

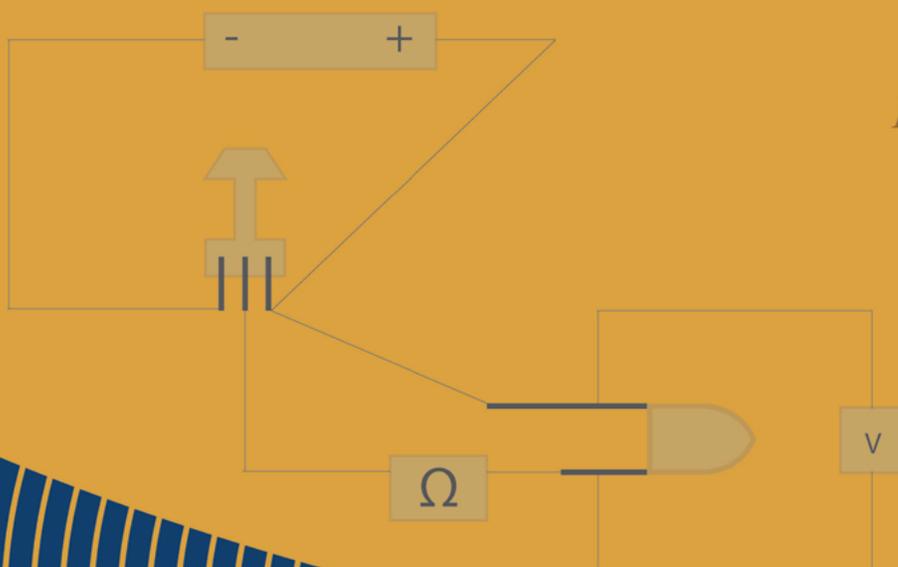
Laboratório de Física Moderna

Denise da Costa Assafrão de Lima

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

$$R_T(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} d\lambda$$

$$E = h\nu = eV_{\text{limiar}}$$



Denise da Costa Assafrão de Lima

Professora Adjunta do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo. Possui Doutorado em Física pela Universidade Federal de Minas Gerais, com período sandwich na Queens University of Belfast, Irlanda do Norte. Mestrado em Física pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2005). Tem experiência na área de Física, com ênfase em Física Atômica e Molecular, atuando principalmente nas seguintes linhas: métodos teóricos e computacionais em átomos e moléculas especiais (incluindo anti-matéria): interação de pósitron átomos e moléculas, propriedades de isotólogos e propriedades eletrônicas em nanodispositivos moleculares.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Núcleo de Educação Aberta e a Distância

Laboratório de
Física Moderna

Denise da Costa Assafrão de Lima

Vitória
2012

Presidente da República

Dilma Rousseff

Ministro da Educação

Aloizio Mercadante

**Diretor de Educação a Distância - DED/
CAPES/MEC**

João Carlos Teatini de Souza Climaco

Universidade Federal do Espírito Santo**Reitor**

Reinaldo Centoducatte

Pró-Reitora de Ensino de Graduação

Maria Auxiliadora de Carvalho Corassa

Diretor Geral do Ne@ad

Maria Aparecida Santos Corrêa Barreto

Coordenadora UAB da Ufes

Maria José Campos Rodrigues

Diretora-Administrativa do Ne@ad

Maria José Campos Rodrigues

Diretor-Pedagógico do Ne@ad

Júlio Francelino Ferreira Filho

Diretor de Centro de Ciências Exatas

Armando Biondo Filho

Coordenador do Curso de Física -EaD

Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Revisor de Conteúdo

Carlos Augusto Cardoso Passos

Design Gráfico

LDI - Laboratório de Design Instrucional

Ne@ad

Av. Fernando Ferrari, 514
CEP 29075-910, Goiabeiras
Vitória - ES
(27) 4009 2208

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Laboratório de Design Instrucional**LDI coordenação**

Heliana Pacheco
José Octavio Lobo Name
Letícia Pedrucci
Ricardo Esteves

Gerência

Daniel Dutra

Editoração

Heinrich Kohler

Ilustração

Paulo Reckel

Capa

Heinrich Kohler
Paulo Reckel

Impressão

L732I Lima, Denise da Costa Assafrão de.
Laboratório de física moderna / Denise da Costa Assafrão de Lima.
- Vitória : Universidade Federal do Espírito Santo, Núcleo de Educação
Aberta e à Distância, 2012.
60 p. : il.

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-85-8087-069-5

11. Física moderna. 2. Física experimental. I. Título.

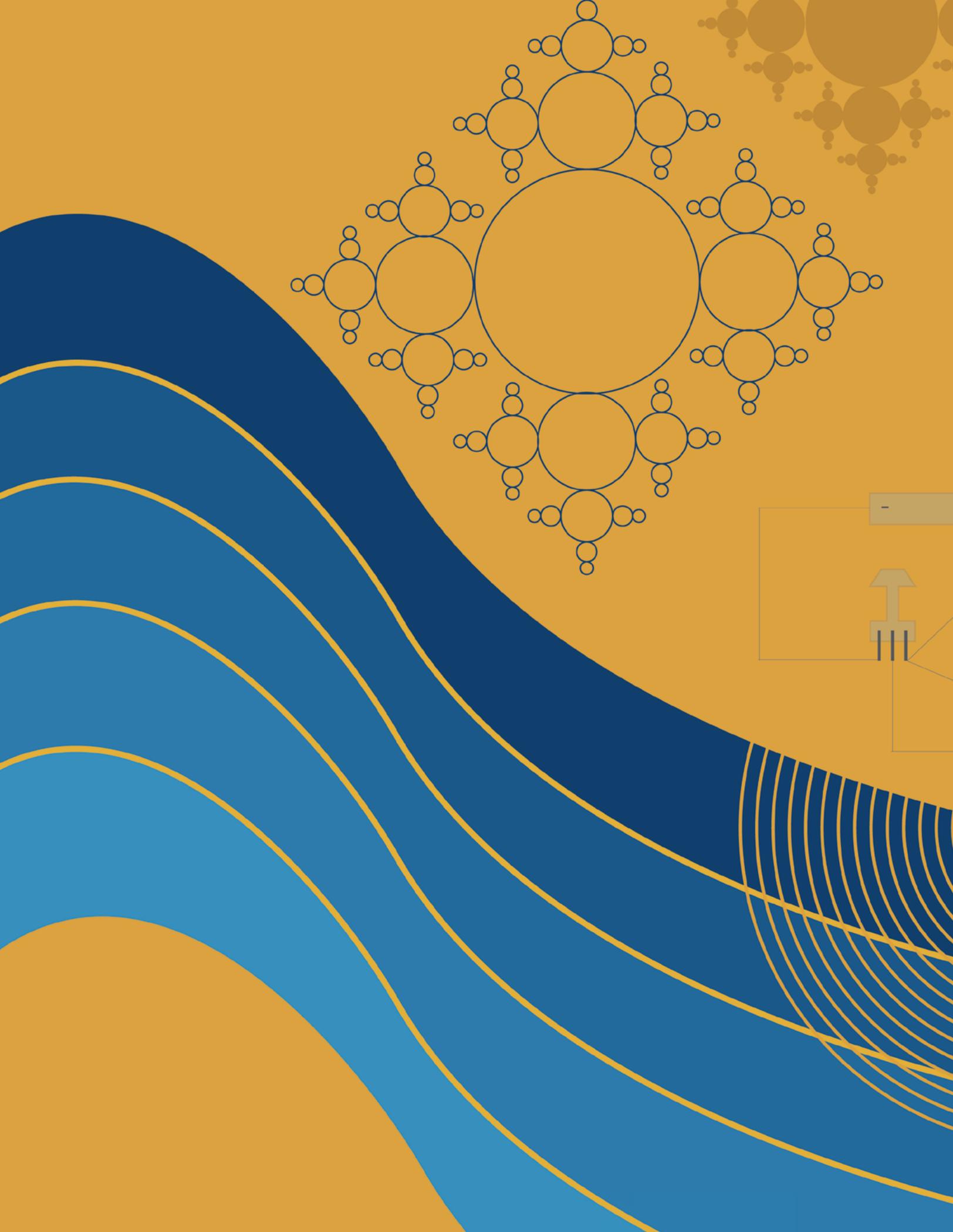
CDU: 53



Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir deste trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito pela criação original.

A reprodução de imagens nesta obra tem caráter pedagógico e científico, amparada pelos limites do direito de autor, de acordo com a lei nº 9.610/1998, art. 46, III (citação em livros, jornais, revistas ou qualquer outro meio de comunicação, de passagens de qualquer obra, para fins de estudo, crítica ou polêmica, na medida justificada para o fim a atingir, indicando-se o nome do autor e a origem da obra). Toda reprodução foi realizada com amparo legal do regime geral de direito de autor no Brasil.

Clique nas marcas abaixo para acessar os sites das instituições:



Apresentação

No final do século XIX e início do século XX um resultado experimental intrigava a comunidade científica: os espectros da radiação emitida por corpos negros em uma dada temperatura eram idênticos e não dependiam da composição do material. Várias teorias foram escritas com o intuito de obter a energia emitida pelo corpo negro em função do comprimento de onda da radiação. Em 1900, mais precisamente em 14 de dezembro, numa reunião da Sociedade Alemã de Física, o físico Max Planck propôs a hipótese da quantização da energia para entender os espectros da radiação emitida por um corpo aquecido. Em sua teoria, a energia foi tratada como uma quantidade discreta, ou seja, só poderia assumir certos valores uniformemente distribuídos e proporcionais à frequência da radiação emitida. Essa ideia marcou o início de uma revolução na física: o nascimento da Física Quântica. Para Planck a ideia da quantização não passava de um argumento matemático; alguns historiadores relatam que ele escreveu uma carta ao físico norte-americano Robert W. Wood dizendo que sua hipótese foi um "ato de desespero". Alguns anos mais tarde, entretanto, Albert Einstein generalizou as ideias de Planck e propôs que a energia radiante seria quantizada em pacotes concentrados, os chamados fótons, evidenciando que o quanta de energia não era apenas uma construção matemática. Esta hipótese explicou o efeito fotoelétrico (a emissão de elétrons por uma superfície devida à incidência de luz sobre ela) e deu o prêmio Nobel a Einstein em 1921.

Você pode se perguntar qual o impacto destas descobertas em seu dia a dia. Essa resposta não é difícil e podemos considerar um único exemplo: a teoria sobre os fótons e os processos de emissão e absorção da radiação por um átomo levou ao desenvolvimento do laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Por suas propriedades, o laser é hoje utilizado nas mais diversas aplicações: em cirurgias médicas; em pesquisas científicas; em telecomunicações nas fibras ópticas; no comércio com os leitores de códigos de barras; na indústria de armamento com as miras lasers; em nossas casas nos aparelhos leitores de CD, DVD e Blu-Ray e você o usará para realizar alguns experimentos deste livro. Para estudar os detalhes sobre o funcionamento do laser, veja o artigo de V. S. Bagnato (Física na Escola, volume 2, número 2, 2001). Como você pode concluir todos nós fomos diretamente beneficiados pelos avanços propiciados pela Física Quântica que é parte fundamental da Física Moderna.

A proposta deste livro é apresentar alguns conceitos fundamentais da Física Quântica a partir de uma coletânea de experimentos já bem conhecidos, simples e baratos que

podem ser feitos na cozinha de sua casa. Os assuntos se apresentam em ordem de forma a reproduzir a história da Física Quântica em seus aspectos fundamentais. Começamos com os experimentos que enfatizam o carácter ondulatório da luz, passamos pela discussão do efeito fotoelétrico e chegamos em uma das mais recentes e promissoras descobertas do nosso século, o Grafeno. O último capítulo apresenta uma bela experiência mostrando como é possível adaptar os experimentos de Física Moderna para estudantes com deficiência visual.

