

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Laboratório de Física Moderna: Natureza da Luz

Prof. Dr. Carlos Augusto Cardoso
Passos

Sumário

Experiência 1.....	2
A velocidade da Luz.....	2
Experiência 2.....	4
Radiação Térmica.....	4
Experiência 3.....	7
A constante de Planck.....	7
Experiência 4.....	10
Oefeito Fotoelétrico.....	10
Capítulo 5.....	14
Espectros Atômicos.....	14
Capítulo 6.....	17
Absorção e emissão de radiação.....	17
Capítulo 7.....	19
Interferência.....	19

Experiência 1

A velocidade da Luz

1. Introdução

Até o século XVII se acreditava que a propagação da luz era instantânea, ou seja, sua velocidade era infinita. Uma das primeiras tentativas para se medir a velocidade da luz foi feita por Galileu. Ele tentou medir o tempo que um feixe luminoso demoraria para percorrer uma dada distância. No entanto, sem aparelhos de medida bastante sensíveis seria impossível obter um valor para este tempo e o experimento fracassou. Por volta de 1675, o astrônomo dinamarquês Olaf Römer fazia observações dos sucessivos eclipses de uma das luas do planeta Júpiter. Ele mostrou que quando a Terra estivesse em posições diametralmente opostas ao Sol, ocorria um atraso entre dois eclipses de aproximadamente 20 minutos. Römer sugeriu que este atraso era devido ao tempo gasto pela luz para percorrer a distância correspondente ao diâmetro da órbita da Terra e concluiu que a velocidade da luz embora muito alta, era finita. Uma medida bastante precisa foi feita pelo físico francês H.L. Fizeau, por volta de 1849, usando um dispositivo óptico constituído de dois espelhos e uma roda dentada que permitia ao observador sincronizar os raios incidente e refletido. Mais tarde o físico e astrônomo francês Jean Bernard Léon Foucault adaptou o experimento de Fizeau e calculou a velocidade com bastante precisão. Fez ainda comparações entre a velocidade da luz se propagando na água e no ar. Experimentos mais precisos foram feitos, dentre eles as técnicas precisas desenvolvidas pelo físico A. A. Michelson, e hoje o valor exato da velocidade da luz é $c = 299.792.458 m/s$.

Em sua teoria eletromagnética, J. C. Maxwell mostrou que toda onda eletromagnética se propaga no vácuo com a mesma velocidade $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$, onde ϵ_0 é a permissividade elétrica e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, respectivamente. Podemos ainda medir a velocidade de propagação de uma onda através da medição direta de sua frequência ν e comprimento de onda λ da forma

$$c = \lambda \nu. \quad (1.1)$$

Neste experimento vamos medir a velocidade da luz à partir da radiação de microondas.

2. Roteiro: Experiência 1- Medida da velocidade da luz.

Objetivo

Medir a velocidade da luz.

Material Utilizado

- Forno de microondas;
- Prato para microondas;
- Marshmallows ou Tablettes de Manteiga;

- Régua.

Procedimento

- Retire o prato giratório do microondas;
- Disponha os marshmallows lado a lado em um prato que possa ser colocado no microondas. Se você for usar os tabletes de manteiga corte pequenos pedaços, tomando o cuidado para que tenham o mesmo comprimento e espessura e organize-os da mesma forma;
- Verifique a frequência das microondas do seu forno. Você pode verificar a frequência em um adesivo colocado na parte de trás ou procure no manual do forno de microondas. O valor mais frequente é 2450 MHz ($2.45 \times 10^9 \text{ Hz}$).
- Leve tudo ao forno de microondas. Deixe os marshmallows por 40s e a manteiga por 5s. Use a potência máxima do forno;
- Retire o prato do forno com cuidado para não se queimar e observe que aparecem alguns pontos derretidos. A distância entre dois pontos derretidos corresponde a dois máximos das microondas e já sabemos que a distância entre dois máximos consecutivos de uma onda é o que chamamos de comprimento de onda.
- Meça essa distância e anote em uma tabela. Repita esse procedimento 5 vezes, substituindo por novos marshmallows (ou pedaços de manteiga).
- Calcule o valor médio e o desvio padrão da medida.
- Usando a equação 1.1 encontre o melhor valor para a velocidade de propagação da microonda e compare com o valor exato.

Responda às questões

1. Explique o funcionamento do forno de microondas.
2. Por que os alimentos não são uniformemente cozidos quando colocados em um forno de microondas?

Sugestão

Você pode usar dois ovos ao invés dos materiais propostos e medir a distância entre dois pontos de cozimento. Deixe por apenas 15s.

3. Bibliografia

1. D. Halliday, R. Resnick e J. Walker; Fundamentos de Física, Vol IV, Óptica e Física Moderna, Editora LTC, 8ª edição (2008).
2. R. H. Stauffer Jr, The Physics Teacher , 35 231 (1997).

Experiência 2

Radiação Térmica

Radiação de corpo negro

1. Introdução

Quando colocamos um pedaço de ferro no fogo, deixamos por alguns segundos e o aproximamos de nossas mãos podemos sentir a radiação emitida pelo corpo na forma de calor. Esta radiação, no entanto, não é visível. À medida que a temperatura aumenta, a quantidade de radiação emitida também cresce e começamos a observar uma mudança na coloração da superfície do ferro; em temperaturas muito altas a superfície do ferro adquire uma cor vermelha brilhante. A radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é chamada de *radiação térmica*. Em geral, em temperaturas abaixo de 600°C a radiação térmica emitida pelos corpos não é visível, seu comprimento de onda é muito maior do que o comprimento da luz visível. Existem, no entanto, corpos que emitem radiação visível como por exemplo, o Sol, o carvão em brasa, as lâmpadas incandescentes, dentre outros. O espectro de radiação térmica emitida pelo corpo dependerá, essencialmente, da natureza desse corpo. Entretanto, alguns objetos quando aquecidos emitem espectros idênticos, ou seja, a radiação emitida por estes corpos à mesma temperatura não dependerá da constituição do material. Estes objetos são chamados de *corpos negros*. Se um corpo absorve toda a radiação incidente sobre ele considerado um *corpo negro*. De fato, esses não refletem a luz incidente e portanto eles possuem a coloração negra.

