



Efeito Fotoelétrico



Felipe Davies Meinesz e Alexandre de Taunay Voloch

11 de setembro de 2024

- Descoberto por A. E. Becquerel em 1839 e confirmado por Heinrich Hertz em 1887
- Teoricamente explicado por Einstein em 1905-1906 (Nobel 1921)
 - ▶ $E = h\nu$
 - ▶ $E_K = h\nu - e\phi$

Introdução Teórica

Experimento

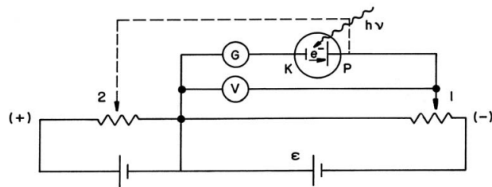


Figura 1: Circuito elétrico para a medida das fotocorrentes. O ânodo P pode ficar com polaridade negativa (1) ou positiva (2) com respeito ao cátodo K .

- $E_K = h\nu - e\phi$
- $E_K = eV_0$
- $V_0 = \frac{h}{e}\nu_0 - \phi$

Níveis de Fermi

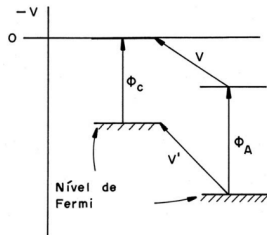


Figura 3: Diagrama dos potenciais do cátodo e do ânodo. As setas indicam a direção em que os elétrons perdem energia.

- $-e\phi_C + eV + e\phi_A - eV' = 0$
- $V = V' + (\phi_A - \phi_C)$
- $e|V_0| = h\nu_0 - \phi_C$
- $|V_0| = \frac{h}{e}\nu_0 - \phi_A$
- Esperamos chegar em $\frac{h}{e} = 4.14 \cdot 10^{-15} V \cdot s$ e $h = 6.62 \cdot 10^{-34} J \cdot s$

Materiais e Métodos

Montagem real

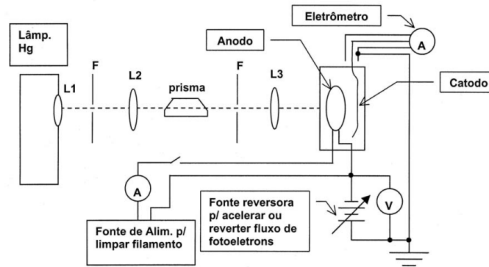


Figura 4: Montagem para medidas do efeito fotoelétrico.

Materiais e Métodos

Aparato Experimental

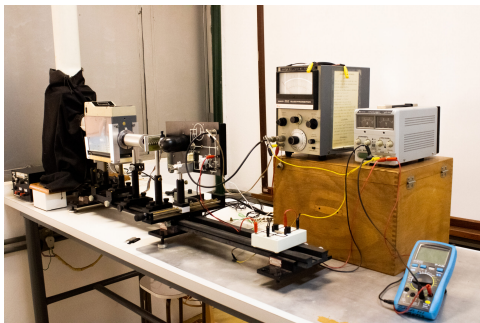


Figura: Experimento fotoelétrico no Laboratório de ensino de Física

1. Fotocélula de Fósforo
2. Lâmpada de mercúrio
3. LEDs
4. Fonte de alimentação para lâmpada
5. Tomadas da rede elétrica
6. Prisma de visão direta
7. Fendas fixas
8. Lentes
9. Eletrômetro Keithley 610C
10. Fonte de tensão DC regulável
11. Voltímetro DC
12. Trilhos
13. Cabo coaxial
14. Fios de conexão
15. Espectrômetro
16. Potenciômetro

Resultados e Discussão

Espectro da lâmpada de mercúrio com prisma

λ_{pico} (nm)	Desvio	Marcação na Lâmpada
405	3	421
435	4	451
492	3	508
547	2	557
578	2	589

Tabela: Dados de emissão para lâmpadas de mercúrio

Resultados e Discussão

Espectro dos diferentes LEDs

λ_{pico} (nm)	Desvio	Número do LED
636	9	1
625	8	2
591	5	3
652	6	4
524	15	5
464	12	6
372	5	7

