**Ondas**

**Introdução**

Em nossa vida diária, estamos continuamente em contato com diversos tipos de ondas. Algumas destas ondas são velhas conhecidas como é o caso do som, em que sem ele não existiria a comunicação verbal, muito menos a audição, ou então a luz, responsável por fenômenos tão complexos como a visão dos animais e a fotossíntese das plantas, em que sem ela não existira vida na Terra.

Deste modo, algumas destas ondas podemos ver (luz, pulsos produzidos por uma corda esticada, ondas que se propagam na superfície da água quando algum objeto cai sobre ela, etc), outras podemos ouvir (deste o mais irritante barulho, até a mais melodiosa sinfonia) e outras não podemos ver nem ouvir mas nem por isso deixam de existir ou ter menor importância sobre os mecanismos que regem a natureza.

Apesar de existirem ondas de origem e natureza diversas (luz é onda eletromagnética ao passo que o som é onda mecânica), todas elas possuem algo em comum: são energias propagando-se por um meio, que não é transportado nessa propagação.

O estudo das ondas é relevante não só pela beleza de conhecer os mecanismos que produzem o pôr-do-Sol ou um arco-íris, mas pelos benefícios tecnológicos decorrentes a este estudo, como o advento dos meios de comunicação (telégrafo, o aparelho de AM/FM, a televisão, telefone, etc), ou o uso dos raios-x no diagnóstico de fraturas e/ou doenças, que fizeram emergir todo um campo da física aplicada à medicina.

Por isto, os conceitos relativos à mecânica ondulatória são importantes para que se compreenda o mundo como ele é, mesclando suas partes poéticas como a música com as tecnologicamente investigadas como a eletrônica.

Para finalizar, com o aparecimento da mecânica quântica no começo do século XX, descobriu-se que tudo o que existe na natureza vibra (átomos, moléculas, pêndulos, etc), de modo que hoje em dia a compreensão dos fenômenos oscilatórios representam um papel primordial no entendimento do Universo.

**Quadro sinótico dos fenômenos ondulatórios**

De acordo com o exposto anteriormente, concluímos que as ondas desempenham um papel fundamental em nossas vidas, sendo portanto indispensável o conhecimento de suas leis básicas. Como a mecânica ondulatória apareceu justamente para investigar e aprimorar o conhecimento humano nesta importante sub-área da física, obtemos a seguinte definição:

**Mecânica Ondulatória**

Pode ser definida como a parte da física que estuda as ondas de um modo geral, preocupando-se com suas formas de produção, propagação e absorção, além de suas propriedades.

**Reflexão**

A reflexão de uma onda ocorre após incidir num meio de características diferentes e retornar a se propagar no meio inicial. Qualquer que seja o tipo da onda considerada, o sentido de seu movimento é invertido. Porém o módulo de sua velocidade não se altera. Isto decorre do fato de que a onda continua a se propagar no mesmo meio.
*EX.: O princípio do funcionamento do espelho é tão somente uma reflexão das ondas luminosas nele incidentes. Deste modo, vemos nossa própria imagem no espelho quando raios de luz que saem de nossos corpos (o qual por si só, já é uma reflexão), atingem a superfície do espelho e chega até os nossos olhos.*

**Refração**

Denomina-se refração a passagem de uma onda de um meio para outro de características diferentes (densidade, textura, etc). Qualquer que seja o tipo de onda considerada, verifica-se que o sentido e velocidade de propagação não são mais os mesmos de antes da refração. Isto acontece pois o meio apresenta propriedades distintas das do meio antigo.
*EX.: A refração ocorre, por exemplo, quando colocamos uma colher dentro de um copo d'água e verificamos que a colher parece sofrer uma "quebra" da parte que está dentro da água para com a parte que está fora da água. Isto ocorre devido ao fato da direção original de propagação da luz ter sido desviado devido à mudança do meio.*

**Polarização**

A Polarização, é um fenômeno que acontece somente com as ondas transversais. Consiste na seleção de um plano de vibração frente aos outros por um objeto, ou seja, se incidir ondas com todos os planos de vibração num certo objeto, este acaba deixando passar apenas aquelas perturbações que ocorrem num determinado plano.
*EX.: Uma aplicação da polarização é a fotografia de superfícies altamente refletoras como é o caso de vitrines de lojas, sem que nelas apareça o reflexo da imagem do fotógrafo. Para isto, utiliza-se um polarizador, que funciona como um filtro, não deixando passar os raios que saem do fotógrafo chegarem até o interior da máquina fotográfica.*

**Dispersão**

A Dispersão, é um fenômeno que acontece quando uma onda, resultante da superposição de várias outras entra num meio onde a velocidade de propagação seja diferente para cada uma de suas componentes. Consequentemente a forma da função de onda inicial muda, sendo que sua forma é uma função do tempo.
*EX.: A luz branca é formada por sete cores (vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, azul escuro e violeta), que constituem seu espectro. Quando esta luz incide sobre um prisma de vidro, ela acaba sofrendo uma dispersão pois a velocidade da luz é diferente para cada cor e a luz branca acaba sofrendo uma decomposição nesta passagem. O violeta é o que sofre maior diminuição em sua velocidade ao passo que o vermelho é a cor que sofre a menor diminuição.*