A distribuição espectral da radiação de corpo negro é especificada pela chamada *Radiância Espectral*, $R_T(\nu)$, que é definida de forma que $R_T(\nu)d\nu$ seja igual à energia por unidade de tempo por unidade de área emitida por uma superfície à temperatura T num intervalo de frequência de ν a $\nu + d\nu$. Se plotamos um gráfico de $R_T(\nu)$ em função de ν para diferentes temperaturas absolutas T , observaremos que R_T cresce rapidamente com o aumento da temperatura. Por volta de 1879, Josef Stefan escreveu uma relação empírica entre a energia por unidade de tempo por unidade de área irradiada pelo corpo negro e sua temperatura

$$R_T = \sigma T^4 \quad (1)$$

em que $\sigma = 5,67 \times 10^{-08} W/m^2 K^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura em unidades de Kelvin. Veja que, de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, R_T só depende da temperatura do corpo e não de qualquer outra característica do corpo e pode ser entendida como a *rapidez* com que um corpo emite energia. Os corpos que não são negros também irradiam energia por unidade de área por unidade de tempo porém, com uma *rapidez* menor do que um corpo negro à mesma temperatura. Para estes corpos a cor e a composição do material são fatores extremamente relevantes. Outro resultado interessante é que espectro de radiância se desloca para frequências maiores à medida que a temperatura aumenta. Este resultado ficou conhecido como a Lei do Deslocamento de Wien

$$\nu_{max}/T = 2,898 \times 10^{-3} (m \times K) \quad (2)$$

em que ν_{max} é a frequência na qual R_T tem seu valor máximo para uma dada temperatura.

Uma cavidade também se comporta como um corpo negro. A radiação térmica que incide sobre o orifício entra na cavidade e é repetidamente refletida pelas suas paredes. Se a área da orifício for muito pequena comparada ao interior da cavidade, podemos considerar que toda a radiação será absorvida no interior da cavidade e o orifício será um absorvedor ideal, caracterizando um corpo negro.

Neste experimento vamos estudar a absorção de radiação por dois objetos de cores diferentes, exemplificando a teoria da radiação térmica.

Roteiro: Experiência 2- Radiação de Corpo Negro.

Objetivo Geral

Estudar a absorção e emissão de radiação por um corpo negro.

Material Utilizado

- Duas latas de alumínio iguais;
- Tintas preta e branca;
- Termômetros;
- Uma lâmpada incandescente de 100W e um bocal;
- Relógio;
- Água

Procedimento

- Pinte uma das latas com a tinta branca e a outra com a tinta preta;
- Encha as duas latas com a mesma quantidade de água;
- Meça a temperatura inicial da água nas duas latas e anote este valor. Aguarde alguns instantes até que a temperatura seja a mesma nas duas latas;
- Ligue a lâmpada incandescente colocada próxima às latas de maneira simétrica;
- Anote a temperatura em cada lata a cada minuto até que a temperatura se estabilize;

- Desligue a lâmpada e meça novamente a temperatura a cada minuto.
- Anote seus dados em uma tabela e faça o gráfico de Temperatura X Tempo. Você terá dois conjuntos de valores: Um para a absorção (aquecimento das latas) e outro para a emissão (resfriamento das latas) e portanto terá que fazer dois gráficos para cada lata;
- Obtenha a taxa de variação da temperatura para as duas latas.

Responda às questões:

1. Qual das latas aquece mais rapidamente. Qual delas esfria mais rapidamente? Por que isso ocorre?
2. Aproxime suas mãos no lado das latas oposto à lâmpada e verifique em que caso a radiação emitida é maior. É possível estimar o comprimento de onda da radiação emitida?
3. Apenas parte da energia fornecida a uma lâmpada de 100W surgem na forma de radiação visível. O que acontece com o resto da energia? O que poderia ser feito para melhorar a eficiência desta lâmpada?

Bibliografia

1. D. Halliday, R. Resnick e J. Walker; Fundamentos de Física, Vol IV, Óptica e Física Moderna, Editora LTC, 8^a edição (2008).
2. R. Eisberg e R. Resnick, Física Quântica, Editora Campus, 27 Edição (1979).
3. <http://www.if.ufrgs.br/oei/exp/exp3.html>. Acesso em 26/06/2012.

Experiência 3

A constante de Planck

Introdução

A Lei de Stefan-Boltzmann e a Lei de Wien não descreviam completamente a radiação térmica. Era necessária uma teoria que explicasse o espectro de radiação de corpo negro, ou seja, uma expressão para radiância espectral que explicasse os pontos observados experimentalmente. A densidade de energia espectral foi calculada por Rayleigh-Jeans utilizando o princípio da equipartição da energia da teoria clássica da Termodinâmica. Ele obteve uma equação para $R_T(\lambda)d\lambda$ da forma

em que k é a constante de Boltzmann. Essa expressão concorda com os resultados experimentais somente no limite de grandes comprimentos de onda. Para pequenos valores de λ o modelo de Rayleigh-Jeans diverge. Este resultado ficou conhecido como *catástrofe do ultravioleta*. Por volta de 1900, o físico alemão Max Planck propôs uma nova formulação para a radiação de corpo negro que não considerava o princípio clássico de equipartição de energia. Ele sugeriu que o problema para as altas frequências (λ pequeno) poderia ser eliminado se existisse uma energia de corte tal que $\bar{E} \rightarrow 0$ se $\nu \rightarrow \infty$, ou seja, o valor médio da energia tende a zero se $\nu \rightarrow \infty$. Planck então sugeriu que a energia média é uma função da frequência e mostrou que as variações das energias térmicas de um corpo negro só poderia assumir valores múltiplos de uma certa quantidade, ou seja,

