



# Laboratório de Física Moderna

Relatórios 6 - 9

Gabriel Wendell Celestino Rocha

Vinícius Câmara Filgueira

## Atividade 6 - Experimento de Michelson e Morley

- a) Da análise do interferômetro de Michelson-Morley, podemos escrever:

$$\Delta d = \frac{\ell v^2}{\lambda c^2} \quad \therefore \quad \boxed{\Delta d = 0.052 \text{ m}} \quad (1)$$

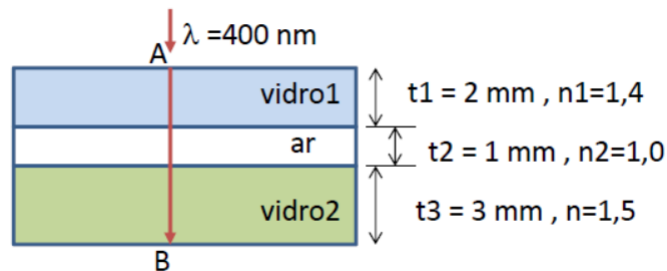
onde  $\ell$  é a distância entre os espelhos do interferômetro,  $v$  é a velocidade de propagação do feixe após do feixe após passar pelas lâminas de vidro,  $\lambda$  o comprimento de onda do feixe e  $c$  a velocidade da luz no vácuo.

■

- b) Considere o sistema ótico representado pela Figura 1. Para calcularmos o comprimento ótico entre os pontos  $A$  e  $B$  para a situação onde o feixe incidente é paralelo à normal, podemos usar a relação:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \Lambda_i, \quad (2)$$

onde  $\Lambda_i$  é o comprimento ótico de cada camada e  $\Lambda$  o comprimento ótico resultante.



**Figura 1:** Sistema ótico constituído por duas camadas de vidro separadas por uma camada de ar.

Por definição, o comprimento  $\Lambda_i$  ótico para uma camada  $i$  de espessura  $t_i$  e índice de refração  $n_i$  é dada por

$$\Lambda_i = n_i \cdot t_i. \quad (3)$$

Substituindo a Equação (3) em (2) obtemos então:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N n_i \cdot t_i. \quad (4)$$

Para o sistema ótico apresentado na Figura 1, temos que  $i = 3$ , onde cada camada possui espessura e índice de refração bem definidos. Os valores para cada camada se encontram na Tabela 1.

$i$	$t_i$ (mm)	$n_i$
1	2.00	1.4
2	1.00	1.0
3	3.00	1.5

**Tabela 1:** Características de cada camada do sistema ótico apresentado.

Substituindo os dados apresentados na Tabela 1 na Equação (4) obtemos finalmente:

$$\Lambda = 2.8 \text{ mm} + 1.0 \text{ mm} + 4.5 \text{ mm} \quad \therefore \quad \boxed{\Lambda = 8.3 \text{ mm}} \quad (5)$$

■

- c) Dado o experimento de Michelson-Morley, temos que o índice de refração resultante é dado pela Equação abaixo:

$$n = \frac{(2t - N\lambda)(1 - \cos i)}{2t(1 - \cos i) - N\lambda}, \quad (6)$$

onde  $t$  é a espessura da lâmina de vidro,  $\lambda$  é o comprimento de onda do feixe incidente,  $N$  o número de comprimento de onda e  $i$  é o ângulo que o feixe incidente faz com a normal à lâmina de vidro, respectivamente.

Para o experimento 6B, temos  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 622 \text{ nm}$ ,  $N = 50$  e  $i = 21^\circ$ , respectivamente. Substituindo tais valores na Equação (6) obtemos:

$$n = \frac{(2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} - 50 \cdot 622 \cdot 10^{-9} \text{ m})(1 - 0.93)}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}(1 - 0.93) - 50 \cdot 622 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \quad \therefore \quad \boxed{n \approx 1.292} \quad (7)$$

■

- d) Dada a configuração do experimento 6B, valem as seguintes relações:

$$\Delta = 2(\overline{ae} - \overline{ac}) = N\lambda = 2t \left( \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + 1 - n - \cos i \right). \quad (8)$$

Substituindo os dados mencionados no item c) na Equação (8) obtemos o seguinte valor para a diferença de caminhos óticos:

$$\Delta = 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \left[ \sqrt{(1.29)^2 - \sin^2(21^\circ)} + 1 - 1.29 - 0.93 \right] \quad \therefore \quad \boxed{\Delta = 3.128 \cdot 10^{-5} \text{ m}} \quad (9)$$