Denise da Costa Assafrão de Lima

Índice

CAPÍTULO 1 - *Interferência*

1.1 Interferência	9
1.1.1 Roteiro: Experiência 1 - Padrão de interferência de fenda dupla	10
1.1.2 Bibliografia	12

CAPÍTULO 2 - *Difração da Luz*

2.1 Difração por fenda única	14
2.1.1 Roteiro: Experiência 2- Medida da espessura de um fio de cabelo	15
2.1.2 Bibliografia	16
2.2 Difração por um orifício circular.	16
2.2.1 Roteiro: Experiência 3- Medida do diâmetro de um orifício produzido por uma agulha de costura	17
2.2.2 Bibliografia	18
2.3 Redes de Difração: Dispersão e Resolução	19
2.3.1 Roteiro: Experiência 4- Medida da constante de rede de um CD e um DVD.	20
2.3.2 Bibliografia	22

CAPÍTULO 3 - *A Velocidade da Luz*

3.1 A velocidade da Luz	24
3.1.1 Roteiro: Experiência 5- Medida da velocidade da luz.	24
3.1.2 Bibliografia	26

CAPÍTULO 4 - *Radiação Térmica*

4.1 Radiação de corpo negro.	28
4.1.1 Roteiro: Experiência 6- Radiação de Corpo Negro.	29
4.1.2 Bibliografia	30
4.2 A constante de Planck	30
4.2.1 Roteiro: Experiência 7- Medida da constante de Planck.	32
4.2.2 Bibliografia	33

CAPÍTULO 5 - *O Efeito Fotoelétrico*

5.1 O efeito Fotoelétrico36
5.1.1 Roteiro: Experiência 8- Observando o efeito fotoelétrico	38
5.1.2 Bibliografia	39

CAPÍTULO 6 - *Espectros Atômicos*

6.1 Espectros Atômicos41
6.1.1 Roteiro: Experiência 9- Observando o espectro do Sódio.	42
6.1.2 Bibliografia	44

CAPÍTULO 7 - *Fractais*

7.1 Fractais46
7.1.1 Roteiro: Experiência 10 - Fractais	48
7.1.2 Bibliografia	49

CAPÍTULO 8 - *A Escala Atômica*

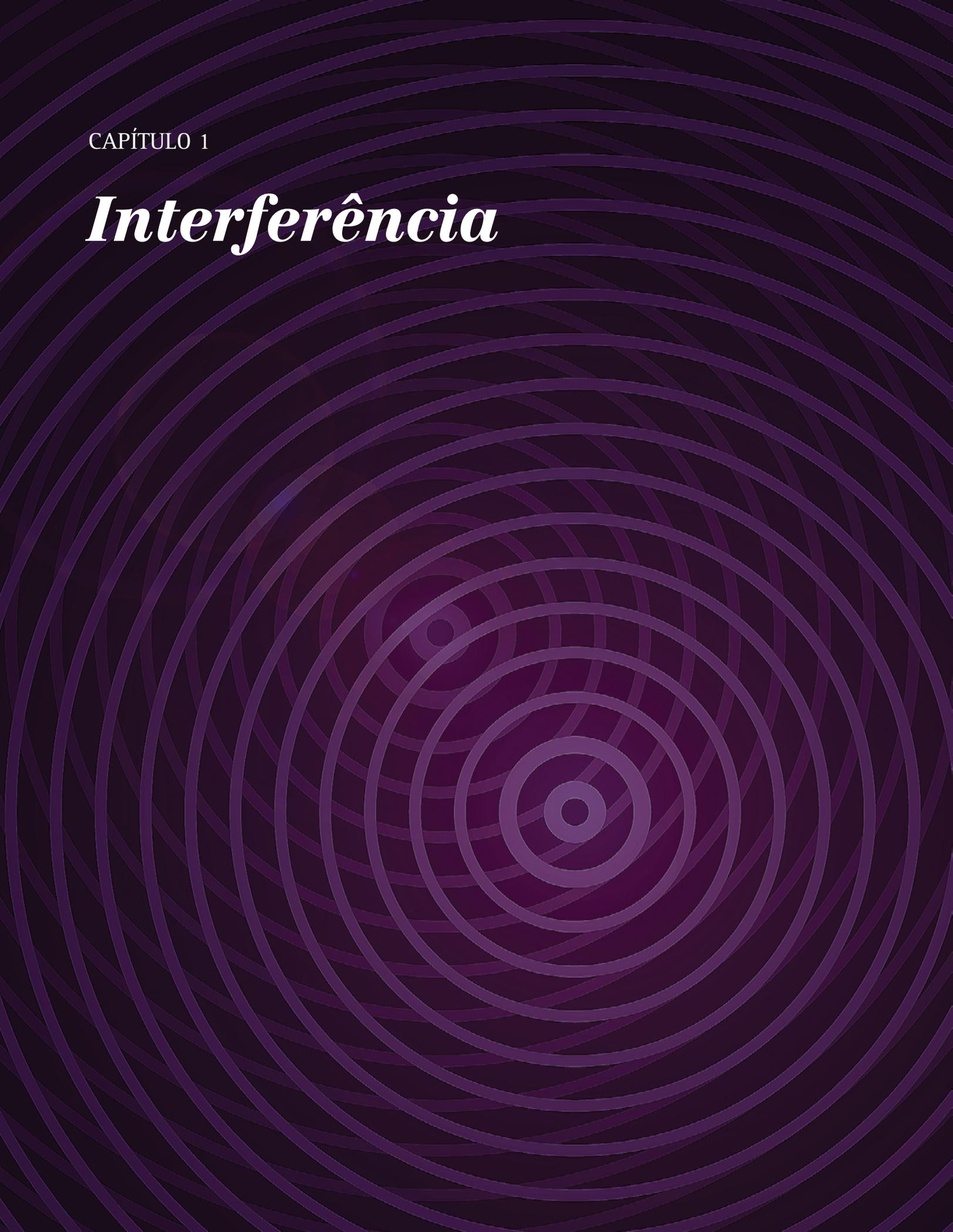
8.1 O Grafeno51
8.1.1 Roteiro: Experiência 11- Quantas folhas de grafeno possui uma linha desenhada à lapis?	52
8.1.2 Bibliografia	54

CAPÍTULO 9 - *Física Experimental para Portadores de Necessidades Especiais*

9.1 Introdução	56
9.2 A analogia para ensinar o conceito do efeito fotoelétrico para Deficientes	
9.2.1 Fundamentação Teórica	57
9.2.2 Roteiro: Experiência 12- Efeito Fotoelétrico para Deficientes Visuais	58

CAPÍTULO 1

Interferência



1.1 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.

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

$$\begin{aligned}
 d \sin \theta &= m\lambda & m=1,2,3\dots\text{máximos} \\
 d \sin \theta &= \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda & m=0,1,2\dots\text{mínimos}
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

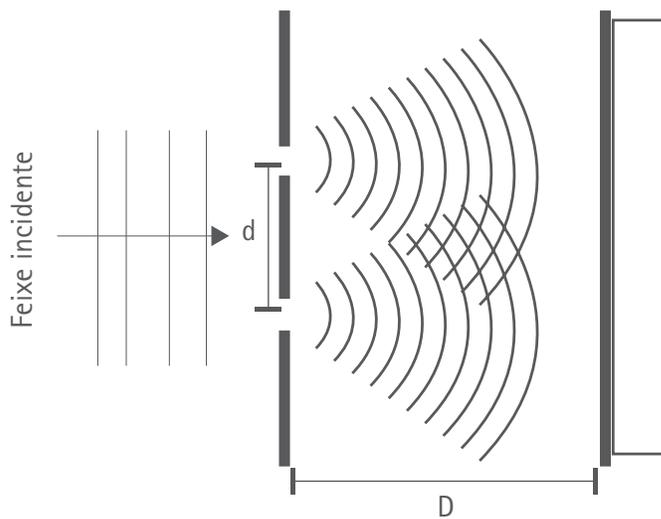


Figura 1.1: Um feixe de laser incide sobre uma tela onde foram feitas duas fendas separadas pela distância d . No anteparo é observada a figura de interferência.

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

1.1.1 Roteiro: Experiência 1 - 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;

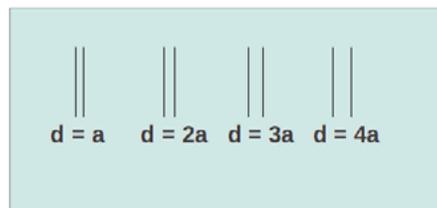


Figura 1.2: Esquema para a construção das fendas duplas.

- 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;
- Repita este procedimento para todos os pares de fendas;

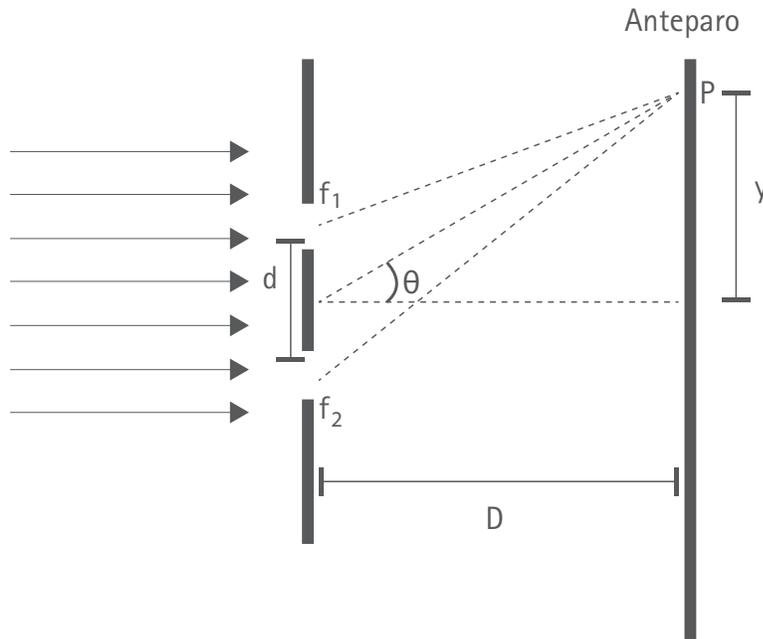


Figura 1.3: Arranjo experimental para a observação da figura de interferência. A separação entre as fendas f_1 e f_2 é d e a placa está à distância D do anteparo. O ponto P se refere à um máximo ou mínimo de intensidade conforme equação 1.1.

- Usando a equação 1.1 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 1.3.
- Calcule o ângulo θ sabendo que,

$$\text{sen}\theta = \frac{y}{y^2 + D^2} \quad (1.2)$$

- Usando a equação 1.1 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.

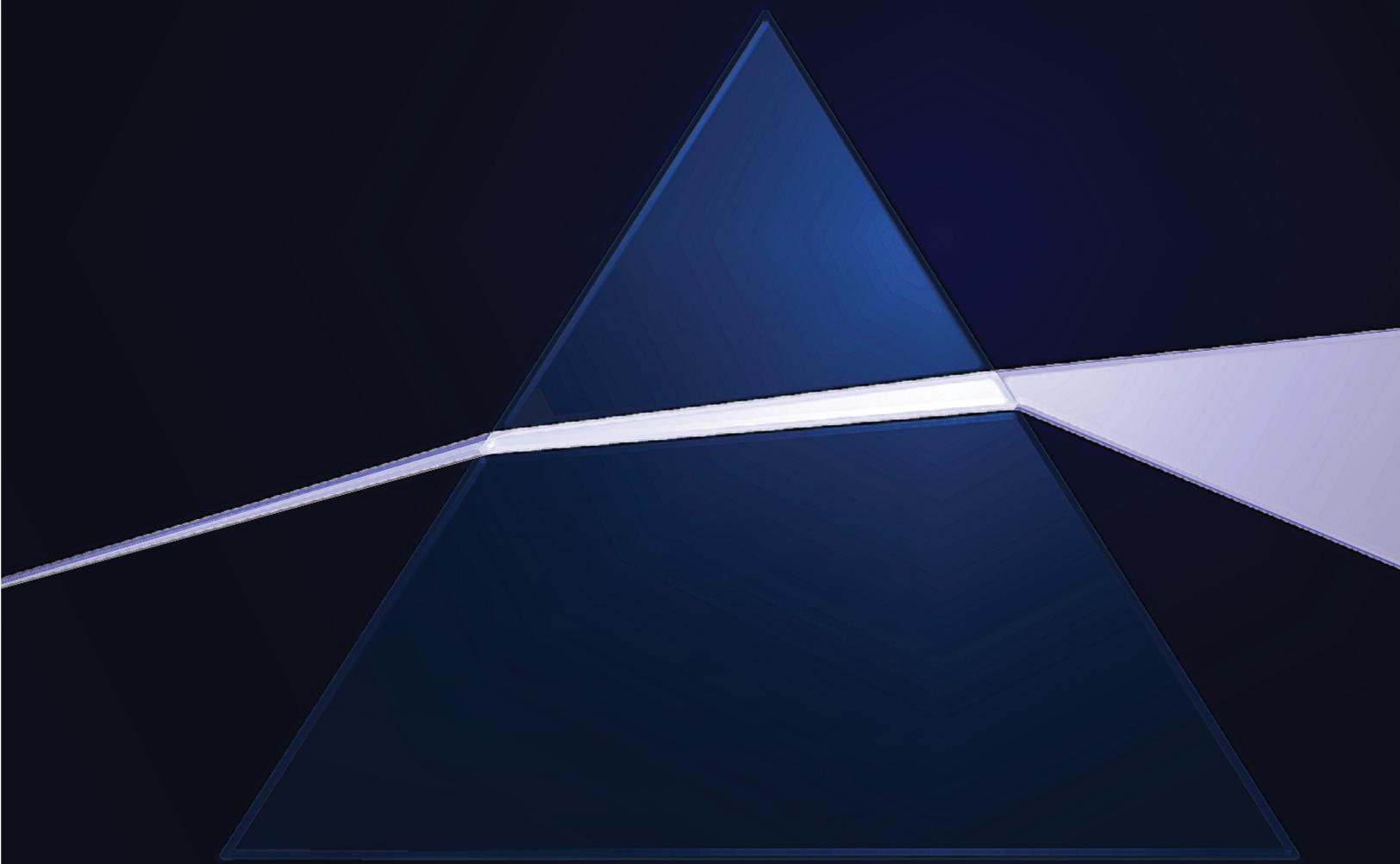
1.1.2 Bibliografia

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 Univesidade**, Editora UFMG (2007).

CAPÍTULO 2

Difração da Luz



2.1 Difração por fenda única

Introdução

Difração é o desvio ou o espalhamento de ondas por uma fenda ou um obstáculo. Se um feixe de luz atravessa uma única fenda, ou um obstáculo, com dimensões proporcionais ao comprimento de onda λ observaremos em um anteparo a formação do espectro de difração similar às figuras de interferência, caracterizado por uma região central de intensidade máxima (máximo central) seguidas de máximos de menor intensidade simetricamente distribuídos. O engenheiro francês Augustin Fresnel (1788-1827) foi quem explicou o fenômeno da difração baseado na teoria ondulatória. Se aumentamos o número das fendas, todas idênticas, paralelas e igualmente espaçadas teremos uma rede de difração. A figura 2.1 mostra espectro de difração produzido em um anteparo colocado à distância D de uma fenda única de largura d , por onde incide um feixe de luz de comprimento λ .

Podemos obter a posição dos mínimos do padrão de difração usando a equação

$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (2.1)$$

Para cada valor de m temos dois mínimos, um acima do eixo central e outro abaixo e a cada par de mínimos adjacentes existe um máximo.

