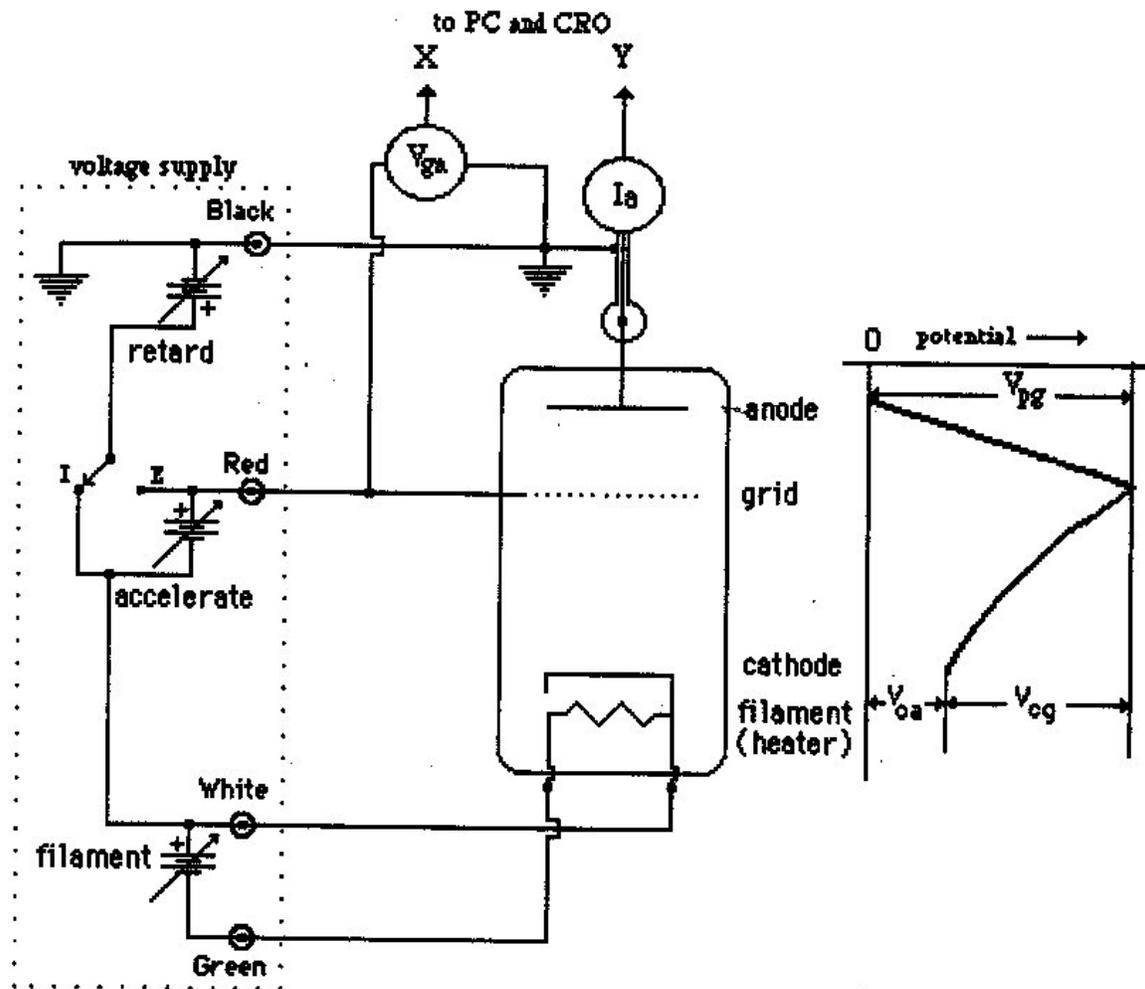


Figura3: Diagrama do circuito para determinação do potencial de ionização do mercúrio.

### Instrumental Eletrônico

Para o controle do experimento foram construídos dois circuitos: o primeiro (circuito 1) para o controle dos potenciais acelerador e retardador e da voltagem do filamento e o segundo (circuito 2) para o controle da temperatura do aquecedor que determina a pressão do vapor de mercúrio. Os layouts foram elaborados no programa PIA32 e os circuitos foram corroídos em placas cedidas pela oficina de eletrônica do IFGW.

