

Física para Farmácia

4310181

5º Experimento

Difração

Flávio C. D. Moraes, fmoraes@if.usp.br

Renato F. Jardim, rjardim@if.usp.br

Instituto de Física, Universidade de São Paulo
São Paulo

2014

Difração

Introdução

Difração é um fenômeno ondulatório, que ocorre quando uma parte de uma frente de onda, seja de uma onda sonora, de matéria, ou luz, é obstruída por um objeto, de forma a sofrer uma alteração de fase ou amplitude.

Embora, não exista nenhuma distinção física relevante entre “difração” e “interferência”, normalmente o termo “interferência” é empregado para falar sobre fenômenos que envolvem poucas ondas, enquanto “difração” é usada para falar sobre fenômenos de muitas ondas.

Um exemplo visível da difração ocorre quando as ondas do mar colidem com barreiras, como diques ou molhes, e esse fenômeno é importante, por exemplo, para entender a formação de baías e lagoas.

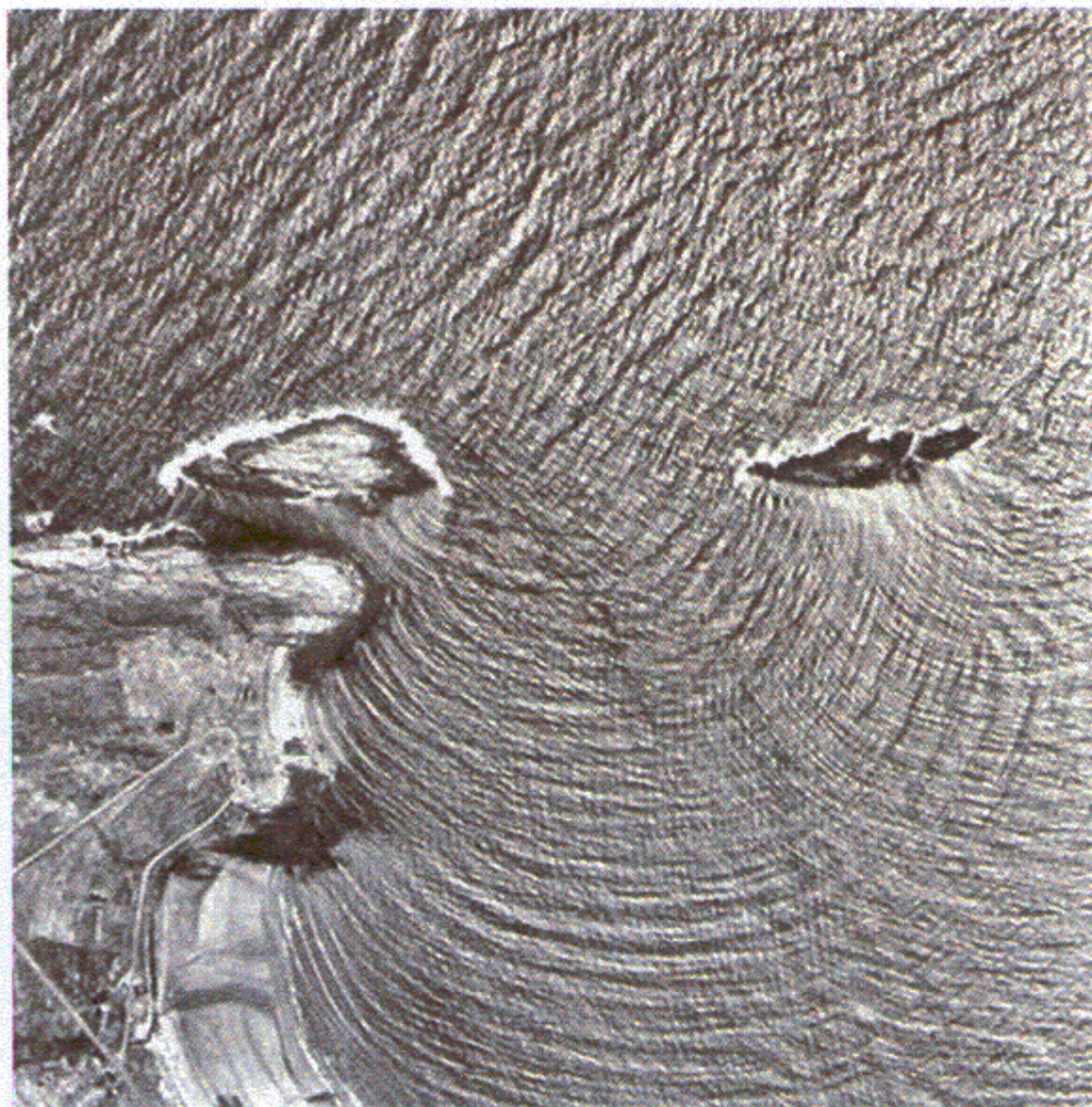


Figura 1 – Difração de ondas do mar em rochas.

