

# Parte I

## Experimentos de Física Moderna - versão 19 de Agosto de 2016



# Capítulo 1

## Boas práticas de laboratório

1. O uso de caderno de laboratório com folhas costuradas e paginadas é obrigatório.
2. Empregue a Teoria de Erros nas práticas deste laboratório: Algarismos significativos, incerteza instrumental, cálculo e apresentação da incerteza estatística quando necessário, propagação de incertezas.
3. Diagramação de todo, TODO, o experimento a ser realizado; incluindo os equipamentos e variáveis a serem adquiridas.
4. Na apresentação dos resultados o tamanho das figuras devem ser de no mínimo de 1/4 de página A4, com todo o texto, medias, estatísticas e desvios LEGÍVEIS.
5. O experimento deve ser realizado sempre com muitos resultados experimentais, garanta qualidade nos resultados.
6. Dúvidas a respeito do uso dos equipamentos deve-se buscar apoio técnico; manter sob controle os parâmetros e NUNCA ultrapassar os valores máximos estipulados pela equipe.
7. NÃO manusear fios, botões de forma desnecessária ou imprudente, quando solicitado, empregar óculos de proteção ao longo de todo experimento.
8. A análise dos resultados deverá ser iniciada no dia da prática experimental ao final da aquisição dos resultados experimentais, evitando dúvidas desnecessárias no dia da entrega do relatório.
9. Entrega do relatório será realizado somente na semana seguinte. Somente neste dia. Se puderem entregar no escaninho na sexta feira durante o dia, já posso corrigir e devolver no mesmo dia.
10. Os resultados experimentais colhidos no dia deverão ser registrados e tabulados num arquivo excel, incluindo as incertezas, nomes das grandezas e suas respectivas unidades. Este arquivo devera ser enviado para L.B@usp.br no mesmo dia em que foi realizado o experimento.

11. Para facilitar a correção ordene o relatório de acordo com os itens solicitados no roteiro.
12. Venham para a aula com o roteiro lido. Isto fará parte da avaliação.
13. A única prova será no dia 02 de dezembro, com consulta ao caderno de laboratório, e a livros de física moderna. Não sera permitido fotocópias de cadernos alheios, apenas de livros.

# Capítulo 2

## Radiação Térmica

### 2.1 Introdução

De acordo com o primeiro capítulo do Livro de Física Quântica do Eisberg e Resnick, o nascimento da física quântica ocorreu no dia 14 de dezembro de 1900, com a apresentação do trabalho denominado como “Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal”, por nada menos que Max Planck. Então, nada mais justo que iniciar os trabalhos experimentais de mecânica quântica com o experimento sobre a radiação emitida por corpos aquecidos.

A radiação térmica é considerada aquela radiação que é emitida devido a sua temperatura. A atividade experimental proposta aqui utilizará fontes emissoras de radiação que emitirão na faixa espectral do infravermelho e detectores sensíveis à esta radiação. A distribuição da radiação emitida por um corpo a uma temperatura é determinada pela irradiância espectral que é a energia emitida por tempo, por unidade de área em intervalo de frequência entre  $\nu$  e  $\nu + d\nu$ . Esta irradiância espectral poderá ser integrada sobre todo a faixa espectral, o que resulta na grandeza denominada como irradiância total, ou apenas irradiância.

A correlação da radiação  $R$  emitida por um corpo a temperatura  $T$  foi proposta inicialmente por Josef Stefan em 1879 como:

$$R = \sigma T^4, \quad (2.1)$$

onde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

Outra relação conhecida como deslocamento de Wien é apresentada:

$$\nu_{max} \propto T \quad (2.2)$$

onde  $\nu_{max}$  é a frequência na qual a irradiância apresenta o seu valor máximo. Esta relação mostra que o pico de emissão de um corpo aumenta com o aumento da temperatura deste corpo.

A equação que Max Planck apresentou para descrever a densidade de energia do espectro de um corpo negro  $\rho_T(\nu)$  é:

$$\rho_T(\nu)d\nu = \left( \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \right) \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad (2.3)$$

onde  $\nu$  é a frequência da radiação emitida, em  $Hz$ ,  $c$  a velocidade da luz igual a  $2,99.10^9 m/s$ ,  $k$  a constante de Boltzmann igual a  $1,38.10^{-23} J/K$ ,  $h$  a constante de Planck e  $T$  a temperatura do corpo em  $K$ .

## 2.2 Objetivo

Investigar os processos de emissão de radiação de corpos aquecidos. Alcançar um entendimento a cerca dos processos de absorção e emissão de corpos e a relação entre a emissão da radiação e a temperatura que o corpo se encontra. Para isto esta atividade é composta por vários experimentos incluindo corpos com diferentes características superficiais e diferentes temperaturas.

## 2.3 Metodologia

Neste experimento serão utilizados os seguintes materiais:

Sensor de radiação do tipo Termopilha TD-8553,

Voltímetro acoplado ao sensor de radiação;

Cubo de radiação térmica TD-8554A, potenciômetro Variac;

Termopar digital;

Ventilador de resfriamento;

Lâmpada de Stefan-Boltzmann TD-8555, fonte de alimentação, voltímetro e amperímetro para a fonte;

Trilho com escala milimetrada, régua de 50cm e paquímetro.

1. A irradiância emitida por um corpo será determinada com o emprego do sensor de irradiação acoplado a um voltímetro com sensibilidade de  $mV$ . Para obter a irradiância em  $W/m^2$  é necessário inicialmente converter o valor de  $mV$  para  $mW$  empregando a relação apresentada pelo fabricante:  $18,9 \pm 3,8 V/M$ . Após esta conversão o valor de tensão é convertido para a potência que alcançou o detector, mas é necessário dividir este valor pela área sensível do detector. Obtenha este valor no documento com as especificações técnicas do sensor de radiação. Agora é possível determinar a irradiância em  $W/m^2$ . Empregue esta conversão em todas as medidas desta prática experimental.
2. Determine a equação de propagação da incerteza para a irradiância e aplique apenas para uma medida; e assim poderemos ter uma ordem de grandeza da incerteza experimental associada a este experimento.

### 2.3.1 Lei de Stefan-Boltzmann

Verifique a lei de Stefan-Boltzmann para altas temperaturas. Para isto posicione o sensor próximo a lâmpada para determinar a radiação emitida em função da intensidade da lâmpada. **CUIDADO: não encoste o sensor na lâmpada.**

3. Diagrame os experimentos incluindo os principais componentes e variáveis a serem mensuradas.

A lâmpada de Stefan-Boltzmann é uma fonte de radiação térmica de alta temperatura, que se aproxima de uma fonte pontual. A temperatura do filamento pode ser obtida através da resistência do filamento, sendo que para pequenas variações de temperatura temos a equação ??

$$T = \frac{R - R_{ref}}{\alpha R_{ref}} - T_{ref} \quad (2.4)$$

onde  $R$  é a resistência do filamento que está a temperatura  $T$ ,  $R_{ref}$  a resistência à uma temperatura de referência  $T_{ref}$ , que pode ser a temperatura ambiente e  $\alpha$  uma constante de valor igual a 0,0045.

Para grandes variações a temperatura pode ser determinada pela tabela ??.

**Tabela 2.1:** Dependência da resistência com a temperatura do filamento de tungstênio.

$R/R_{300K}$	$T(K)$	$R/R_{300K}$	$T(K)$	$R/R_{300K}$	$T(K)$	$R/R_{300K}$	$T(K)$
1,0	300	5,48	1200	10,63	2100	16,29	3000
1,43	400	6,03	1300	11,24	2200	16,95	3100
1,87	500	6,58	1400	11,84	2300	17,62	3200
2,34	600	7,14	1500	12,46	2400	18,28	3300
2,85	700	7,71	1600	13,08	2500	18,97	3400
3,36	800	8,28	1700	13,72	2600	19,66	3500
3,88	900	8,86	1800	14,34	2700	26,35	3600
4,41	1000	9,44	1900	14,99	2800		
4,95	1100	10,03	2000	15,63	2900		

4. Meça a temperatura ambiente e a resistência do filamento da lâmpada, antes de ligá-la.
5. Varie a intensidade da lâmpada aplicando diferentes valores de tensão e corrente e anote os valores de radiação detectado pelo sensor. Lembre que o valor de tensão precisa ser convertido para potência e normalizado pela área do sensor.
6. Faça um gráfico da irradiância do filamento, calculada a partir da tensão mensurada no detector, em função da temperatura no filamento.

### 2.3.2 Lei do inverso do quadrado da distância

Demonstre que a lei do inverso do quadrado da distância é válida para a radiação térmica emitida por uma fonte pontual. Para tanto, realize a montagem onde são necessários o sensor de radiação, a lâmpada Stefan-Boltzmann, uma fonte de tensão, um trilho graduado e um voltímetro.

7. Diagrame este experimento no seu caderno de laboratório.
8. Varie a posição do sensor, em relação à lâmpada e verifique a variação da irradiância em função da distância entre o sensor e a fonte. Obtenha valores experimentais cobrindo distâncias que gerem valores máximos de irradiância (sensor próximo a lâmpada) até distâncias superiores a 100 cm. Entre 0 e 10 cm meça a cada 1 cm e a partir de 10 cm meça com passo de 5 cm.
9. Apresente os resultados num gráfico e ajuste uma função que comprove a dependência com o inverso do quadrado da distância. É importante destacar aqui que o ajuste não pode ser forçado a um expoente 2 e sim com o emprego de uma variável no expoente da distância de forma que o ajuste nos mostrará que o expoente é 2 ou não.