$$\bar{E} = 0, \Delta E, 2\Delta E, 3\Delta E... \quad (3.4)$$

Planck queria mostrar que $\bar{E} \approx kT$ quando a diferença de energia ΔE fosse pequena e que $\bar{E} \approx 0$ se ΔE fosse grande. Então, ele precisava obter uma expressão em que ΔE fosse uma função crescente de ν . Planck propôs que $\Delta E \propto \nu$ e a constante de proporcionalidade é a chamada *constante de Planck*, h . Em outros termos

$$\Delta E = h\nu. \quad (3.5)$$

Planck obteve o valor desta constante que melhor ajustava seu resultado aos dados experimentais. O valor considerado foi de

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad (3.6)$$

A expressão obtida por Planck para a radiância é da forma

$$R_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad (4.7)$$

Essa ficou conhecida como Lei da Radiação de Planck para o corpo negro. A lei de Stefan-Boltzmann e a Lei de deslocamento de Wien podem ser obtidas pela fórmula de Planck. Por toda a sua contribuição para as bases da Teoria Quântica, Max Planck ganhou o Prêmio Nobel em 1918.

Em 1905, partindo da teoria de Planck, Einstein sugeriu que “na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço, que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais”. Em outras palavras, Einstein propôs que a luz era composta de pequenos pacotes cada um com uma energia $E = h\nu$. Esses pacotes de energia foram, mais tarde, denominados fótons. Com esta hipótese Einstein generaliza a ideia de Planck, recupera a ideia de Newton que acreditava ser a luz composta de pequenas partículas e introduz a quantização do campo eletromagnético.

A constante de Planck provou ser a constante fundamental da teoria quântica.

Roteiro: Experiência 3- Medida da constante de Planck.

Objetivo

Obter o valor da constante de Planck a partir da luz emitida por um LED (Light Emitting Diode).

Material Utilizado

- Leds de 4 cores diferentes. Escolha os leds de alto brilho e transparentes para facilitar as medidas;
- Resistores de 300Ω ;
- Pilha de 6V;
- Potenciômetro;
- Multímetro;
- Fios para o arranjo experimental.

Procedimento

- Você precisa conhecer o comprimento de onda e a frequência de cada Led. Use a rede de difração caracterizada no Experimento 04, substituindo a caneta laser pelos Leds de diferentes cores ligados a uma pilha. Refaça o procedimento para todos os Leds e obtenha o comprimento de onda λ . Use $c = \lambda\nu$ e obtenha a frequência de cada Led. Anote os valores de frequência obtidos. Você precisará destes valores para concluir a medida. Estime o erro de sua medida;
- Monte o seu experimento conforme a figura;

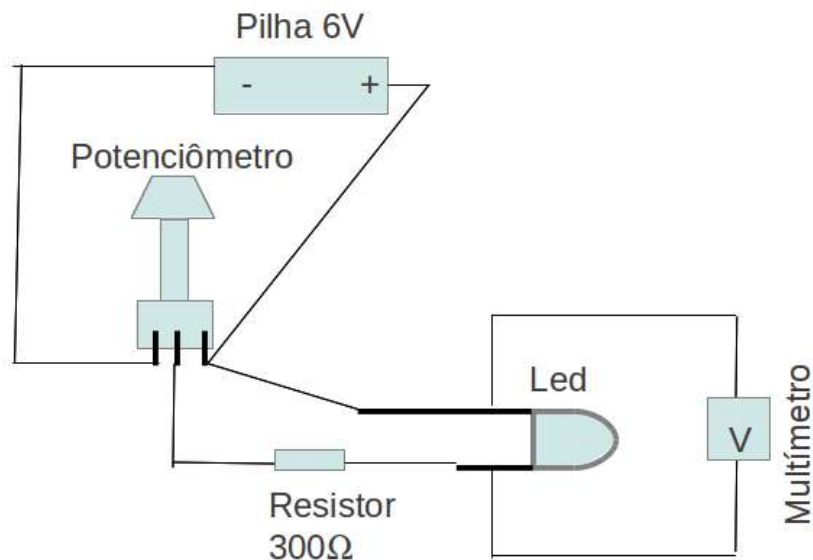


Figura 4.1: Arranjo experimental para a medição da constante de Planck

- O Led possui um terminal positivo (longo) e um negativo (curto). Preste atenção para que a conexão com os polos dos demais dispositivos seja correta;
- Varie o potenciômetro e observe o limiar da diferença de potencial medida pelo multímetro quando o Led começa a acender. Repita esse procedimento 5 vezes, anote os valores de V_{limiar} e tome o valor médio. Faça o mesmo com todos os Leds;
- Faça um gráfico de V_{limiar} versus frequência ν ;
- Obtenha o coeficiente de inclinação desta curva;
- Usando

$$E = h\nu = eV_{limiar} \quad (4.8)$$

$$V_{limiar} = \frac{h}{e}\nu$$

em que $e = 1.60 \times 10^{-16} \text{ C}$ é a carga elementar. Veja que $\frac{h}{e}$ corresponde à inclinação da reta na curva $V_{limiar} \times \nu$. Com base em seu gráfico obtenha o valor para a constante de Planck. Estime o erro de sua medição. Compare seu resultado com o valor esperado.