Neste experimento vamos analisar a figura de difração formada em um anteparo quando um feixe de luz de comprimento de onda conhecido incide sobre um fio de cabelo. Vamos usar a equação 2.1 para calcular a espessura do fio de cabelo.

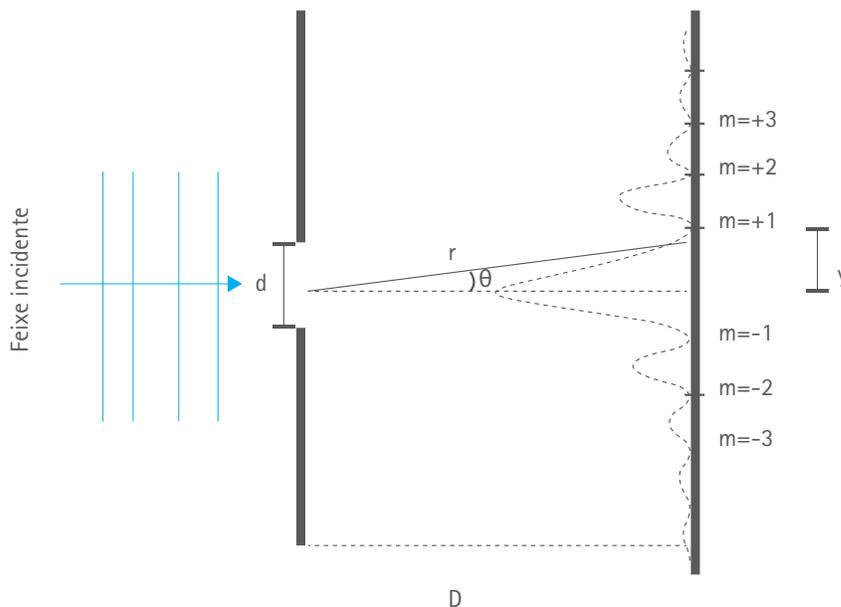


Figura 2.1: Espectro de difração da luz por uma fenda de largura d colocada à distância D de um anteparo. A largura do máximo central é igual à distância entre os dois primeiros mínimos adjacentes.

2.1.1 Roteiro: Experiência 2- Medida da espessura de um fio de cabelo

Objetivo

Neste experimento vamos analisar as diferentes figuras de difração produzidas quando um feixe de laser incide sobre uma fenda ou um obstáculo.

Material Utilizado

- Caneta laser com comprimento de onda conhecido;
- Anteparo;
- Régua ou papel milimetrado;
- Cartolina ou papel cartão;
- Fios de cabelo de diferentes espessuras.

15

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;
- Posicione o fio de cabelo de forma que o feixe de laser incida sobre ele. Você pode fazer uma moldura de papel para fixar o fio;
- Meça a distância D entre o fio de cabelo e o anteparo, observe a figura de difração produzida e copie a figura formada em uma folha de papel com o cuidado de reproduzir exatamente a mesma figura;
- Meça a distância entre dois mínimos adjacentes ao máximo central, tome a metade desse valor e obtenha o valor de y indicado na figura 2.1. Faça a medida para os quatro primeiros mínimos.
- Calcule o ângulo θ sabendo que, pela figura 2.1,

$$\text{sen}\theta = \frac{y}{y^2 + D^2} \quad (2.2)$$

- Anote essas medidas em uma tabela e use a equação 2.1 para calcular o diâmetro d do fio de cabelo. Obtenha o valor médio $\langle d \rangle$.
- Repita o procedimento variando a distância D .

Responda às questões

1. O que ocorrerá com a posição dos máximos e mínimos da figura de difração se mudarmos o comprimento de onda do feixe incidente? E se a largura da fenda for aumentada e diminuída? Verifique se suas conclusões estão de acordo com a equação 2.1.
2. Por que o centro da figura de difração é um ponto de intensidade máxima?

Sugestão

Use um fio de cabelo longo e observe a figura de difração para as diferentes partes do fio. Anote as mudanças observada para cada parte do fio.

2.1.2 Bibliografia

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

F. Catelli e S. Vicenzi, *Cad. Bras. Ens. Fís.* 19, 393 (2002).

A. L. Schawlow e S. M. Currys, *American Journal of Physics*, 42, 83 (1974).

2.2 Difração por um orifício circular

Introdução

O padrão de difração em uma abertura circular de diâmetro d é caracterizado por um disco luminoso cercado de anéis claros e escuros como mostra a figura 2.2.

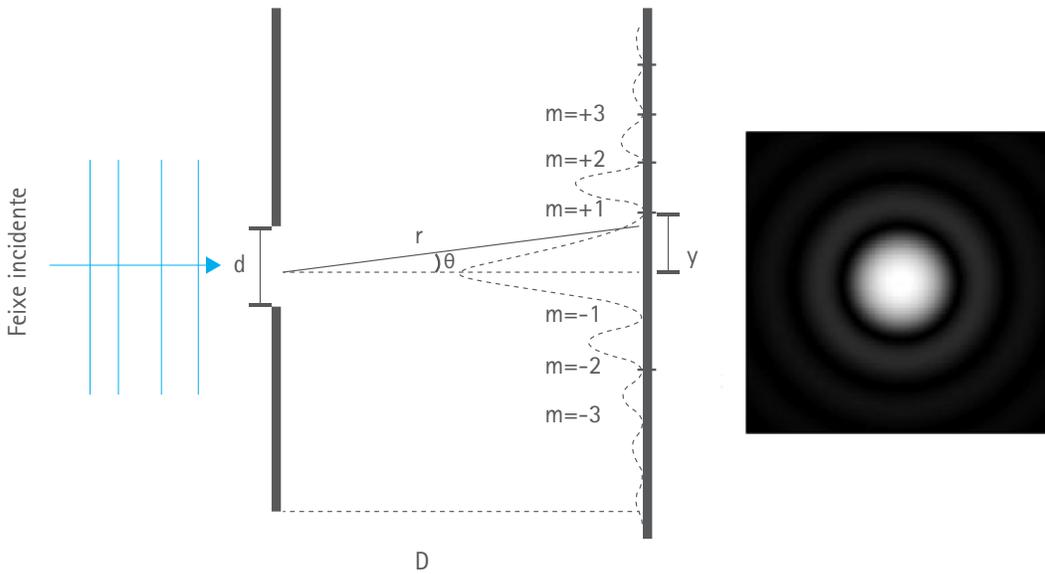


Figura 2.2: Espectro de difração da luz por uma fenda circular de diâmetro d colocada à distância D de um anteparo.

A posição do primeiro mínimo da figura de difração é dada por

$$\text{sen}\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (2.3)$$

Uma vez que $D \gg y$ podemos fazer a aproximação

$$\text{sen}\theta \approx \text{tg}\theta = \frac{y}{D} \quad (2.4)$$

Neste experimento vamos analisar a figura de difração formada em um anteparo quando um feixe de luz de comprimento de onda conhecido incide sobre um pequeno orifício.

2.2.1 Roteiro: Experiência 3- Medida do diâmetro de um orifício produzido por uma agulha de costura

Objetivo

Calcular o diâmetro de um orifício curcular por meio da figura de difração produ- zida.

Material Utilizado

- Caneta laser com comprimento de onda conhecido;
- Anteparo;

- Régua ou papel milimetrado;
- Papel alumínio;
- Agulha de costura com a ponta muito fina.

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;
- Em um pedaço de papel alumínio preso em uma moldura de papel faça um pequeno furo pressionando levemente a ponta da agulha de costura;
- Posicione o papel alumínio entre o laser e o anteparo e faça o feixe incidir diretamente no pequeno orifício. Quanto menor for este furo mais nítida será a figura de difração observada;
- Meça a distância entre a moldura com o orifício e o anteparo e observe a figura de difração produzida;
- Meça o diâmetro do anel formado pelos quatro primeiros mínimos de difração em torno do máximo central, tome a metade deste valor e calcule o ângulo θ com a ajuda da equação 2.4.
- Anote essas medidas em uma tabela e use a equação 2.3 para calcular o diâmetro d do orifício. Obtenha o valor médio $\langle d \rangle$.
- Repita o procedimento variando a distância D .

Sugestão

Faça outros furos de diâmetros diferentes e observe as figuras de difração produzidas.

2.2.2 Bibliografia

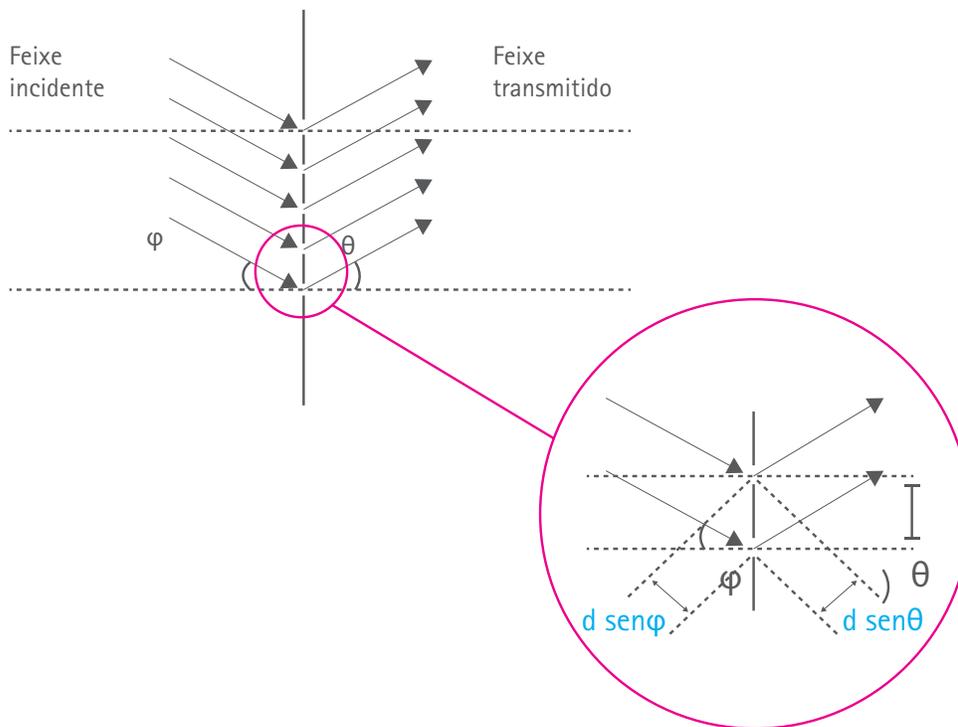
D. Halliday, R. Resnick e J. Walker; **Fundamentos de Física, Vol IV, Óptica e Física Moderna**, Editora LTC, 8a edição (2008).

F. Catelli e S. Vicenzi, **Cad. Bras. Ens. Fis.** 19, 393 (2002).

2.3 Redes de Difração: Dispersão e Resolução

Introdução

Uma rede de difração é formada por um conjunto de pequenas fendas ou obstáculos, igualmente espaçados, conforme mostra a figura 2.3. Se a luz incide sobre a rede de difração observaremos a formação de uma imagem no anteparo caracterizada por franjas cujas intensidades diminuem à medida em que se afastam do máximo central. Em geral, uma onda eletromagnética poderá sofrer desvios periódicos em sua fase e/ou amplitude ao incidir sobre uma rede de difração. A distância entre duas fendas consecutivas é denominada *constante da rede*.



19

Figura 2.3: Incidência oblíqua de um feixe luminoso sobre uma rede de difração. A luz incide sobre a rede em um ângulo ϕ e difrata fazendo um ângulo θ com a horizontal.

A diferença de caminho óptico entre dois raios (mostrado em destaque na figura 2.3) será

$$\Delta r = d \sin \theta + d \sin \phi \quad (2.5)$$

de forma que a condição para interferência construtiva pode ser obtida pela expressão

$$d \sin \theta + d \sin \phi = m \lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2.6)$$

Esta equação é conhecida como equação geral da rede de difração. Cada comprimento de onda λ define uma direção angular θ para a interferência construtiva. Com isso podemos usar a rede de difração para decompor o espectro de um feixe policromático, como a luz branca. A constante de rede d pode ser escrita em termos de uma frequência espacial f , dada em linhas/unidade de comprimento e definida como $f = \frac{1}{d}$ e a qualidade da rede é descrita por sua dispersão angular e resolução dada por, respectivamente

$$D_{\theta} = \frac{m}{\cos \theta} \quad R = N m \quad (2.7)$$

em que N é o número de linhas da rede iluminadas pelo feixe incidente. Quanto maior a dispersão angular D_{θ} ou a resolução R de uma rede de difração melhor é a capacidade da rede em separar dois comprimentos de ondas próximos de um feixe policromático incidente.

Neste experimento vamos construir e caracterizar redes de difração a partir de CDs e DVDs.

2.3.1 Roteiro: Experiência 4- Medida da constante de rede de um CD e um DVD.

Objetivo

Caracterizar uma rede de difração construída com CDs e DVDs.

Material Utilizado

- Caneta laser com comprimento de onda conhecido;
- CDs de diferentes marcas;
- DVDs de diferentes marcas;
- Régua ou papel milimetrado;
- Anteparo.