**Difração**

É o encurvamento sofrido por uma onda quando esta encontra obstáculos à sua propagação. Esta propriedade das ondas foi de fundamental importância para provar que os raios de uma onda não são retilíneos.
*EX.: É possível escutar um som emitido atrás de uma parede, mesmo que esta tenha uma grande espessura de tal forma que o som não consiga de modo algum atravessá-la. Isto nos indica que o som deve, de alguma forma, contornar o muro. Isto é o que se chama de difração.*

**Interferência**

Interferência representa a superposição de duas ou mais ondas num mesmo ponto. Esta superposição pode ter um caráter de aniquilação, quando as fases não são as mesmas (interferência destrutiva) ou pode ter um caráter de reforço quando as fases combinam (interferência construtiva).
*EX.: Quando escutamos música em nosso lar, percebemos que certos locais no recinto é melhor para se ouvir a música do que outros. Isto é porque nestes pontos as ondas que saem dos dois alto-falantes sofrem interferência construtiva. Ao contrário, os locais onde o som está ruim de ouvir é devido à interferência destrutiva das ondas.*

**Reflexão das ondas**

Quando se emite um som nas proximidades de um obstáculo como por exemplo uma caverna, as ondas sonoras sofrem reflexão nas paredes da caverna e voltam na direção oposta e, quando elas chegam ao nosso ouvido, nós ouvimos o eco. Portanto a existência do eco se deve unicamente à propriedade de reflexão das ondas sonoras.

Da mesma forma, as cores dos objetos são devido à reflexões de alguns comprimentos de ondas pela luz incidente sobre eles. Assim, quando olhamos para um objeto opaco, vemos somente a parcela não absorvida da luz que chegou até ele.

Um mesmo objeto pode adquirir tons diferentes de acordo com o tipo de luz que chega até ele. Por exemplo uma flor vermelha na luz branca (denominada luz policromática por apresentar todas as cores do espectro), pode tornar-se negra se retirarmos a luz branca e incidirmos sobre ela apenas luz monocromática verde. Isto acontece porque somente os comprimentos de ondas correspondentes aos tons avermelhados é que são efetivamente refletidos pela flor, sendo os outros absorvidos. Como o verde pertence à faixa do espectro que é absorvida, a flor não refletirá luz nenhuma, tornando-se negra. Já as folhas continuam verdes pois toda a luz que chega até elas acaba sendo refletida.

Do que foi escrito no parágrafo anterior, podemos presumir que um objeto é branco quando reflete todas as cores. Da mesma forma, um objeto é negro quando absorve todas as cores. E por fim, um objeto pode tornar-se negro se a luz que incide nele não possuir a faixa de comprimentos por ele refletida.

A luz ou qualquer outra onda, ao incidir numa superfície polida, seguem uma regra simples, conhecida como lei de reflexão. Ela nos diz que o ângulo no qual o raio de luz atinge a superfície é o mesmo que será refletido, ou seja, o ângulo de incidência "I" é igual ao de reflexão "R".

Apesar da luz ser um exemplo vistoso, as reflexões de outros tipos de ondas também podem ser observadas como, por exemplo, a reflexão de ondas mecânicas numa corda ou então de uma pedra atirada nas águas de um lago tranquilo.

**Aplicação da Reflexão**

Reflexão das ondas num lago: Pensando num lago de águas tranquilas, ou então um aquário marinho no qual é atirado dentro dele um salva-vidas. Devido à introdução deste novo elemento no sistema, uma parte da água é deslocada dando origem a uma perturbação que se propaga numa onda circular plana na superfície da água. Ao encontrar a borda do aquário, parte da onda sofre reflexão e adquire outro sentido do movimento. Quando isto acontece, dizemos que houve reflexão das ondas na água.

Ondas em cordas: Todo mundo um dia brincou de pular corda. Eventualmente a corda poderia ser agitada no sentido vertical ou horizontal, formando "ondinhas". Se a corda fosse pequena, poderia juntar dois ou mais pedaços a fim de conseguir uma corda resultante maior. Neste caso específico, um caso interessante de reflexão acaba ocorrendo. Isto porque dependendo das densidades dos dois meios os quais a onda vai passar pode ocorrer duas coisas distintas. Se por um acaso o meio no qual a corda vai penetrar possuir uma densidade menor, a parte refletida ficará com a mesma forma do que foi; se por outro lado, a onda penetrar num meio mais denso, ela sofre uma inversão na sua forma denominada inversão de fase.

**Reflexão de ondas luminosas**

Miragens: Um fenômeno que produz alguns tipos interessantes de ilusões de óptica e que acontecem devido à reflexão da luz são as denominadas "miragens". Um exemplo bastante corriqueiro ocorre nas estradas, em dias de calor e sol forte, quando o asfalto fica muito aquecido e eleva a temperatura da camada de ar em suas proximidades. Assim, uma camada de ar quente é formada bem próximo ao chão. Um raio de luz que incida em um ângulo rasante por esta camada de ar mais aquecida pode sofrer reflexão total e chegar aos nossos olhos distorcida pela descontinuidade desta camada de ar, dando a ilusão daquela "água" que se vê na pista e que miraculosamente desaparece ao nos aproximarmos dela. Deste modo, aquela miragem nada mais é do que a imagem distorcida de um objeto que esteja no horizonte (geralmente uma nuvem ou pássaro voando).