Bibliografia

1. D. Halliday, R. Resnick e J. Walker; Fundamentos de Física, Vol IV, Óptica e Física Moderna, Editora LTC, 8ª edição (2008).
2. R. Eisberg e R. Resnick, Física Quântica, Editora Campus, 27 Edição (1979).
3. S. L. de Moura, F. I. da Silva, F. C. M. da Silva e J. A. V. dos Santos, Química Nona na Escola, 33, 246 (2011)
4. M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro e R. Haag, Física na Escola, 6, 75 (2005).
5. P. H. Dionisio, Cad. Brás. Ens. Fís.22, 147 (2005).
6. M. A. Cavalcante e R. Haag, Rev. Bras. Ensino Fís.27, 343 (2005).

Experiência 4

O efeito Fotoelétrico

Introdução

Por volta de 1886, o físico alemão Heinrich Hertz mostrou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando se incide luz ultravioleta sobre um deles. Mais tarde, o físico Wilhelm Hallwachs estimulado por estes trabalhos de Hertz, mostrou que corpos metálicos irradiados com luz ultravioleta adquiriam uma carga positiva. Esse fenômeno foi explicado pelo físico alemão Phillip Lenard onde propôs que a luz ultravioleta era responsável pela emissão de partículas da superfície do metal. Foi o britânico Joseph John Thomson quem descobriu que as partículas emitidas da superfície são os elétrons. A emissão de elétrons de uma superfície devido à incidência de luz sobre ela é chamada *efeito fotoelétrico*. Para entender o efeito fotoelétrico, considere o esquema mostrado na figura 4.1.

Quando a luz incide sobre a superfície metálica (catodo) os elétrons desta superfície podem ser ejetados, sem nenhum atraso, e se uma diferença de potencial ΔV é estabelecida entre as placas, os elétrons ejetados são coletados pela placa coletora (anodo) e podemos observar uma corrente fotoelétrica no circuito.

A figura 4.2 mostra a corrente fotoelétrica em função da diferença de potencial.

Se a diferença de potencial entre as duas placas for grande o suficiente, a corrente fotoelétrica atinge um valor constante, ou seja, todos os elétrons ejetados são coletados no anodo. Se ΔV for reduzido a zero a corrente não será nula, porém se o sinal da diferença de potencial for invertido haverá um valor para $|\Delta V| = V_o$, chamado potencial de corte, em que a corrente fotoelétrica é zero.

Isso ocorre porque os elétrons emitidos, mesmo os de maior energia, são forçados a retornar ao catodo devido à mudança no sinal de ΔV . Neste caso, os elétrons perdem energia cinética e ganham energia potencial e o potencial de corte corresponde ao valor máximo da diferença de potencial necessária para que toda energia cinética se

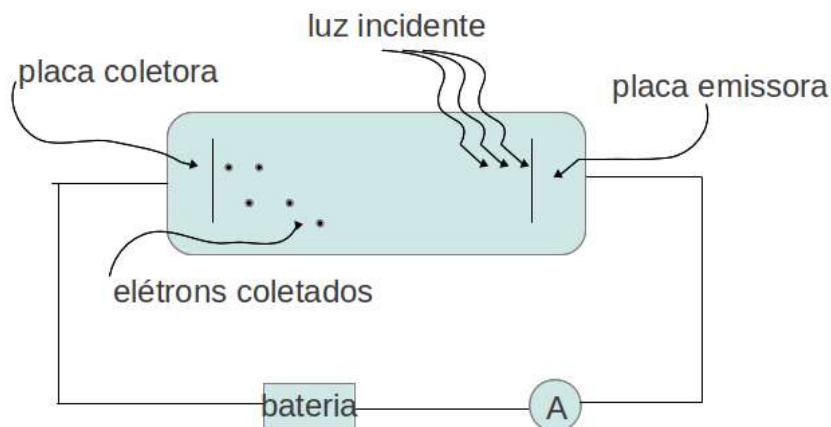


Figura 4.1: Diagrama esquemático para observar o efeito fotoelétrico.

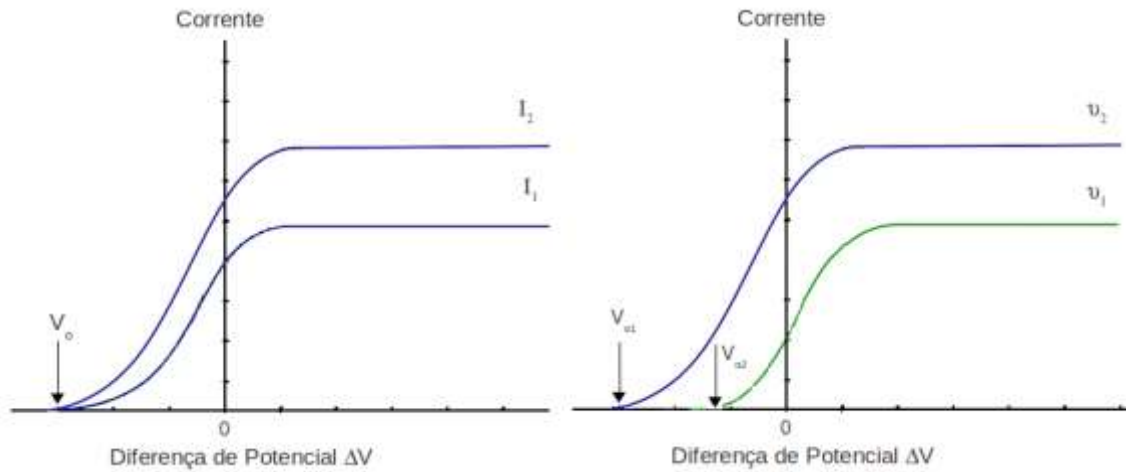


Figura 4.2: Variação da corrente fotoelétrica com a diferença de potencial aplicada às placas. I_1 e I_2 são as intensidades da luz incidente, ν_1 e ν_2 são as frequências e V_0 é o potencial de corte.

transforme em energia potencial, ou seja, $\Delta U = -\Delta K$. Uma vez que os elétrons mais energéticos tem energia cinética máxima, K_{max} , e a energia potencial de um elétron é

28

$\Delta U = -e\Delta V$, podemos escrever

$$eV_0 = K_{max} \quad (5.1)$$

A teoria ondulatória previa que a energia cinética dos elétrons ejetados deveria aumentar com o aumento da intensidade da luz incidente e portanto, o potencial de corte V_o também aumentaria. No entanto, os experimentos mostravam que o potencial de corte não depende da intensidade I da fonte incidente como mostra a figura 4.2 e deve depender, no entanto, da frequência ν da luz incidente. Além disso, a teoria ondulatória previa que o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência da luz incidente o que não era observado. Se a frequência da luz incidente for menor do que um dado valor chamado frequência de corte, ν_o , o efeito não era observado.