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 normalmente sobre o anteparo. Você pode usar a própria parede da sala como anteparo. Retire o espelho quando for efetuar as medidas;

- Retire o revestimento metálico do CD. Você pode fazê-lo colando uma fita adesiva sobre a face metálica, espere alguns instantes e remova;
- Posicione a rede de difração (CD) entre o laser e o anteparo. Ajuste o anteparo de forma que você consiga visualizar as duas primeiras ordens de difração ($m = 0, \pm 1$) em torno do máximo central, conforme a figura 2.4;

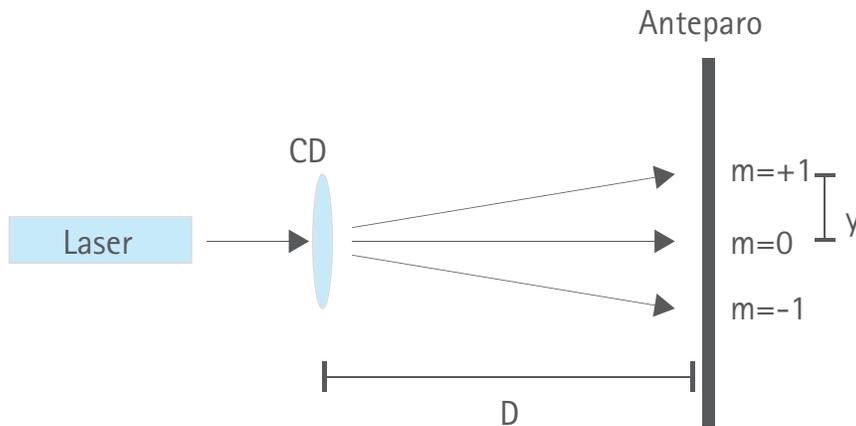


Figura 2.4: Esquema para a construção do arranjo experimental.

- Meça a distância D entre a rede e o anteparo;
- Meça a distância y entre o máximo central e o primeiro máximo na figura de interferência. Use a régua ou o papel milimetrado. Seja bastante cuidadoso ao fazer esta medida.
- Obtenha o ângulo θ e use a equação 2.6 para calcular a constante d da rede.
- Lembre-se que na sua montagem experimental o ângulo de incidência ϕ é zero.
- Use a equação 2.7 para calcular a dispersão angular D_θ .
- Estime o diâmetro da ponta laser e calcule o número de linhas iluminadas na rede de difração fazendo $N = \frac{\varphi}{d}$, em que φ é o diâmetro do laser. Obtenha a resolução R .
- Repita o procedimento usando o DVD como rede de difração.

Responda às questões

1. Em nosso experimento qual é a rede de difração mais eficiente, construída com o CD ou o DVD?
2. Uma das aplicações da rede de difração é na decomposição espectral da luz policromática. Você poderia explicar como isso ocorre?

3. Obtenha a equação da dispersão angular. Lembre-se que $D_\theta = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ e use a equação da rede tomando $\phi = 0$.

Sugestão

Substitua o CD/DVD por um pedaço de tecido (linho, por exemplo) ou por uma pena de galinha e observe as figuras de difração produzidas.

2.3.2 Bibliografia

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

F. Catelli e S. Vicenzi, Cad. Brás. Ens. Fís. 19, 393 (2002).

M. A. Cavalcante, V. Jardim e J. A. de A. Barros, Cad.Cat.Ens.Fís. 16, 154 (1999).

CAPÍTULO 3

A Velocidade da Luz



3.1 A velocidade da Luz

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. Uma série de 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 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ são a permissividade elétrica e 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:

$$c = \lambda \nu.$$

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

3.1.1 Roteiro: Experiência 5- Medida da velocidade da luz.

Objetivo

Medir a velocidade da luz.

Material Utilizado

- Forno de microondas;
- Prato para microondas;
- Marshmallows ou Tabletes 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 3.1 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.

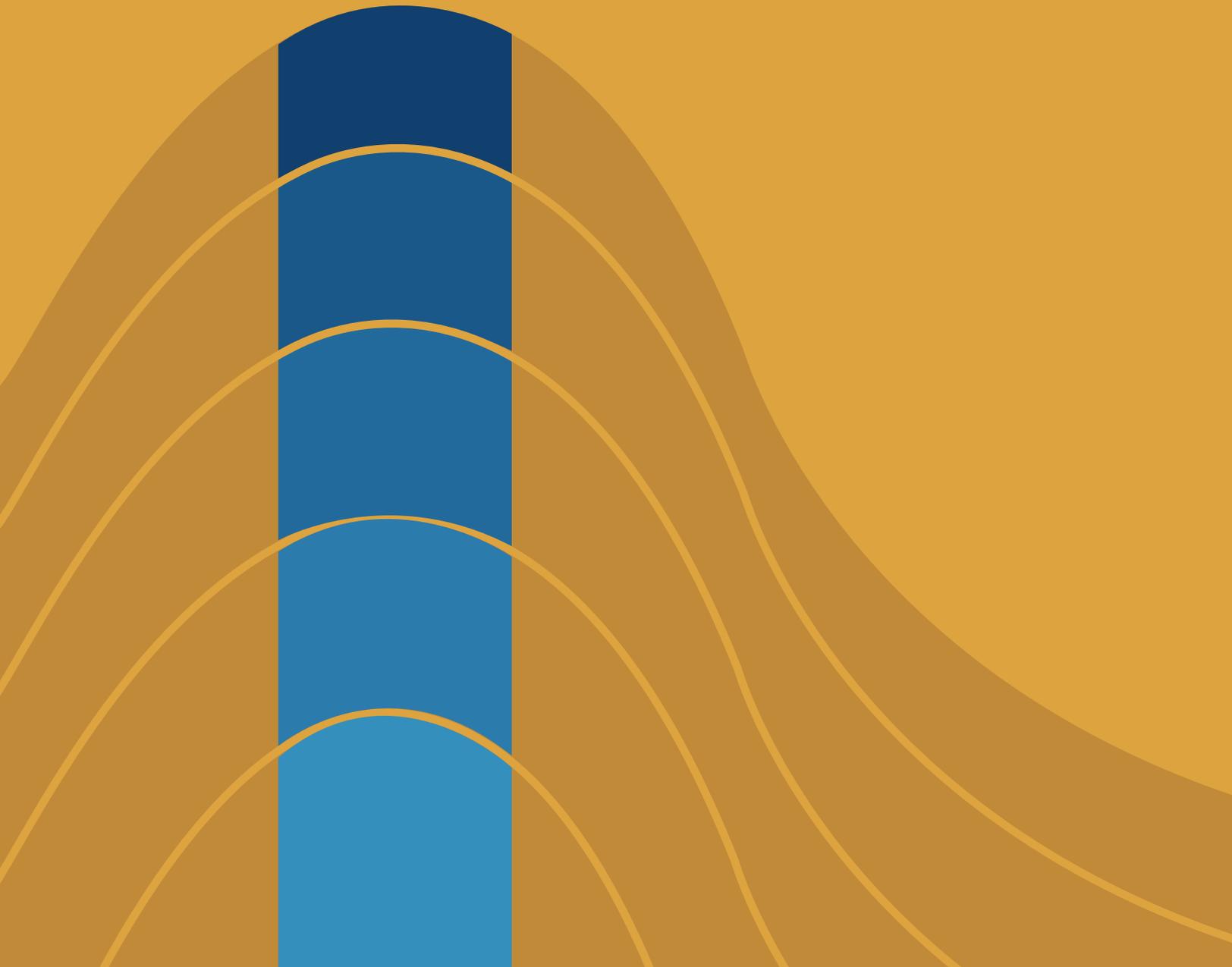
3.1.2 Bibliografia

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

R. H. Stauffer Jr, **The Physics Teacher** , 35 231 (1997).

CAPÍTULO 4

Radiação Térmica



4.1 Radiação de corpo negro

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 ele é considerado um corpo negro. De fato, essas matérias não refletem a luz incidente e portanto eles possuem a coloração negra.

A distribuição espectral da radiação de corpo negro é especificada pela chamada Radiação 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

$$R_T = \sigma T^4 \quad (4.1)$$

em que $\sigma = 5,67 \times 10^{-08} \text{W/m}^2 \text{K}^4$ 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

$$\frac{\nu_{max}}{T} = 2,898 \times 10^{-3} (m \times K) \quad (4.2)$$

em que ν_{max} é a frequência na qual RT 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.

4.1.1 Roteiro: Experiência 6- 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 estabeleça;
- 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?

4.1.2 Bibliografia

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

R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica*, Editora Campus, 27 Edição (1979).

<http://www.if.ufrgs.br/oei/exp/exp3.html>. Acesso em 26/06/2012.

4.2 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 $RT(\lambda)d\lambda$ da forma

$$R_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}d\lambda \quad (4.3)$$

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 a *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,

$$\bar{E} = 0, \Delta E, 2\Delta E, 3\Delta E... \quad (4.4)$$

Planck queria mostrar que $\bar{E} \approx kT$ quando a diferença de energia ΔE fosse pequena e que $E \approx 0$ 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

$$\Delta E = h\nu. \quad (4.5)$$

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

$$h = 6.63 \times 10^{-34} J.s \quad (4.6)$$

A expressão obtida por Planck para a radiância é da forma

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

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 idéia de Planck, recupera a idéia 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.

4.2.1 Roteiro: Experiência 7- 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;

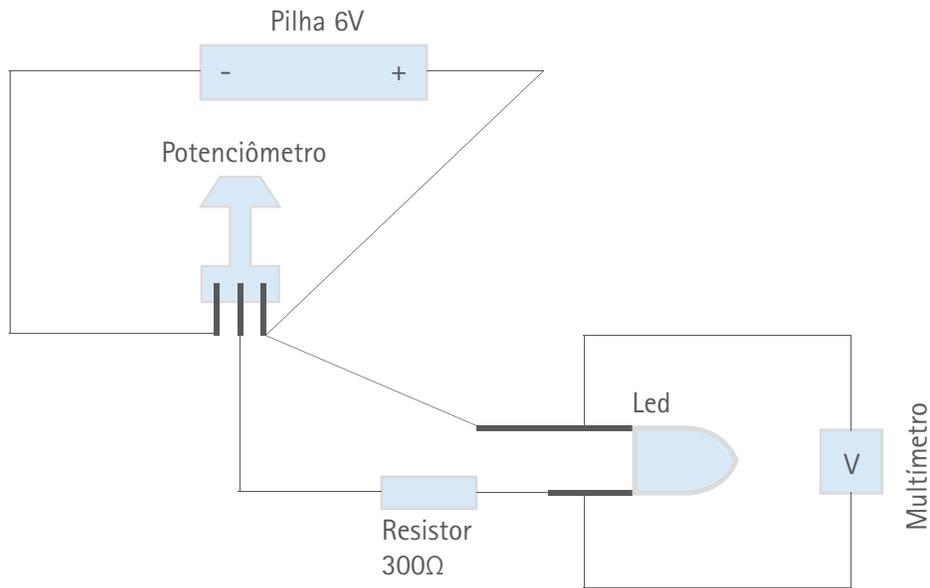


Figura 4.1: Arranjo experimental para a medição da constante de Planck

- 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

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

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

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 $V_{\text{limiar}} \times \nu$. 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.

4.2.2 Bibliografia

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

R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica*, Editora Campus, 27 Edição (1979).

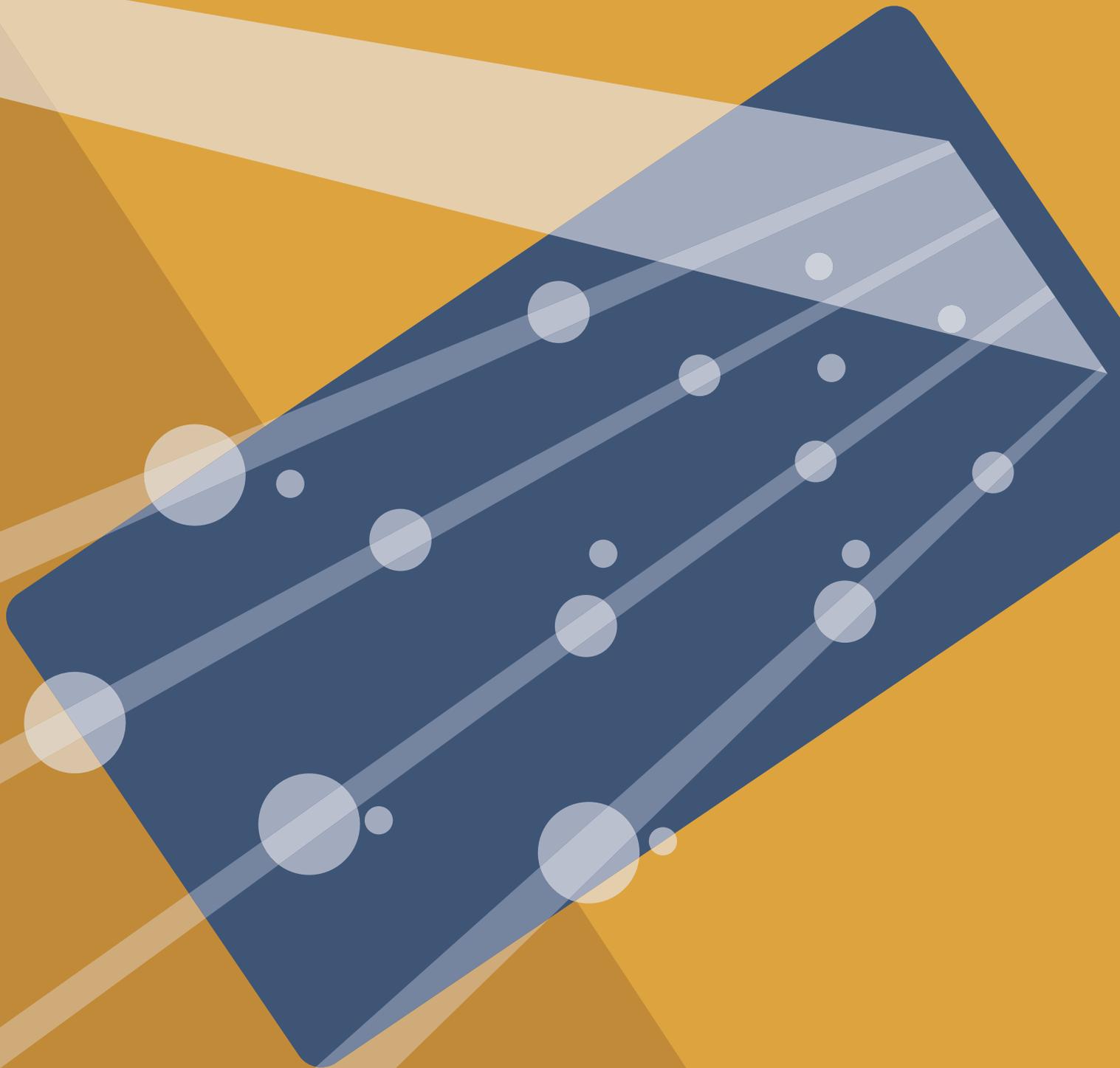
S. L. de Moura, F. I. da Silva, F. C. M. da Silva e J. A. V. dos Santos, *Química Nona na Escola*, 33, 246 (2011)

M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro e R. Haag, *Física na Escola*, 6, 75 (2005).