Em ondas sonoras a difração faz com que o som contorne objetos como colunas ou paredes, tornando possível escutar alguém que não esteja visível. Entretanto, os efeitos da difração deixam de ser notáveis quando o tamanho do “obstáculo” é significativamente maior do que o comprimento de onda da onda. Isso justifica o porquê da luz não contornar objetos macroscópicos.

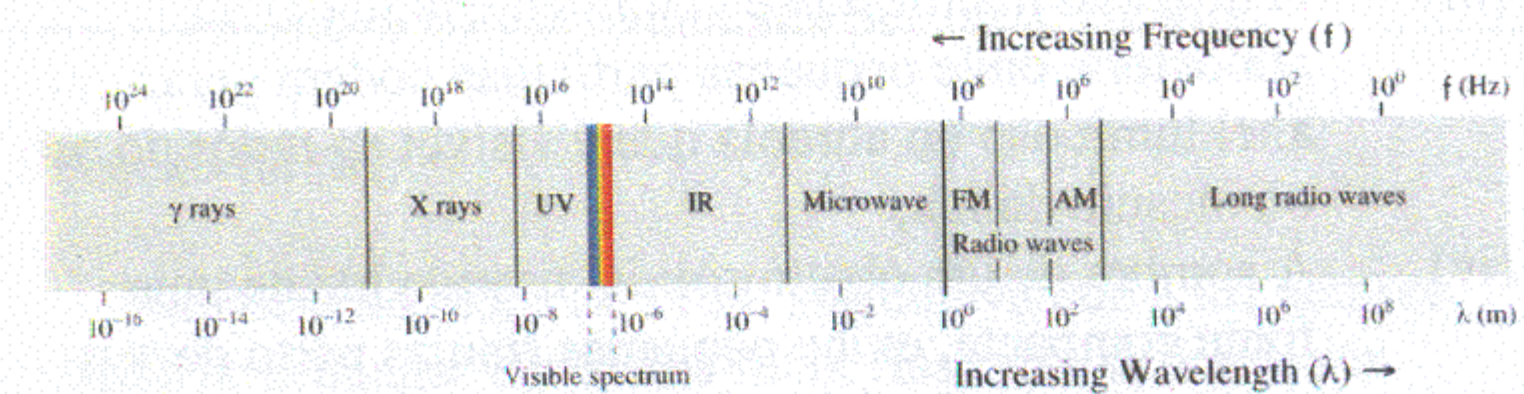


Figura 2 – Comprimento de onda de diferentes ondas eletromagnéticas. Ondas sonoras audíveis tem frequência entre ~ 20 e 20MHz.

É importante salientar que até mesmo partículas sofrem difração, pois de acordo com os princípios da mecânica quântica, qualquer objeto físico tem propriedades ondulatórias. Entretanto, o comprimento de onda de uma partícula está relacionado inversamente com a sua massa e sua velocidade, e costuma ser muito pequeno. Para se ter uma idéia, no experimento de Davisson–Germer, que evidenciou pela primeira vez a propriedade ondulatória de elétrons, o comprimento de onda do feixe de elétrons utilizado, que tinha energia cinética em torno de 54eV, era de 0,167 nm, o que é equivalente ao comprimento de onda de raio-X. Prótons e nêutrons, com a mesma velocidade, vão ter um comprimento de onda cerca de 1800 vezes menor.

Para observar a difração dos elétrons Davisson e Germer atiraram o feixe de elétrons através de uma rede cristalina de níquel. A distância entre os planos do cristal é de 0,091 nm. Já para efeitos de difração com luz visível bastam objetos ou fendas da ordem de centenas de nanômetros.

Exemplos do fenômeno da difração que envolvem luz no visível são:

- (i) As trilhas muito justapostas de um CD ou mesmo de um DVD atuam como uma grade ou rede de difração no sentido de formar o tradicional padrão de um arco-íris quando uma pessoa olha para o disco;
- (ii) O mesmo princípio pode ser ampliado no sentido de construção de uma grade ou rede de difração que produz um padrão qualquer de difração, como é o caso de hologramas presentes em cartões de crédito;
- (iii) A difração manifesta-se claramente também na atmosfera, onde pequenas partículas podem gerar um anel luminoso ou aureola que é visível ao redor do sol ou mesmo da lua;
- (iv) A sombra de um objeto sólido, usando luz de uma fonte compacta, exibe pequenas franjas perto de seus cantos, o que não deixa de ser resultado da difração.