Tabela: Dados de emissão para LEDs

Resultados e Discussão

Curvas da voltagem como função da corrente para a Lâmpada de Mercúrio

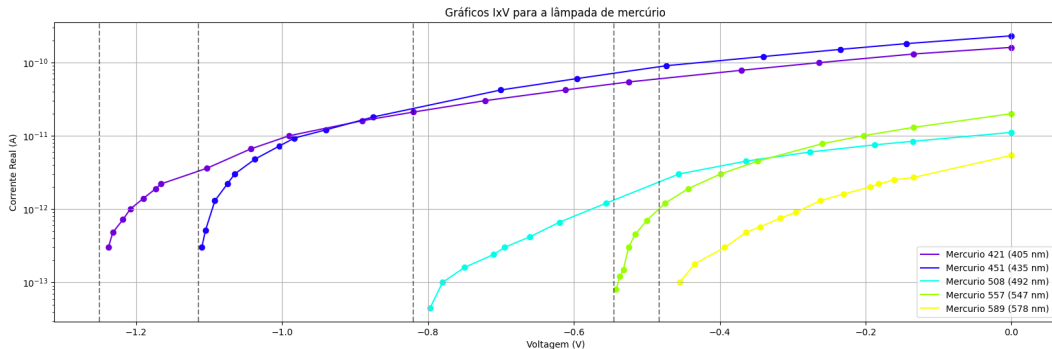


Figura: Curvas de corrente x voltagem para a lâmpada de mercúrio

Resultados e Discussão

V_0 para a lâmpada de mercúrio

$\lambda (nm)$	Marcação na lâmpada (nm)	V_0 estimado (V)
405	421	1.25
435	451	1.115
492	508	0.82
547	557	0.545
578	589	0.483

Tabela: V_0 para cada LED

Resultados e Discussão

Curvas da voltagem como função da corrente para as LEDs

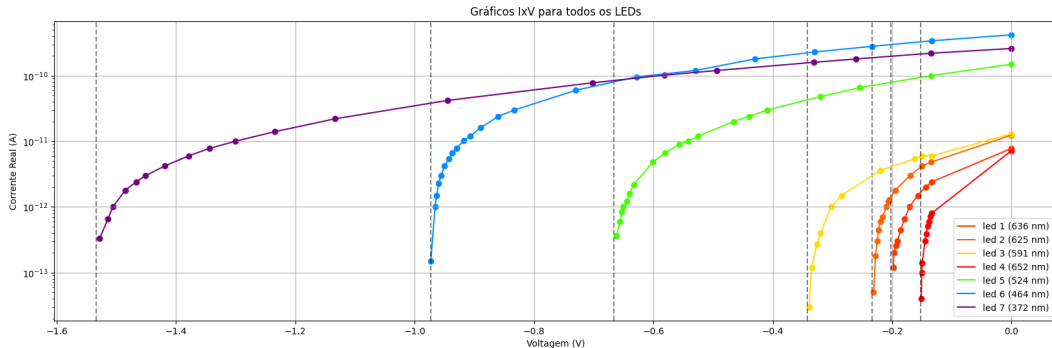


Figura: Curvas de corrente x voltagem para os LEDs

Resultados e Discussão

V_0 para cada LED

$\lambda(nm)$	Numero LED	V_0 estimado (V)
372	led 7	1.534
464	led 6	0.9736
524	led 5	0.666
591	led 3	0.342
625	led 2	0.234
636	led 1	0.202
652	led 4	0.152

Tabela: V_0 para cada LED

Resultados e Discussão

Curvas da voltagem de corte para as LEDs como função das diferentes frequências

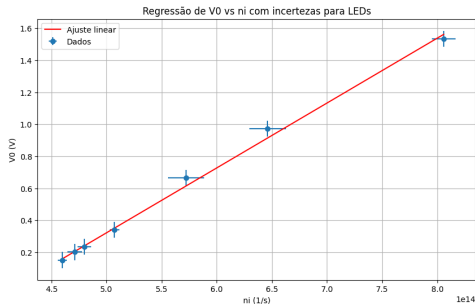


Figura: Gráfico de $V_0 \times \nu$ para os LEDs.

Juntando todas os V_0 s calculados, chegamos no gráfico ao lado. Para o ajuste de curva, fizemos um ajuste simples (mínimos quadrados) usando o módulo scipy do Python.

Para calcular h , utilizamos que o coeficiente angular da reta será $\frac{h}{e}$, portanto multiplicamos o coeficiente por e para chegar em h .