### 2.3.3 Avaliação qualitativa da radiação térmica

10. Com o cubo desligado meça a radiação emitida pelas quatro faces e anote sua a temperatura. Neste item meça a temperatura das quatro faces também. Observa-se que o cubo é aquecido por uma lâmpada incandescente no seu interior e a temperatura das 4 faces será a mesma, pois o cubo é irradiado de forma homogênea e é composto pelo mesmo material (alumínio)
11. Aqueça o cubo empregando 10% da potência do potenciômetro. Meça novamente a radiação emitida pelas 4 faces e suas respectivas temperaturas. Se a temperatura das quatro faces for similar entre si para uma determinada potência. Fixe o termopar em uma das faces e mantenha-o nesta posição até o final do experimento, evitando assim a troca desnecessária do termopar entre as 4 faces.
12. Para determinar a dependência da temperatura em função da irradiância emitida pelas faces aqueça o interior do tubo ate outros valores percentuais do potenciômetro e meça a temperatura e a irradiância em ( $W/m^2$ ) das quatro faces. Obtenha a irradiância para 6 valores de potência, para tal utilize o valor já adquirido com a lampada desligada e ligada a 10%, e meça a temperatura e a irradiância para os seguintes valores no potenciômetro: 30%, 50%, 70% e na posição máxima 90% – 100%. **IMPORTANTE: Mantenha o cubo aquecido na potência máxima pra realizar os experimentos subsequentes.**
13. Faça um gráfico da irradiância das 4 faces, empregando a unidade correta para está variável ( $W/m^2$ ), em função da temperatura das faces do cubo.



14. Explique as diferenças observadas entre as faces. Qual seria a lei física que possa explicar as diferenças e semelhanças observadas nos valores das irradiâncias.

### 2.3.4 Irradiância de uma fonte não pontual

15. Se considerarmos que a nossa fonte não é mais uma fonte pontual mas uma face plana, como as faces do cubo, a relação de decaimento da radiação em função da distância ainda é o inverso do quadrado? Que dependência você esperaria observar? **Responda esta questão antes de prosseguir para o próximo item.**
16. Com o cubo aquecido na potência máxima determine a irradiância de uma das faces do cubo num range de 0 cm à 20 cm com passos de 0,5 cm. Empregue o trilho para deslocar o sensor e afere a posição com o paquímetro. Depois dos 20 cm, continue medindo a irradiância até o sensor atingir o valor associado a irradiância emitida pela sala, que deve ocorrer aproximadamente quando o sensor está 100 cm distante do cubo.
17. Faça um gráfico da irradiância em função da distância e ajuste a função mais adequada para cada regime observado.

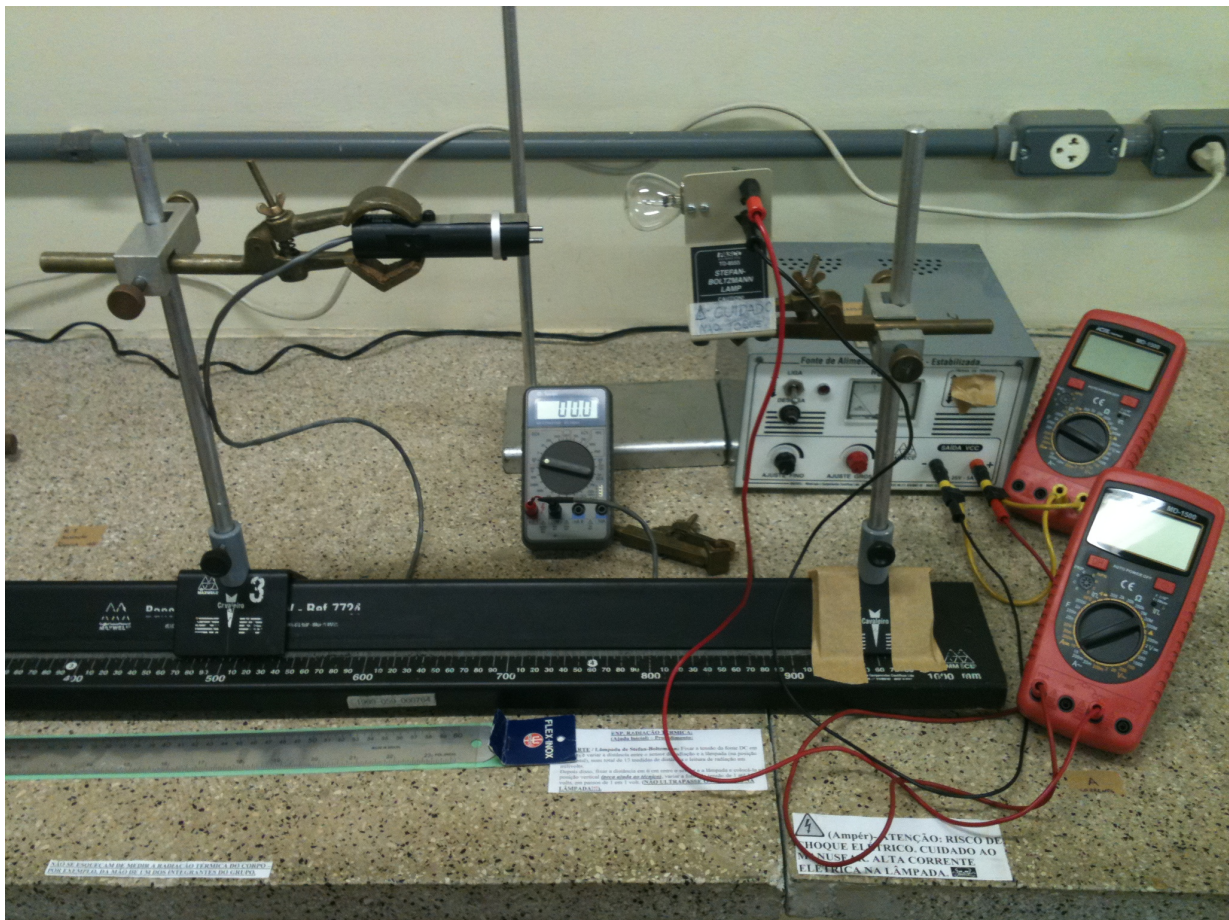
### 2.3.5 Lei de Stefan-Boltzmann para Baixas Temperaturas

18. Posicione o sensor encostado a uma das faces do cubo de radiação térmica e monitore a irradiância em função do resfriamento do cubo; registre a tensão no sensor e a temperatura. Nesta parte do experimento seria interessante mensurar a irradiância na mesma face que se encontra o termopar. O resfriamento deve ocorrer de forma não forçada, apenas deligue a lâmpada que se encontra no interior do cubo e anote os valores. **ATENÇÃO: resfrie o cubo de forma não forçada até o resfriamento de  $1^{\circ}\text{C}$  demorar um tempo superior a 30 s. Somente nesta condição você deve ligar o ventilador e continuar o resfriamento com uma taxa mais elevada.**

### 2.3.6 Radiação do corpo humano

19. Determine a irradiância emitida pelo nosso corpo encostando gentilmente o sensor na nossa pele. Adicionalmente registre a temperatura da pele, preferencialmente no mesmo local onde ocorrer a medida da irradiância fi realizada.
20. Sabemos que o nosso corpo emite uma potência próxima a 90 W e a nossa pele possui uma área de  $1,2\text{ m}^2$ , o valor de irradiância mensurado pelo sensor está coerente? Calcule a potência irradiada de nosso corpo a partir do valor mensurado de irradiância e discuta os seus resultados.

21. Quando a temperatura de um determinado corpo a ser mensurado está muito próxima a temperatura do ambiente é necessário considerar a temperatura ambiente no cálculo. Como seria esta consideração? Reavalie os resultados e cálculos realizados nos itens anteriores empregando este novo conceito.



**Figura 2.1:** Lâmpada de Stefan-Boltzmann que corresponde a uma fonte pontual e um sensor de radiação, sensível a faixa espectral do infravermelho  $0,5 - 22 \mu\text{m}$

## 2.4 Discussão

22. Liste, em ordem crescente, as faces do cubo que se portaram como melhores emissores de radiação. Explique seus resultados.
23. Por que o cubo de radiação térmica apresenta a mesma temperatura para as quatro faces e emite diferentes valores de radiação térmica? Tenha especial atenção as faces de mesmo material mas com características de rugosidade diferente.



**Figura 2.2:** *Cubo de radiação térmica, com um termômetro digital acoplado a uma das faces e o detector de radiação posicionado em frente a face preta.*

- 
24. Qual a maior diferença entre a lei de Stefan-Boltzmann para baixas e altas temperaturas?
  25. A relação  $R = \sigma T^4$  é exata para corpos negros e vale para todas as temperaturas. Por que essa relação não é usada como padrão para uma definição de temperatura? Referência: Questão 4 do Eisberg, pg 43.
  26. Qual é o comprimento de onda da radiação que o corpo humano emite com maior intensidade? Referência: Eisberg, pg 45.
  27. Utilizando a função de distribuição de Planck qual é o espectro de emissão do corpo humano, da terra e do sol. Monte o espectro, integre o valor e compare com o valores registrados para o corpo humano e para o ambiente.

# Capítulo 3

## Séries de Balmer

### 3.1 Objetivo

Determinar as características espectrais dos gases monoatômicos presentes em alguns lâmpadas de plasma e correlacionar as emissões atômicas com o modelo de Bohr.

### 3.2 Metodologia

Neste experimento serão empregados os seguintes itens: Rede de difração por transmissão e LED vermelho  $\lambda = 631 \text{ nm}$  para caracterizar o sistema e converter o ângulo de difração em comprimento de onda, lâmpadas de hidrogênio, hélio, neônio e oxigênio com suas fontes apropriadas. **ATENÇÃO: Sempre solicite auxílio e orientação aos técnicos antes de manusear estas fontes.** Goniômetro com um telescópio para observação da radiação difratada pela grade. Observe a montagem conforme a figura ??.