A difração pode ser também um problema para aplicações tecnológicas: ela, por exemplo, determina limites para a resolução de uma câmera fotográfica, de telescópios e de microscópios.

Os efeitos da difração da luz foram observados e caracterizados pela primeira vez por Francesco M. Grimaldi, em meados de 1665. Ele foi o responsável pelo termo difração (do latim *diffringere*, que significa quebrar, espedaçar, fazer em pedaços) referindo-se ao fato de que a luz “partia-se ou quebrava-se” em pequenos pedaços após “colidir” com pequenos objetos, baseado no princípio de Huygens, de que cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado como uma fonte de ondas esféricas.

Um pouco mais tarde, por volta de 1670, James Gregory observou o fenômeno da difração causado pela incidência de luz em uma pena de passarinho, o que pode ser considerado como a descoberta da primeira rede de difração. Entretanto, o experimento mais fantástico acerca do fenômeno foi desenvolvido por Thomas Young (1803) que observou um claro padrão de difração com duas fendas quase que justapostas. Ao explicar seu experimento invocando a interferência causada pelas ondas provenientes das duas fendas, ele deduziu que a luz deveria se propagar como ondas. Os experimentos de Young foram

complementados por Augustin-Jean Fresnel (entre 1815 e 1818), que inclusive efetuou todos os cálculos que são utilizados até o momento. Esses cálculos foram muito importantes e forneceram suporte para a teoria que assume um comportamento ondulatório para a luz. Na verdade, essa teoria ondulatória havia sido proposta no passado, por volta de 1690, por Christiaan Huygens e que foi revigorada por Thomas Young. O fato é que o comportamento ondulatório da luz, de certa forma, foi contrário à idéia corpuscular da luz sustentada por Isaac Newton.

Difração da luz

Newton, ao redor de 1704, sustentava que a luz sempre deveria se propagar em linhas retas. Isso não deixa de ser verdadeiro quando alguém pensa em grandes escalas. Entretanto, em escalas pequenas, ou da ordem do seu comprimento de onda λ , a luz quando encontra, por exemplo, um obstáculo, tende a contorná-lo, e é espalhada em ângulos oblíquos. Isso é o chamado fenômeno da difração e é explicado pelo princípio de Huygens.

O princípio de Huygens, entretanto, não é suficiente, por si só, para explicar todos os detalhes da difração, e precisou ser corrigido por Fresnel, que adicionou o conceito de interferência, criando o princípio de Huygens-Fresnel. O princípio preconiza que **“cada ponto desobstruído de uma frente de onda, em um determinado instante, atua como uma fonte de onda esférica, com a mesma frequência que a onda original, e que a amplitude do campo ótico em qualquer ponto é dada pela superposição de todas as ondas esféricas, considerando suas amplitudes e fases relativas”**.

Isso pode ser visualizado na Figura 3, mostrada abaixo, ou seja, seguindo o princípio de Huygens-Fresnel, após encontrar uma fenda a luz é espalhada e gera fontes de ondas esféricas.

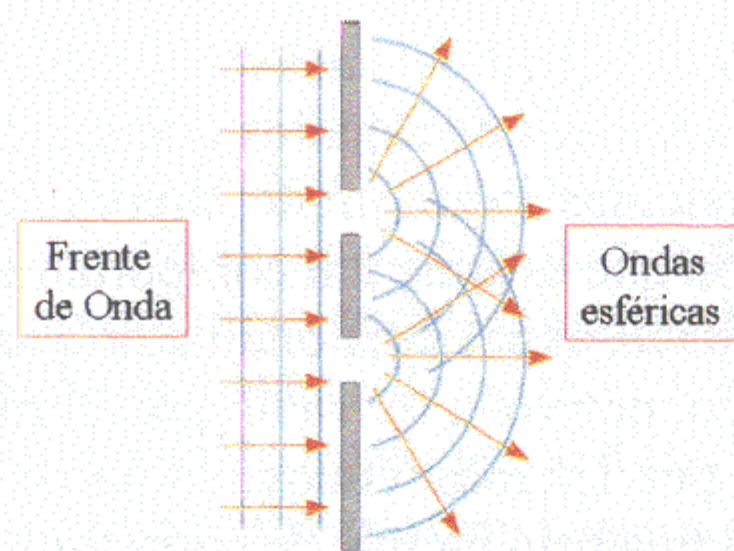


Figura 3 – Frente de onda que encontra duas fendas e a conseqüente propagação das ondas esféricas.