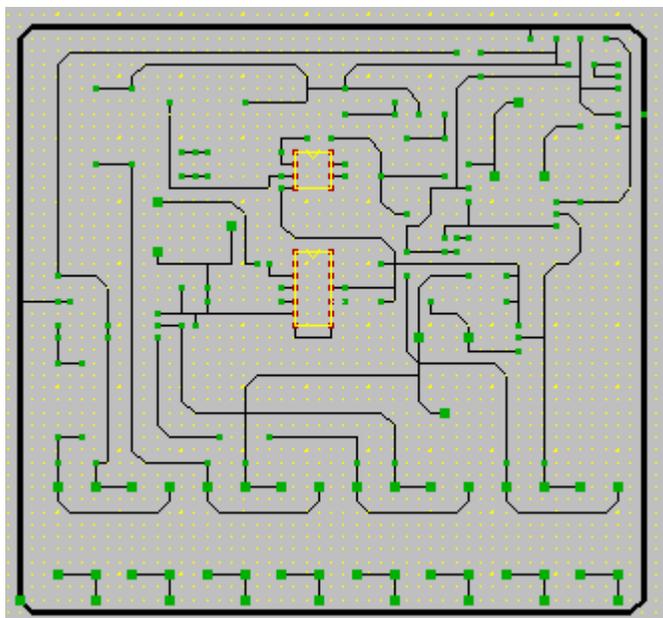


Figura 4: Layout do circuito 1

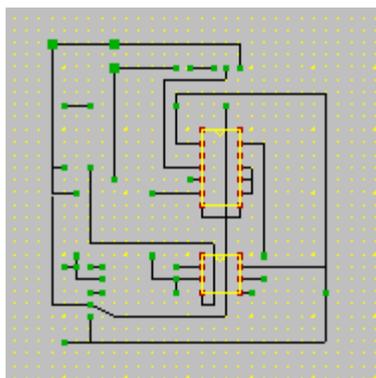


Figura 5: Layout do circuito 2

O circuito 1 (apêndice) foi retirado de um manual do laboratório de experimentos em física moderna do MIT (Massachusetts Institute of Technology). O circuito foi concebido tanto para o controle do experimento de ionização quanto para o de excitação. Sua alimentação é feita por dois transformadores:

Transformador 1 : primário de 120V e secundário de 60V com capacidade para no máximo 50mA de corrente.

Transformador 2 : primário de 120 V e secundário de 12 V com capacidade para no máximo 1 A de corrente.

O transformador 2 alimenta o componente LM7808 que é um gerador preciso e estável de 8V. Este por sua vez fornece o sinal tanto para a geração de um potencial contínuo quanto para um potencial variável. O potencial contínuo permite a regulação da tensão entre o catodo e a grade em qualquer valor fixo entre 0 e 70V (sinal amplificado),

a regulagem sendo feita por um potenciômetro de  $5K\Omega$ . Já o potencial variável originalmente seria provido pelo componente ICL8038. Este é um gerador preciso e sensível de ondas senoidais, quadradas e triangulares. Sua alimentação positiva de 8V é provida pelo LM7808 enquanto que a negativa de  $-4V$  vem de um LM337, que é um regulador negativo ajustável (o ajuste de  $-4V$  é feito pelo trimpot 1). O objetivo original seria o uso da onda triangular gerada pelo 8038 para a obtenção de uma rampa. A variação do potencial em rampa permite que seja feita uma varredura entre 0 e 60V do potencial de aceleração, permitindo a construção automática no plotter do gráfico de corrente no eletrômetro pelo potencial acelerador.

Entretanto, por sua fragilidade, o 8038 adquirido para o experimento foi queimado durante os testes. Devido a seu alto custo e dificuldade de obtenção, o componente foi substituído por uma combinação de resistores e capacitor conforme esquematizado na figura 1.

O resistor R1 é de  $470K\Omega$ , o resistor R2 é de  $5K\Omega$  e o capacitor C é de  $1000\mu F$ . Quando a chave é aberta, o capacitor é carregado, e a tensão na região de uso (entre 0 e 60V) cresce aproximadamente linear como uma rampa. Quando a chave é fechada, o capacitor é descarregado pelo resistor 2 e a tensão volta a zero. Na nova configuração do circuito, a função rampa não é mais ligada ao potenciômetro de  $5K\Omega$ , indo diretamente para a entrada 2 do LF356.