1. Diagrame a montagem experimental a ser empregada nesta prática. Inclua todos os componentes e todas as variáveis a serem adquiridas.
2. Alinhe o sistema usando o LED vermelho e a grade de difração para decompor a luz. Observe e registre as posições angulares de cada linha espectral de ambos os lados da difração e da ordem zero. Empregue o número de linhas por milímetro e determine o seu comprimento de onda. Compare com o valor nominal associado a este LED. O procedimento anterior foi proposto para preparar o experimento da Séries de Balmer. Neste foi fornecido a largura das fendas da rede de difração e solicitado para determinar o comprimento de onda do LED, o qual sabemos que é  $631 \text{ nm}$ .
3. Para as lâmpadas de plasma também será fornecido a largura das fendas e será mensurado o ângulo de difração de todas as linhas de emissão das fontes e então empregando a equação ?? para determinar o comprimento de onda associado à cada





**Figura 3.1:** Fontes de plasma do experimento da série de Balmer posicionadas para observação pelo telescópio. A radiação da fenda de saída da fonte atravessa pela grade de difração, o ângulo de difração é mensurado pelo goniômetro posicionado na base do telescópio.

uma destas linhas de emissão.

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad (3.1)$$

onde  $d$  é o espaçamento da rede de difração,  $\theta$  o ângulo de difração e  $m$  a ordem de difração que pode assumir  $m = 0, 1, 2, \dots$

4. Determine a posição angular de todas as linhas espectrais das diferentes lâmpadas de plasma disponíveis na bancada. Monte uma tabela com estes valores e tenha atenção redobrada com as linhas muito próximas ou muito fracas. Esta metodologia consegue identificar mais linhas espectrais que o emprego do espectroradiômetro na prática seguinte.
5. Converta os ângulos de difração em comprimentos de onda e monte uma tabela incluindo os valores aqui observados.
6. Encontre o valor da constante de Rydberg para a lâmpada de Hidrogênio e compare com o valor tabelado desta constante.
7. Encontre a mesma constante empregando as linhas espectrais das demais lâmpadas. Identifique as lâmpadas que melhor determinaram esta constante.
8. Apenas para a lâmpada de Hidrogênio propague as incertezas dos ângulos de difração para o cálculo da constante de Rydberg.

### 3.3 Discussão

9. É possível observar as outras linhas (Paschen, Lyman, Bracket) para a lâmpada de hidrogênio?
10. Como funciona uma lâmpada de plasma?
11. Explique a divergência observado no cálculo da constante de Rydberg empregando lâmpadas diferentes da lâmpada de Hidrogênio.





# Capítulo 4

## Espectroscopia de emissão

A espectroscopia de emissão é uma importante ferramenta para caracterizar fontes emisoras de radiação óptica, pois com o espectro de emissão é possível inferir na composição química do gás que compõe a fonte emissora, as características espectrais das fontes ou também é possível mensurar a densidade de fótons emitidos pelas fontes, variável muito importante para avaliar o efeito que esta radiação possui sobre a matéria.

### 4.1 Objetivo

Compreender a instrumentação de um sistema experimental empregado em espectroradiometria óptica. Determinar o espectro de emissão de diferentes fontes emisoras, calibrar um espectroradiômetro e calcular a densidade de fótons emitidos por lâmpadas e leds.

### 4.2 Metodologia

1. Diagrame os componentes ópticos correspondentes a um espectroradiômetro, incluindo desde a radiação proveniente da fonte a ser mensurada, os componentes internos ao espectroradiômetro, fibras, sensores, até a irradiância espectral a ser registrada.
2. A irradiância espectral é comumente a medida radiométrica fornecida por espectroradiômetros, a sua unidade representa a potência irradiada por unidade de área e por unidade de comprimento de onda e é expressa como  $W/m^2/nm$  ou variações, como apresentado no arquivo da fonte calibrada que será usada neste experimento:  $\mu W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-2}$ . Para acessar a irradiância espectral é necessário calibrar o espectrômetro que será utilizado, pois ele não é calibrado fornecendo apenas a intensidade de luz em função do comprimento de onda.  
Ao registrar e calcular esta grandeza (irradiância espectral) mede-se o número de fótons por unidade de tempo, por unidade de área e por unidade de comprimento de

onda que chega até o sensor do espectroradiômetro. A unidade anterior pode facilmente ser transformada para  $s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ , necessitando saber apenas a energia associada aos fótons detectados.

A irradiância espectral de uma fonte qualquer é determinada por um espectroradiômetro e uma fonte calibrada. É necessário ter uma fonte calibrada para obter um espectro em que se possa correlacionar o que o equipamento está mensurando com o que a fonte calibrada está emitindo. Segue o procedimento para calibrar o espectrômetro.

Inicialmente ligue a lâmpada halógena da fonte calibrada disponível na bancada. Neste experimento iremos calibrar apenas a região espectral compreendida entre  $350 - 800nm$ . Insira o sonda da fibra óptica na porta de saída da luz da fonte halógena; escolha um tempo de integração adequado para não saturar e minimizar o ruído da medida. Este espectro sera a intensidade da fonte, lembrando que o termo intensidade se refere ao espectro não calibrado. Desligue a lâmpada e meça novamente o sinal de fundo que o sistema gera, devido ao ruído térmico, eletrônica ou possível radiação de fundo, este espectro será a intensidade de fundo que será utilizado para descontar da intensidade da lâmpada. Por fim, anote o tempo de integração utilizado nestas das medidas e busque obter o espectro calibrado desta lâmpada, que dever ser fornecido pelo fabricante da lâmpada calibrada.

Para calibrar o espectrômetro e transformá-lo num espectroradiômetro iremos determinar a sua responsividade espectral ( $R$ ), conforme apresenta do equação ??, onde  $I_{lampada}$  é a intensidade da fonte calibrada,  $I_{fundo}$  a intensidade de fundo,  $\Delta t$  o tempo de integração e  $I_{calibra}$  o irradiância espectral da fonte calibrada. A unidade da Responsividade espectral dependerá da unidade informada pela irradiância espectral da fonte.

$$R = \frac{I_{lampada} - I_{fundo}}{I_{calibra} \cdot \Delta t}, \quad (4.1)$$

Segue o procedimento necessário para obter a irradiância espectral de uma fonte que se tenha interesse em caracterizar.

Para determinar a irradiância espectral de qualquer outra fonte se deverá usar a responsividade espectral calculada, que é valida somente para este espectroradiômetro. Para calcular, por exemplo, a irradiância espectral do led branco, como solicitado no próximo item se deverá posicionar o sensor da fibra na posição desejada e mensurar nesta mesmíssima configuração a intensidade do led e a intensidade de fundo (com o led desligado) e anotar o tempo de integração empregado para mensurar estas duas intensidades. O cálculo da irradiância espectral será então realizado conforme a ??.

$$I_{IrradEspec} = \frac{I_{lampada} - I_{fundo}}{R \cdot \Delta t}, \quad (4.2)$$

A irradiância espectral  $I_{IrradEspec}$  terá uma unidade que dependerá da unidade da Responsividade espectral ( $R$ ) empregada.

3. Determine o espectro de emissão e calcule a irradiância espectral do led branco disponível na bancada.

### 4.2.1 Transmissão de filtros

A transmissão da radiação por algum objeto parcialmente translúcido pode ser definido como:

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (4.3)$$

onde  $I_T$  é o intensidade espectral transmitida e  $I_0$  a intensidade espectral incidente no filtro e  $T$  corresponde a transmissão do feixe, podendo ser expresso de forma normalizada entre 0 e 1, ou em valores percentuais entre 0 e 100%. Esta relação pode ser obtida para uma faixa espectral ou individualmente para cada comprimento de onda, produzindo assim um espectro de transmissão.

4. Determine o espectro de transmissão dos filtros a serem utilizados no experimento “Efeito Fotoelétrico” determinando a radiação de uma fonte branca sem o filtro e com o filtro. Esta radiação não precisa ser a irradiância, basta ser a intensidade não calibrada detectada pelo espectrorradiômetro.

A configuração para este experimento é alinhar a entrada do espectrorradiômetro com uma fonte branca, como uma fonte LED, e obstruir o caminho óptico com os filtros. É importante observar se o filtro obstrui totalmente a luz branca e que nenhuma radiação alcance o detector pelas laterais do filtro. **IMPORTANTE: É necessário obter o espectro da fonte sem e com os filtros mantendo sempre a configuração da fonte e detector intactos; caso ocorra um desalinhamento, movimentação do detector ou da fonte é necessário obter novamente o espectro da lâmpada sem e com o filtro, pois estes dois valores serão empregados para acessar o espectro de transmissão.**

5. Calcule os espectros de acordo com a equação ?? e produza um gráfico com todos os espectros de transmissão dos filtros disponíveis. Este gráfico deverá ser restrito a região espectral do visível: 400-700 nm.
6. Determine a partir do espectro de transmissão o comprimento de onda de corte que estes filtros possuem, ou seja, qual é o menor comprimento de onda que os filtros transmitem. Anote também o percentual de transmissão para este comprimento de onda que você julgou que o filtro transmite com maior intensidade. Estes valores serão utilizados para obter a função trabalho no experimento “Efeito Fotoelétrico”.

7. Explique a metodologia empregada para determinar o menor comprimento de onda de transmissão dos filtros que você empregou no item anterior.