Para explicar estas questões, Einstein propôs, em 1905, que a luz incidente sobre a placa emissora era composta de fótons que transportam uma energia $E = h\nu$. Cada fóton incidente transfere esta energia a um único elétron da placa. Parte desta energia será usada para retirar o elétron da placa e o restante será a energia cinética máxima adquirida pelo elétron ejetado. Isso pode ser resumido na equação

$$h\nu = \varphi + K_{max} \quad (4.2)$$

Nesta equação, φ é a chamada *função trabalho*, ou seja, é a energia necessária para que o elétron seja ejetado e só depende da natureza da placa emissora. Com essa expressão, Einstein explicou que se aumentamos a intensidade da luz incidente, o número de interações entre fótons e elétrons também é aumentado e portanto, o número de elétrons ejetados também será maior. Isso, entretanto, não modifica o potencial de corte V_o , apenas o valor da corrente fotoelétrica é aumentada. Além disso, se $K_{max} = 0$ teremos que

$$h\nu_o = \varphi \quad (4.3)$$

o que significa que um fóton de frequência ν_o tem exatamente a energia necessária para retirar um elétron da placa. Se a frequência for menor do que este valor nenhum elétron será ejetado e o efeito não será observado.

Com esta teoria, Einstein recebeu o Prêmio Nobel em 1921.

Roteiro: Experiência 4- Observando o efeito fotoelétrico

Objetivo

Analisar a interação da radiação com a matéria, através do efeito Fotoelétrico.

Material Utilizado

- Multímetro
- LDR (Light Dependent Resistor)
- Cartolina preta

O LDR, também conhecido como célula foto-condutiva ou foto-resistência, é um dispositivo semicondutor cuja resistência varia linearmente com a intensidade de luz incidente.

Procedimento

- Faça um tudo de cartolina preta com diâmetro idêntico ao LDR. Coloque o LDR dentro do tubo.
- Ligue as extremidades do LDR ao Multímetro.

- No outro lado do tubo de papel aproxime uma lâmpada incandescente.
- Meça a resistência no Multímetro na escala de Ohms. Anote os valores.
- Cubra a entrada de luz do tubo com um pedaço de papel preto e observe o valor medido no multímetro. Anote os valores. Repita as medidas 5 vezes e tome o valor médio da resistência. Obtenha o desvio padrão de sua medida.
- Dobre o papel ao meio e repita o procedimento do item anterior.
- Dobre mais uma vez e repita o processo.

Responda às questões

1. O que ocorre com a leitura medida se você cobre a entrada de luz sobre o LDR? Como você explica esse comportamento?
2. Uma das aplicações do efeito fotoelétrico é nos postes de iluminação pública. Explique o seu funcionamento.

Sugestão

Construa um eletroscópio de folhas e reproduza o efeito fotoelétrico.

Bibliografia

1. R. Eisberg e R. Resnick, Física Quântica, Editora Campus, 27 Edição (1979).
2. E. de C. Valadares e A. M. Moreira, Caderno Catarinense de Ensino de Física, 15, 359 (1998).
3. M. A. Cavalcante, C. R.C. Tavolaro, D. F. de Souza e J. Muzinatti, Física na Escola, 3, 24 (2002).
4. D. R. de O. Pereira e O. Aguiar, Rev. Ponto de Vista, 3, 65.

Capítulo 5

Espectros Atômicos

Introdução

O espectro da radiação emitida por uma lâmpada incandescente, por exemplo, apresenta uma estrutura contínua ao contrário da radiação emitida por átomos livres. O espectro atômico está distribuído em comprimentos de onda discretos de forma que cada espécie de átomo tem seu espectro característico que pode conter centenas de linhas espectrais. Podemos estudar os espectros de emissão atômica usando como fonte de luz uma descarga elétrica em um gás monoatômico, uma amostra de Hélio, por exemplo. Alguns elétrons da amostra são excitados para estados de energia mais altas e quando decaem para o estado fundamental emitem radiação eletromagnética que, ao passar por uma rede de difração, é decomposta em seu espectro discreto de comprimentos de onda. Um espectro de absorção ocorre quando a luz emitida por uma fonte, uma lâmpada incandescente, por exemplo, passa através de um gás frio e rarefeito. A radiação é então absorvida em determinados comprimentos de onda e as linhas observadas representam os comprimentos de onda que faltam no espectro contínuo. Interessante observar que para cada linha no espectro de absorção há uma linha correspondente no seu espectro de emissão. O contrário nem sempre acontece. A figura 1 mostra um esquema dos diferentes espectros na região do visível.

Por volta de 1913, Niels Bohr desenvolveu um modelo atômico que apresentava uma excelente concordância com os dados espectroscópicos que dispunha na época. Bohr observou que a teoria clássica não explicava porque átomos de uma mesma espécie deveriam ter órbitas eletrônicas similares, como evidenciava os espectros atômicos. Bohr postulou que os elétrons de um átomo só poderiam se mover em órbitas circulares discretas específicas em torno do núcleo, sob influência da atração Coulombiana, com uma energia total constante, caracterizando um estado estacionário. Nestes estados, os elétrons acelerados não poderiam emitir radiação eletromagnética.