O LF356 é um amplificador operacional JFET com alimentação positiva de +8V (provida pelo LM7808) e negativa de  $-4V$  (provida pelo LM337). Sua função é gerar corrente no coletor do 2N3055, que é um amplificador de potência. A voltagem gerada no 2N3055 é o potencial acelerador aplicado entre o catodo e a grade.

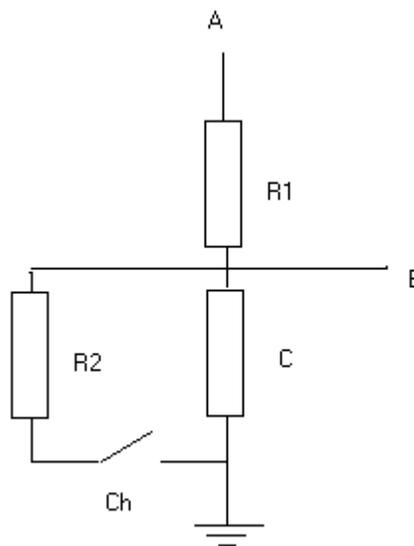


Figura 6: circuito RC

O circuito fornece também o controle de outros dois parâmetros: o potencial retardador e a voltagem no filamento. O potencial retardador é controlado por uma associação entre um diodo zener e um potenciômetro. Já voltagem no filamento, que determina sua temperatura, é controlada por um potenciômetro ligado a um LM337.

O circuito 2 (apêndice) tem por função o controle da temperatura do aquecedor. Consiste num circuito de realimentação que responde a um sinal de erro gerado num amplificador operacional CA3080 atuando como um comparador. O CA3080 tem em sua entrada positiva um sinal vindo de um potenciômetro de ajuste de temperatura, e na entrada negativa um sinal vindo de um termopar que está medindo a temperatura no interior do experimento. O sinal de erro consiste na diferença entre os dois sinais e será nulo quando a temperatura selecionada for igual à temperatura medida no termopar, o que indica que está controlada. A saída do CA3080 está ligada a um CA3079, um amplificador que também recebe o sinal vindo da carga (no caso o aquecedor). Este consiste num novo sinal de realimentação uma vez que a corrente no aquecedor é gerada por um triac controlado pelo sinal vindo do CA3079 que é regulado pelo que vem do aquecedor.

## Resultados Experimentais

Foi possível a obtenção de um único gráfico para potenciais tanto de excitação quanto de ionização. Isso se deve a uma peculiaridade do novo circuito RC que permite que o potencial de aceleração extrapole o limiar de excitação e entre na faixa de ionização numa mesma varredura. O gráfico está abaixo:

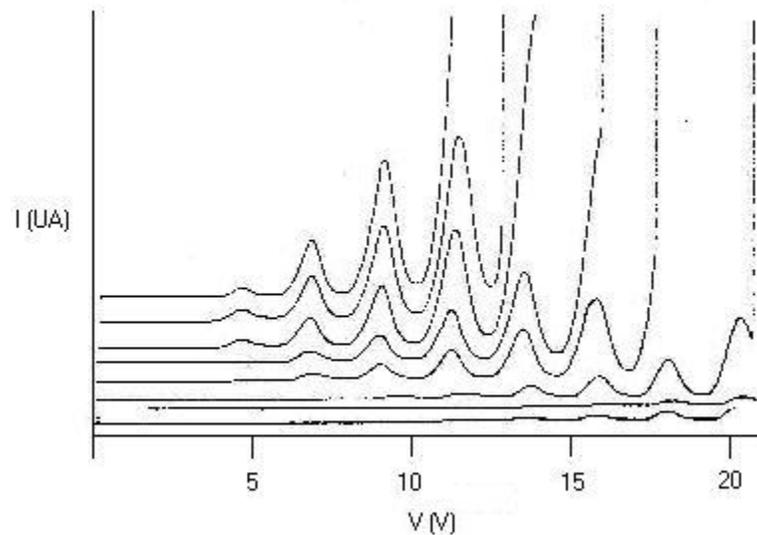


Figura 7: Corrente em função da voltagem aceleradora para diferentes temperaturas (em ordem crescente de cima para baixo).