### 4.2.2 Espectros de emissão

Nesta subseção serão determinados os espectros de emissão de diferentes fontes. Sempre anote a distância entre o sensor e a fonte a ser mensurada. Esta distância é importante quando se quer comparar a irradiância espectral de diferentes fontes. Sugere-se manter uma distância de 10 cm entre a sonda da fibra óptica e a fonte

8. Determine o espectro de emissão das lâmpadas de plasma (hidrogênio, hélio e neônio e oxigênio) utilizadas no experimento “Séries de Balmer”. Para estes espectro não é necessário calcular a irradiância espectral, pois as mesmas são compostas por linhas muito intensas e estreitas, as quais não são possíveis de serem registradas pelo espectroradiômetro de forma calibrada.
9. Monte gráficos destas lâmpadas e identifique todos os picos de emissão. Compare com os valores apresentados na literatura e observados no experimento “Séries de Balmer” montando uma tabela.
10. Determine o espectro de emissão de uma lâmpada fluorescente que ilumina a sala, para esta medida meça numa distância aproximada que simule a nossa altura na sala. A partir das picos estreitos observadas identifique a provável composição química do gás desta lâmpada.
11. Determine o espectro de emissão dos LEDs disponíveis na bancada, similares aos LEDs a serem empregados no experimento “Efeito Fotoelétrico”.
12. Calcule a irradiância espectral dos LEDs e da lâmpada fluorescente.
13. Monte um gráfico com a irradiância espectral de todos os LEDs empregados, sempre mantendo uma elegibilidade na visualização dos resultados.
14. Identifique o comprimento de onda e a pico de irradiância espectral onde ocorre a máxima emissão dos LEDs e monte uma tabela com estes valores; eles serão utilizados no experimento “Determinação da constante de Planck”.
15. Determine o espectro de emissão de uma lâmpada de filamento (de tungstênio), o qual é similar às lâmpadas empregadas nos experimentos “Efeito Termoiônico” e “Radiação Térmica”.
16. Determine a irradiância espectral desta fonte e apresente num gráfico.
17. Determine a irradiância espectral da fonte fluorescente tubular (violeta) em função da distância entre a fonte e o sensor 0-100 cm (passo 1 cm até 10 cm e passo de 10 cm entre 10 cm e 100 cm). Para tal meça com o sensor alinhado ortogonalmente com o centro do tubo e um trilho.

18. Adquira a irradiância ( $I$ ) a partir da integral do espectro de emissão (irradiância espectral) conforme apresentado na ?? e ajuste a função teórica mais adequada para a dependência da irradiância com a distância da fonte. Explique a sua escolha e caso seja necessário divida em diferentes regiões de distanciamento da lâmpada.

$$I = \int I_{IrradEspec} d\lambda \quad (4.4)$$

19. Pela lei de Planck e Wien, qual seria o pico de emissão máximo esperado para estas lâmpadas de filamento. Compare este valor esperado com o espectro de emissão obtido experimentalmente.

### 4.3 Discussão

20. A lei de Wien pode ser aplicada a todas as lâmpadas empregadas neste experimento? Aponte onde esta lei é válida e onde ela não pode ser aplicada.
21. Explique empregando as definições, integrais e unidades os conceitos: Irradiância e irradiância espectral, potência, potência espectral.
22. Considerando uma boa medida experimental, por que é possível observar mais linhas com o telescópio e o olho quando comparado com a informação obtida pelo espectroradiômetro da experiência “Espectroscopia de Emissão”?
23. Ainda empregando os dois métodos luneta com o olho e o espectroradiômetro, qual seria mais adequado para diferenciar picos de emissão, como os observados nas lâmpadas de plasma, que estão posicionados muito próximos um do outro?



# Capítulo 5

## Efeito fotoelétrico

### 5.1 Objetivo

Estudar o efeito fotoelétrico e empregá-lo para determinar a função trabalho do material absorvedor de um fototubo.

### 5.2 Metodologia

Leia a teoria sobre o efeito fotoelétrico e determine a equação teórica que correlaciona o comprimento de onda da radiação com a função trabalho e a constante de Planck. Neste experimento será empregado um “foto-tubo” com amperímetro acoplado, voltímetro, filtros coloridos e LEDs emissores. Observe montagem experimental na figura ??.

1. Inicialmente devemos calibrar o potencial de referência do fototubo. Para isto tampe a entrada de luz com um filme opaco e aplique uma tensão de  $3V$ ; nesta situação a corrente deve ser nula. Ajuste o fototubo para estes valores antes de iniciar a medida com os filtros e LEDs. Ao expor o fototubo à radiação monocromática a corrente de leitura do amperímetro do detector aumenta. Consulte um técnico para padronizar a distância e a corrente máxima de  $30nA$  gerada pela radiação no fototubo. Neste momento é importante ter o apoio do técnico e professor para auxiliar a medida e evitar dano ao detector.

**ATENÇÃO: Nunca ultrapasse o valor de  $30nA$ , mesmo considerando tempos curtos; evite a exposição desnecessária do detector à radiação, sempre tampe a entrada do detector com um filme opaco quando for trocar de filtro ou de LED.**

2. Posicione a fonte de luz branca a uma determinada distância e a mantenha fixa por um suporte. Varie esta distância até encontrar uma posição que gere  $30nA$ . Aplique uma tensão de retardo para diminuir a corrente. Determine a corrente em função da tensão de retardo aplicada no detector. Obtenha uma medida para cada  $5nA$  aplicado no fototubo. Execute este procedimento para todos os filtros disponíveis



**Figura 5.1:** Montagem experimental para o efeito fotoelétrico. As fontes ao lado direito são o laser, LEDs, e uma fonte branca com filtros que podem ser posicionados na entrada do detector. Este detector absorve a radiação e gera uma corrente, a qual pode ser freada com um potencial retardador.



na bancada. É importante manter fixo tanto a posição do detector e a fonte branca durante as medidas de um determinado filtro. Ao trocar o filtro, ajuste a distância para gerar os mesmos 30 nA iniciais.

**ATENÇÃO: Lembre de desligar a lâmpada ao trocar o filtro e zerar a tensão quando não há entrada de luz no fototubo.**

3. Avalie o perfil destas curvas, tensão versus corrente, num mesmo gráfico e determine os valores das tensões de corte para cada filtro empregado. Monte uma tabela para melhor visualizar estes valores e correlacione com os valores de comprimento de máxima transmissão dos filtros, que foram obtidos na prática anterior de “Espectroscopia de Emissão”.
4. Com os valores de tensão de retardo e comprimentos de onda de corte determine a constante de Planck e a função trabalho do material que foi empregado para absorver a luz no detector e gerar em fotocorrente. Ajuste a equação teórica que relaciona estas variáveis.
5. Repita o experimento empregando os LEDs como fontes de excitação; determine a curva de corrente versus tensão e identifique a tensão de corte para cada LED empregado.
6. Produza um gráfico com os valores de comprimentos de onda de pico e da tensão de retardo obtido com o emprego dos LEDs. Obtenha a função trabalho e a constante de Planck.
7. Avalie o conjunto de dados obtidos com os filtros e os LEDs e identifique o conjunto mais adequado para calcular a função trabalho e a constante de Planck.

### 5.2.1 Discussão

8. O que é um fototubo e fotocélula?
9. Qual é o material que compõe a superfície absorvedora do fototubo?
10. Ordene as cores dos filtros e dos LEDs de acordo com o valor da tensão de retardo obtido. Com esta ordenação os valores de tensão de corte estão coerentes com o comprimento de onda e com a cor das fontes, ou seja, comprimentos de onda menores produzindo tensões de corte maiores?
11. Quando uma fonte possui dois picos de emissão, como por exemplo o LED branco ou o filtro magenta; qual é comprimento de onda de corte correto a ser empregado no cálculo da constante de Planck? Não esqueça de explicar a sua resposta e considere esta questão se algum ponto experimental ficou um pouco longe do valor esperado quando você calculou a constante de Planck e a função trabalho.



# Capítulo 6

## Constante de Planck

O bombardeamento de uma superfície metálica por fótons provoca a emissão de elétrons dessa superfície, através de um efeito conhecido por efeito fotoelétrico e estudado na prática anterior. O efeito contrário (emissão de fótons ao capturar um elétron) pode ser estudado em diodos emissores de luz (LEDs).

### 6.1 Objetivo

Obter a curva característica de LEDs e determinar experimentalmente a constante de Planck.

### 6.2 Metodologia

1. Para determinar experimentalmente a constante de Planck deverá ser montado um circuito onde é possível aplicar diferentes tensões sobre um LED e medir a corrente que o atravessa. Monte este sistema e diagrame esta montagem experimental.
2. Variando a resistência do potenciômetro, aplique diferentes valores de tensão sobre o LED. Para cada tensão aplicada, o valor da correspondente corrente deve ser medido, levantando, assim, a curva característica de cada LED. (Muito cuidado deve ser tomado na aquisição de baixos valores de tensão e corrente, sem estes valores não será possível fazer bons ajustes, que serão solicitados na sequência). Por exemplo, abaixo de 1 mA mude a escala do voltímetro e meça a tensão ate correntes de 0.1 mA com passo de 0.2, chegando a 0.09 mA meça com passo de 0,02 até 0,01 mA. Isto garantirá diversos pontos distribuídos sobre todo o regime da curva teórica, que é uma função exponencial.  
Deve-se tomar MUITO cuidado para não ultrapassar os valores máximos de tensão e corrente estabelecidos pelo LED pois nesta região pequenos acréscimos geram grandes variações de corrente. (Após a aquisição da primeira curva característica solicite a

avaliação dos resultados pelo professor, antes de prosseguir com a análise do segundo LED).

3. Monte os gráficos de corrente versus tensão ( $I \times V$ ) para todos os LEDs avaliados.
4. A partir destas curvas  $I \times V$  encontre os valores do potencial de corte  $V_D$  para cada um dos LEDs. Considere que estes se comportam como um componente ôhmico para altos valores de corrente e tensão. Para tal, ajuste uma reta considerando apenas os valores de corrente e tensão que geram uma dependência linear na curva característica.
5. Utilizando as mesmas curvas características experimentais ajuste a equação ?? aos valores e obtenha o fator geométrico  $\eta$ .