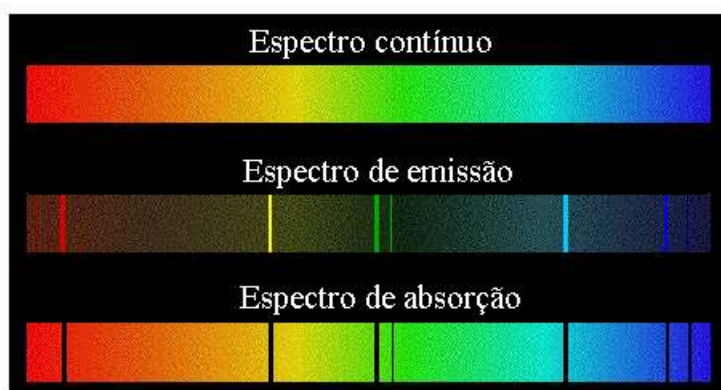


Figura 5.1: Diferentes espectros na região do visível.

O átomo só emitiria ou absorveria radiação eletromagnética se um elétron fizesse uma transição de um estado de energia E_i para um estado de energia E_f . A frequência da radiação emitida poderia ser calculada da forma

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} \quad (5.1)$$

em que h é a constante de Planck. Esta energia, absorvida ou emitida, corresponde a energia transportada por um fóton, conforme o postulado de Einstein.

Com seu postulado, Bohr sugere a quantização do momento angular L do elétron se movendo na órbita do núcleo que deve assumir valores $L = n\hbar$, com $n=1,2,3\dots$. E a quantização do momento angular leva à quantização da energia total. Para o átomo de Hidrogênio a energia total será

$$E_n = -\frac{mZ^2e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad n=1,2,3\dots \quad (5.2)$$

em que m é a massa do elétron, Z é o número atômico e e é a carga do elétron. À partir deste valor e usando a expressão 5.1 é possível obter a frequência de radiação eletromagnética emitida quando um elétron sofre uma transição de um estado inicial n_i para um estado final n_f . Segundo Bohr cada uma das séries conhecidas no espectro do átomo de Hidrogênio corresponde a uma transição na qual o elétron vai para um certo estado final. Com essa análise foi possível obter os comprimentos de onda de todas as séries com bastante precisão.

Neste experimento vamos construir um espectrômetro manual e observar os espectros produzidos por diferentes fontes.

Roteiro: Experiência - Observando o espectro do Sódio.

Objetivo Geral

Construir um espectrômetro manual para observar os espectros produzidos por diferentes fontes.

Material Utilizado

- Um tubo de papelão de aproximadamente 30cm de comprimento. Você pode usar o tubo de papel toalha;
- UM CD;
- Fita adesiva;
- Papel cartão ou cartolina preta;
- Lâmpada incandescente;
- Lâmpada Fluorescente;
- Vela;
- Sal de cozinha;
- Lápis de cor.

Procedimento

- Retire a película laminada do CD e corte-o em quatro partes iguais;
- Pegue uma dessas partes e cole sobre um lado do tubo de papelão. O CD será a sua rede de difração;
- Recorte um círculo de cartolina, faça uma fenda de aproximadamente 2cm de comprimento e 0,5cm de largura. Cole esse círculo no lado oposto do tubo

como se fosse uma tampa. O espectrômetro está pronto;

- Aponte o espectrômetro para a lâmpada incandescente cuidando para que a radiação incida diretamente sobre a fenda;
- Observe o espectro formado dentro do tubo e faça um desenho detalhado da figura formada em um pedaço de papel;
- Substitua a fonte pela lâmpada fluorescente e repita o procedimento.
- Substitua a fonte pela vela. Observe o espectro produzido. Agora coloque um pouco de sal de cozinha na chama da vela e observe as modificações que surgem no espectro. Faça o desenho do espectro em detalhes. Você deve observar a linha característica de emissão do Sódio. É possível estimar o comprimento de onda desta linha?
- Você pode fotografar os espectros ao invés de desenhá-los, se preferir.

Responda às questões

1. Identifique as principais características e diferenças entre os espectros produzidos pelas duas lâmpadas.
2. Compare o espectro produzido pela vela com o espectro produzido pelas lâmpadas.
3. O que ocorre quando você coloca o sal de cozinha sobre a chama da vela? Após alguns instantes, o que ocorre com as linhas de emissão observadas?
4. Como podemos calcular os comprimentos de onda observados?

Sugestão

1. Se você tiver acesso à lâmpada de Sódio refaça o procedimento acima observando o espectro com a lâmpada acesa e imediatamente após ela ser apagada. Compare seu resultado com o sal de cozinha.
2. Aponte seu espectrômetro para um poste de iluminação pública. Em geral, são usadas lâmpadas de vapor de mercúrio ou de sódio. Compare os espectros.
3. Em um dia de sol observe o espectro do Sol. Não olhe diretamente para o Sol com o espectrômetro.

Bibliografia

1. R. E. Eisberg e R. Resnick, Física Quântica, Editora Campus, 27^a edição (1979).
2. M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro e R. Haag, Física na Escola, 6, 75 (2005).
3. M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro, Cad.Cat.Ens.Fís., 18, 297 (2001).
4. Quântica para iniciantes, <http://www.pontociencia.org.br/quantica.htm>. Acesso em 28/06/2012.

Capítulo 6

Absorção e emissão de radiação

Objetivos

- Analisar transferências e transformações de energia em sistemas.
- Relacionar o poder de absorção e de emissão de radiação com a natureza das superfícies
- Reconhecer que a radiação incidente num corpo pode ser parcialmente absorvida, refletida ou transmitida.
- Relacionar as taxas de absorção e de emissão da radiação de um corpo com a diferença entre a sua temperatura e a do ambiente que o rodeia.