O resultado do princípio de Huygens-Fresnel pode ser mais bem avaliado ao observarmos cinco estágios diferentes do movimento progressivo de uma frente de onda ao atravessar uma fenda (figura 4). Os diagramas mostram a evolução temporal de ondas esféricas, em intervalos de tempo iguais, depois que a onda plana encontra uma fenda, ao se propagar da esquerda para a direita. Nos pontos onde as ondas esféricas se sobrepõem, ocorre interferência.

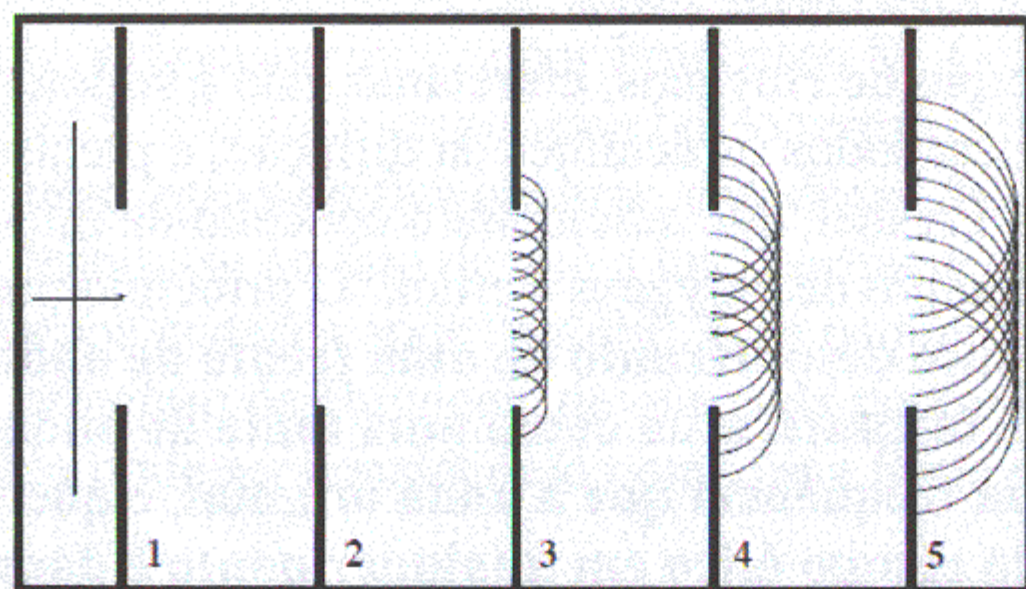


Figura 4 – Movimento progressivo de uma onda após encontrar uma fenda simples.

O resultado líquido do fenômeno mostrado nas Figs. 3 e 4, quando um anteparo é posicionado a uma distância L , a direita de uma fenda dupla de tamanho d , é chamado de espectro de Fraunhofer de interferência. A Figura 4, por exemplo, mostra claramente que existem regiões no anteparo em posições y

diferentes onde a intensidade da luz é máxima e mínima. O espectro de Fraunhofer de interferência requer algumas considerações importantes para sua validade. A primeira delas é que as ondas que chegam à fenda dupla (Figura 3) são monocromáticas (apenas um comprimento de onda λ) e podem ser visualizadas como ondas planas. As ondas esféricas produzidas após atravessarem a fenda apresentam mesma fase e a ocorrência de máximos e mínimos é devido à diferença de caminhos percorridos pelos diferentes feixes de luz.

Através de experimentos similares aos mostrados nas Figuras 3 e 4, a natureza ondulatória da luz foi estabelecida por Thomas Young há mais de dois séculos atrás. O experimento de Young consistia de uma tela com um único orifício (ou fenda) e uma segunda tela com duas aberturas ou fendas muito próximas entre si. O orifício da primeira tela foi criado para criar a fonte de luz a qual é originada de um único ponto e que está em fase com ela mesma (condição de Huygens). No nosso experimento utilizaremos um laser onde as ondas estão em fase pela virtude do dispositivo. Essa luz ilumina uma fenda dupla, como a mostrada na Figura 5.