P. H. Dionisio, *Cad. Brás. Ens. Fís.*22, 147 (2005).

M. A. Cavalcante e R. Haag, *Rev. Bras. Ensino Fís.*27, 343 (2005).

O Efeito Fotoelétrico



5.1 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 5.1.

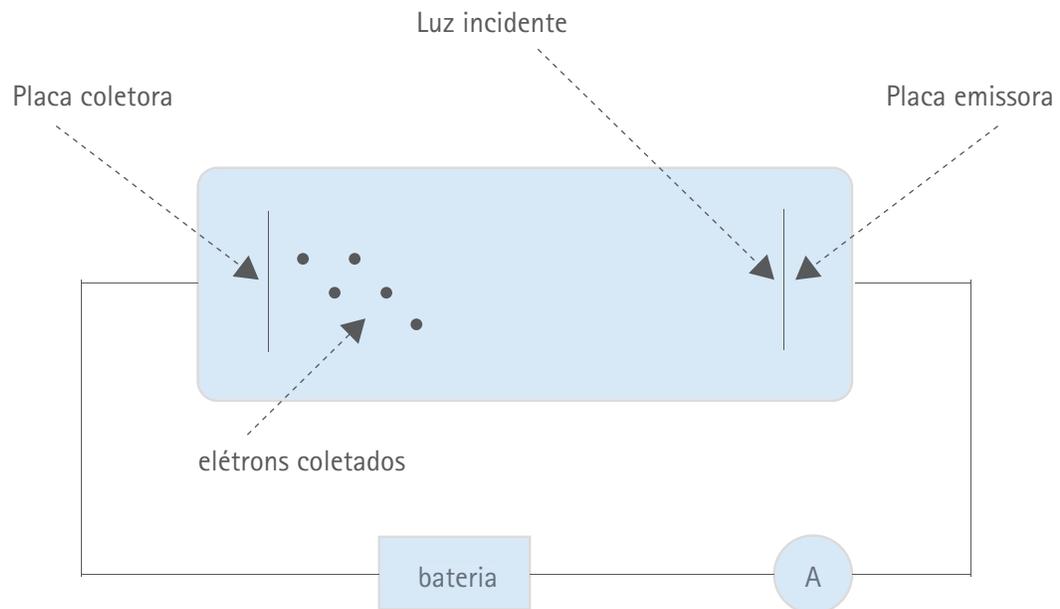


Figura 5.1: Diagrama esquemático para observar o efeito fotoelétrico.

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 5.2 mostra a corrente fotoelétrica em função da diferença de potencial.

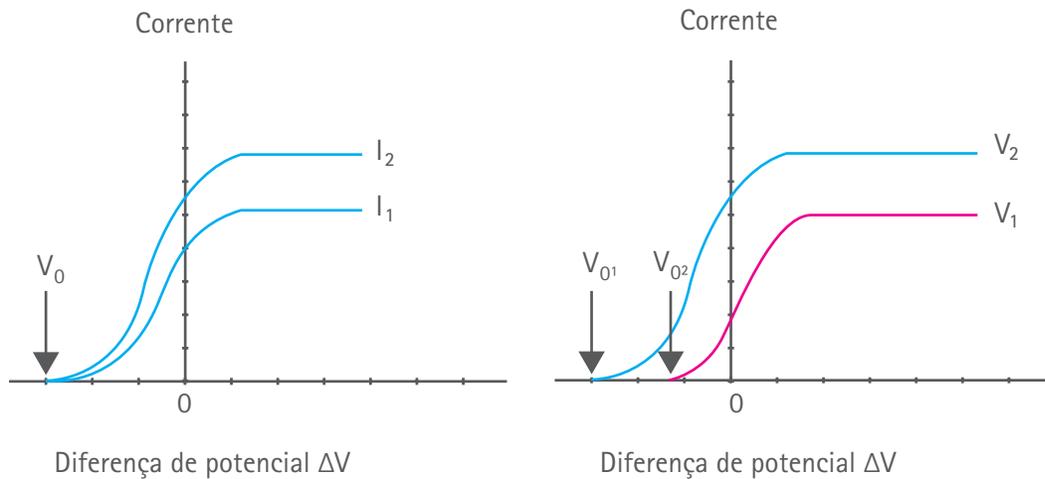


Figura 5.2: Variação da corrente fotoelétrica com a diferença de potencial aplicada às placas. I_1 e I_2 são as intensidades da luz incidente, ν_1 e ν_2 são as frequências e V_0 é o potencial de corte.

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 $|\Delta V| = V_0$, 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 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 $\Delta U = -e\Delta V$, 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_0 também aumentaria. No entanto, os experimentos mostravam que o potencial de corte não depende da intensidade I da fonte incidente como mostra a figura 5.2 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

$$h\nu = \varphi + K_{max} \quad (5.2)$$

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

38

$$h\nu_o = \varphi \quad (5.3)$$

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.

5.1.1 Roteiro: Experiência 8- 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 tampo 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.

5.1.2 Bibliografia

R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica*, Editora Campus, 27 Edição (1979).

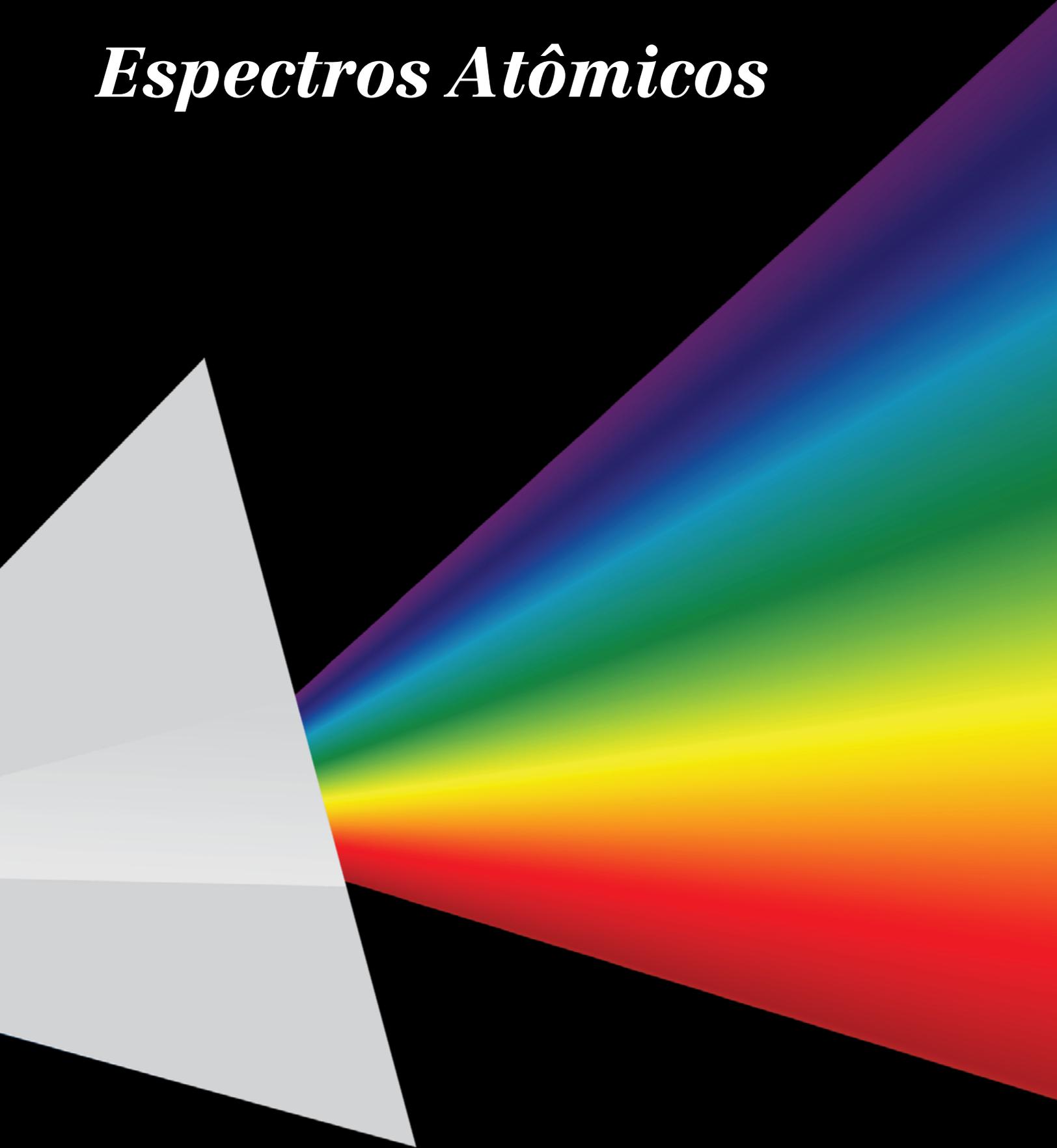
E. de C. Valadares e A. M. Moreira, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 15, 359 (1998).

M. A. Cavalcante, C. R.C. Tavoraro, D. F. de Souza e J. Muzinatti, *Física na Escola*, 3, 24 (2002).

D. R. de O. Pereira e O. Aguiar, *Rev. Ponto de Vista*, 3, 65.

CAPÍTULO 6

Espectros Atômicos



6.1 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 6.1 mostra um esquema dos diferentes espectros na região do visível.

41

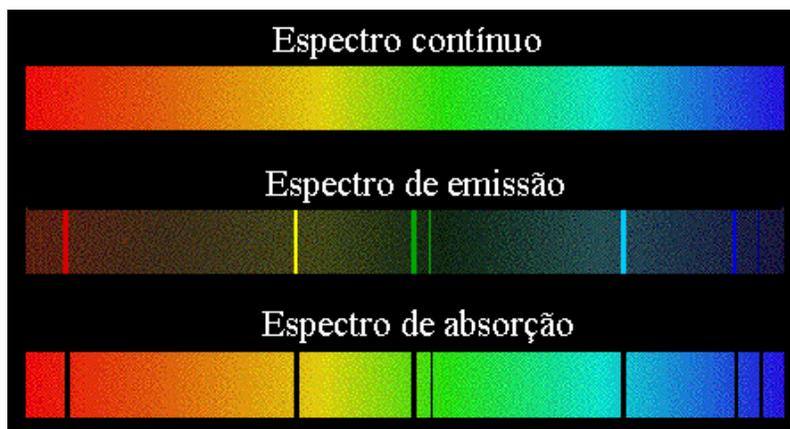


Figura 6.1: Diferentes espectros na região do visível. A figura foi retirada da referência 5.

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. 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

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} \quad (6.1)$$

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

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

42

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 6.1 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.

6.1.1 Roteiro: Experiência 9- 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.

6.1.2 Bibliografia

R. Einsberg e R. Resnick, *Física Quântica*, Editora Campus, 27a edição (1979).

M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro e R. Haag, *Física na Escola*, 6, 75 (2005).