Estimando uma incerteza bem alta para o V_0 (de 0.05 V), chegamos em:

$$\frac{h}{e} = (4.05 \pm 0.21) \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$$

$$h = (6.49 \pm 0.33) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

o que está plenamente condizente com o valor conhecido de $6.62 \cdot 10^{-34}$. O valor do coeficiente linear do fitting foi de

$$\phi_a = -1.70 \pm 0.11 \text{ V}$$

Resultados e Discussão

Curva das voltagens de corte para a lâmpada de Mercúrio como função das diferentes frequências

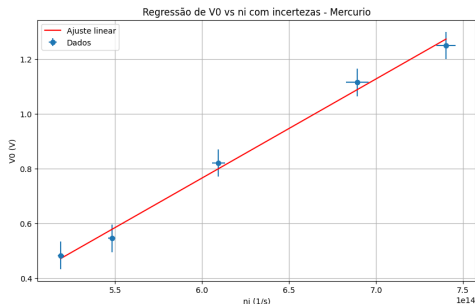


Figura: Gráfico de $V_0 \times \nu$ para a lâmpada de mercúrio.

Para a lâmpada de mercúrio, fazendo o mesmo fitting chegamos no gráfico ao lado, e nos valores:

$$\frac{h}{e} = (3.62 \pm 0.28) \cdot 10^{-15} V_s$$

$$h = (5.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-34} J_s$$

$$\phi_a = -1.41 \pm 0.17 V$$

Percebe-se que o valor de h está cerca de 10% "pior" do que o que obtemos através dos LEDS. Acreditamos que, para a lâmpada de mercúrio, como temos intensidades bem menores de luminosidade, e uma maior possibilidade de haver diversas frequências de luz operando (pois o mercúrio emite em diversos comprimentos de onda), isso acaba justificando essa imprecisão maior.

Resultados e Discussão

Um pouco de discussão acerca dos slides anteriores

- Estamos medindo correntes muito pequenas - as menores são de ordem 10^{-13} A. O eletrômetro é uma fonte significativa de erro, apesar das nossas melhores tentativas para calibrá-lo, pois nessas ordens de grandeza qualquer pequena flutuação tem um efeito enorme no ponteiro.
- Isso nos trás a um ponto interessante - nossas medidas de V_0 são confiáveis? Claramente, pelo menos para os LEDs, que têm intensidades altas, pudemos sim aproximar bem o valor de h , com o valor correto dentro da incerteza, mas podemos especular o porquê do nosso valor não estar centrado no valor correto. Talvez estejamos medindo V_0 um pouco abaixo do real, mas não podemos medir o real devido à minúscula corrente envolvida.

Resultados e Discussão

A função trabalho

- É notável que ambas as funções-trabalho do ânodo ϕ_a medidas não equivalem nem um pouco com as funções trabalho "conhecidas": $\phi_a = 5.29V$, $\phi_b = 2.15V$, nem com a diferença entre elas, nem nada disso. Não temos explicação para isso, mas como discutido no laboratório com os docentes, isso é um resultado comum nesse experimento.

Resultados e Discussão

Velocidades máximas dos elétrons

Nome da Lâmpada	Velocidade Máxima dos Elétrons (m/s)
Mercúrio 421	$(1.882 \pm 0.023) \times 10^6$
Mercúrio 451	$(1.754 \pm 0.027) \times 10^6$
Mercúrio 508	$(1.692 \pm 0.028) \times 10^6$
Mercúrio 557	$(1.635 \pm 0.025) \times 10^6$
Mercúrio 589	$(1.610 \pm 0.026) \times 10^6$
LED 7	$(1.882 \pm 0.023) \times 10^6$
LED 6	$(1.754 \pm 0.027) \times 10^6$
LED 5	$(1.692 \pm 0.028) \times 10^6$
LED 3	$(1.635 \pm 0.025) \times 10^6$
LED 2	$(1.610 \pm 0.026) \times 10^6$
LED 1	$(1.603 \pm 0.026) \times 10^6$
LED 4	$(1.592 \pm 0.026) \times 10^6$