Escurecimento de corpos quando molhados: Nos mesmos moldes da aplicação anterior ocorre na estrada. Um veículo, ao trafegar por uma auto-estrada pavimentada percebe que quando chove, a estrada adquire um aspecto mais escuro. Isto ocorre porque num dia de Sol, a luz que incide no asfalto é difundida para todos os lados (reflexão difusa). Isto ocorre pelo fato do asfalto apresentar muitas saliências e rugosidades que refletem a luz de maneiras diferentes, variando de ponto para ponto. Já quando chove, forma-se uma camada de água sob o asfalto e esta película provoca uma reflexão direcionada ou especular, melhorando a qualidade da reflexão da luz no asfalto. Deste modo, uma porção menor de luz chegará ao observador e consequentemente a estrada adquirirá um tom escurecido.

Caleidoscópio: Um dos exemplos mais interessantes em relação à reflexão da luz trata-se do denominado "Caleidoscópio", que nada mais é do que um tubo cilíndrico feito de papelão ou algum outro material opaco contendo três ou mais espelhos planos em seu interior. Um de seus fundos é opaco e devidamente lacrado e outro possui um orifício que permite olhar em seu interior. Dentro do tubo geralmente se coloca pequenos pedaços de objetos de diferentes cores e que devido a suas múltiplas reflexões nos espelhos formam um mosaico.

Uso de óculos escuros na neve: Outra aplicação da reflexão da luz ocorre por exemplo no uso de óculos escuros em regiões onde existam muita neve. Este uso é justificado pelo fato da neve ser uma substância pouco absorvente, refletindo grande parte da luz solar que incide sobre ela, tornando o ambiente muito "claro". Isto não ocorre para a grama, a terra e outras substâncias pois estas últimas absorvem quase a totalidade das ondas luminosas que nelas chegam.

**Reflexão de ondas eletromagnéticas**

A radioastronomia se desenvolveu principalmente depois do avanço do sistema computacional ocorrido nas últimas décadas, possibilitando o armazenamento e manipulação de um grande número de dados colhidos pelos radiotelescópios terrestres e satélites lançados pelo homem.

Através deste ramo da astronomia, o homem conseguiu ampliar consideravelmente sua visão do Universo, uma vez que passou a analisá-lo com uma faixa do espectro eletromagnético bastante larga, analisando emissão de radiação de corpos invisíveis a olho nu ou então que estão encobertos por nuvens de gases interestelares como as proto-estrelas, estrelas de nêutrons, anãs brancas e buracos negros. Apesar dos conceitos de transmissão e processamento de informações ser complexo demais para ser tratado aqui, a captação das ondas de rádio se faz pelo princípio muito simples: O feixe de ondas de rádio incide numa superfície de grandes dimensões (isto porque o comprimento das ondas de rádio são muito maiores do que a da luz), que funciona como um espelho curvo, fazendo convergir as ondas ao foco, onde está situado um detector.

Um dos projetos de pesquisa envolvendo os radiotelescópios é o estudo do clima e sinais geofísicos provenientes da própria Terra. Um exemplo disto é a inclinação do feixe de ondas de rádio proveniente de um objeto estelar, quando entra na atmosfera da Terra. Além disto, o ar faz diminuir a velocidade das ondas eletromagnéticas, retardando seu tempo de chegada. Este atraso e inclinação dependem de uma série de fatores, dentre eles destacam-se a pressão, a umidade do ar e o ângulo de incidência do feixe de ondas, que sofre um desvio maior para ângulos pequenos. As variações atmosféricas podem ser mapeadas através do uso em conjunto de diversos radiotelescópios como o projeto atualmente desenvolvido em Maryland-Virginia no Goddard Geophysical and Astronomical Observatory.

**Refração de ondas**

Considere uma onda que atravessa uma superfície de separação entre dois meios quaisquer (água e óleo, ar e vidro, corda fina e corda grossa, etc), sua direção inicial é desviada. Este desvio no ângulo de incidência, e que depende exclusivamente das características do meio, é denominado REFRAÇÃO. A refração é a explicação de inúmeros efeitos interessantes, como o arco-íris, a cor do céu no pôr-do-Sol, o uso de lentes nos óculos e instrumentos astronômicos, etc.

A lei básica que regulamenta a refração é a chamada "LEI DE SNELL-DECARTES", onde relaciona os ângulos de incidência "i" e penetração "r" com os índices de refração relativos entre os meios em questão (por índice de refração relativo, podemos entender como a divisão entre as velocidades dos dois meios). Qualquer que seja o tipo de onda envolvida na refração, sua frequência não se altera. O mesmo não ocorre com a velocidade e o comprimento de onda.

A onda refratada sempre está em concordância de fase com relação à onda incidente. Já com relação à onda refletida, podemos afirmar que se o meio no qual ela penetrou for mais denso do que o meio do qual ela veio, as ondas refletida e refratada estão em oposição de fase. Já na hipótese inversa, ou seja, quando o meio no qual ela penetrou se apresenta menos denso do que o meio do qual ela veio, as duas ondas estarão com a mesma fase.