Introdução

A absorção de radiação, e também a emissão, por parte dos corpos está relacionada com a taxa de absorção, e de emissão, da radiação com a natureza da superfície do corpo e mede-se qualitativamente através da diferença de temperatura entre a temperatura a que está o corpo e a temperatura do ambiente que o rodeia.

Quando a radiação eletromagnética emitida por um corpo incide noutra, uma parte pode ser refletida, outra parte pode ser transmitida através dele (se for transparente para essa radiação) e a restante pode ser absorvida. A parte que é absorvida aumenta a energia interna desse corpo e isto é traduzível por uma elevação de temperatura.

Teoricamente temos dois extremos: o emissor ideal ou corpo negro, aquele cuja superfície não reflete radiação de nenhuma frequência, visível ou não, absorvendo-a, e depois emitindo-a, com emissividade $e = 1$ para todas as frequências, e o radiador ideal, aquele cuja superfície não emite nem absorve radiação de nenhuma frequência, visível ou não, apenas a refletindo, com emissividade $e = 0$ para todas as frequências.

Na prática existem corpos que se aproximam do emissor ideal, sendo bons emissores, bons absorventes e maus refletores da radiação e existem outros que se aproximam do radiador ideal, sendo maus emissores, maus absorventes e bons refletores da radiação.

Existem situações intermédias em que os mesmos corpos podem ser bons ou maus emissores/absorssores de radiação de apenas certas frequências.

Vamos comparar um corpo de superfície preta, um corpo de superfície branca e um corpo de superfície metálica, em cada uma das seguintes situações:

- **Situação 1:** incidência de luz visível por uma lâmpada de incandescência (220 v ; 100 w) no corpo, indo este absorver radiação visível e emitir radiação infravermelha, em que ao ser atingido o equilíbrio térmico a taxa de absorção de radiação visível é igual à taxa de emissão de radiação infravermelha.
- **Situação 2:** se o corpo estiver a uma temperatura de cerca de 50°C e o deixarmos arrefecer, ele irá emitir radiação infravermelha para o ambiente e irá absorver, do ambiente, também radiação infravermelha.

Material

3 latas pintadas (preto, branco, metalizado) com orifícios na tampa cheias de ar, 3 latas pintadas (preto, branco, metalizado) com orifícios na tampa com água a 50°C, aparelho de banho-maria, 6 termómetros, 3 cronómetros, 3 candeeiros com lâmpadas de incandescência (220 v ; 100 w), fita métrica, papel milimétrico

Procedimento experimental

1. Registe, para cada um dos aparelhos de medida utilizados, o alcance, a natureza e o erro absoluto de leitura.
2. Insira um termómetro em cada uma das 3 latas cheias de ar.
3. Anote a temperatura inicial do ar dentro de cada lata.
4. Irradie cada uma das 3 latas com a lâmpada de incandescência, tendo o cuidado de deixar uma distância de 25 cm entre a lâmpada e a lata, colocando a lâmpada ao mesmo nível que a lata.
5. Meça e registe a temperatura do ar contido em cada lata, de 60 s em 60 s, durante 30 minutos.
6. Coloque 250 cm³ de água previamente aquecida no aparelho de banho-maria, a 50°C, no outro conjunto de 3 latas, e insira outros termómetros através dos orifícios nas suas tampas.
7. Meça e registe a temperatura da água contida em cada lata, de 60 s em 60 s, durante 30 minutos.
8. Simultaneamente coloque o conjunto inicial de latas exposto ao Sol, durante 30 minutos, e anote as respectivas temperaturas do ar contido no seu interior.

Resultados obtidos

1. Registe em tabela/quadro os dados obtidos para cada uma das latas, relativamente à absorção e à emissão de radiação.
2. Construa os gráficos $T = f(t)$, relativos à absorção e à emissão.
3. Sobreponha os gráficos obtidos.

Discussão e conclusões

1. Relacione as taxas de absorção e de emissão de um corpo com a diferença entre a sua temperatura e a do ambiente que o rodeia.
2. Relacione a taxa de absorção, e de emissão, de radiação com a natureza da superfície de cada lata utilizada.
3. Compare os resultados obtidos e infira acerca do poder emissor/absorvente ou refletor dos corpos utilizados, comparando as diferentes temperaturas de equilíbrio.
4. Explique como e porquê se atinge o equilíbrio térmico, ao fim de um certo tempo.
5. Relacione o traçado dos gráficos de temperatura em função do tempo, $T = f(t)$, obtidos com o atingir do equilíbrio térmico.
6. Explique "Porque são as casas no Alentejo tradicionalmente pintadas de branco?" e "Porque é a parte interna das garrafas - termo espelhada?"

Capítulo 7

Interferência

Introdução

O fenômeno de interferência foi observado experimentalmente por Thomas Young, em 1801, e é chave para se entender a natureza ondulatória da luz. Como já se sabia, se duas ou mais ondas se encontram em uma dada região do espaço, ocorre o que chamamos de superposição. Se as ondas se encontram em fase, ou seja, o máximo de uma coincide com o máximo de outra teremos uma onda resultante cuja amplitude é igual a soma das amplitudes de cada onda e a interferência será construtiva. Se, no entanto, na região de superposição o máximo de uma onda coincidir com o mínimo de outra, ou seja, as ondas se encontram com uma diferença de fase, teremos uma interferência destrutiva. A amplitude da onda resultante será a diferença das amplitudes individuais. O Experimento de Young mostrou que se um feixe luminoso monocromático e coerente atravessa duas fendas paralelas e idênticas a imagem vista em um anteparo colocado próximo às fendas apresenta regiões de máximo de intensidade e regiões de intensidade mínima indicando que as ondas provenientes das duas fendas se superpõem resultando em uma interferência construtiva (franjas claras) e destrutiva (franjas escuras). A figura 1.1 mostra um esquema do experimento.