■

- e) Sabe-se da teoria ondulatória clássica que a condição de formação de anéis interferência dada a condição de ângulos gaussianos, ou seja,  $\theta \ll 5^\circ$  pode ser expressa como:

$$2d = m\lambda \iff m = \frac{2d}{\lambda}. \quad (10)$$

Substituindo  $d = 1.5 \mu\text{m}$  e  $\lambda = 633 \text{ nm}$  na Equação (10) e aplicando a função piso no resultado obtemos:

$$m' = \lfloor m \rfloor = \left\lfloor \frac{2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{633 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \right\rfloor = \lfloor 4.739 \rfloor \quad \therefore \quad \boxed{m' = 5 \text{ anéis} \rightarrow 4 \text{ anéis}} \quad (11)$$

Matematicamente, pelas propriedades da função piso, deveríamos visualizar a formação de 5 anéis de interferência. Entretanto, experimentalmente notou-se a formação apenas de 4 anéis.

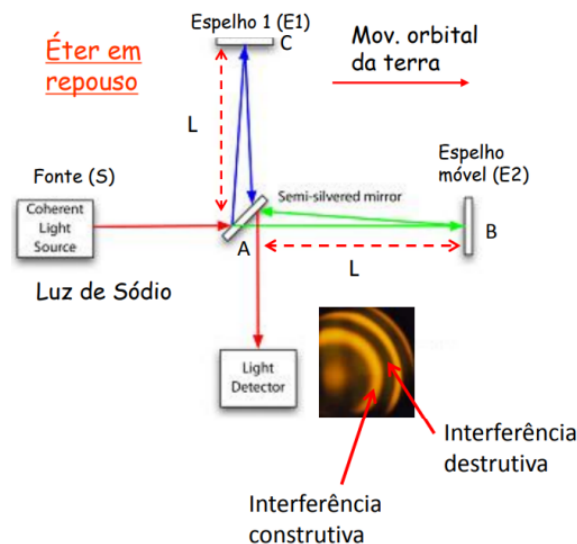
■

- f) Considere novamente a Equação (10). Considerando um deslocamento  $d = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$  nota-se, experimentalmente, a formação de 90 anéis de interferência. Nesse caso, a faixa de comprimentos de onda responsável por gerar essa quantidade de anéis é dada por:

$$\lambda = \frac{2d}{m} = \frac{2 \cdot 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}}{90 \text{ anéis}} \quad \therefore \quad \boxed{\lambda \approx 533 \text{ nm}} \quad (12)$$

■

- g) O experimento de Michelson & Morley consiste em um interferômetro formado por três espelhos, uma fonte de luz e um detector, como ilustrado na Figura 2.



**Figura 2:** Esquema do experimento de Michelson-Morley.

Considerando tal experimento, temos que os tempos de deslocamento da luz nos dois sentidos serão dados por:

$$t_{AB} = \frac{\ell}{c-v} \quad , \quad t_{BA} = \frac{\ell}{c+v}. \quad (13)$$

Com base na geometria do experimento (vide Figura 2), podemos escrever:

$$L^2 + (vt_{AC})^2 = (ct_{AC})^2 \implies \begin{cases} t_{AC} = \frac{\ell}{\sqrt{c^2-v^2}} \\ t_{AC'} = \frac{\ell}{\sqrt{c^2-v^2}} \end{cases} \therefore t_{AC} = t_{AC'}. \quad (14)$$

Novamente com base na geometria do experimento e com base no resultado obtido em (14), obtemos finalmente:

$$\begin{aligned} \Delta t \cong (t_{AB} + t_{BA}) - (t_{AC} + t_{CA}) &= \left( \frac{\ell}{c-v} + \frac{\ell}{c+v} \right) - \left( \frac{\ell}{\sqrt{c^2-v^2}} + \frac{\ell}{\sqrt{c^2-v^2}} \right) \\ \therefore \quad \boxed{\Delta t \cong \frac{\ell v^2}{c^3}} \end{aligned} \quad (15)$$

■

- h) Considere a Figura 3 abaixo. Note que, com base na geometria da mesma, podemos exprimir as distâncias apresentadas da seguinte forma:

$$\Delta = n(AB + BC) - AD, \quad (16)$$

onde o índice de refração  $n$  e as distâncias apresentadas satisfazem as seguintes relações:

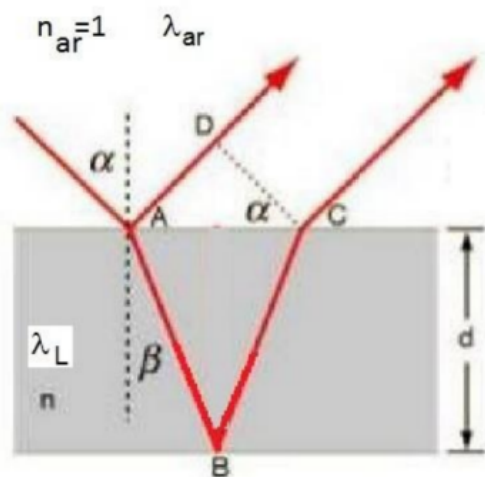
$$\begin{cases} n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{ar} f}{\lambda_L f} = \frac{\lambda_{ar}}{\lambda_L} \\ AB + BC = M\lambda_L = \frac{M\lambda_{ar}}{n} \\ AD = N\lambda_{ar} \end{cases} \implies \Delta = (M - N)\lambda_{ar}. \quad (17)$$

Analisando agora a geometria do sistema óptico apresentado na Figura 4, podemos escrever as relações:

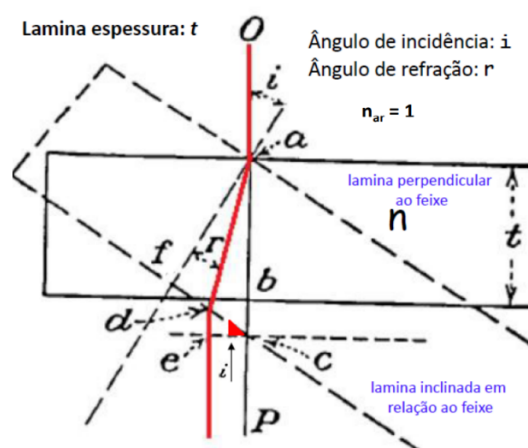
$$\Delta = N\lambda = n(\overline{ae} + \overline{ac}) \quad , \quad \begin{cases} \overline{ae} = \overline{ad} \cdot n + \overline{de} \\ \overline{ac} = nt + \overline{bc} \end{cases} \quad (18)$$

Aplicando trigonometria clássica na Figura 4, temos

$$\begin{aligned} \cos r = \frac{t}{\overline{ad}} \quad \wedge \quad \overline{de} = \overline{dc} \sin i \implies \overline{de} = (\overline{fc} - \overline{fd}) \sin i \quad , \quad \begin{cases} \overline{fc} = t \cdot \tan i \\ \overline{fd} = t \cdot \tan r \end{cases} \\ \therefore \quad \cos i = \frac{t}{t + \overline{bc}} \implies \overline{bc} = -t + \frac{t}{\cos i}. \end{aligned} \quad (19)$$



**Figura 3:** Caminhos ópticos percorridos em uma lâmina.



**Figura 4:** Caminhos ópticos percorridos em uma lâmina inclinada.

Aplicando a lei de Snell-Descartes na Figura 4 podemos escrever:

$$n \sin r = \sin i \implies \cos r = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}{n}$$

$$\overline{ae} = n \cdot \frac{t}{\cos r} + [t(\tan i - \tan r)] \sin i \implies \overline{ac} = nt - t + \frac{t}{\cos i}. \quad (20)$$

Simplificando ao máximo e realizando algumas manipulações algébricas com o resultado obtido em (20) obtemos finalmente:

$$\frac{N\lambda}{2} = \frac{tn}{\cos r} + t \sin i (\tan i - \tan r) - nt + t - \frac{t}{\cos i} \implies \frac{N\lambda}{2t} + \cos i + n - 1 = \sqrt{n^2 - \sin^2 i}$$