Por esta lei, percebemos que a incidência de raios perpendiculares (paralelos à reta normal) à fronteira que separa os dois materiais não causa desvio no sentido de propagação da onda, uma vez que todos os pontos que constituem a frente de onda acabam sofrendo uma mudança de velocidade simultaneamente.

**Exemplos de refração de ondas**

Cintilação das estrelas: De um modo geral, ao se observar as estrelas numa noite sem nebulosidade, verificaremos que esses objetos apresentam rápidas e bruscas alteração de brilho e cor. Estas cintilações são o resultado das incessantes movimentações das massas gasosas componentes das diferentes camadas da atmosfera terrestre. Por causa disto, estas cintilações são tanto menores quanto mais calma estiverem as camadas e quanto mais curto for o caminho percorrido pela luz ao atravessar a atmosfera.

Deste modo, a cintilação é maior ao nível do mar do que nas altas montanhas. Da mesma forma, no horizonte a luz da estrela atravessa uma maior quantidade de ar, sua cintilação é maior; em contrapartida, no zênite (ponto mais alto do céu, acima de nossas cabeças), a quantidade de ar atravessada pelos raios de luz são os menores e consequentemente a cintilação da estrela é menor.

Arco-íris: O arco-íris é um dos mais belos espetáculos da natureza, resultante da combinação da dispersão, reflexão e refração dos raios de luz em gotículas de água em suspensão na atmosfera. A luz incidente numa gotícula de água esférica acaba sofrendo refração e uma consequente dispersão, uma vez que a velocidade das ondas luminosas depende da frequência do meio.

Quando um raio luminoso de uma certa cor efetuar seu desvio total máximo, significará que todos os outros de comprimentos de onda próximos emergirão da gota muito juntos, reforçando a cor numa direção específica.

Para a luz vermelha, o reforço acontece quando o ângulo entre a gota, o observador e o plano horizontal for de 42 graus; já para o violeta, este ângulo é menor (40 graus), sendo que as outras cores possuem valores intermediários entre estas duas cifras.

Posição aparente dos astros

Os raios provenientes de um corpo celeste (planeta ou estrela), sofrem um desvio ao passar pela atmosfera terrestre. Deste modo, existe nos objetos celestes um desvio na verdadeira posição dos mesmos (salvo, em exceção, com a luz incidindo perpendicularmente às camadas). Isto acontece porque a atmosfera não é um meio homogêneo por apresentar grandes diferenças em sua densidade, tornando-se menos densa à medida que a altitude aumenta. Consequentemente, quanto maior a altitude, menor será o valor do índice de refração do ar. Deste modo, um raio de luz proveniente do espaço segue uma trajetória curvilínea.

Efeitos de "quebra" aparente dos corpos:

Se incidirmos um objeto (um lápis ou uma caneta por exemplo) dentro de um copo cheio de água, temos a impressão de que ele se quebrou, porém, ao retirá-lo, a parte que foi imersa volta ao normal. Isto acontece pois a luz passou do ar para a água e sofreu refração, indo do ar (meio no qual a velocidade das ondas é maior) para a água (no qual a velocidade é menor, existindo com isto o desvio observado).

**Polarização das ondas**

Considere inicialmente a luz produzida no Sol. Devido ao fato das fontes terem um grande número de irradiadores de ondas, bem como de casualidades nos processos de emissão, as ondas são formadas por diversos planos de polarização espalhados em todos os ângulos possíveis. Estas ondas são chamadas de ondas naturais ou não-polarizadas. Em contrapartida, dizemos que uma onda está polarizada quando oscila num só plano de vibração, chamado plano de polarização da onda.

Existem na natureza processos que permitem separar determinados planos de vibração do feixe de ondas não polarizadas. Isto é conseguido com um dispositivo denominado POLARIZADOR, que só deixa passar as componentes paralelas ao seu eixo óptico dos planos de vibração das ondas incidentes. Uma grande variedade de polarizadores ópticos são construídos e vendidos comercialmente.

*Exemplos de Polarização*

Podemos observar que após a onda emergir do polarizador só existe as componentes paralelas ao seu eixo óptico, sendo eliminadas as componentes perpendiculares. É muito corriqueiro também o uso de um segundo polarizador que se situa logo em seguida do primeiro, com a finalidade de assegurar que a onda emergente esteja realmente polarizada. Este segundo polarizador, que muitas vezes é análogo ao primeiro é denominado ANALISADOR.

Considere "ß" o ângulo formado entre os eixos óticos do analisador e do polarizador. Caso estes eixos sejam perpendiculares entre si (ângulo de 90 graus), nenhuma onda emergirá do analisador. Se por outro lado os eixos forem paralelos, toda a luz que chega ao analisador acabará saindo.

Esse processo é conhecido como LEI DE MALUS. Caso ocorra o aparecimento de mais de um analisador em nosso sistema, a lei de malus pode ser generalizada, sendo um produto dos cossenos ao quadrado de todos os ângulos entre o polarizador e o analisador.