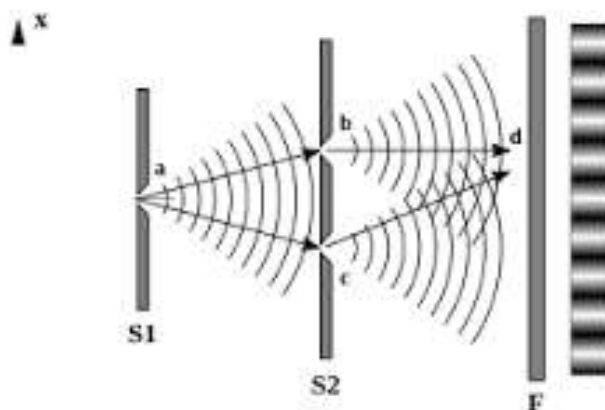


Figura 1.1: Um feixe de laser incide sobre uma tela onde foram feitas duas fendas separadas pela distância d . No anteparo é observada a figura de interferência.

Se a distância D até o anteparo é muito maior do que a separação d das fendas, podemos mostrar que a condição para que se tenha um máximo ou um mínimo de interferência é dado por

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (7.1)$$

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (7.2)$$

Neste experimento vamos analisar as figuras de interferência produzidas quando um feixe de laser atravessa os pares de fendas separadas por distâncias variadas .

Roteiro: Experiência 7- Padrão de interferência de fenda dupla

Objetivo

Analisar as diferentes figuras de interferência produzidas por fendas duplas separadas por diferentes distâncias.

Material Utilizado

- Caneta laser com comprimento de onda conhecido;
- Anteparo;
- Régua ou papel milimetrado;
- Uma superfície de vidro plana, poder ser a tampa de um quadro ou porta-retrato;
- Uma vela.
- Agulha de costura.
- Um pedaço de espelho.

Procedimento

- Construa um anteparo e o posicione perpendicularmente ao laser. Coloque um espelho a frente do anteparo para garantir que o feixe do laser incida sobre o anteparo em um ângulo de 90° .
- Você pode usar a própria parede da sala como anteparo. Retire o espelho quando for efetuar as medidas;
- Acenda a vela e incida diretamente sobre a superfície de vidro de forma a produzir uma densa camada escura;
- Com o auxílio da agulha de costura faça o desenho de pares de fendas separadas pela distância d sobre a superfície, conforme a figura 1.2. Tome cuidado para que as fendas sejam bem finas e retas. Faça a distância a o quanto menor possível e as outras como múltiplos deste valor;

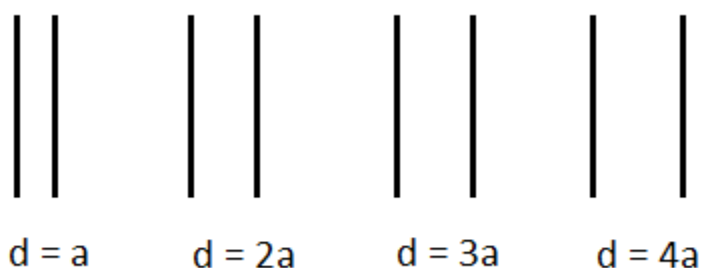


Figure 1.2: Esquema para a construção das fendas duplas

- Posicione o feixe de laser de modo a incidir sobre o primeiro par de fendas separadas pela distância $d = a$. Observe a figura de interferência produzida. Reproduza cuidadosamente em uma folha de papel o padrão de interferência observado. A figura 1.3; mostra o esquema do arranjo experimental;

- Meça a distância D entre as fendas e o anteparo;

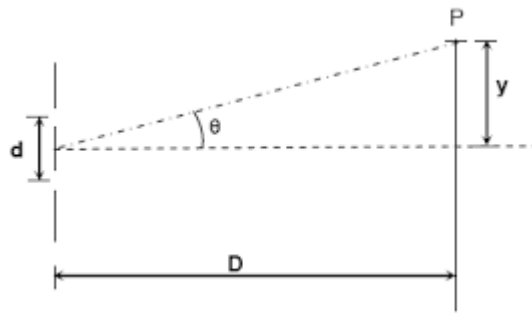


Figura 1.3: Arranjo experimental para a observação da figura de interferência. A separação entre as fendas f_1 e f_2 é d e a placa está à distância D do anteparo. O ponto P se refere à um máximo ou mínimo de intensidade conforme equação 7.2.

- Repita este procedimento para todas os pares de fendas;
- Usando a equação 1.4 determine qual das fendas produzirá uma figura de interferência com os máximos de intensidade mais próximos. Compare seu resultado com as figuras observadas.
- Escolha a fenda dupla que apresenta a figura de interferência mais nítida e meça as distâncias dos três primeiros mínimos de intensidade em relação ao centro do padrão de interferência. Tome a metade desse valor e obtenha o valor de y indicado na figura 7.3
- Calcule o ângulo sabendo que,

$$\text{sen } \theta = \frac{y}{(y^2 + D^2)} \quad (7.3)$$

- Usando a equação 7.2 calcule o valor para a separação entre as fendas.

Responda às questões

1. A experiência da fenda dupla de Young é um experimento de difração, de interferência ou de ambas? Com este aparato experimental você poderia explicar sua resposta? Que modificações seriam necessárias se trocássemos o feixe de laser pela luz do sol?

Sugestão

Faça pequenos pontos sobre a superfície plana e observe o padrão de interferência produzido. Em seu experimento original, Young utilizou minúsculos furos ao invés de fendas.

Bibliografia

D. Halliday, R. Resnick e J. Walker; Fundamentos de Física, Vol IV, Óptica e Física Moderna, Editora LTC, 8ª. edição (2008).

A. A. Campos, E. S. Alves e N. L. Speziali, Física Experimental Básica na Universidade, Editora UFMG (2007).