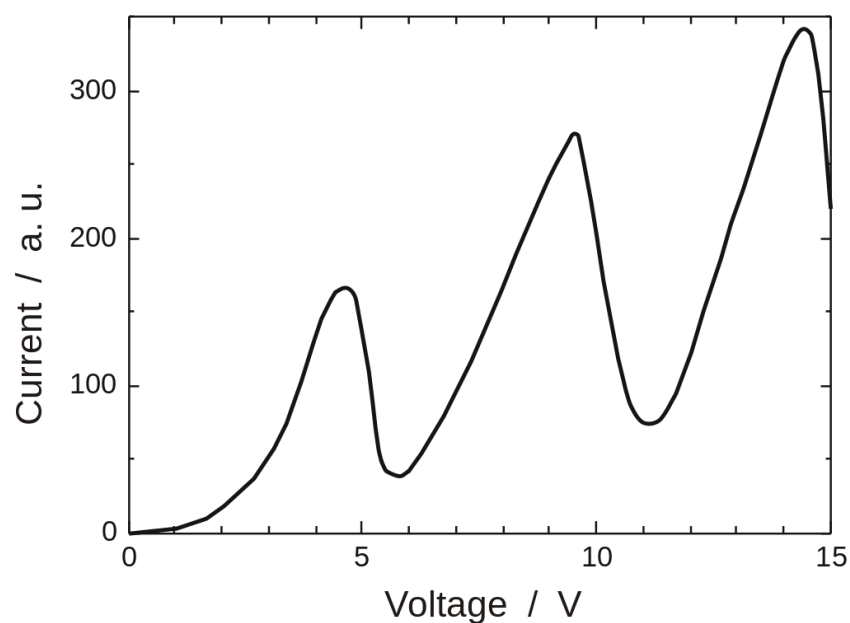
$$\therefore \boxed{n = \frac{(2t - N\lambda)(1 - \cos i)}{2t(1 - \cos i) - N\lambda}} \quad (21)$$

■

## Atividade 7 - Experimento de Franck-Hertz

- a) O objetivo do experimento de Franck-Hertz é constatar as energias das transições atômicas que por sua vez são discretas. Com base nisso, é possível então reforçar os argumentos apresentados por Bôhr em seu modelo para o átomo de hidrogênio.
- b) Para que o experimento de Franck-Hertz ocorra é necessário que o mercúrio (Hg) esteja em seu estado gasoso para que haja a liberação de elétrons pelo Hg que por sua vez serão acelerados devido a uma diferença de potencial  $\Delta V$ . Uma vez que o ponto de ebulição do Hg é demasiadamente alto, cerca de  $356.7^\circ\text{C}$ , faz-se necessário o uso de um forno capaz de atingir tais temperaturas.
- c) O experimento de Franck-Hertz consiste em acelerar elétrons de baixa energia emitidos termicamente (efeito termoiônico) pelo cátodo  $C$  e acelerados na direção de um anodo  $A$  por uma diferença de potencial  $V$ . Alguns elétrons passam através dos buracos localizados no anodo e conseguem chegar até uma placa  $P$  desde que sua energia cinética seja suficiente para vencer o potencial de retardo  $V$  aplicado entre a placa  $P$  e o ânodo  $A$ . A primeira medida foi realizada em um tubo contendo vapor de Hg. Para uma baixa voltagem, observa-se  $I$  cresce quando  $V$  cresce. quando  $V$  chega a  $4,9\text{ V}$  a corrente cai abruptamente. Isto foi interpretado como sendo uma interação entre os elétrons e os átomos de Hg que tem um início repentino quando os elétrons adquirem uma energia cinética de  $4,9\text{ eV}$ . Aparentemente uma parcela significativa dos elétrons excita os átomos de Hg e perdem totalmente sua energia cinética. Se  $V$  for apenas ligeiramente maior que  $4,9\text{ V}$  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 que causa os picos e vales.
- d) Observando a figura abaixo constatamos de um vale para um pico a variação de potencia gira em torno de  $4,9\text{ eV}$ , indicando que essa foi a energia que o elétron absorveu e, após colidir com as camadas de valência, de maneira discreta, forneceu energia aos elétrons
- e) (a) Falso. Não são os fótons os responsáveis pela absorção de energia pelos átomos de Hg e sim os elétrons.
- (b) Falso. As colisões entre os átomos de Hg são responsáveis por ionizar o gás em torno das placas.
- (c) Falso. As colisões dos átomos de Hg com a grade não são os responsáveis pela absorção de energia dos mesmos.
- (d) Verdadeiro. De fato, as colisões dos elétrons com os átomos de Hg, especificamente os elétrons de valência fazem com que ocorra a absorção da energia.
- (e) Falso. As colisões entre o ar e o Hg fornecem os elétrons livres que por sua vez são acelerados.
- f) Considere a equação da energia de um fóton. Podemos obter a frequência de oscilação da seguinte forma:

$$E = hf \implies f = \frac{E}{h} = \frac{4,9\text{ eV}}{4,14 \cdot 10^{-15}\text{ eV} \cdot \text{s}} \quad \therefore \quad \boxed{f = 1,18 \cdot 10^{15}\text{ s}^{-1}} \quad (22)$$