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{\eta kT} - 1\right) \quad (6.1)$$

onde  $I$  é a corrente que atravessa o diodo quando uma tensão  $V$  é aplicada;  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura absoluta em que o LED se encontra,  $I_0$  a corrente de difusão térmica que percorre o LED sem a presença de uma tensão externa,  $e$  a carga do elétron e  $\eta$  uma constante que depende da geometria e do material de que é feito o diodo.

6. Com o LED próprio para aquecimento determine a curva característica com o LED aquecido à diferentes temperaturas: ambiente,  $30^\circ C$ ,  $40^\circ C$ ,  $50^\circ C$  e  $60^\circ C$ . Neste experimento é mais que importante obter várias medidas para baixos valores de tensão e corrente. Solicite ao professor a avaliação dos resultados obtidos para uma temperatura antes de obter a curva característica para a segunda temperatura.
7. Com estes valores é possível avaliar a influência da agitação térmica no comportamento da corrente que passa pela junção p-n sem a aplicação de uma tensão externa. Monte um gráfico com as curvas características em diferentes temperaturas e ajuste a equação ?. Determine a corrente de difusão térmica  $I_0$ .

## 6.3 Discussão

8. O que pode ser obtido do gráfico  $\ln(I_0)$  versus  $1/\lambda$ ? Obtenha uma equação analítica (a partir da equação ??) e compare com os seus valores experimentais.
9. Enumere as principais críticas que a referência [?] aponta para o método empregado nesta experiência.
10. Quais as fontes de erro presentes nesta experiência para o cálculo da constante de Planck?

11. Diodo, LED, fotodiodo, junção p-n, explique todos estes componentes utilizando diagramas, sua microestrutura de fabricação e a estrutura eletrônica dos fenômenos envolvidos.
12. Por que é difícil produzir LEDs azuis, violetas ou ultravioletas?
13. Que metodologia poderia ser empregada para determinar a melhor faixa de valores que se deve utilizar para obter o valor de potencial de corte? No item anterior, onde solicitou-se ajustar uma reta na região do gráfico que a dependência de  $I$  por  $V$  e aproximadamente linear se utiliza geralmente uma dezena de dados experimentais. Mas ao utilizar mais dados experimentais para produzir o ajuste, menos inclinado ficaria a reta ajustada. Assim, em outras palavras, como poderíamos definir a melhor faixa de valores de  $I$  e  $V$  para ajustar a reta e assim determinar com mais certeza o potencial de corte, quando esta reta intercepta a abcissa.



# Capítulo 7

## Espectroscopia de estados eletrônicos

### 7.1 Espectroscopia de absorção

Estude o texto disponibilizado no ambiente virtual dando especial atenção a Lei de Beer na página 136.

#### 7.1.1 Objetivo

Correlacionar as variáveis envolvidas no processo de absorção, como o coeficiente de absorção molar (absortividade molar), a concentração e o caminho óptico. Adicionalmente uma aplicação será obter o espectro de absorção e determinar o coeficiente de absorção molar dos compostos: Azul de Metileno (AM) e da Acridina laranja (AL).

#### 7.1.2 Metodologia

1. Antes de iniciar o experimento diagrama os componentes internos do espectrômetro de absorção identificando os seguintes componentes no seu diagrama: fonte, espelhos, lentes, filtros, porta-amostra, detectores, redes de difração, etc.  
O Azul de Metileno possui peso molecular de  $319,85 \text{ g.mol}^{-1}$  e a Acridina Laranja um peso molecular de  $265,35 \text{ g.mol}^{-1}$ .
2. Obtenha a equação que correlaciona a variável a ser calculada (coeficiente de absorção molar) com as variáveis experimentais (absorbância, caminho óptico e concentração). Propague as incertezas experimentais e determine a incerteza associada ao coeficiente de absorção molar.
3. A partir das 5 soluções previamente preparadas de Azul de Metileno (AM), obtenha o espectro de absorção para cada solução. Execute a varredura de 450-750 nm para produzir um espectro de absorbância.
4. Faça uma tabela anotando os valores de absorbância para comprimento de onda de 664 nm para cada amostra. Observe que a coloração nas seis cubetas são diferentes,

ela está associada com a concentração do composto. Registre um espectro típico para o azul de metileno fotografando a tela do espectrofotômetro.

5. Segundo a Lei de Lambert-Beer a absorvância relaciona-se com a concentração da amostra e o caminho óptico através do coeficiente de absorção molar. Determine a partir dos espectros obtidos no item anterior o coeficiente de absorção molar do AM e compare com algum valor encontrado na literatura.
6. Repita o experimento do item anterior para a Acridina Laranja (AL), também faça a varredura do espectro de absorção UV-Vis de 400-750 nm para todas as 5 soluções disponíveis.
7. Faça uma tabela anotando os valores de absorvância para comprimento de onda de 490 nm para cada amostra de acridina laranja. Registre um espectro típico para a acridina laranja fotografando a tela do espectrofotômetro.
8. De forma similar determine a partir dos espectros obtidos o coeficiente de absorção molar do AL e compare com algum valor encontrado na literatura.

A Lei de Lambert-Beer também pode ser aplicada à soluções que contêm misturas de mais de um tipo de moléculas absorvedoras. Segundo a equação ?? a absorvância total da mistura  $A_M(\lambda)$  é definida pela contribuição da absorvância de cada solução absorvedora sobre um espectro de comprimentos de onda:

$$A_M(\lambda) = A_{AL}(\lambda) + A_{AM}(\lambda) \quad (7.1)$$

onde  $A_{AL}(\lambda)$  a absorvância da solução de acridina laranja e  $A_{AM}(\lambda)$  a absorvância de azul de metileno, ambas utilizadas para compor a mistura.

9. Determine o espectro de absorvância das duas soluções de mistura disponíveis.
10. Faça uma tabela anotando os valores de absorvância para dois comprimentos de onda: 490 nm e 664 nm.
11. Estas duas misturas foram produzidas a partir de soluções de AL e AM com concentrações desconhecidas. Empregando os resultados obtidos para as soluções de AL e AM e o espectro de absorvância das misturas, determine a concentração de cada solução empregada para produzir estas duas misturadas.
12. Obtenha o espectro de absorção de uma amostra de água tônica, registre o espectro e anote a posição e absorvância de todos as bandas observadas.

### 7.1.3 Discussão

13. O que você observa quando os espectros de absorção são normalizados pelo comprimento de onda de máxima absorção?
- 14.



## 7.2 Espectroscopia de excitação e fluorescência

Estude a teoria sobre transições moleculares e técnicas de fluorescência a partir dos textos disponíveis no ambiente virtual.

### 7.2.1 Objetivo

Estudar o fenômeno de transições eletrônicas radioativas através da aplicação de técnicas de fluorescência e excitação em soluções de água tônica, azul de metileno e acridina laranja.

### 7.2.2 Metodologia

1. Diagrame a óptica, componentes internos do espectrofluorímetro a ser empregado nesta prática. Inclua neste diagrama a fonte emissora, porta amostra, rede de difração, lentes, filtros e detectores para ambas as técnicas a serem empregadas: espectroscopia de fluorescência e espectroscopia de excitação.
2. Sabendo que o espectro de absorção no ultravioleta e visível da solução contendo água tônica está disponível no ambiente virtual descubra qual o composto responsável pela emissão de fluorescência da solução, também denominado como fluoróforo. Esta questão parece moleza, mas não se esqueça que você precisa provar a sua resposta.
3. Qual é a faixa de comprimentos de onda que seria a região mais adequada para excitar esta amostra e produzir um intenso espectro de absorção?
4. Obtenha um espectro de fluorescência da solução de água tônica e correlacione o experimento realizado com o diagrama que você fez no item anterior. Identifique neste experimento que valor de excitação foi empregado para produzir a fluorescência e qual faixa espectral foi utilizada para obter o espectro de fluorescência.
5. Com a mesma solução obtenha um espectro de excitação. Para este experimento correlacione mais uma vez com o seu diagrama e identifique a radiação que foi empregada para excitar a amostra e qual radiação foi coletada para montar o espectro de excitação.
6. Obtenha o espectro de fluorescência e excitação de uma amostra de AM e AL.
7. Compare o espectro de absorção com o espectro de emissão de fluorescência dos compostos estudados. Onde estão localizados os comprimentos de onda de máxima absorção e máxima emissão fluorescente?
8. Qual a semelhança entre o espectro de absorção e o espectro de excitação fluorescente?



# Capítulo 8

## Efeito termoiônico

Estude o experimento termoiônico pela referência [?], disponível no ambiente virtual

### 8.1 Objetivo

Estudar a emissão de elétrons emitidos a partir de uma superfície aquecida, fenômenos conhecido como efeito termoiônico.

### 8.2 Metodologia

Este experimento será executado de forma similar ao artigo apresentado na referência [?] e disponibilizado no ambiente virtual. Seguem as orientações para os experimentos:

1. Com base nos circuitos elétricos do experimento termoiônico diagrama a trajetória dos elétrons e dos íons positivos durante o experimento e emissão termoiônica, dando ênfase a região próxima ao filamento e tomando o devido cuidado com as polaridades das fontes (0-12 V) empregadas para ligar a lâmpada (filamento 1 ) também chamado de anodo e a fonte (0-200 V) do filamento 2 (catodo).
2. Com base na figura 1 da referência [?] e seu diagrama determine experimentalmente a corrente em função da tensão aplicada no filamento 2, para diferentes valores de tensão aplicada no filamento 1. É muito importante respeitar os valores máximos permitidos para cada circuito de tensão e corrente, sempre consulte os técnicos de apoio.
3. Determine a função trabalho do catodo (filamento 1) que é composto pelo tungstênio, empregando a equação de Richardson-Dushman. Para tal é necessário determinar a corrente termoiônica de saturação para cada tensão aplicada no filamento 1. Adicionalmente é necessário obter a temperatura do filamento para as diferentes tensões e correntes aplicadas, para tal empregue os resultados da figura 2 da referência [?].