Tabela: Velocidade Máxima dos Elétrons

Resultados e Discussão

Curvas de saturação

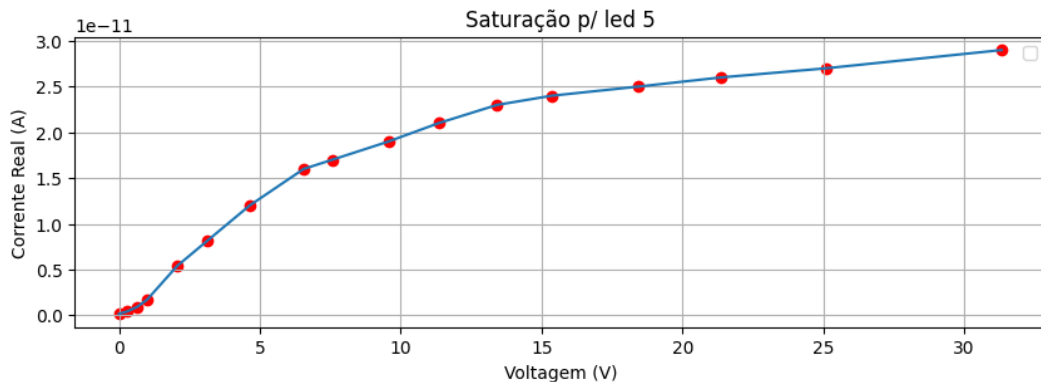


Figura: Curva de saturação - led 5

Resultados e Discussão

Curvas de saturação

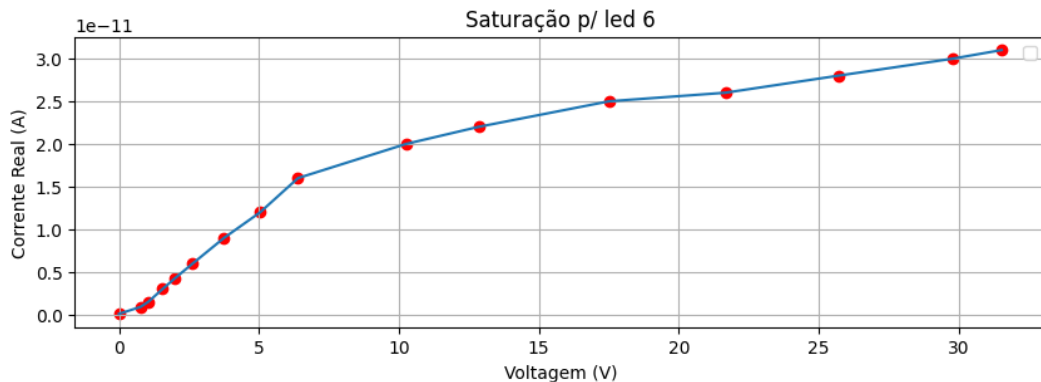


Figura: Curva de saturação - led 6

Resultados e Discussão

Tentativa de estimar a eficiência

Partimos do pressuposto que $I_{ideal} = \frac{P \cdot e}{h\nu}$. Medimos, para ambos os leds, uma potência de aproximadamente $600nW$. O problema é que isso equivale a uma I_{ideal} da ordem de $10^{-7}A$, o que, claro, **não condiz** com os dados medidos. Temos duas possíveis fontes de erro:

- O potenciômetro não ter medido a potência corretamente. Não sabemos exatamente o como disso, porque utilizamos uma fenda para garantir que a mesma potência que chegava ao potenciômetro, chegava à fotocélula.
- Não atingimos a corrente de saturação em nenhum dos casos, como é aparente do gráfico. Porém, mesmo assim é difícil acreditar que ela vá passar para $10^{-7}A$, que seriam 4 ordens de grandeza de diferença.

Resultados e Discussão

Respostas às perguntas da apostila

Perguntas

1. Discuta os aspectos do efeito fotoelétrico que a Física Clássica não consegue explicar e que foram resolvidas com a teoria quântica de Einstein.
2. Sugira um método para determinar a carga específica dos fotoelétrons (veja ref. 5).
3. Porque os elétrons saem do metal com velocidade menor que a sua velocidade máxima?
4. Porque se tem uma corrente negativa com o potencial de retardo?
5. Discuta algumas aplicações práticas da fotocélula.
6. A Espectroscopia fotoeletrônica envolve a medida da distribuição da energia cinética dos fotoelétrons emitidos por uma amostra, a qual é irradiada com fótons de alta energia (raios-X ou uma fonte ultravioleta, He I de 584 Å). Faça um diagrama esquemático de um espectrômetro fotoeletrônico explicando brevemente seu funcionamento, e discuta o espectro fotoeletrônico de um sólido ou uma molécula a sua escolha (veja ref. 7 e 8).