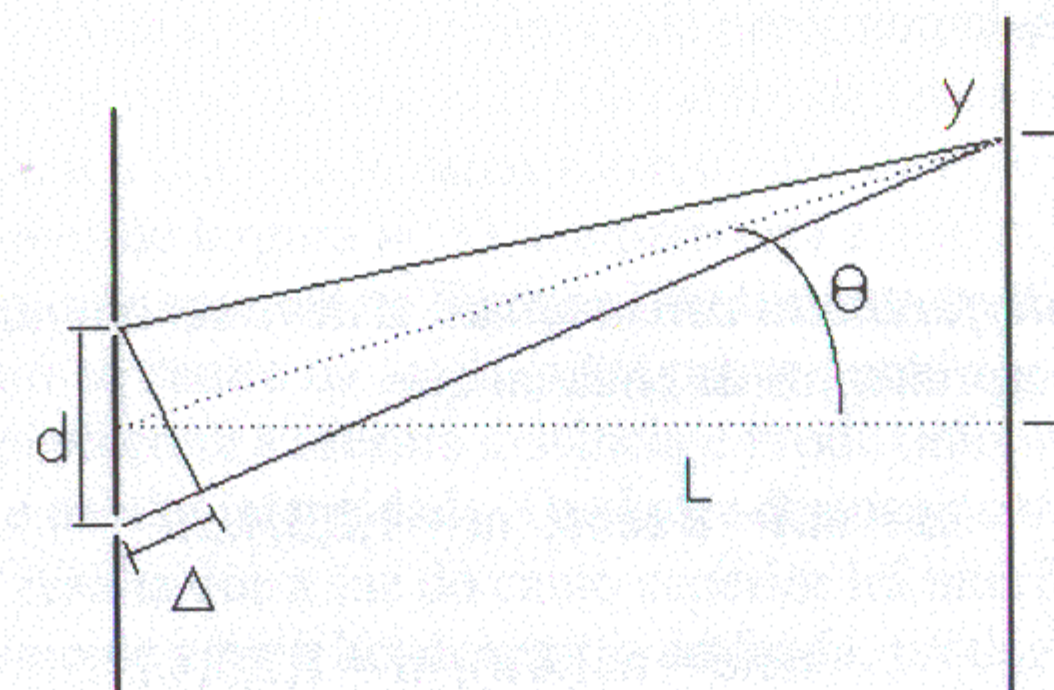


Figura 5 – Experimento de Young de uma fenda dupla.

A luz proveniente das duas fendas interfere entre si, produz series de franjas brilhantes e escuras em um anteparo colocado a uma distância L .

No ponto do anteparo exatamente no centro entre as fendas, a luz caminha distâncias iguais e, portanto interfere construtivamente para produzir um máximo de intensidade, ou seja, uma região brilhante do espectro. Em outros pontos, a diferença de fase causada pela diferença do caminho percorrido por cada uma das ondas esféricas, faz com que as ondas interfiram destrutivamente, produzindo regiões negras do espectro. Isso pode ser visualizado na Figura 6 (lado direito).

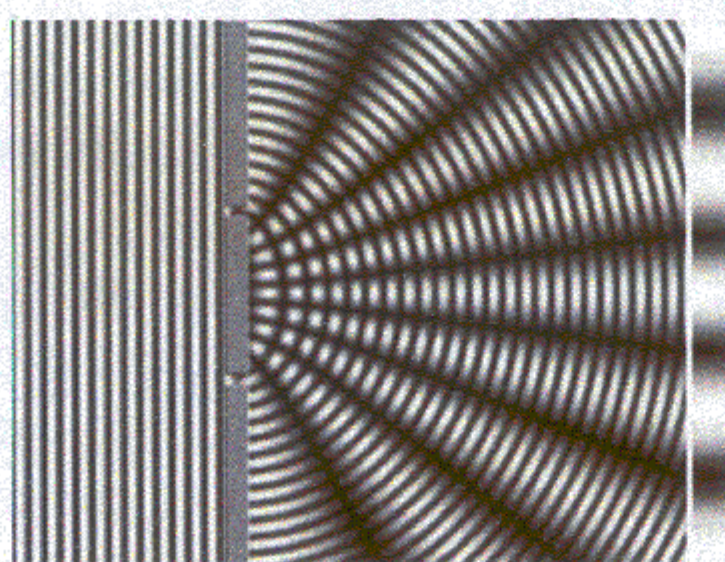


Figura 6 – Padrão de intensidade de uma fenda dupla.