**Figura 5:** Variação da corrente com a tensão.

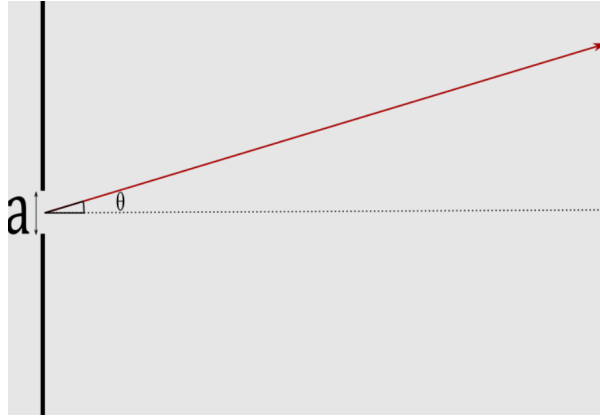
■

- g) Supondo que o forno não estivesse ligado, notaríamos a formação de um gráfico de caráter puramente exponencial.
- h) As excitações provocadas nos átomos de Hg não podem ser provocadas pela luz visível devido ao fato de que a frequência mais energética do espectro de luz visível possuir energia de 2.9 eV.



## Atividade 8 - Princípio de Incerteza de Heisenberg

- a) Considere o experimento de difração de um feixe de elétrons por uma pequena fenda de largura  $a$  como ilustrado abaixo:



**Figura 6:** Representação do experimento de difração de elétrons.

Do estudo da ótica física, a primeira abertura angular não nula para a qual ocorre um máximo de intensidade é dada por:

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{a}. \quad (23)$$

Uma vez que o elétron se move para a direção do eixo vertical, tal elétron irá adquirir um *momentum* na direção vertical, sendo esse *momentum*  $\Delta p_z$  e  $p$  o *momentum* total. Dessa forma, temos

$$\sin \theta_1 \cong \frac{\Delta p_z}{p} \implies \frac{\Delta p_z}{p} \cong \frac{\lambda}{a} \implies a \cdot \Delta p_z \cong \lambda \cdot p. \quad (24)$$

Pelo princípio da dualidade onda-partícula de De Broglie, temos que  $p = h/\lambda$ . Substituindo esse resultado na Equação (24) obtemos finalmente:

$$\therefore \boxed{\Delta z \Delta p_z \cong h} \quad (25)$$

■

- b) Durante o experimento utilizou-se três larguras de fendas distintas:  $d_1 = 0.4$  mm,  $d_2 = 0.15$  mm e  $d_3 = 0.075$  mm, respectivamente. Para uma melhor medição do primeiro mínimo de interferência, optou-se por medir a largura  $L$  da franja e dividir o resultado por 2, dando assim uma melhor precisão do primeiro mínimo que se localiza exatamente no feio da franja de interferência. Em símbolos:

$$L = 2a_i \implies a_i = \frac{L}{2}, \quad (26)$$

Com base nisso, obteve-se como resultado:  $a_1 = 1.6$  cm,  $a_2 = 4.1$  cm e  $a_3 = 9.0$  cm, respectivamente. A distância entre a fenda e o anteparo foi mantida constante ao longo de todo o experimento e seu valor é  $b = 9.47$  m =  $9.47 \cdot 10^3$  mm.

Além disso, para cada etapa do experimento, mediu-se a grandeza dada pela seguinte relação:

$$\frac{\Delta y \Delta p_y}{h} = \frac{d}{\lambda} \sin \left[ \arctan \left( \frac{a}{b} \right) \right]. \quad (27)$$

E com base nos resultados obtidos através da Equação (27) foi possível obter a incerteza no *momentum* da seguinte forma:

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} = \sin \alpha_1 \implies \Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha_1 = 1. \quad (28)$$

Sendo  $\lambda = 632.8$  nm o comprimento de onda do feixe utilizado no experimento e  $\alpha_1 = 0.097$ ,  $\alpha_2 = 0.25$  e  $\alpha_3 = 0.54$  os ângulos utilizados em cada etapa, foi possível realizar a construção da Tabela 2.