4. A literatura apresenta um valor de  $4,52 \text{ eV}$  para a função trabalho do tungstênio, compare o valor obtido neste experimento com o valor esperado e apresentado pela literatura.
5. Determine a validade da Lei de Child neste experimento. Para tal, determine a dependência da corrente emitida pelo cátodo para o anodo em função da tensão aplicada entre os dois filamentos.

### 8.3 Discussão

6. Por que ocorre a saturação da corrente termoiônica? Isto fica mais evidenciado nas tensões menores, mas certamente também ocorre nos valores maiores. Explique esta saturação.
7. Observa-se que o limite superior da tensão inviabiliza observar a corrente termoiônica de saturação. Que equação teórica poderíamos ajustar para este gráfico de corrente termoiônica versus tensão entre os filamentos?
8. Empregue esta equação para ajustar aos valores experimentais e assim avaliar a sua efetividade na determinação da corrente termoiônica de saturação para tensões mais elevadas.
9. Explique o efeito Diodo retificador que ocorre na lâmpada com emissão termoiônica. Explique e diagrame a corrente em função do tempo para comprovar o efeito de diodo retificador.

# Capítulo 9

## Difração de elétrons e fótons

### 9.1 Objetivo

Estudar o fenômeno de difração de elétrons e correlacionar com a difração de fótons já estuda na disciplina de óptica mas revisada aqui sob novas circunstâncias. Empregar este fenômeno para determinar o espaçamento interatômico de uma amostra policristalina de grafite e de filmes com com estruturas microscópicas desconhecidas.

### 9.2 Metodologia

#### 9.2.1 Difração de elétrons

Neste experimento um Tubo (TEL.2555) produz um feixe estreito de elétrons através de um cátodo aquecido em um bulbo evacuado. Neste bulbo, o feixe de elétrons é direcionado para uma grade composta por uma fina camada de cristais de grafite. Ao penetrar através do alvo de carbono, o feixe é difratado e esse efeito pode ser visualizado na tela fosforescente depositada na superfície do bulbo, através da formação de dois anéis. **Use óculos de proteção durante todo o experimento.**

1. Identifique os componentes deste experimento e diagrame-os: fonte de elétrons, amostra policristalina de grafite, posição que formam os anéis
2. Determine a distância entre a amostra policristalina de carbono e a formação dos anéis. Tome o devido cuidado e considere a trajetória correta dos elétrons difratados. Diagrame todas estas trajetórias e determine as distâncias sem realizar aproximações de  $\theta = \tan(\theta)$  e inclua a curvatura da tela fosforescente na suas medidas.
3. Obtenha uma expressão para o comprimento de onda do elétron em função da tensão de aceleração dos elétrons.

4. Obtenha uma expressão para o diâmetro dos anéis de difração formados em função da tensão de aceleração dos elétrons. Expresse numa equação linear para aplicá-la aos resultados experimentais.
5. Ligue a alimentação do cátodo e espere aproximadamente um minuto para que o filamento atinja estabilidade térmica. Aplique uma tensão no ânodo e observe o padrão de difração formado na tela fosforescente do bulbo. Meça os diâmetros dos anéis interno e externo. Como já mencionado anteriormente a superfície do bulbo não é plana e você deve levar isso em consideração para essas medidas. Repita esse procedimento para um intervalo de tensão no ânodo entre  $2,5 \text{ kV}$  a  $4,0 \text{ kV}$ , com passo  $0,5 \text{ kV}$ .

**ATENÇÃO:** Não deixar o tubo ligado por muito tempo pois a corrente tende a subir de forma brusca e mesmo para tensões mais baixas solicita-se deixar ligado apenas para fazer as medidas experimentais. Correntes muito elevadas farão com que o alvo seja superaquecido (e se torne avermelhado). Inspeccione o alvo periodicamente durante o experimento e, lembre-se de que um minuto de espera tem que ser observado para a estabilização da temperatura do cátodo antes que a tensão no ânodo seja aplicada. A corrente no ânodo nunca deve exceder  $0,2 \text{ mA}$ . Monitore essa corrente.

6. Monte um gráfico dos diâmetros em função da tensão aplicada e ajuste a equação obtida anteriormente.
7. Encontre os espaçamentos interatômicos do grafite e compare-os com os valores esperados e apresentados pela literatura.
8. Determine o espaçamento dos planos interatômicos dos cristais de grafite.

### 9.2.2 Difração de fótons

Nesta parte do experimento será empregado um laser de He-Ne e diferentes amostras a serem empregadas para produzir padrões de difração de ondas eletromagnéticas.

9. De forma similar a difração de elétrons ocorre a difração de fótons. Inicialmente observe o padrão formado por uma rede de difração regularmente empregada em outras práticas experimentais, como por exemplo, redes de 500 ou 1000 linhas/mm. Calcule o espaçamento destas ranhuras e diagrama a microestrutura que compõem esta rede. Esta atividade é apenas preparativa para o item seguinte.
10. Além da rede de difração, calculada anteriormente, existem diferentes amostras que apresentam uma microestrutura com dimensões próximas às dimensões do comprimento de onda da luz, denominados amostra 1, amostra 2 e amostra 3. Determine o padrão de difração destas amostras e calcule o espaçamento responsável pela difração da radiação do laser de He-Ne.

### 9.3 Discussão

11. No experimento de difração de elétrons a tensão de aceleração é limitada em 4 kV pela fonte de alimentação e voltímetro. Nestas condições é correto desconsiderar o efeito relativístico associado a energia do elétron? Prove a sua resposta.
12. A hipótese de que os átomos de carbono no grafite se arranjam em uma estrutura cúbica pode ser verdadeira?
13. A estrutura cristalina do grafite pode ser hexagonal e possuir dois valores de parâmetro de rede da célula unitária. Esta célula unitária é a menor unidade repetidora presente numa rede cristalina. Estas células possuem três parâmetros de rede, comumente chamados de parâmetro  $(a, b, c)$ . Mas estes parâmetros não são explicitamente responsáveis pela formação do padrão de difração observado, mas sim os planos atômicos. Correlacione os parâmetros de rede do grafite com os espaçamentos interatômicos observados e calculados experimentalmente.
14. Questiona-se algumas vezes se os dois anéis observados são originários de dois planos interatômicos diferentes ou se os dois anéis são correspondentes ao mesmo plano mas com duas ordens de difração. Discuta este questionamento e prove com a teoria de difração e seus resultados experimentais que estes dois anéis são correspondentes a dois planos ou a um plano.
15. Qual seria o padrão formado por um feixe de elétrons passando por uma fenda simples, fenda dupla, uma rede de ranhuras ou uma rede com ranhuras igualmente espaçadas nas duas dimensões produzindo uma rede quadriculada?
16. No exemplo 3.6 do livro do Eisberg pg 111 (ano 1988) é apresentado um experimento similar ao realizado aqui. Com base neste exemplo mostre que o experimento realizado aqui esta de acordo com o princípio de incerteza de Heisenberg.
17. Por que a lei de Bragg possui um fator 2? Apresente o princípio físico responsável pelo surgimento do fator 2 e mostre matematicamente a origem deste fator.
18. Por que ocorre a difração com padrões de raias em redes de difração de fendas simples ou duplas enquanto ocorre padrões circulares em orifícios circulares em misturas policristalinas? Que estrutura microscópica precisa existir na amostra para gerar um padrão circular?
19. Explique os padrões observados neste experimento e outros que não foram realizados aqui mas são apresentados regularmente em livros textos como: aberturas retangulares, triangulares, hexagonais e circulares.





# Capítulo 10

## Princípio da incerteza

### 10.1 Ondas mecânicas

#### 10.1.1 Objetivo

Verificar a validade do princípio da incerteza de Heisenberg empregando ondas acústicas.

#### 10.1.2 Metodologia

1. Diagrame o experimento a ser realizado, ele foi extraído da referência disponível no ambiente virtual.

Neste experimento serão empregadas diferentes fontes sonoras, uma delas é composta por um gerador de função e uma caixa de som que possui frequência variável e um interruptor o que permitirá emitir pacotes de ondas em diferentes tempos, inclusive com tempos de frações de segundos. Além desta fonte também estará disponível diapasões com frequências fixas.

Para registrar a amplitude da onda sonora será empregado um microfone acoplado a placa de som do computador. Registre a amplitude da onda sonora produzida pela caixa de som em função do tempo através do programa Sound Recorder do Windows.

Após a aquisição dos resultados salve numa pasta apropriada e leve consigo todos os dados adquiridos e analisados no dia, pois eles serão periodicamente removidos do computador. Mas a análise deve ser iniciada no dia do experimento. Exporte o sinal em função do tempo para o programa Origin e neste execute as análises solicitadas na sequência.

1. Empregando o gerador de função a 200 Hz e o microfone registre a amplitude para um pacote de ondas de aproximadamente 1s, mas não esqueça de iniciar a gravação antes de apertar do interruptor e interromper a gravação pelo menos 1s depois do pacote de ondas ter finalizado . Salve e exporte para conduzir as análises. Faça um gráfico da amplitude em função do tempo, meça pelo gráfico o tempo associado ao comprimento do pacote de ondas, aplique a transformada de Fourier neste sinal, faça um gráfico

desta transformada na região de frequência que há o interesse de visualizar o sinal, identifique a frequência emissora da fonte lendo a posição do pico da banda, meça a largura da banda de frequência empregando a metodologia de largura-a-meia-altura (FWHM - full width at half maximum). Empregue o valor do comprimento (tempo) do pacote de onda gerado, a frequência e a largura desta frequência para avaliar se o valor de  $\Delta E \cdot \Delta t$  é maior que  $\hbar/2$ .