Resultados e Discussão

Respostas às perguntas da apostila

1. A física clássica falhava em explicar o efeito fotoelétrico porque não conseguia prever que a emissão de elétrons de uma superfície metálica dependia da frequência da luz incidente, e não de sua intensidade. A teoria quântica de Einstein introduziu a ideia de que a luz consiste em quanta (fótons), cada um com energia proporcional à sua frequência ($E = h\nu$). Isso explicou por que, para uma dada voltagem de retardo, apenas a luz com frequência acima de um certo limiar pode ejetar elétrons, independentemente da intensidade da luz. O eletromagnetismo clássico não consegue prever essa dependência da frequência, pois lá toda transferência de energia depende só da intensidade (que, note-se, pode ser tão pequena quanto quisermos, então nunca deveria haver um "limiar".)

Resultados e Discussão

Respostas às perguntas da apostila

2. Não tivemos acesso à fonte citada na apostila.

Resultados e Discussão

Respostas às perguntas da apostila

3. Os elétrons saem do metal com uma velocidade menor que sua velocidade máxima porque a energia dos fótons é parcialmente utilizada para superar a função trabalho do metal. Depois que eles superaram a função trabalho, só vai sobrar energia $E = h\nu - \phi$, ao invés de $E = h\nu$ que eles tinham inicialmente ao absorverem a energia do fóton.

Resultados e Discussão

Respostas às perguntas da apostila

4. A corrente negativa com potencial de retardo ocorre porque os elétrons emitidos têm uma distribuição de energias cinéticas. O potencial de retardo impede os elétrons mais energéticos de alcançarem o ânodo, mas pode ser que outros elétrons (um pouco menos energéticos), não consigam atingir o ânodo e acabem fazendo o caminho reverso (pois já tiveram energia suficiente para serem ejetados do metal).

5. As fotocélulas hoje são utilizadas numa ampla variedade de tecnologias:
- Sensores de iluminação
 - Câmeras digitais e sensores em dispositivos eletrônicos
 - Células solares para geração de energia
 - Fotomultiplicadores em detectores de partículas
 - Sensores de movimento (segurança, portas automáticas, etc.)

Resultados e Discussão

Respostas às perguntas da apostila

6.



Raios-X ou UV

Figura: Diagrama esquemático de um espectrômetro fotoeletrônico

Resultados e Discussão

Respostas às perguntas da apostila

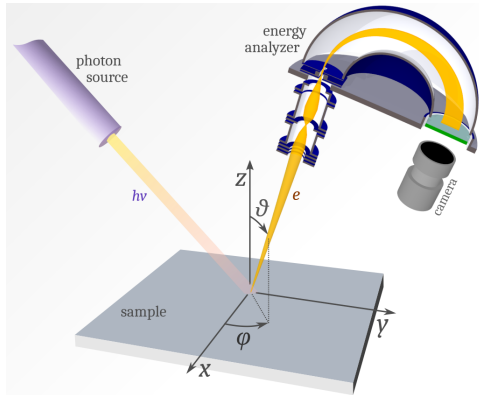


Figura: Esquema de um espectrômetro de fotoemissão. (Fonte: Wikipédia)

O funcionamento básico do espectrômetro fotoeletrônico envolve:

- Irradiação da amostra com fótons de alta energia
- Emissão de fotoelétrons da amostra
- Análise da energia cinética dos fotoelétrons emitidos
- Detecção e contagem dos fotoelétrons

Quanto ao espectro fotoeletrônico, vamos considerar o exemplo do cobre (Cu):

- O espectro (com unidades de energia, geralmente eV) mostrará picos correspondentes aos diferentes níveis de energia dos elétrons no Cu.
- Os picos mais intensos serão dos níveis 3d e 4s, que são os níveis de valência do Cu.
- A largura dos picos pode indicar interações eletrônicas ou efeitos de estado sólido. Este espectro pode fornecer informações valiosas sobre a estrutura eletrônica e composição química do material analisado.



OBRIGADO!