**Tabela 2:** Grandezas de interesse medidas ao longo do experimento.

$i$	$d_i$ (mm)	$a_i$ (mm)	$b$ (mm)	$\Delta p_y$ (kg·m/s)	$\frac{\Delta y \Delta p_y}{h}$
1	0.4	160	$9.47 \cdot 10^3$	$1.014 \cdot 10^{-28}$	1.070
2	0.15	410	$9.47 \cdot 10^3$	$2.591 \cdot 10^{-28}$	1.034
3	0.075	900	$9.47 \cdot 10^3$	$5.383 \cdot 10^{-28}$	1.117

■

c) Podemos exprimir a relação de incerteza da seguinte forma:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}, \quad (29)$$

onde  $\Delta p_x$  e  $\Delta x$  são as incertezas no *momentum* e na posição e  $h$  a constante de Planck, respectivamente. Note que, se minimizarmos a desigualdade (29), obtemos

$$(\Delta p_x \Delta x)_{\min} = \frac{h}{4\pi}. \quad (30)$$

Isolando a incerteza no *momentum* e substituindo os devidos valores obtemos então:

$$(\Delta p_x)_{\min.} = \frac{h}{4\pi \Delta x} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4 \cdot 3.14 \cdot 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}} \quad \therefore$$

$$\boxed{(\Delta p_x)_{\min.} = 5.33 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (31)$$

■

- d) Seja  $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$  kg a massa do elétron, então a incerteza no *momentum* para um elétron que viaja a velocidades não relativísticas será

$$\Delta p_x = m_e \cdot \Delta v_x. \quad (32)$$

Substituindo a Equação (32) em (30) e resolvendo-a com relação à incerteza na posição obtemos então

$$\begin{aligned} (\Delta x)_{\text{mín.}} &= \frac{h}{4\pi \cdot m_e \Delta p_x} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4 \cdot 3.14 \cdot 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 40 \text{ m/s}} \\ \therefore \quad &\boxed{(\Delta x)_{\text{mín.}} = 1.447 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \end{aligned} \quad (33)$$

■

- e) Considerando a incerteza na posição de um átomo de cloro (Cl) podemos obter a incerteza no *momentum* deste mesmo átomo através da Equação (30):

$$(\Delta p_x)_{\text{mín.}} = \frac{h}{4\pi \Delta x} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4 \cdot 3.14 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 2.636 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (34)$$

De posse da incerteza no *momentum* do átomo de Cl, podemos obter a incerteza na determinação experimental da velocidade através da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \Delta p_x &= m_{\text{Cl}} \cdot \Delta v_x \iff \Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m_{\text{Cl}}} \\ \Delta v_x &= \frac{2.636 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{5.86 \cdot 10^{-26} \text{ kg}} \quad \therefore \quad \boxed{\Delta v_x = 4.49 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}} \end{aligned} \quad (35)$$

■

## Atividade 9 - Efeito Fotoelétrico

- a) Sabemos que o efeito fotoelétrico é um fenômeno de origem quântica que consiste na emissão de elétrons por algum material que é iluminado por radiações eletromagnéticas de frequências específicas. O experimento tem como objetivo conseguir detectar a ejeção de elétrons de um material exposto a uma determinada frequência de radiação eletromagnética, por meio da constatação de corrente elétrica. Os fótons transferem energia para os elétrons. Se essa quantidade de energia for maior do que a energia mínima (função trabalho) necessária para se arrancar os elétrons, estes serão arrancados da superfície do material, formando uma corrente de fotoelétrons.
- b) Para saber quais dos elementos são mais propícios para se fazer uma célula foto-voltaica devemos calcular a energia carregada por um fóton na frequência da luz visível com mais energia, ou seja, o fóton cujo comprimento de onda vale 425 nm e comparar com as funções trabalho dos elementos apresentados. Dessa forma, escrevemos

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 2.9 \text{ eV}. \quad (36)$$

Comparando o resultado obtido em (36) notamos que os únicos elementos apropriados para a construção da célula foto-voltaica é o Lítio (Li) e o Bário (Ba) cujas funções trabalho valem 2.3 eV e 2.5 eV, respectivamente.