Em algum ângulo θ a diferença de caminhos Δ , segundo a Figura 5, é dada por

$$\Delta = d \sin \theta. \quad (1)$$

Para **interferências construtivas**, Δ deve ser um número inteiro de comprimentos de onda tal que

$$\Delta = m\lambda = d \sin \theta, \quad m = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2)$$

$$\sin \theta = m (\lambda/d), \quad m = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (3)$$

É possível encontrar a distância no anteparo entre o máximo central e um dado valor y utilizando a relação $\tan \theta = (y/L)$ ou ainda $y = L \tan \theta$. No limite de ângulos pequenos (5° ou menores), a aproximação $\tan \theta \approx \sin \theta$ é válida e então

$$y = m(L\lambda/d). \quad (4)$$

Uma vez determinada a condição para regiões brilhantes ou máximos construtivos, é possível determinar, por exemplo, a distância d entre as fendas. Isso é feito através das medidas de y e L , conhecendo-se λ da luz utilizada. Argumentos similares são utilizados para as condições das regiões de mínimos, um tópico que pode ser desenvolvido pelos estudantes em casa.

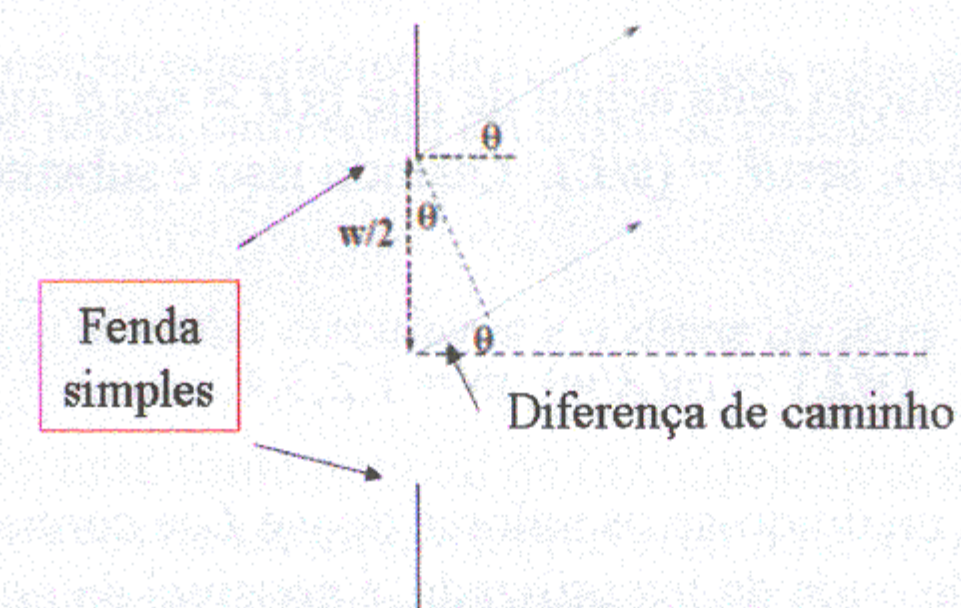


Figura 7 – Detalhe de uma fenda simples em um experimento de difração.

Uma fenda simples também pode produzir um padrão de difração. Basicamente, um lado (ou canto) da fenda ou orifício interfere com o outro lado. Considere o caso da Figura 7 de uma fenda simples de largura w . O anteparo está a direita, muito longe e, portanto, não aparece na Figura. Diretamente na direção oposta do anteparo ao centro da fenda, a luz proveniente dos dois cantos da fenda percorrerá a mesma distância e produzirão uma região brilhante e de alta intensidade. Qualquer deslocamento de um ângulo θ resulta que a luz do canto superior irá interferir destrutivamente com a luz do centro da fenda, produzindo assim um mínimo na intensidade vista no anteparo. A diferença de caminho percorrido pelos dois raios mostrados na Figura 5 é $(w/2)\sin \theta$. Para a primeira região de interferência destrutiva, o valor descrito deve ser igual a $(1/2)\lambda$. Sendo assim,

$$(w/2)\sin \theta = (1/2)\lambda \quad (5)$$

$$\text{sen } \theta = (\lambda/w) \quad (6)$$

Para diferenças de caminhos percorridos $(3/2) \lambda$, $(5/2) \lambda$, $(7/2) \lambda$, etc, o resultado será de interferências destrutivas. Sendo assim, as regiões de mínimo e escuras no padrão de difração ocorrerão para os ângulos dados por

$$\text{sen } \theta = m(\lambda/w), m = 1,2,3,4,\dots \quad (7)$$

A aproximação feita acima de que $\text{tg } \theta \approx \text{sen } \theta$ ainda é válida e, portanto, $\text{sen } \theta = (y/L)$. Quando isso é substituído na Eq. 7, resulta em

$$(y/L) = m(\lambda/w), m = 1,2,3,4,\dots \quad (8)$$

Portanto, medindo-se os valores de y e L , e conhecendo-se o comprimento de onda da luz utilizada, é possível determinar o tamanho da fenda simples.