Verifica-se que a polarização é um fenômeno típico das ondas transversais. Sendo assim, podemos concluir que o som jamais poderá ser polarizado enquanto que todo o espectro eletromagnético (luz, ultravioleta, raios-x, infravermelho, raios gama, ondas de rádio, microondas, etc), podem ser polarizadas por se tratarem de ondas transversais.

Como aplicação prática no estudo da polarização, podemos citar, por exemplo, a fluorescência polarizada, técnica experimental com aplicações na farmacologia. Através desta técnica, podemos detectar a presença de drogas ilícitas em medicamentos. O processo consiste em colocar uma pequena amostra do remédio num feixe de luz plano-polarizada monocromática devidamente colimada. Esta luz monocromática passa através de um filtro polarizador vertical afim de deixar a luz polarizada verticalmente antes de chegar à amostra. Com isto, somente as moléculas com orientação vertical absorvem a luz e passando para um estado excitado. Ao decaírem, estas moléculas emitem luz nos planos paralelos e perpendiculares ao feixe de ondas incidente, sendo suas intensidades (tanto paralela quanto perpendicular) medidas experimentalmente.

Deste modo, a fração entre a intensidade da luz polarizada verticalmente que incide na amostra e a intensidade da luz polarizada horizontalmente que sai da amostra é medida pela quantidade de moléculas que rotacionaram durante a excitação ótica.

Uma amostra que contenha fluorfosfato emite luz despolarizada pois não pode rotacionar durante a excitação óptica. Ao se adicionar uma mistura de soro e anticorpos ao sistema, ocorre uma reação entre as duas substâncias e o complexo resultante emite luz polarizada, a qual em seguida se efetua uma curva padrão de concentração de fluorfosfato versus polarização.

Através da construção de uma curva padrão para a amostra e sua subsequente comparação com os gráficos de concentração versus polarização de drogas conhecidas, podemos determinar o tipo da droga que está presente na amostra.

**Difração das ondas**



É possível ouvir o som produzido por uma explosão que se situa atrás de um muro delimitador, mesmo que este tenha grande espessura de tal forma que as ondas sonoras não consigam atravessá-lo. Da mesma forma, se algum membro da sua família que está trancado sozinho num dos quartos colocar uma música num volume bem alto num aparelho de som potente, todos os outros irão reclamar (principalmente os que não apreciarem o tipo da música escolhida). Deste modo, percebemos que o som (e todos os outros tipos de ondas) tem a capacidade de contornar obstáculos. A esta habilidade definiu-se o nome de DIFRAÇÃO, que ocorre devido ao fato do comprimento de onda dos sons variarem de alguns centímetros a vários metros, de forma que estas ondas longitudinais acabam sendo "grandes" em comparação com as aberturas e obstáculos frequentemente encontrados na natureza.

Quando partes de uma onda são ceifadas pela presença de obstáculos, sua propagação no meio considerado torna-se bem mais complicada, fugindo ao que o bom senso esperaria. Isto pode ser exemplificado imaginando-se um tanque cheio d'água com ondas planas se propagando em sua superfície. De início, poderia-se pensar que além do orifício, a onda só se propagaria nos pontos situados entre as extremidades da passagem. Porém, o que realmente acontece é que o orifício funciona como se fosse uma fonte de ondas puntiforme, produzindo ondas circulares (Caso a passagem seja muito grande comparado com o comprimento de onda da onda incidente, apenas nas regiões próximas às bordas é que será notado alguma curvatura nas ondas).

Deste modo, podemos definir como DIFRAÇÃO a curvatura que uma onda faz ao passar por um obstáculo. Esta curvatura pode ocorrer em maior ou em menor grau, dependendo da forma e das dimensões do obstáculo a ser transpassado.

O fenômeno da difração pode ser entendido com base no princípio de Huygens, descoberto em 1678 pelo holandês Christian Huygens. O referido princípio considera que cada ponto de uma dada frente de onda age como se fosse uma fonte puntiforme de ondas. A nova frente de onda (num instante posterior), é determinada pela superfície envoltória de todas estas ondículas esféricas emitidas por estas fontes puntiformes que se propagaram durante o intervalo pertinente.

Cumpre notar que no caso das ondas luminosas, seus comprimentos de onda variam de 4000 a 8000 angstrons aproximadamente. Por esta razão não se observa a difração da luz com facilidade, pois as aberturas e fendas são muito maiores do que o comprimento desta ondas.

**Aplicação da difração das ondas**

O estudo da difração é importante nos dias de hoje para estudar a natureza de defeitos pontuais e intersticiais em materiais como o quartzo, possibilitando desta maneira estudar se um material é ou não adequado ao emprego em pesquisas, experimentos ou mesmo em indústrias.

A topografia que se faz através da difração de raios-x é uma poderosa ferramenta para o estudo de micro-estruturas, fenômenos de fratura e plasticidade em materiais cristalinos. Neste tipo de difração são destacadas três técnicas (Berg-Barrett, Bormann, e Lang) que podem ser aplicadas numa grande variedade de materiais.