- c) Quando a energia do fóton incidente é maior que  $W_0$ , a energia restante é transformada em energia cinética do elétron. Dessa forma, a energia cinética máxima  $E_{\text{máx.}}$  do elétron arrancado é dada por:

$$E = K_{\text{máx.}} = hf - W_0. \quad (37)$$

Convertendo os valores de energia em elétron-volt (eV) para Joules (J) e substituindo na Equação (37) obtemos:

$$K_{\text{máx.}} = 9.28 \cdot 10^{-19} \text{ J} - 7.2 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2.08 \cdot 10^{-19} \text{ J}. \quad (38)$$

Por outro lado, a velocidade de máxima ejeção do elétron pode ser obtida da seguinte forma:

$$K_{\text{máx.}} = \frac{m_e v_{\text{máx.}}^2}{2} \implies v = \sqrt{\frac{2K_{\text{máx.}}}{m_e}}. \quad (39)$$

Sendo  $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  a massa do elétron e substituindo o resultado obtido em (38) na Equação (39) obtemos finalmente

$$v_{\text{máx.}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.08 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} \quad \therefore \quad \boxed{v_{\text{máx.}} = 6.76 \cdot 10^5 \text{ m/s}} \quad (40)$$

■

- d) Da natureza discreta das trocas de energia, cada fóton incidente sobre o material é responsável por emitir um fóton-elétron. Uma vez que o potencial de corte é atingido, quanto maior a intensidade da luz incidente maior será a quantidade de fótons incidindo sobre a superfície do material e, conseqüentemente, maior será a quantidade de fóton-elétrons emitidos.

Dessa forma, partindo de uma razão de proporção de um fóton incidente para um fóton-elétron emitido é fácil ver que para termos o dobro de fóton-elétrons emitidos devemos dobrar a quantidade de elétron incidentes.

- e) A energia cinética de ejeção dos elétrons não depende da intensidade do feixe incidente. Para perceber isso, basta notar que na Equação (36) a energia cinética adquirida pelo fóton-elétron depende da energia dos fótons, que por sua vez depende da frequência dos fótons incidentes. Logo, quanto maior a frequência desses fótons incidentes maior será a energia cinética de ejeção dos fóton-elétrons e maior será a velocidade de ejeção dos mesmos.
- f) Considere a Tabela 3 abaixo com os valores de tensão  $V$  e comprimento de onda  $\lambda$  usados no experimento em questão.

**Tabela 3:** Valores de comprimento de onda e tensão para o experimento.

$\lambda$ (nm)	$c/e\lambda$ ( $\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V$ (Volts)
578	$3.237 \cdot 10^{24}$	0.617
546	$3.427 \cdot 10^{24}$	0.738
436	$4.292 \cdot 10^{24}$	1.334
405	$4.620 \cdot 10^{24}$	1.521
366	$5.112 \cdot 10^{24}$	1.898

Como demonstrado em sala, o potencial de corte  $V$  pode ser escrito como uma função afim dependente do parâmetro  $c/e\lambda$  da seguinte forma:

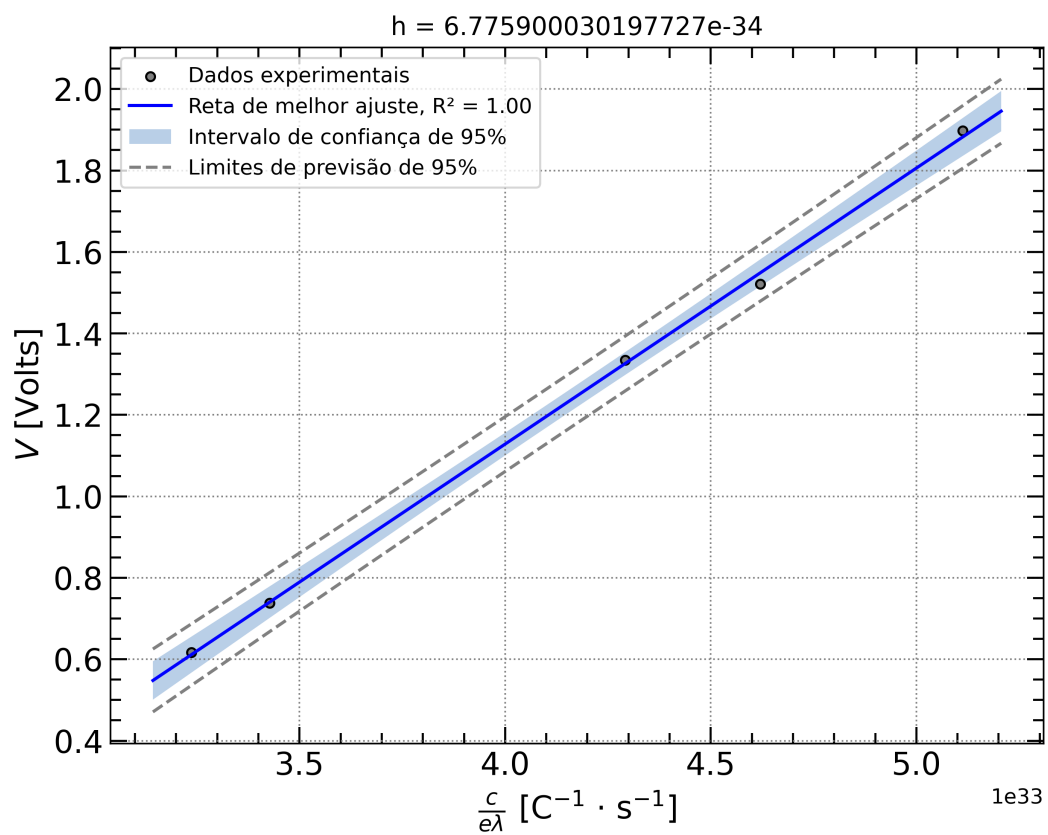
$$V = -\frac{A}{e} + h \left( \frac{c}{e\lambda} \right), \quad (41)$$

onde  $A = W_0$  é a função trabalho do elemento em análise,  $e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  é a carga elementar do elétron,  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  é a constante de Planck,  $c = 299792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  é a velocidade da luz no vácuo e  $\lambda$  o comprimento de onda do feixe incidente.

Analisando a Equação (41), é fácil ver que o potencial de corte é uma função afim cujos coeficiente linear e angular valem  $b = -\frac{A}{e}$  e  $a = h$ , respectivamente. Dessa forma, para determinarmos experimentalmente o valor da constante de Planck, basta calcularmos o coeficiente angular a reta que melhor se ajusta aos dados experimentais expostos na Tabela 3.

Portanto, optou-se por plotar uma curva polinomial do tipo  $V(c/e\lambda) = A' \cdot \left( \frac{c}{e\lambda} \right) + B'$ , onde  $A'$  e  $B'$  são os coeficientes angular e linear da curva de ajuste, respectivamente. Os resultados desse ajuste se encontram na Figura 7.

Com base no ajuste, obteve-se como resultado para a constante de Planck,  $A' = h_{\text{exp.}} = 6.7759 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  e  $B' = -\frac{A}{e} = -1.5821 \text{ V}$ .



**Figura 7:** Ajuste linear (reta) para os dados experimentais (pontos). A região hachurada indica o intervalo de confiança padrão de 95%. Os parâmetros  $A'$ ,  $B'$  foram obtidos por meio do método de regressão linear.

Dessa forma, o erro na medida pode ser facilmente calculado a partir da relação percentual:

$$|\text{Erro}| = \left| \left( 1 - \frac{h_{\text{exp.}}}{h_{\text{teo.}}} \right) \cdot 100\% \right| \quad \therefore \quad \boxed{|\text{Erro}| = 2.261\%} \quad (42)$$

■

Uma vez que  $|\text{Erro}| < 5\%$ , temos que os nossos dados experimentais apresentam baixa dispersão e com isso nos dados apresentam uma boa precisão.

- g) Analisando novamente a Equação (41), note que a função trabalho do elemento em análise pode ser determinada a partir do coeficiente linear  $B'$  do ajuste linear dos dados experimentais. Em símbolos:

$$B' = -\frac{A}{e} \implies A = -B' \cdot e. \quad (43)$$

Substituindo  $B' = -1.5821 \text{ V}$  e  $e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  em (43) obtemos:

$$A = -(-1.5821 \text{ V}) \cdot (-1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \quad \therefore \quad \boxed{A = -2.5347 \text{ eV}} \quad (44)$$

■

Com base no valor obtido em (44), temos que o material no qual o cátodo é feito é provavelmente de bário (Ba) cuja função trabalho é de  $A_{\text{Ba}} = 2.5 \text{ eV}$ .