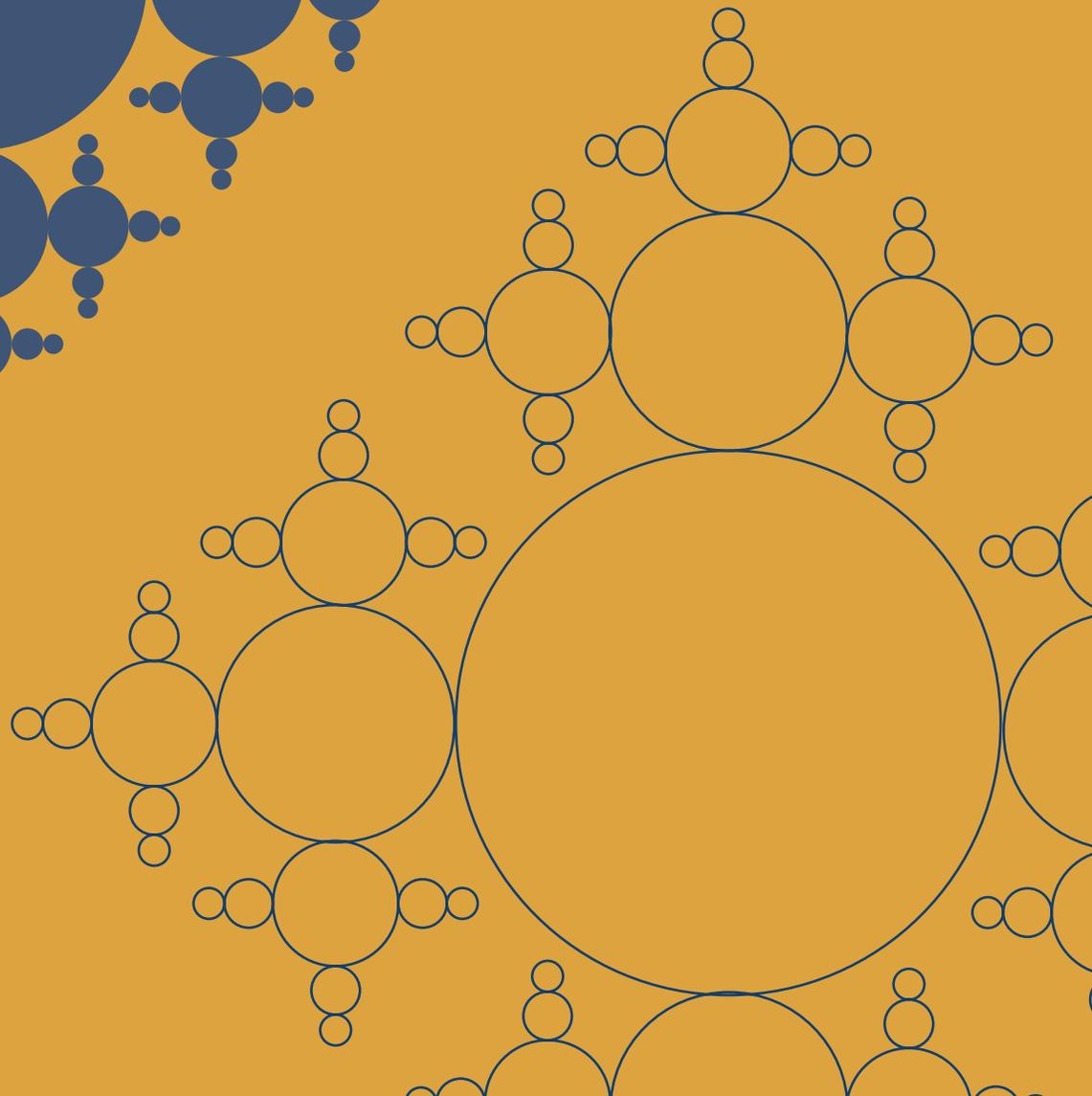
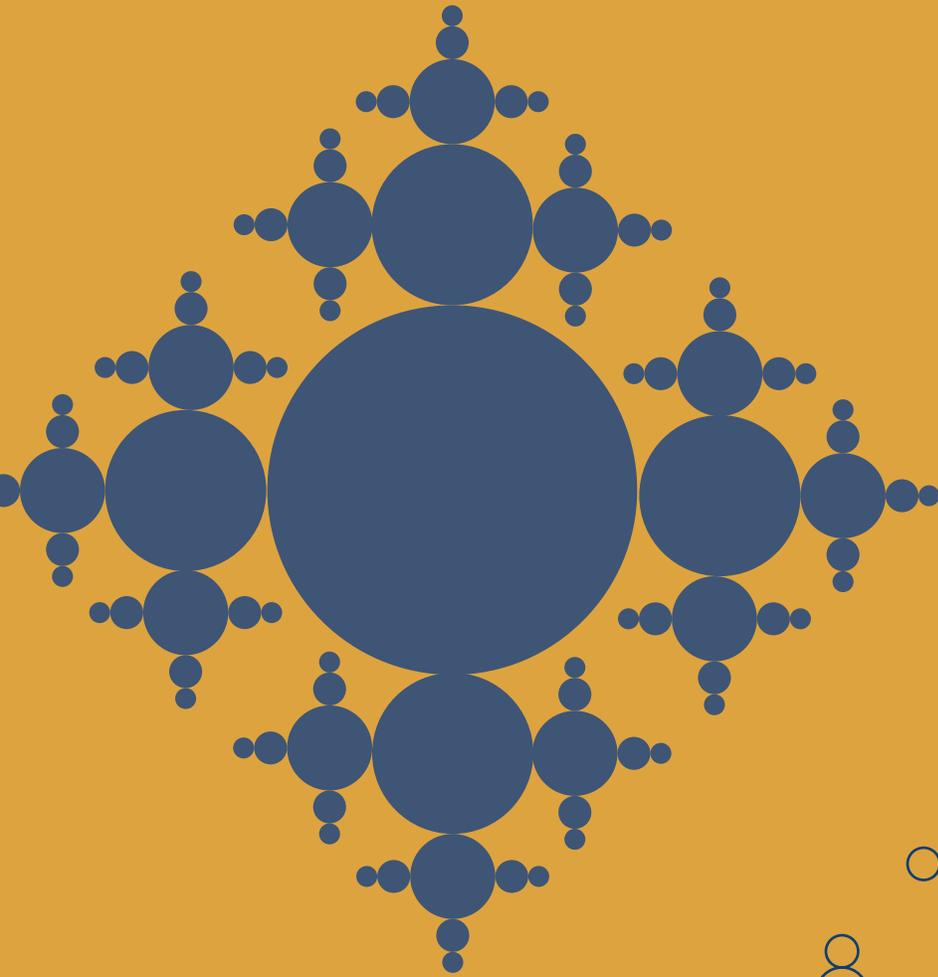
M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro, *Cad.Cat.Ens.Fís.*, 18, 297 (2001).

Quântica para iniciantes, <http://www.pontociencia.org.br/quantica.htm>. Acesso em 28/06/2012.

CAPÍTULO 7

Fractais

Autor: Carlos Augusto Cardosos Passos



7.1 Fractais

Introdução

A geometria euclidiana foi considerada como a melhor que descreviam o mundo em que vivemos. No entanto, esta geometria não descreve bem a forma de uma nuvem, de uma montanha e do litoral porque não são esferas, cones e arcos, respectivamente. Isto implica dizer que a natureza se apresenta com formas irregulares, de forma que uma nova geometria é necessária para descrever tais formas da natureza. Com este problema em mente matemáticos do final do século XIX e início do século XX propuseram uma nova geometria denominada *Fractal*.

A palavra Fractal origina-se no Latim *fractus*, cujo significado é fragmentado, fracionado. Além disso, “Fra” indica a ideia de fração (parte), e “tal” pode significar total (todo). Fractais são formas geométricas elementares, tal que o padrão se replica indefinidamente, de forma a gerar figuras complexas que preservam e o mais interessante caracteriza o todo. Por isso, podem apresentar dimensão espacial fracionária. Daí, a ideia de que a parte está no todo e o todo está na parte [1,2].

Convém diferenciar os conceitos de dimensão usado na geometria fractal. A dimensão topológica d pode assumir valores inteiros maiores e iguais a zero [1,3]:

1. $d = 0$ significa um ponto;
2. $d = 1$ significa uma linha;
3. $d = 2$ significa um plano;

A dimensão de imersão é a menor dimensão do espaço em que o objeto pode estar contido. Vejamos alguns exemplos [1,3]:

- para um fio de cabelo esticado, de densidade uniforme e homogêneo $d = 1$;
- para uma argola bem fina, de densidade uniforme e homogênea $d = 2$;
- para uma mola bem fina, de densidade uniforme e homogênea $d = 3$;

Outro exemplo é quando você observa uma folha de papel A4 sobre uma mesa, a dimensão d é igual a 2. E se você amassa esta folha tal que ela se assemelhe a uma esfera, agora a dimensão d é igual a 3. Desta forma queremos chamar tua atenção para o fato de que a dimensão está relacionada com uma medida. Vejamos como isto se dá.

Se quisermos medir a altura de uma pessoa, ou mais simplesmente uma linha reta. Podemos usar certa escala r , como por exemplo, um lápis (sem ponta) e contar quantos lápis N são necessários para equiparar o tamanho da pessoa (ou linha reta). Portanto,

nossa medida fornece $M = N r^1$ para seu comprimento. Usaremos a letra M para qualquer tipo de medida. A nossa precisão será cada vez melhor se consideramos um lápis cada vez menor. Isto fica mais evidente para nós quando requeremos medir altura de uma pessoa, quanto menor for o lápis (a escala) mais nos aproximamos da “não linearidade” da altura uma pessoa.



Figura 7.1: Lápis com uma escala para medir comprimento.

Se desejamos medir a área de uma página do livro de física. Para facilitar escolher quadrados de tamanho r e cuja área seja r^2 . Assim, a área da página será $M = N r^2$.

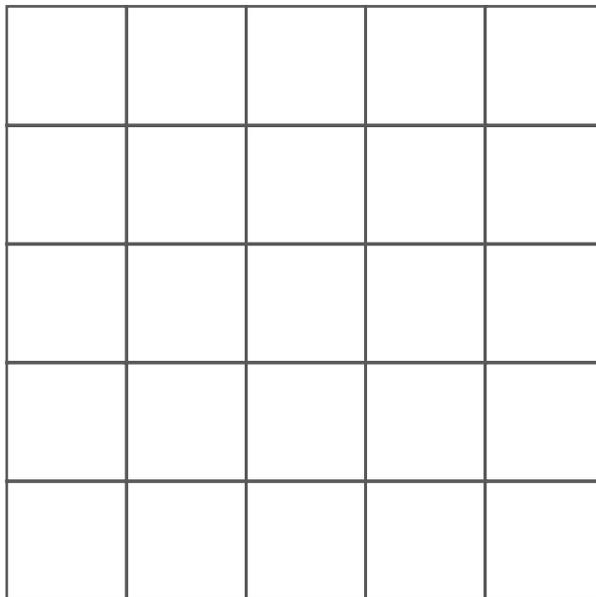


Figura 7.2: A área de uma folha de papel sendo medida por um quadrado padrão

Ressaltamos mais uma vez que, quanto menor for a escala r , nossa medida torna-se mais precisa.

Poderemos, então, fazer a seguinte generalização[1]

$$M = N r^d \quad (7.1)$$

Onde A é uma constante, r é um comprimento característico e d é a sua dimensão. Nesta experiência, o objetivo é medir a dimensão fractal de diferentes bolinhas de papel amassadas. A proposta é fazer a bolinhas de papel com diferentes massas e relacionar com raio de cada “esfera”.

7.1.1 Roteiro: Experiência 10 - Fractais

Objetivo

Estudar as dimensões fractais.

Material Utilizado

- 1 folha de papel A4;
- 1 tesoura;
- 1 paquímetro (ou régua milimetrada);
- 1 papel log-log e/ou milimetrado.

Procedimento

Voce deverá cortar a folha de papel A4 sempre em partes iguais, fazer um conjunto de esferas de papel amassado e medir o diâmetro. Para tanto, faça o seguinte

- divida uma folha de papel A4 em dois pedaços iguais como ilustrado na Figura 7.3;
- um dos pedaços faça uma bolinha de forma que cada uma fique mais próximo de uma esfera;
- divida um dos pedaços em duas partes iguais, com um dos pedaços faça uma bolinha novamente.
- divida novamente um dos pedaços em duas partes iguais;
- continue até obter 7 pedaços de papel de tamanhos diferentes. O menor pedaço entre eles rotule de 1, a segunda menor de 2, e assim por diante;

- para facilitar, a massa da folha 1 será usada como a unidade de massa, tal que se tenha: $M_1 = 1$, $M_2 = 2$, $M_3 = 4$, $M_4 = 8$, $M_5 = 16$, $M_6 = 32$ e $M_7 = 64$. Registre isto em uma tabela; lha de papel A4
- com um paquímetro, meça o diâmetro D de cada bolinha e registre o raio $r = D/2$ na tabela com seus respectivos M ;
- estime a incerteza do raio e anote também na tabela;
- construa um gráfico em papel milimetrado de $M \times r$. Observe que os pontos não são lineares;
- para linearizar este gráfico, coloque os pontos em papel log-log ou encontre o logaritmo natural de cada valor da tabela. Registre os novos valores em outra tabela e construa um gráfico em papel milimetrado.

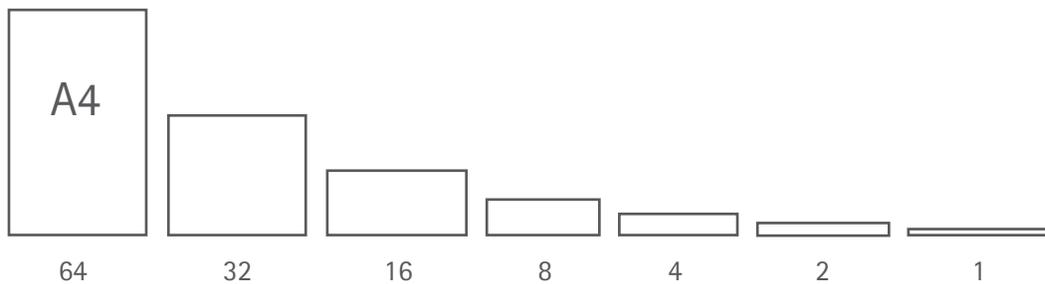


Figura 7.3: Procedimento para cortar a folha de papel A4

Da relação

$$M = N r^d$$

$$\ln M = \ln A + d \ln r \quad (7.2)$$

- compare o valor do coeficiente angular com valor obtido na literatura, $d = (2,5 \pm 0,2)$.
- discuta se as bolinhas podem ser consideradas fractais.