**Experimento de Young**

A difração da luz e posterior interferência foi conseguida pela primeira vez em 1800 por Thomas Young, demonstrando assim o caráter ondulatório da luz (o fato do comprimento da luz ser muito pequeno frente à maioria dos obstáculos naturais faz com que a difração não seja fácil de ocorrer, fato este que levou Newton e outros grandes cientistas a suporem que a luz era um feixe de partículas movendo-se em linha reta e não em um movimento ondulatório).

Para conseguir tal proeza, ele idealizou o seguinte dispositivo: Uma fonte de luz monocromática foi colocada atrás de uma tela opaca contendo uma estreita fenda da ordem de um mícron. Logo em seguida aparece uma segunda tela, provida de duas fendas idênticas.

Caso a luz fosse um feixe de partículas andando em linha reta, não se observaria nada no anteparo, pois toda a luz seria barrada na segunda tela. No entanto, foram obtidas várias franjas claras e escuras que correspondem às interferências construtivas e destrutivas respectivamente.

As interferências ocorrem pela diferença de caminho entre os dois feixes de onda que saem das duas fendas situadas na segunda tela. Se esta diferença for um múltiplo inteiro de um comprimento de onda "L", ocorrerá interferência construtiva, aparecendo a franja clara. Do mesmo modo, se a diferença de caminho for um número ímpar de meio comprimento de onda (L/2), acontecerá a interferência destrutiva, aparecendo a franja escura.

Como resultado deste notável experimento, Young provou que o princípio de Fermat não era a última palavra na descrição do comportamento da luz, pois não previa estas franjas de interferências. Deste modo, alguma coisa a mais era requerido. Este fato levou muitos cientistas a adotarem a luz como onda e a definir e tratar através de um outro formalismo matemático. Isto acabou dando certo para este experimento, quando se conceituou a defasagem "DF" das ondas devido a diferença de percurso dos feixes luminosos.

Por este experimento, nas fendas idênticas chegam luz provenientes da mesma fonte, de forma que naquele ponto os pincéis luminosos que chegam nos orifícios estão em concordância de fase. Sendo "a" a separação entre elas e "Ø" o ângulo entre a franja projetada no anteparo e o meio do segundo anteparo, temos que SEN(Ø)=DF/a .

Através deste esquema, concluímos que sempre existe no meio do anteparo o chamado "máximo principal", que representa a interferência construtiva (portanto franja clara) para n=0. Outros máximos ocorrem para n=1,2,3,... sendo denominados máximos secundários.

Podemos ainda calcular a distância entre dois máximos quaisquer, bastando para isto usar o seguinte raciocínio: Seja n1 e n2 dois máximos de interferência considerados. Pelos resultados anteriores, vemos que isto deve necessariamente corresponder a uma distância y1 e y2, respectivamente. Com isto, a diferença entre os dois máximos será a subtração entre y2 e y1.

Raciocínio análogo pode ser aplicado para se conseguir o espaçamento entre dois mínimos e entre um máximo e um mínimo.

Através deste esquema, concluímos que sempre existe no meio do anteparo o chamado "máximo principal", que representa a interferência construtiva (portanto franja clara) para n=0. Outros máximos ocorrem para n=1,2,3,... sendo denominados máximos secundários.

**Interferência de Onda**

Considere dois pulsos deslocando-se em direções opostas numa corda. Caso estes dois pulsos se interceptem num determinado momento, pode ocorrer interferência construtiva ou destrutiva, de acordo com a forma inicial dos pulsos. Se os dois pulsos estão do mesmo lado da corda, ocorre interferência construtiva e as amplitudes dos pulsos serão somadas. Se ao contrário, acontece no momento do encontro a interferência destrutiva, as amplitudes dos dois pulsos serão subtraídas (o cancelamento completo só existe se os pulsos forem idênticos).

Estas interferências se resultam de acordo com o princípio da superposição de ondas, que infere que a forma da função de onda resultante é igual à soma algébrica das funções de ondas individuais.

O estudo da interferência das ondas é de grande valia às telecomunicações, uma vez que este fenômeno é um dos responsáveis pelas limitações no tráfego de informações. Certos tipos de modulação possuem a propriedade muito importante de minimizar o ruído, como a interferência de um sistema de comunicação. Entretanto esta supressão é conseguida às custas de uma banda de transmissão com um range de frequências consideravelmente maior do que a banda do sinal original ("redução de ruído em banda larga"). Esta banda representa a largura do espectro do sinal, sendo que uma transmissão de grandes quantidades de informação em diminutos intervalos de tempo, necessitam de sistemas emissores de sinais de banda larga para acomodar os sinais (A largura de faixa representa uma limitação em sistemas de comunicação. Se a banda for insuficiente, é preciso diminuir a velocidade de sinalização e consequentemente aumentar o tempo de transmissão). Um esquema eficiente conta com uma minimização do tempo de transmissão, e o envio de uma quantidade máxima de informação num menor tempo possível.

O fenômeno da interferência também ocorre quando uma fina camada de óleo se espalha sobre uma superfície irregular, como uma calçada ou uma sarjeta ou então produzimos uma bolha de sabão com um pouco de água e detergente. Em ambos os casos um feixe luminoso policromático ao incidir nesta película sofre reflexão tanto na superfície superior quanto na inferior da camada de óleo ou sabão. Como resultado, surge regiões escuras nas referentes às zonas de interferência destrutiva e regiões claras quando ocorre interferência construtiva.