Argumentos similares aos desenvolvidos para o experimento de Young e o do orifício simples podem ser utilizados para a discussão de duas outras situações de interesse: a rede ou grade de difração e a fenda esférica, discutidos a seguir.

Redes de difração

Uma rede de difração consiste de diversas fendas regularmente espaçadas, ou de um cristal, com diversos planos refletivos, também regularmente espaçados. O espaçamento d entre as fendas ou os planos do cristal é esperado ser muito pequeno.

Um desenho esquemático de uma rede, envolvendo apenas uma porção do dispositivo é mostrado na Figura 8. Quando o ângulo θ a diferença de caminho percorrido pelos dois feixes, $d \text{ sen } \theta$, é um número inteiro de comprimento de onda, ocorrerá **uma interferência construtiva**.

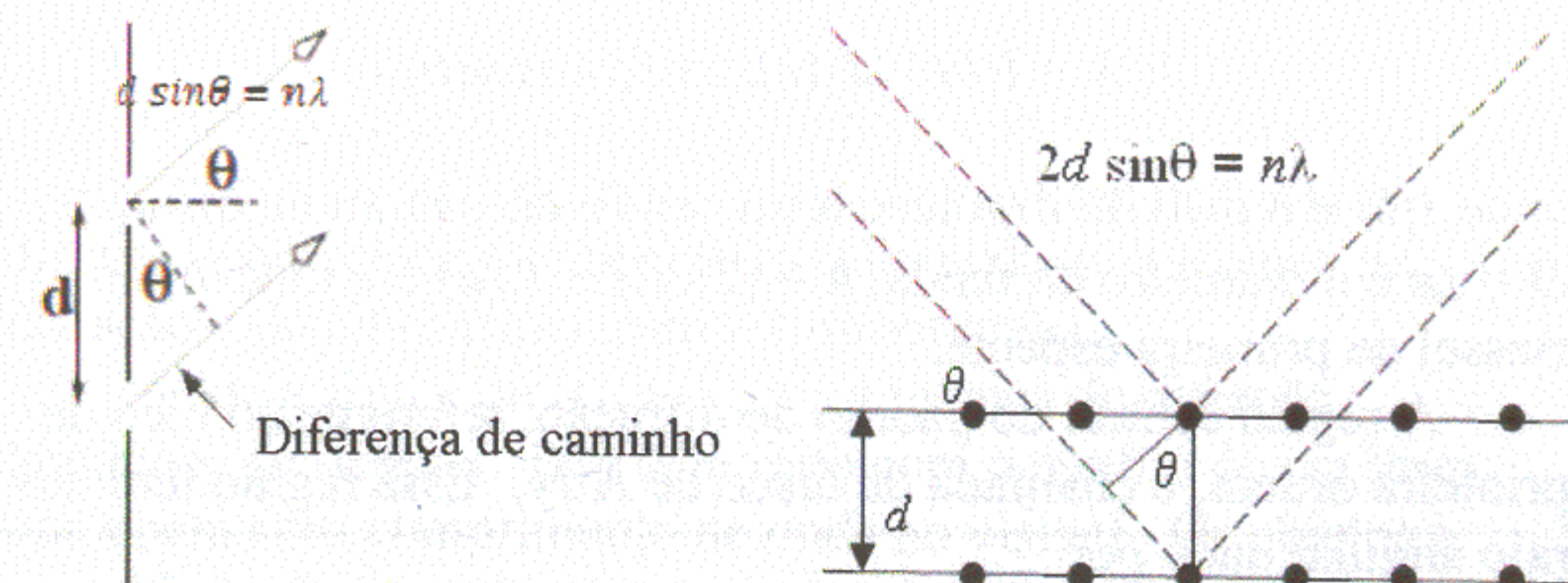


Figura 8 – Desenho esquemático de duas possíveis redes de difração. Uma com múltiplas fendas, outra sendo um cristal de múltiplos planos paralelos.

Fendas circulares e o disco de Airy

Quando uma fonte pontual de luz, como uma estrela, é observada através de um microscópio com uma abertura circular, a imagem não corresponde a um a um ponto de luz: é um disco cercado por um número grande de anéis cujas luminosidades decrescem com o aumento do raio do anel. Esses anéis são produzidos pela difração da luz devido a uma fenda circular e constituem padrões de difração de Fraunhofer. A Figura 9 mostrada abaixo exemplifica o fenômeno citado.