2. A metodologia passo a passo solicitada no item anterior acessará as 2 variáveis necessárias para calcular a o termo  $\Delta E \cdot \Delta t$  para diferentes comprimentos de pacotes de onda, os quais serão selecionados pelo interruptor. Mas antes repita o procedimento anterior 3 vezes, sempre buscando um pacote de onda com tempo próximo a 1s.
3. Uma vez bem estipulado a metodologia, obtenha agora 10 diferentes valores de tempo para o pacote de ondas cobrindo um amplo espectro de valores. Meça inicialmente valores menores que o valor já mensurado, alcançando dezenas de milissegundos, passando também para valores de no máximo 60 s.
4. Monte uma tabela com os valores experimentais e o tempo do pacote de ondas, frequência mensurada experimentalmente, largura da frequência para calcular a relação de Heisenberg.
5. Obtenha os mesmos valores listados no item anterior para os diapasons empregando um valor de tempo fixo para o pacote de ondas. Monte uma tabela, calcule a relação de Heisenberg e correlacione com os resultados já obtidos com o gerador de função.

### 10.1.3 Discussão

6. Ao comparar as duas referências disponíveis para este experimento, o artigo e o texto do livro de Física Quântica observa-se uma pequena diferença no enunciado da relação de Heisenberg. Existe um erro em uma destas referências ou elas são compatíveis?
7. Usualmente emprega-se a variável tempo para designar o tamanho de um pacote de ondas, evidentemente é um erro fazer isto, mas a correlação entre comprimento e tempo existe. Diagrame bidimensionalmente e espacialmente o comprimento do pacote de ondas do menor pacote que você conseguiu gerar.
8. Se você fosse desafiado a obter a menor relação experimental para  $\Delta E \cdot \Delta t$  empregando o sistema disponível na bancada, que experimento você faria?

## 10.2 Ondas eletromagnéticas

Leia o texto de referência para o princípio da incerteza de Heisenberg disponível no ambiente virtual.

### 10.2.1 Objetivo

Estudar o princípio da incerteza de Heisenberg empregando num sistema de fenda simples com largura variável.

### 10.2.2 Metodologia

9. Neste experimento empregaremos a relação de incerteza entre posição e momento; demonstre esta relação empregando o exemplo do livro de Física Quântica e correlacione com o experimento a ser realizado.
10. Diagrame os componentes e variáveis a serem empregadas no experimento. **CUIDADO: nunca ultrapasse os valores do micrômetro em que ocorrerá um choque entre as lâminas, pois isto afetará o alinhamento e produzirá irregularidades na bordas de ambas as lâminas, inviabilizando o experimento.**
11. Com o auxílio do técnico de laboratório avalie se ela está totalmente obstruindo o feixe laser, mas cuidado que ao abrir  $10\mu\text{m}$  a radiação laser precisa ser observada no anteparo como uma fraca e larga figura de difração. Nesta posição, com a fenda fechada, zere o micrômetro e abra totalmente a fenda até não mais interferir no diâmetro original do feixe. Agora determine a largura do máximo central do feixe laser e a largura da fenda. O diâmetro do feixe será determinado pelo deslocador e o detector com a máscara com orifício e a largura da fenda será determinada pela leitura direta no micrômetro.
12. Tenha o cuidado de alinhar o laser para que passe exatamente pelo meio da fenda, e feche ela gentilmente até se observar uma pequena alteração na largura do diâmetro do feixe que está projetado no anteparo. Nesta condição, em que se observa os primeiros sinais que está ocorrendo a difração da radiação, volte o micrômetro  $30\mu\text{m}$  e meça novamente o diâmetro do feixe. Tenha em mente que o objetivo é determinar um perfil de variação da largura da fenda com a largura do máximo central da difração que ser observará no anteparo. Daqui em diante, determine o diâmetro do máximo central de difração para cada  $10\mu\text{m}$  de deslocamento da fenda, até obstruir totalmente a fenda. Quando a largura do máximo central for superior a  $20\text{mm}$  não empregue mais o deslocador com o detector e sim um paquímetro ou uma régua.
13. Apresente um gráfico da variação da largura do máximo de difração com a largura da fenda.
14. Determine a incerteza no momento do fóton em função da largura da fenda
15. Confirme que o princípio de incerteza não é violado para diferentes valores de largura da fenda deste experimento.

**10.2.3 Discussão**

16. Diagrame o experimento conhecido como Microscópio de Bohr e simule possíveis resultados experimentais.
17. qual seja a diferença no padrão de difração formado no anteparo se no lugar do laser tivéssemos um feixe de elétrons?
18. Simule a energia dos elétrons e largura da fonte para que um feixe de  $1\text{mm}$  sofra difração ao passar por uma fenda de largura variável. Quais valores de largura da fenda produziria um alargamento do máximo central da ordem de  $2\text{mm}$ .

# Capítulo 11

## Carga específica do elétron

Estude a relacionada ao movimento de partículas carregadas em campos magnéticos, texto disponível no ambiente virtual.

### 11.1 Objetivo

Determinar a carga específica do elétron através e um método denominado como Busch-Hoag

### 11.2 Metodologia

O aparato experimental a ser utilizado está apresentado na figura do texto disponibilizado no ambiente virtual onde temos um tubo de raios catódicos colocado no centro do solenóide, montado com um tubo de PVC, e duas fontes de tensão, sendo uma para o solenóide e outra para as placas defletoras. O eixo maior do solenoide (eixo Z) foi alinhado de modo a ficar paralelo ao campo magnético terrestre, orientado com o auxílio de uma bússola.

Procuramos manter o centro do tubo de raios catódicos coincidindo com o centro do tubo de PVC a fim de ter uma melhor aproximação nos cálculos do campo.

Seguem as características dos equipamentos:

- a) Tubo de raios catódicos, Comprimento:  $37,0 \pm 0,1 \text{ cm}$ , Tensão de aceleração na direção Z:  $2500 \text{ V}$
- b) Fontes de Tensão, com corrente máxima para o solenoide:  $0,45 \pm 0,01 \text{ A}$ ;  
Fonte de corrente alternada com tensão de pico para as placas defletoras:  $120 \text{ V}$ ;
- c) Solenóide  
Comprimento do solenoide:  $61,1 \text{ cm}$ .  
Diâmetro do solenoide:  $15,0 \pm 0,1 \text{ cm}$ .

Densidade do enrolamento: 5500 voltas/m.

Número de voltas: 3360 voltas.

d) Placas Defletoras

Distância entre as placas:  $2,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ ;

Largura:  $2,00 \pm 0,05 \text{ cm}$ ;

Comprimento:  $2,00 \pm 0,05 \text{ cm}$ ;

1. Antes de executar as atividades propostas no roteiro demonstre a equação 17 apresentada na referência.
2. Diagrame todos os equipamentos, campos elétricos e magnéticos envolvidos e a trajetória dos elétrons. Diagrame duas figuras, uma no plano horizontal e outra no vertical.
3. Aplique uma tensão na fonte do solenoide para produzir um campo magnético no seu interior; **CUIDADO: nunca ultrapasse os valores máximos de corrente e tensão estabelecidos e sempre use óculos de proteção durante o experimento.**
4. Para quatro valores de tensão  $V_d$  aplicadas sobre as placas defletoras, varie o valor da corrente contínua no solenoide e produza diferentes campos magnéticos. Meça o diâmetro da figura formada na tela fluorescente para os diferentes valores de campo, este diâmetro fornecerá o valor do raio  $r$  da trajetória helicoidal que o elétron realizou. Empregue a lei dos cossenos para melhor calcular o raio da trajetória do elétron.
5. Faça o cálculo do campo induzido no interior do solenoide a partir da tensão e corrente aplicados no solenoide e os demais dados fornecidos.
6. Compare o campo magnético calculado com o valor do campo magnético da terra. Caso a bobina não estivesse orientada com o campo magnético da terra qual seria a influência no resultado final?
7. Calcule os respectivos valores da carga específica do elétron empregando as equações da referência disponibilizada no ambiente virtual.
8. Para cada valor de tensão aplicada nas placas, faça gráficos ilustrando os resultados da carga específica.

### 11.3 Discussão

9. Ao ligar a fonte de elétrons, sem campo elétrico nas placas e sem campo magnético no solenoide surge apenas um ponto na tela fosforescente, o qual é originado pela

colisão dos elétrons diretamente na tela, sem qualquer desvio. Ao aplicar uma tensão entre as placas que defletirá este feixe de elétrons o ponto na tela não é apenas deslocado, mas surge uma linha. Explique a origem desta linha no lugar do suposto deslocamento do ponto fosforescente.

10. Qual a influência do campo magnético da terra sobre os resultados obtidos? Algum cuidado especial deve ser tomado em relação a isto?
11. Observa-se um certo padrão geométrico na tela fosforescente, principalmente para altos valores de tensão. Explique a origem destes padrões e compare com o movimento helicoidal esperado teoricamente. Desenhe as duas trajetórias vistas dos dois planos, vertical e horizontal.
12. Ao aplicar um certo valor para o campo elétrico entre as placas e um campo magnético no solenoide observa-se a forma curva da linha fosforescente similar ao formato de um "S", adicionalmente surge uma alça nas duas extremidades, similar a um segundo "S" que estava sobreposto e agora está mais evidente, principalmente na parte mais extrema da figura. Explique a origem desta alça produzida e correlacione com a figura desenhada no item anterior.
13. Diagrame a trajetória do elétron quando este é submetido ao campo elétrico similar ao do experimento mas com o campo magnético aplicado transversalmente a trajetória inicial dos elétrons, i. e., se o campo magnético fosse girado  $90^\circ$  no plano horizontal. Como seria o desenho observado na tela?