Outro exemplo interessante de interferência acontece quando feixes de cores diferentes se cruzam, verificando uma mudança de cor apenas na região do cruzamento dos feixes, voltando às cores originais após saírem daquela região.

Fenomenologicamente, as interferências podem ser classificadas em interferências unidimensionais (caso da corda com pulsos movimentando-se em sentidos opostos), bidimensionais (películas de óleo ou sabão) e tridimensionais (veja os feixes de luz se cruzando acima).

|  |  |
| --- | --- |
| Ilustração | Ilustração |

**Interferência bidimensional**

Quando jogamos uma pedra num lago tranquilo, observamos o surgimento de uma onda circular que se propaga no lago. Porém se jogarmos simultaneamente duas pedras separadas a uma distância considerável uma da outra, resultará na formação de duas frentes de ondas que se interferirão ao se encontrarem. Caso a produção destas perturbações adquiram um caráter periódico, ocorrerá a formação de uma figura de interferência, onde nos pontos onde existe a superposição entre duas cristas ou duas depressões existe a interferência construtiva. Já nos pontos onde se encontram uma crista e uma depressão, ocorre interferência destrutiva.

Seja dois diapasões ou duas outras fontes de ondas puntiformes, emitindo ondas com frequências "f1" e "f2" simultaneamente. Quando ocorre o encontro entre duas cristas de ondas, temos a interferência construtiva; já se o cruzamento ocorrer entre uma crista e uma depressão, temos a interferência destrutiva.

Deste modo, podemos verificar que entre dois máximos de interferência existe sempre um mínimo situado exatamente no meio do caminho. As curvas nas quais ondas bidimensionais formam a figura de interferência é conhecida como nodos ou curvas nodais e são sempre hipérboles cujos focos estão situados nas fontes.

Um exemplo de interferência de ondas num sistema bidimensional poderá ser demonstrado a partir da excitação simultânea de dois auto-falantes ligados a um mesmo gerador de sinais. Um espectador que andar pelo recinto no qual foram colocados estes dois auto-falantes notará pelo ouvido, pontos onde o som torna-se mais forte (interferência construtiva) e mais fraco (interferência destrutiva). Na realidade, a interferência destrutiva não acontece pois as paredes e os outros objetos do recinto refletirão uma parte do som neles projetado, preenchendo ou então diminuindo os efeitos de interferência destrutiva.

**Ressonância**

Qualquer sistema físico que é posto a oscilar livremente possui a tendência de oscilar com uma frequência específica de oscilação denominada frequência preferencial de vibração, que pode ser única ou não, dependendo do sistema físico considerado. Assim, por exemplo, um pêndulo simples, de comprimento "L", imerso num planeta de gravidade "g", possui apenas uma única frequência de oscilação f=(1/2\*pi)\*sqrt(g/L).

Outra demonstração da existência da ressonância é a existência de ondas estacionárias, que pode ser facilmente demonstrada através de um tubo fechado que recebe água em sua extremidade superior. A água adicionada cria um som de borbulhamento no tubo. Devido ao fato da coluna de ar dentro do tubo está diminuindo, as frequências de ressonância podem ser ouvidas.

Por outro lado, uma corda ou um tubo sonoro de comprimento "L", cuja velocidade da onda neste meio seja "v", apresentam diversas frequências preferenciais, as quais são proporcionais entre si denominadas harmônicos. Elas podem ser expressas pela relação f = n.v/2.L, onde n=1,2,3, ..., representa o harmônico considerado (veja a parte de tubos sonoros).

Quando num sistema físico qualquer são injetados impulsos de energia periodicamente com uma frequência igual a uma de suas frequências preferenciais de vibração, o sistema passa a vibrar com amplitude progressivamente crescente, que tende ao maior valor possível. Neste caso, dizemos que o sistema em questão entrou em RESSONÂNCIA.

*Exemplo de Ressonância*

Se aplicarmos num balanço (ou pêndulo) uma série de empurrões regularmente espaçados por um intervalo temporal, a amplitude após um certo tempo, será a maior possível. Se este intervalo variar irregularmente, dificilmente o balanço oscila.

A sintonização das estações num rádio constitui um exemplo de ressonância elétrica. Quando giramos o botão do sintonizador, fazemos com que a frequência da corrente alternada no aparelho se torne igual à das ondas emitidas pela estação transmissora.

Uma ponte ou qualquer outra estrutura tem a habilidade de vibrar com certas frequências naturais. Quando a frequência do passo cadenciado com que a coluna de soldados atravessa uma ponte coincide com uma das frequências naturais da ponte, pode resultar numa vibração de amplitudes perigosamente grandes, devido à ressonância. Por isto, a travessia de soldados em pontes é feita em passo sem cadência.

**Absorção das ondas**

Qualquer onda, seja ela de natureza eletromagnética ou mecânica pode interagir com a matéria no qual ela se propaga, tendo como resultado uma diminuição da intensidade da onda. De um modo geral, esta interação se processa mais acentuadamente quando existe uma transição brusca de dois meios, acontecendo aí os fenômenos de reflexão, refração e absorção das ondas. Uma vez que os dois primeiros fenômenos já estão discutidos em outras seções, vamos nos preocupar apenas com a absorção.