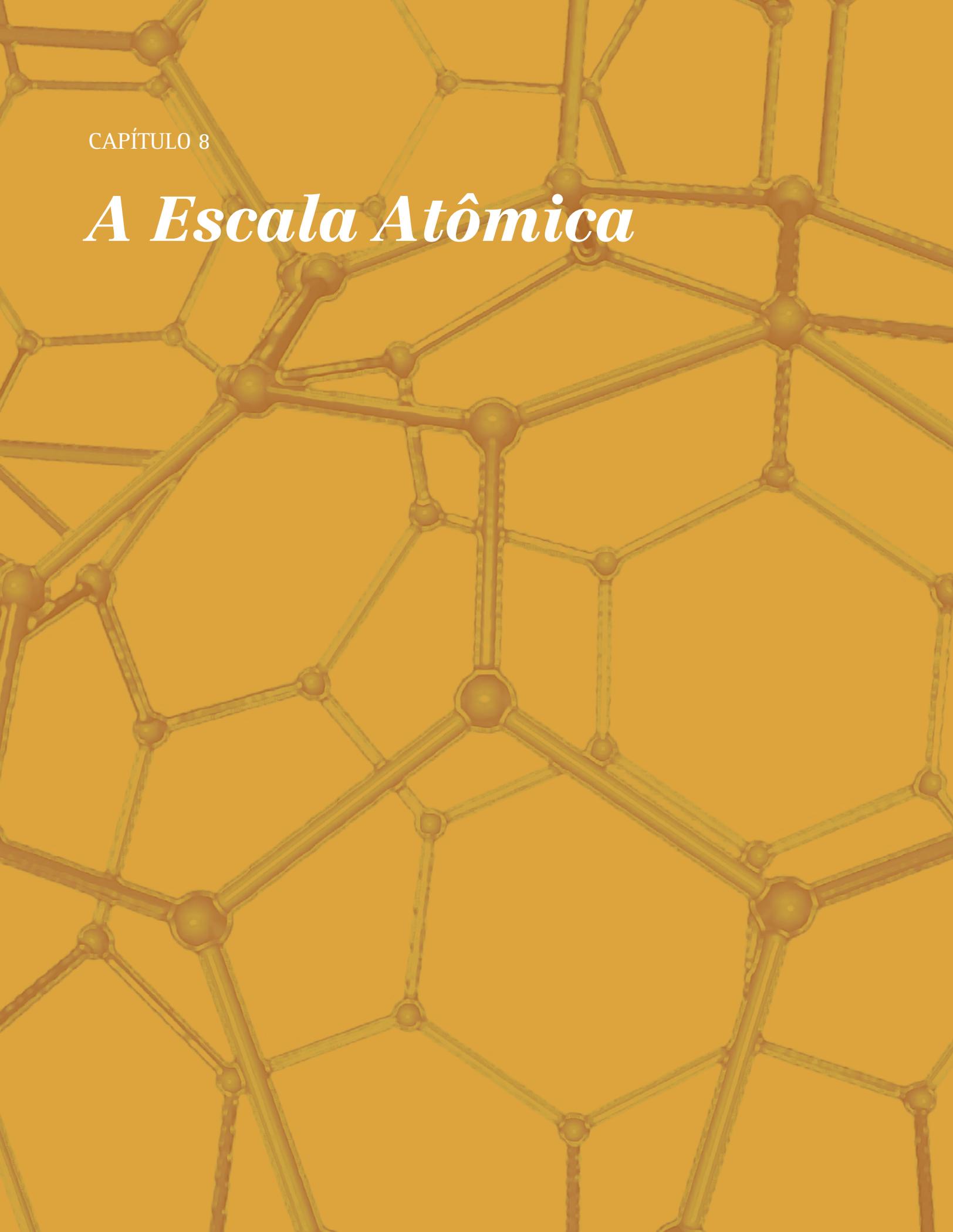
7.1.2 Bibliografia

M. Amaku, M. Morales, L. B. Horodyski-Matsushigue e Pascholati P. R. Rev. Bras. Ens. Fis. 23, 422 (2001).

<http://www.teoriadacomplexidade.com.br/fractais.html>. Acesso em 01/06/2012.

Apostila de Laboratório de Física Experimental I: Roteiros de Experiências, Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense.

<http://www.rpm.org.br/conheca/fractais.pdf>. Acesso em 01/06/2012.

The background of the page is a detailed, golden-yellow molecular structure. It consists of a network of interconnected spheres (atoms) and rods (bonds), forming a complex, crystalline lattice. The spheres are shaded to give a three-dimensional appearance, and the rods are also rendered with depth. The overall color is a warm, golden-brown hue.

CAPÍTULO 8

A Escala Atômica

8.1 O Grafeno

Introdução

O carbono é um dos elementos químicos fundamentais da natureza. Dependendo da forma como os átomos de carbono se ligam, teremos diferentes estruturas com diferentes propriedades. A figura 8.1 mostra os chamados *alótropos de carbono*.

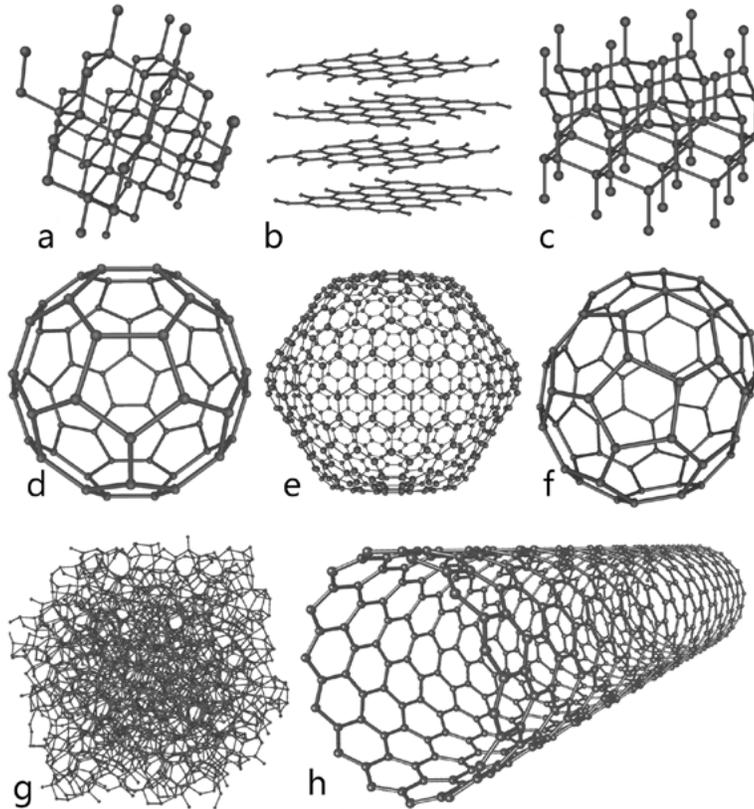


Figura 8.1: Alguns alótropos de carbono: a) Diamante; b) Grafite; c) Lonsdaleita; d) Fulereo C_{60} ; e) Fulereo C_{540} ; f) Fulereo C_{70} ; g) Carbono Amorfo; h) Nanotubo de carbono. A figura foi retirada da referência 5.

O grafite é uma destas formas de carbono e é usado em inúmeras aplicações industriais, como por exemplo, em lubrificantes. A forma popularmente conhecida é usada no lápis. Em 2010, pesquisadores da Universidade de Manchester, na Inglaterra, ganharam o prêmio Nobel por terem observado, pela primeira vez, uma única folha de grafite, o chamado Grafeno. O grafeno é uma estrutura unidimensional composta de átomos de carbono arranjados em forma hexagonal. O grafeno possui inúmeras qualidades: É o mais fino de todos os materiais conhecidos; é cerca de 100 vezes mais resistente que o aço; suporta uma corrente seis ordens de grandeza maior do que o

cobre; é um excelente condutor térmico e elétrico, dentre outras. Isso torna o grafeno uma importante descoberta do nosso século. Provavelmente, sempre que você usa seu lápis (ou lapiseira) uma folha de grafeno é produzida. O grafite é formado por várias folhas de grafeno empilhadas e a distância entre uma folha e outra é de aproximadamente $3,354A^{\circ}$. A distância entre dois átomos de carbono da rede é de aproximadamente $1,42A^{\circ}$.

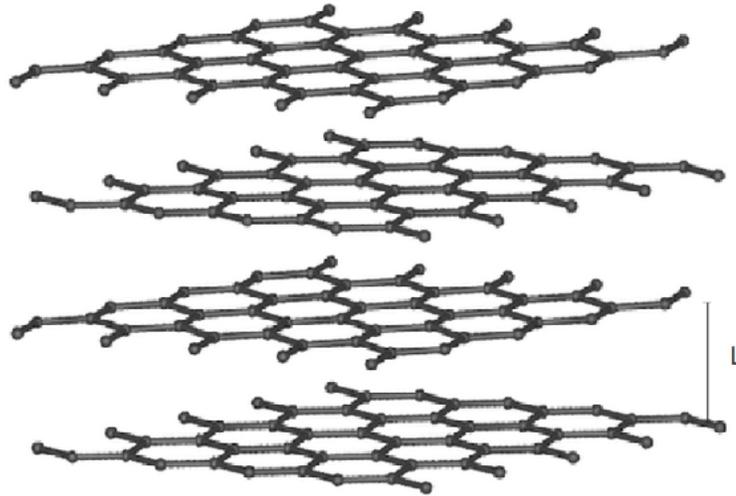


Figura 8.2: Estrutura do grafite formado pelo empilhamento de folhas de grafeno. Os valores típicos de $L=3,354A^{\circ}$. A figura foi retirada da referência 5.

8.1.1 Roteiro: Experiência 11- Quantas folhas de grafeno possui uma linha desenhada à lapis?

Material Utilizado

- Grafite de dureza e diâmetros distintos. Escolha os modelos HB e 2B e os diâmetros 0.5mm, 0.7mm e 0.9mm;
- Régua;
- Papel milimetrado;
- Multímetro.

Procedimento

- Meça o comprimento de cada amostra de grafite;

- Precisamos conhecer a resistividade do grafite. Para isso tome as amostras de grafite e faça a medida direta da resistência usando o multímetro na escala de resistência (200k Ω), conforme o esquema abaixo.

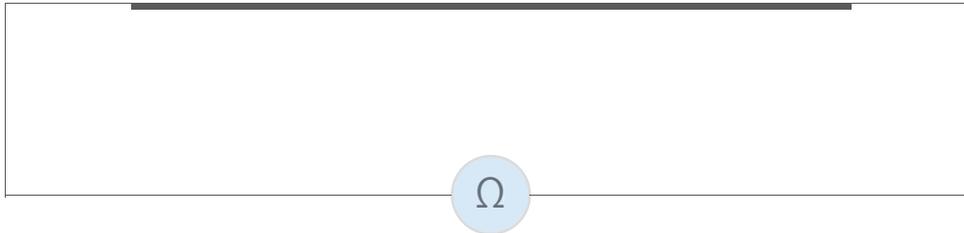


Figura 8.3: Medida direta da resistência de diferentes amostras de grafite para o cálculo da resistividade.

Para o grafite de comprimento L e seção transversal de área A a resistividade é dada por

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (8.1)$$

em que R é a resistência.

- Preencha a tabela abaixo com os dados medidos e calcule a resistividade ρ . Obtenha o valor médio $\langle \rho \rangle$. Lembre-se que a área da seção transversal de um cilindro é $A = \pi r^2$;

HB	0.5mm	0.7mm	0.9mm
L			
R			
A			
ρ			
2B	0.5mm	0.7mm	0.9mm
L			
R			
A			
ρ			

Figura 8.4: Tabela 1

- Em uma folha de papel milimetrado faça o desenho de um retângulo de comprimento $L = 150\text{cm}$ e largura $l = 4\text{mm}$, conforme a figura 8.5. Faça a figura para os

dois tipos de grafite. Preencha toda a figura e tom e cuidado para que nenhuma parte da figura fique sem cor. É esta figura que vamos usar para medir a espessura de grafite depositado;

- Meça a resistência R variando com o comprimento L da linha. Para isso coloque um terminal do multímetro no ponto zero da linha varie até a distância 15cm.
- Faça um gráfico de $R \times L$ e por meio de uma regressão linear, obtenha o coeficiente de inclinação da reta.

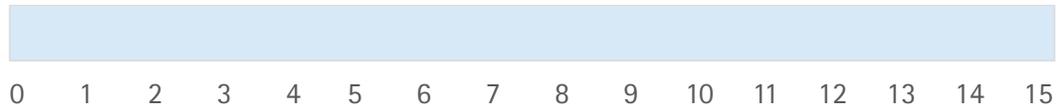


Figura 8.5: Figura desenhada com as duas amostras de grafite.

Use a expressão anterior escrita agora na forma

$$R = \frac{\rho}{le} L \quad (8.2)$$

em que e é a espessura e le é área da linha desenhada. Note que $\frac{\rho}{le}$ nos dá a inclinação da reta $R \times L$. Então

$$e = incl \times \frac{l}{p}$$

- Calcule o melhor valor para a espessura da linha e estime o desvio da medida.
- Repita o procedimento para as duas amostras de grafite.
- Estime a quantidade de folhas de grafeno em sua linha.
- Estime o número de átomos de carbono em sua linha.

8.1.2 Bibliografia

A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov e A. K. Geim, Rev. Phys. Mod. 81, 109 (2009).

Alice Newcombe, The thickness of a pencil line. Disponível em: <http://www.pencilpages.com/articles/thickness.doc>.