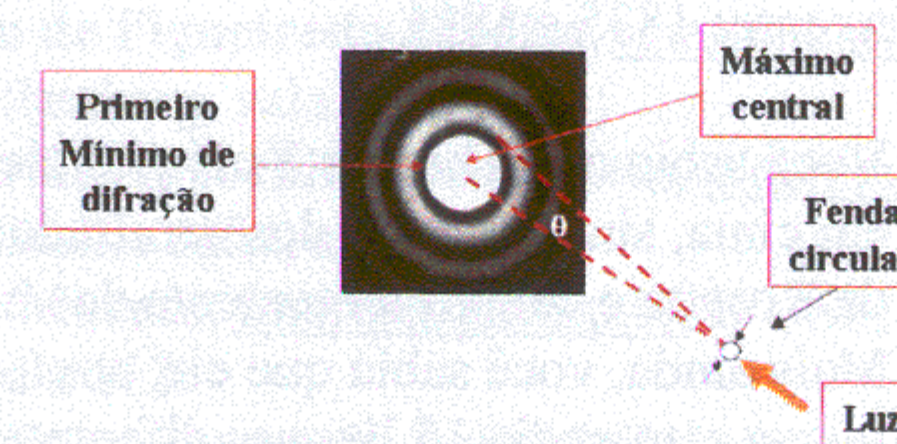


Figura 9 – Padrão de difração de uma fenda circular mostrando os discos de Airy.

A intensidade de luz produzida no anteparo I (ou irradiância) é uma função do ângulo θ e é dada por

$$I(\theta) = I(0) [2J_1(kasen\theta)/kasen\theta] \quad (9)$$

onde $I(\theta)$ é o pico de irradiância no centro do padrão de difração, $D = 2a$ é o diâmetro da fenda, $k = (2\pi)/\lambda$ e $J_1(u)$ é a função de Bessel de primeira espécie.

A região central do padrão de difração, referente ao pico de primeira ordem, é chamada de disco de Airy. Essa região tem um raio angular dado por

$$D \sin\theta = 1,22 \lambda. \quad (10)$$

Usando a aproximação feita acima para ângulos θ pequenos, $\sin\theta \approx \theta$, o raio angular do disco de Airy é dado por

$$\theta = 1,22 \lambda/D. \quad (11)$$

Aqui, uma vez mais, o valor de θ pode ser obtido via as medidas das grandezas geométricas do experimento, de tal forma que o diâmetro de uma fenda circular pode ser determinado.

De acordo com o critério de Rayleigh, duas fontes pontuais de luz não podem ser resolvidas se a separação entre elas for menor que o raio do disco de Airy. Isso limita a aplicabilidade de microscópios, telescópios e outros instrumentos de medidas. O disco de Airy é dado em homenagem ao astrônomo inglês George B. Airy, que viveu entre 1835 e 1881.

Curiosidade: Você sabia que Thomas Young (é ele que está lá em cima, sim !) foi um dos decifradores da Pedra da Rosetta e consequentemente dos hieróglifos ? Mais ainda, você sabia que ele, aos 14 anos, falava e entendia 15 línguas diferentes !!!

O Experimento

Embora detalhes acerca do experimento serão discutidos e apresentados em sala de aula, segue abaixo uma pequena discussão acerca do que será feito utilizando-se a técnica de difração e detalhes experimentais importantes.

A idéia aqui é determinar, via a técnica de difração, tamanhos de objetos. Isso será feito com o auxílio de um laser que opera com comprimento de onda no visível. Os objetos a serem investigados são, entre outros: dois fios de cabelo e hemácias humanas. As hemácias serão coletadas de elementos do grupo, assim como os fios de cabelo. Detalhes acerca da operação do equipamento assim como do desenvolvimento do experimento serão dados em sala de aula. Por outro lado, é importante salientar que, de posse dos dados obtidos, os estudantes serão convidados a desenrolar uma discussão acerca do fenômeno estudado e das grandezas avaliadas em sala de aula.

Física para Farmácia – 4310181 - 2014

Equipe

Prof. Renato de Figueiredo Jardim, rjardim@if.usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 213.

Profa. Carla Eliete Iochims dos Santos, ciochims@if.usp.br, IFUSP, Ed. Basílio Jafet, sala 228.

Prof. Flávio Moraes, fmoraes@if.usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 112.

Prof. Pablo Leite Bernardo, pablopb@if.usp.br, IFUSP, Ed. Alessandro Volta, sala 108.

Prof. Fábio Santos Alves Abud, fabio.abud@usp.br, IFUSP, Ed. Mario Schenberg, sala 101.