Quando pelo menos uma parte de uma onda é absorvida, ocorre uma mudança na energia do material absorvedor, existindo uma variação no estado vibracional e rotacional do material. Sendo a intensidade "I" definida como a razão entre a potência "Pot" da onda pela unidade de área "A", temos que, onde a potência é a energia total "E" dividida pelo tempo "t" e caso uma onda possua intensidade inicial "I0" e final "I", após emergir de um corpo absorvedor a intensidade emergente será tanto menor quanto maior for a espessura "L" da amostra e quanto maior for a concentração "N" de centros absorvedores do sistema considerado (estes centros absorvedores são geralmente átomos, moléculas ou outro defeitos capazes de absorver a luz).

Deste modo, a absorvidade "Ab" de uma onda, definida como o logaritmo do quociente I0/I é uma quantidade adimensional, que varia entre 0 e 1. A expressão para ela pode ser representada como se segue:

"a" é uma constante de proporcionalidade denominada "absortividade" e depende do comprimento de onda considerado. Sua unidade dependerá das unidades adotadas para "N" e "L", sendo que se "L" é expresso em centímetros e "N" em número de moléculas/cm3, então a absortividade deverá ser expressa em número de moléculas/cm2, que é a área efetiva de absorção de uma molécula vista pela onda. Caso a frequência da onda não provoque ressonâncias na amostra, ela não será absorvida e a área efetiva de absorção é aproximadamente zero. De modo contrário, se acontecer alguma ressonância no material, a onda deverá ser absorvida, ou seja, a área de absorção será máxima.

No caso particular da absorção óptica, os corpos claros e espelhados apresentam alta refletividade e baixa absorvidade enquanto que os corpos escuros apresentam o comportamento inverso (a substância mais absorvente que se conhece é o "negro de fumo", que absorve 99% da energia luminosa nele incidente).

A expressão que relata o decréscimo da intensidade da onda devido à sua absorção gradativa é descrita pela lei de Beer-Lambert, cujo modelo é visto através da figura abaixo, onde "dx" representa uma fatia infinitesimal na direção "x" da amostra.



**Arrebentação de ondas**

O fenômeno conhecido como "ARREBENTAÇÃO" é muito conhecido dos surfistas, uma vez que este fica impossibilitado de se deslocar sobre a crista da onda caso a onda em questão não se arrebente. De um modo geral, só é possível se praticar o surfe em regiões próximas da praia. Isto ocorre pois o refluxo das águas que acontece na região inferior acaba causando uma diferença de velocidades nas partes inferior e superior da onda, tendo como resultado que a parte superior passa por cima da parte inferior.

Caso uma onda não tenha arrebentado, o surfista não pode se deslocar em direção à praia pois não ocorre o arrastamento, mas sim, apenas uma oscilação vertical da prancha.

Apesar de um cálculo preciso do momento no qual uma onda arrebenta seja algo complicado, uma regra aproximada nos diz que quando a proporção entre a altura da onda e a profundidade da água no local estiver na razão 3/4, este é o momento no qual a onda arrebenta (ex.: Uma onda de 4 metros arrebenta quando a profundidade da onda for de 2 metros).



**Batimento**

Designamos por BATIMENTO ao fenômeno que acontece quando existe uma superposição entre duas fontes emissoras de ondas que produzam ondas que possuam a mesma direção, amplitude e frequências próximas "f1" e "f2". Pelo fato das frequências diferirem uma da outra, haverá momentos de interferência construtiva, onde a amplitude resultante será grande e momentos de interferência destrutiva, acarretando numa amplitude diminuta.

Um exemplo familiar de batimento é aquele produzido por dois diapasões, ou por duas cordas de guitarra de frequências parecidas. Neste caso, ouvimos um som de intensidade variável, cuja frequência de batimento "fbat" é a subtração das duas frequências envolvidas dividida por 2 (fbat=(|f1-f2|)/2).

A função de cada onda pode ser descrita através de uma senóide, com vetores de onda k, além de fases ph1 e ph2, respectivamente.

Pelo princípio da superposição de ondas, a onda resultante será determinada pela soma algébrica das duas ondas individuais.

Através do uso da relação entre a soma de dois senos, verificamos que a expressão anterior pode ser reescrita sob a forma:

onde a fase de batimento phbat=|ph1-ph2|/2 e as frequência e fase médias são dadas pelas média aritmética das frequência e fases iniciais (fmed = (f1+f2)/2 e phmed=(ph1+ph2)/2).



**Aplicações gerais**

Vários são os campos de atuação para os profissionais que estudam problemas relacionados com a propagação, absorção, reflexão, interferências ou outros tipos de fenômenos ondulatórios. Na maioria das vezes estes problemas estão acoplados com alguns (ou muitos) outros, de forma a se tornarem parte de um complexo quebra-cabeças. Contudo, a despeito das complexidades inerentes, o homem continua avançando no domínio e compreensão dos problemas envolvidos, aumentando com isso suas chances de êxito.