O gráfico mostra a corrente medida no eletrômetro ( $I$ ) em unidades arbitrárias (UA) pela tensão de aceleração ( $V$ ). Foi obtido com a impressora XY ligada ao experimento, ao que se deve a baixa qualidade da impressão. Os gráficos mostram claramente o primeiro pico próximo a 5V (o potencial de excitação do mercúrio em 4,9V). As diferentes linhas correspondem a diferentes temperaturas do aquecedor. De cima para baixo temos: 135,140, 145,160,165,185,200 e 210 °C. A divergência no final de cada linha corresponde à ionização. Logo, pode-se notar que a medida que a

temperatura diminui, os picos de ionização se deslocam para a direita enquanto os picos de excitação permanecem constantes para todas as temperaturas. Isso pode ser explicado pelo aumento do livre caminho médio com a diminuição da temperatura, o que como já foi discutido, faz com que os elétrons obtenham energia de ionização com potenciais aceleradores cada vez menores.

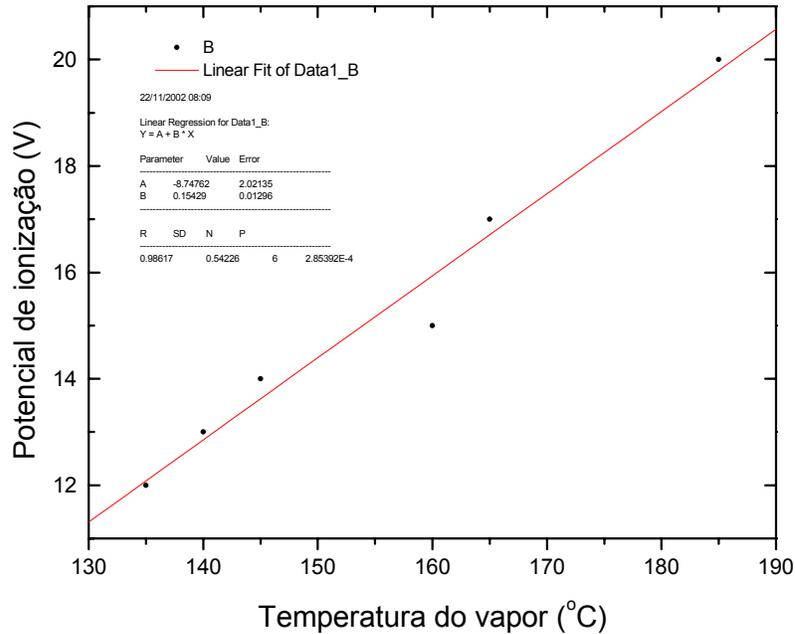


Figura 8: Potencial de ionização do mercúrio pela temperatura do vapor

A figura 8 mostra uma dependência linear entre o valor do potencial de ionização do mercúrio e a temperatura do vapor, mais uma vez indicando a influência do livre caminho médio na energia dos elétrons incidentes.

## Conclusão

O experimento permite as conclusões discutidas na teoria:

- 1) A frequência de qualquer linha do espectro de emissão é independente do potencial acelerador  $V_a$
- 2) Qualquer linha particular irá aparecer somente se o potencial acelerador  $V_a$  é maior que um valor crítico diferente para diferentes linhas.
- 3) O potencial de ionização diminui com a diminuição da temperatura do vapor de mercúrio, devido ao aumento do livre caminho médio dos elétrons

Apesar de os circuitos estarem prontos, precisarão de mais algum tempo para estarem totalmente operacionais. Isso se deve principalmente às dificuldades encontradas com o circuito 1 que exigiram mudanças que alteraram um pouco suas funções. O

circuito não está interagindo bem com o aparato experimental já existente, principalmente com o eletrômetro. Seu funcionamento interno não é bem conhecido e isso faz com que não se consiga determinar um referencial único para os dois equipamentos. Tal fato prejudica tanto as medidas quanto o próprio controle do experimento. Entretanto tal fato pode ser revertido e isso já está sendo estudado. A resolução desta dificuldade o redimensionamento do circuito 1 e a entrada em operação do circuito 2 tornará possível um novo estágio de controle para o experimento de Franck-Hertz e potencial de ionização do mercúrio na disciplina de F740.

### **Referências**

- [1]-A.C.Melissinos , Experiments in modern physics
- [2]-Manual do laboratório de física moderna , Massachussets Institute of technology
- [3]-Manual do Ca3079, Intersil semiconductors