# Capítulo 12

## Carga do elétron

### 12.1 Objetivo

Demonstrar a característica discreta da carga elétrica e determinar o seu valor. Para tal será empregado um método proposto por Robert A. Millikan onde uma gota de óleo eletrizada esta sob efeito de um campo elétrico entre duas placas.

### 12.2 Metodologia

1. Antes de iniciar os experimentos deduza as equações 4 e 5 da fundamentação teórica disponível no ambiente virtual.
2. Diagrame os componentes dos equipamentos a serem empregados no experimento e diagrame toda as forças presentes na gotícula quando ela esta se deslocando entre as placas com e sem o campo elétrico.
3. Observe as marcas na objetiva do microscópio. Estas marcas irão auxiliar para a obtenção das velocidades. Com o capacitor descarregado, borrife o óleo sobre o orifício entre as placas e observe o movimento das gotículas através do microscópio. Evite borrfifar muito para que não ocorra a nebulização, e dificulte a visão das gotas, e que também acabe obstruindo o furo sobre o capacitor.
4. Após isso focalize a luz lateral de forma que possamos visualizar as gotas de óleo. Para ajustar o foco da objetiva, introduza um fio de cobre ou fio de cabelo (COM O CAPACITOR DESCARREGADO!) no orifício do capacitor e ajuste de forma que o veja bem o fio. Lembre-se a imagem que veremos será invertida. **CUIDADO: Façam estes itens com o auxílio do técnico de laboratório, tal procedimento deve ser realizado somente na montagem do equipamento.**
5. Volte a borrfifar o óleo e escolha uma gota que seja bem visível e responda a ação do campo elétrico. Determine o tempo para a gota se deslocar entre as duas marcas realizadas na tela.

6. Após atingir a segunda marca, ligue a fonte de tensão que alimenta o capacitor e observe o movimento de subida da gota. Na subida desta gota determine o tempo para completar o mesmo percurso entre as duas marcas. Procure repetir este processo 3 vezes com a mesma gota. Utilize voltagens da ordem de 400 a 900 V, se a distância entre as placas for de 4 a 5 mm. Anote estes valores para calcular o campo elétrico gerado nestas placas. É importante anotar a característica das gotas avaliadas se elas eram grandes, ou pequenas; ou se houve uma dificuldade adicional na aquisição dos resultados.
7. Obtenha os tempos de descida e subida para 50 gotas ou quantas gotas for possível para aquele dia de experimento, anotando os tempos de subida e de descida 3 vezes para cada gota. Procure observar constantemente a temperatura no termômetro e anote este valor regularmente ao longo do experimento, visto que a viscosidade do ar depende a temperatura entre as placas.
8. Com estes valores determine a carga para cada gota de acordo com a teoria apresentada no ambiente virtual.
9. Monte um histograma da carga de suas gotas similar ao histograma apresentado pela referência disponibilizado no ambiente virtual. Com o histograma será possível identificar uma distribuição de cargas ou múltiplos de cargas. Monte dois histogramas, um com gotas grande e outro com as gotas pequenas e discuta possíveis diferenças entre eles.
10. Compare os seus valores encontrados experimentalmente com o valor da carga do elétron apresentado nos livros textos e calcule o percentual de erro para a carga do elétron.

## 12.3 Discussão

11. Discuta as possíveis razões que a lei de Stokes não seja satisfeita para gotículas pequenas.
12. Qual é a influência que o empuxo possui nos cálculos da carga do elétron?
13. Mostre que a velocidade da gotícula, caindo sem a ação do campo elétrico, é dada pela equação ??.

$$v = \frac{mg}{6\pi a\eta} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{6\pi a\eta}{m} t\right) \right] \quad (12.1)$$

onde  $m$  é a massa da gotícula,  $a$  o seu raio e  $\eta$  a viscosidade desta gota no ar. Determine qual tempo será necessário para que a gotícula típica deste experimento atinja a velocidade terminal e compare com os tempos de voo que foram medidos na experiência.

# Capítulo 13

## Velocidade da luz

### 13.1 Objetivo

Determinar a velocidade da luz.

### 13.2 Metodologia

Neste experimento será determinado a velocidade da luz a partir de um sistema que medirá o tempo de propagação de um pulso de led, que será direcionado através de uma lente de fresnel para um espelho. O pulso é gerado no interior do equipamento modelo U876460 que será redirecionado para um sensor que também se encontra no interior deste equipamento e detectará o pulso refletido pelo espelho. Este espelho é na verdade uma superfície retro-refletora. Esta superfície é composta por uma microestrutura que reflete qualquer feixe de luz na mesma direção do feixe incidente. Há uma lente de fresnel com foco de 37 cm que auxiliará na focalização do feixe de luz e aprimorará o sinal detectado. O equipamento gera um sinal elétrico de referência o que corresponde ao pulso de luz saindo do equipamento e outro sinal que corresponde ao pulso retornando do espelho. Estes dois sinais em conjunto com um sinal de trigger são necessários e suficientes para um osciloscópio detectar o pulso de luz de referência e o pulso refletido.

1. Determine a velocidade da luz para 10 valores de distanciamento entre o espelho e a fonte do equipamento de maneira que cubra o menor valor de distância de propagação da luz e o maior possível, considerando o limite da bancada e a sensibilidade do detector. Muito cuidado no alinhamento pois ele determinará a qualidade do sinal detectado.
2. Como deve ser a microestrutura do espelho para que o raio de luz seja retrorefletido na mesma direção que o raio incidente? Desenhe esta estrutura e diagrama as trajetórias dos raios de luz.
3. Considerando o led pulsado como o objeto de nosso sistema óptico, sabendo que a lente de fresnel possui foco de 37cm e temos ainda um espelho com esta superfície não

convencional, podemos empregar a equação da lente e do espelho para determinar a posição da imagem formada? Determine a posição da imagem formada nas diferentes posições de lentes e espelhos que você empregou para determinar a velocidade da luz.

4. Apresente uma estatística dos valores encontrados para a velocidade da luz e compare com os valor aceito atualmente.

### 13.3 Discussão

5. Descreva o método empregado por Ole Romer para determinar a velocidade da luz. Este método foi o primeiro método que conseguiu alcançar um valor próximo ao valor da velocidade da luz.
6. Quais outras metodologias podemos usar para determinar a velocidade da luz? Descreva em detalhes duas metodologias experimentais que podemos empregar para estimar um valor.
7. A velocidade da luz apresentado na wikipedia tem o valor exato de 299792458 metros por segundo. Como se determina cientificamente este valor exato? Não deveria ter uma incerteza associada? Qual seria este valor de incerteza?

# Capítulo 14

## Gedankenexperiment

O termo Gedankenexperiment é originário da língua Alemã e significa experimentos mentais e não envolve atividades práticas. O termo ficou mais popular com Albert Einstein que usou este termo para explicar diversas situações que ocorrem quando se atingi velocidades próximas a velocidade da luz. Aqui nesta prática o termo foi usado como titulo de experimentos que não serão realizados na prática. Estes experimentos podem ser experimentos que apresentam uma instrumentação de custo elevado e que não estão disponíveis para os alunos ou são experimentos que realmente não podem ser realizados na prática.

### 14.1 Objetivo

O objetivo desta atividade é estudar um experimento que não esta disponível neste laboratório. Os assuntos envolvidos podem ser física moderna, mecânica quântica ou física precursora à física moderna como os experimentos de relatividade, óptica ondulatória ou física atômica.

### 14.2 Metodologia

Cada aluno do grupo (i. e. uma atividade individual) irá selecionar um experimento e desenvolverá: a) Uma introdução explicando a física envolvida; b) O objetivo do experimento, o que se quer ver, determinar ou evidenciar com este experimento imaginário; c) A metodologia envolvida, que pode ser totalmente imaginada, mas requer um diagrama e uma explicação do experimento que deverá ser explicada no relatório; d) Apresentar os supostos resultados a serem observados ou que foram observados na literatura por pesquisadores. Aqui se pode mostrar resultados copiados da literatura, mas não se esqueça de referenciar. e) Por fim, apresentar uma conclusão e discutir os resultados observados ou supostamente ocorridos.

No stoa ha um arquivo wiki que cada aluno deverá editar colocando o experimento escolhido e o seu nome associado, para que os próximos alunos não façam o experimento

repetido. Segue a lista de tópicos que poderão ser escolhidos:

1. Espalhamento de partículas atômicas;
2. Experimento de Franck-Hertz;
3. Experimento Stern-Ferlach;
4. Efeito Zeeman;
5. Ressonância magnética nuclear;
6. Ressonância paramagnética eletrônica;
7. Efeito Hall;
8. Efeito Compton;
9. Espalhamento Raman;
10. Efeito Túnel;
11. Experimento GHZ;
12. Paradoxo EPR;
13. Gato de Schrödinger;
14. Paradoxo dos Gêmeos;
15. Dualismo Onda-Partícula;
16. Paradoxo de Olbers;
17. Existência do éter;
18. Dilatação do tempo;
19. Contração do comprimento ou paradoxo da garagem;
20. Detecção de partículas nucleares.

# Bibliografia

- [1] E. F. de Lima, M. Foschini e M. Magini, O Efeito Termoiônico: Uma Nova Proposta Experimental, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol 23, no 4, 2001.
- [2] R. Morehouse, Measuring Planck's constant by means of an LED, American Journal of Physics, Vol. 66, No. 1, pg. 12, 1998.