P. A.B. Schulz, Física na Escola 8, 4 (2007).

J. C. da S. Borges, M. P. de Lima e C. C. de M. Braga, Ciência na Tela 2, 1 (2009).

<http://nanohoje.blogspot.com.br/2011/04/caros-navegantes-hoje-vamos-conhecer.html>

CAPÍTULO 9

*Física Experimental
para Portadores
de Necessidades
Especiais*

Autor: Marcos Tadeu D'Azevedo Orlando

9.1 Introdução

Este capítulo foi criado com base em discussões no ano de 2011, onde verificamos que existia uma realidade para os alunos de licenciatura que até então não havíamos discutido: o ensino da Física para portadores de necessidades especiais. Isso nos motivou a pensar sobre esse novo paradigma que denominamos como Física Experimental para Portadores de Necessidades Especiais. Com este paradigma tornou-se um importante objeto de criatividade para os alunos, uma vez que pouco se havia trabalhado as necessidades especiais dos alunos e uma Física de Baixo Custo. Usando uma combinação dos paradigmas de baixo custo com o paradigma das necessidades especiais procuramos atingir uma proposta adequada ao Brasil. Durante seis anos de pesquisa ficaram claros a opção dos estudantes pelo paradigma da Física de Baixo Custo. Neste paradigma, apresenta-se a Física através de experimentos que podem ser realizados a um custo de até R\$ 10,00 ou algo em torno de US\$ 4.00. A grande novidade foi associar esse paradigma com o de necessidades especiais. Neste caso o desafio foi enorme e motivador. Este capítulo apresenta um exemplo de experiência. A proposta apresenta a estrutura abaixo:

56

1. Plano de Aula. 2. Roteiro do Experimento.

O plano de aula é o que entendemos ser um material que é repassado ao colega professor que terá de desenvolver um experimento numa sala de aula, longe de nosso contato. O roteiro do experimento é um relato que o aluno deverá seguir para desenvolver os conhecimentos de física indicados.

Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

9.2 A analogia para ensinar o conceito do efeito fotoelétrico para Deficientes Visuais

Objetivo Geral

Tendo em vista a falta de material específico para trabalhar portadores de necessidades especiais em sala de aula, propusemos aqui uma nova proposta que temos desenvolvido no Grupo de Física Aplicada direcionada a atender aos professores do ensino de ciências. Observando o paradigma do Baixo Custo associado ao da Física experimental para portadores de necessidades especiais desenvolvemos aqui uma proposta de analogia experimental usando o tato de deficientes visuais para associar o fenômeno do efeito fotoelétrico.

Objetivo Específico

O objetivo desse experimento é descrever o fenômeno de efeito fotoelétrico através do tato para transmitir a noção física analógica à deficientes visuais. Com isso, além do professor poder ensinar o efeito fotoelétrico usando analogia aos alunos em geral, como é comumente feito em sala de aula, este experimento permite que o professor seja capaz de ensinar o mesmo conceito para alunos com deficiência visual (cegos ou com pouca visão).

9.2.1 Fundamentação Teórica

O conceito do efeito fotoelétrico se baseia no entendimento de Einstein que a energia de um fóton está associada a sua frequência. Como cada cor está associada a um comprimento de onda no meio em que ela anda, pode-se associar a rugosidade de uma lixa comum usada para lixar paredes ao comprimento de onda. Dessa forma, lixas com grande rugosidade associam-se via tato a cores com comprimento de onda curtas (como a cor violeta). Por outro lado, lixas com baixa rugosidade associam-se a comprimentos de onda longos e suaves (como a cor vermelha). O professor pode orientar um portador de deficiência visual a compreender o efeito fotoelétrico utilizando o tato, conforme sugerimos abaixo:

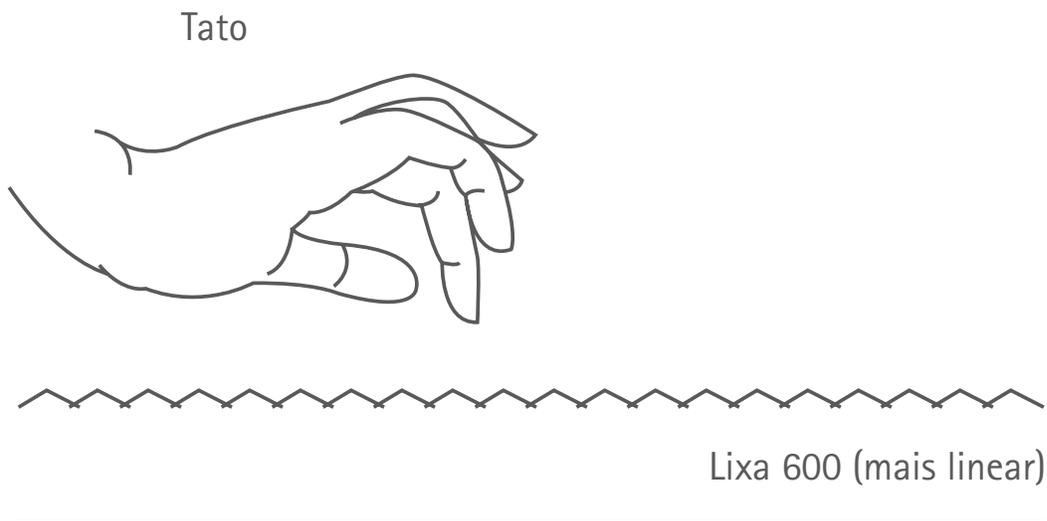


Figura 9.1: Lixa 600 - Associada a cor Vermelha, pois arranca pouco material quando esfregada sobre uma superfície com uma pressão fixa.

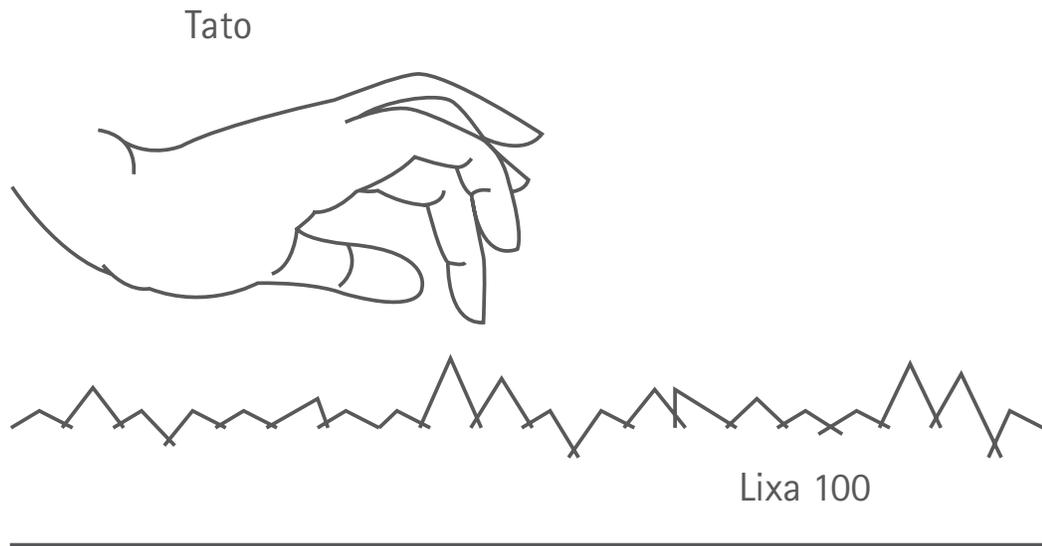


Figura 9.2: Lixa 100 - Associada à cor Violeta, pois arranca muito material, quando esfregada sobre uma superfície com uma pressão fixa.

9.2.2 Roteiro: Experiência 12- Efeito Fotoelétrico para Deficientes Visuais

Objetivo

Descrever o fenômeno de efeito fotoelétrico através do tato para transmitir a noção física analógica à deficientes visuais.

Material Utilizado

- Lixas 100, 200, 300, 400, 500 e 600;
- 6 Retalhos de madeira de 5cm x 10cm x 1cm;
- 6 Retalhos de madeira de 20cm x 20cm e 5cm;
- Cola;
- Régua;
- Tesoura.

Procedimento

A experiência será realizada no período de aula, sendo programada para duas aulas. A primeira delas para a montagem e teste do experimento e a segunda para a realização das discussões e conclusões relativas à experiência desenvolvida.

O experimento usa o tato como um sentido análogo à visão. A ideia é mostrar através do tato que frequências mais altas “arrancam” mais matéria e de forma mais profunda da superfície dos materiais.

Para auxiliar o entendimento desse efeito de “arrancar elétrons” da superfície iniciamos a montagem do experimento tomando muito cuidado com o tato. É necessário que o aluno possa de forma segura esfregar as lixas numa superfície de madeira utilizando sempre a mesma pressão. Desta forma pode-se comparar o efeito da granulidade sem influência da pressão de contato.

Para normalizar esse “esfregaço” o aluno deve construir 6 (seis) substratos de madeira idênticos para afixar em cada um deles uma lixa com dimensões normalizadas. Esse substrato pode ser um pequeno pedaço de madeira de 5cm x 10cm x 1cm.

Cada lixa deve ser colada com sua parte lisa no substrato de madeira. A associação de cores escolhidas para serem verbalizadas são o VERMELHO, LARANJA, AMARELO, VERDE, AZUL, VIOLETA. A associação do tato a cor deve ser a seguinte:

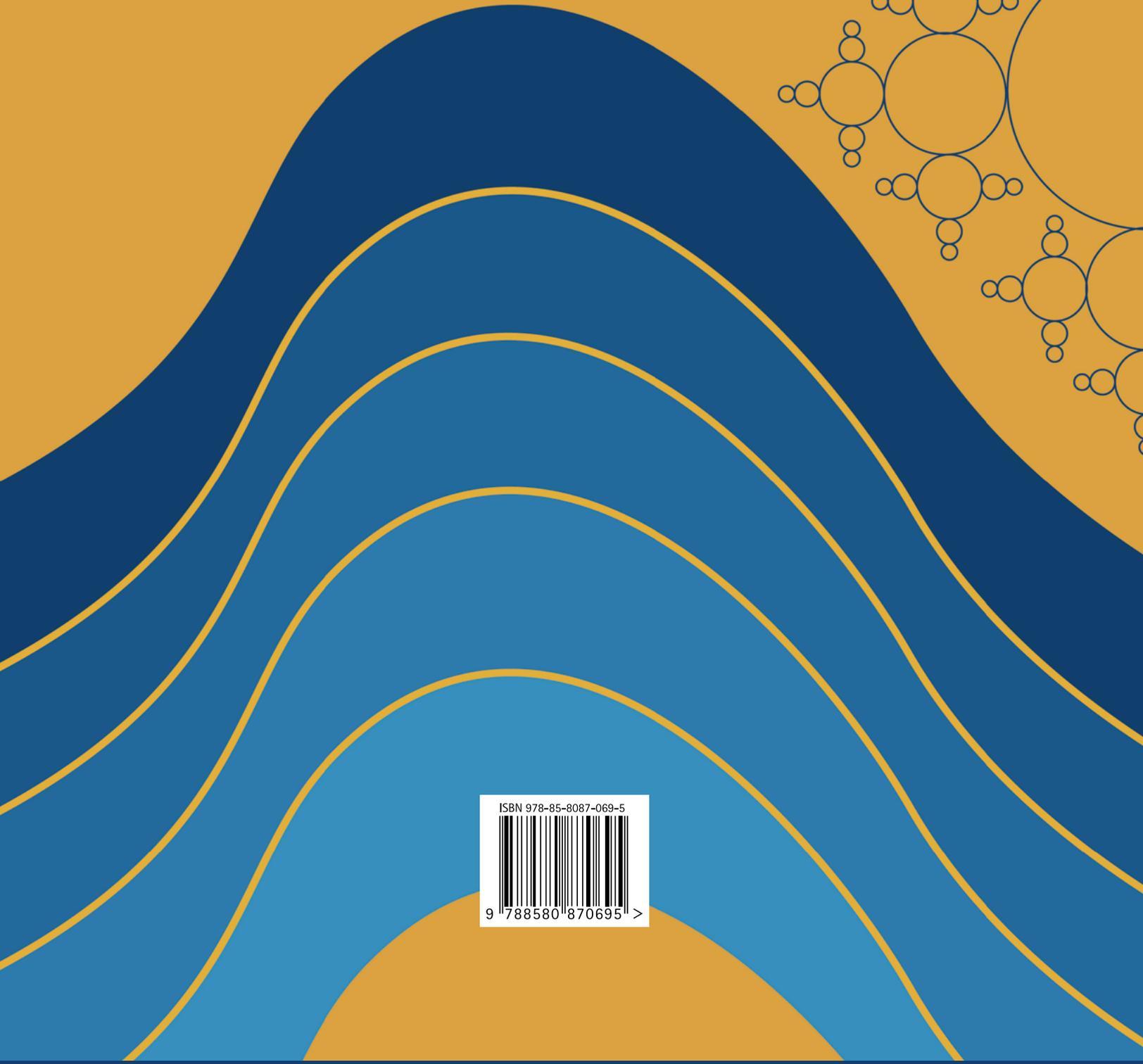
- Lixa de granulometria 600 - VERMELHO
- Lixa de granulometria 500 - LARANJA
- Lixa de granulometria 400 - AMARELO
- Lixa de granulometria 300 - VERDE
- Lixa de granulometria 200 - AZUL
- Lixa de granulometria 100 - VIOLETA

O aluno deve esfregar o primeiro dispositivos por 5 (cinco) vezes em um pedaço de madeira de 30cm x 30cm e 5cm. Esse mesmo procedimento deve ser repetido por mais 5 (cinco) vezes em outros cinco pedaços de madeira de de 30cm x 30cm e 5cm cada um Após o experimento o aluno deve, utilizando o tato desenvolver a analogia entre o Efeito Fotoelétrico proposto por Einstein e a rugosidade das lixas. Espera-se com isso que o aluno seja capaz de responder a seguinte pergunta: quem arranca mais material (elétrons)?

Responda às questões

1. Porque os feixes de luz são desviados, quando se propagam, de um meio para outro de meio (por exemplo, do ar para o vidro)?
2. O que determina em qual direção um feixe vai ser refratado?
3. Porque os feixes refratam em diferentes direções?
4. Com base na analogia entre rugosidade e comprimento de onda, qual a cor que “arranca” partículas do metal, quando atinge a superfície:





UFES

www.neaad.ufes.br
(27) 4009 2208

