

BLOCO VI - ONDAS MECÂNICAS E A LUZ COMO ONDA ELETROMAGNÉTICA

Recurso de Ensino 1

ATIVIDADE SOBRE CAMPO ELETROMAGNÉTICO, COM USO DE SIMULAÇÃO NO COMPUTADOR

Acesso pela internet:

- 1 - Entrar no site www.labvirt.futuro.usp.br
- 2 - Ao final da página clicar em **Física**
- 3 - Na coluna da esquerda clicar em **simulações**
- 4 - Na coluna central clicar no item **4.1 indução eletromagnética, geradores e motores.**
- 5 - Na coluna central clicar em **Propagação de ondas eletromagnéticas**
- 6 - Na coluna central clicar em **Ver Simulação**

Acesso sem conexão com a Internet

- 1 - Gravar em disquete ou cd a pasta: **Atividade 2 - Anexo I**
- 2 - Abrir o link **Internet Explorer**
- 3 - Abrir a pasta **Atividade 2 - Anexo I**
- 4 - Arrastar o arquivo **sim_ondas_propagacaoeletromag.htm** para a página do Internet Explorer

Simulação:

A bolinha azul representa uma carga positiva em movimento. As flechinhas representam o campo eletromagnético em diferentes pontos do plano onde está a carga. Na parte inferior da tela, você encontrará três botões interativos: frequência do movimento, amplitude do movimento e velocidade de propagação.

- 1- Fixe a frequência em 0,3 Hz e a velocidade em 0,5c m/s e teste vários valores de amplitude. O que acontece com a carga?
- 2 - A partir das suas observações, diga o que é amplitude? Qual a unidade de medida usada para a amplitude?
- 3 - Fixe a amplitude em 20,4m e mantenha a velocidade em 0,5c m/s, mudando os valores da frequência. O que você observa no movimento da carga?
- 4 - A partir das suas observações, diga o que é frequência? Qual a unidade de medida da frequência?
- 5 - Fixe a frequência em 0,2 Hz e a amplitude em 2,6 m e teste vários valores de velocidade de propagação. Observe o que acontece com as flechinhas, que representam o campo, em todas as direções, principalmente nas “diagonais”. O que você percebe?
- 6 - Observe agora a carga e a 1ª seqüência de flechinhas. A mudança no campo acontece simultaneamente à mudança de posição da carga ou acontece depois?

Recurso de Ensino 2

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE ONDAS

Esta pesquisa deverá ser **feita em dupla**. Procurar no capítulo **Ondas** de um livro de Física, os seguintes conceitos:

- 1 - O que é uma onda?
- 2 - O que são ondas mecânicas? Dê exemplos.
- 3 - O que são ondas eletromagnéticas? Dê exemplos.
- 4 - O que se move numa onda em uma corda?
- 5 - O que é o som?
- 6 - O que se move numa onda eletromagnética?
- 7 - O que é o espectro eletromagnético? Para que ele serve?
- 8 - A luz é uma onda eletromagnética, assim como as ondas de rádio. Por que podemos “enxergar” as ondas eletromagnéticas da luz e para as ondas de rádio, isso não é possível?

Recurso de Ensino 3

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DAS ONDAS

Você é capaz de dizer o que uma criança brincando em um balanço, um banhista praticando surf em uma linda praia, um pacote de pipocas estourando no forno de microondas, uma ligação em um aparelho de telefone celular e uma radiografia têm em comum? Pense um pouco! Não é uma pergunta muito difícil, embora também não pareça ser fácil. De uma maneira geral, há um princípio físico presente em todas as atividades descritas no parágrafo anterior: o fenômeno ondulatório!

A onda do mar (essencial para o surf) e o balanço da criança são exemplos típicos de um determinado tipo de onda, a onda mecânica; enquanto que os eletrodomésticos, para funcionar, necessitam da presença de um outro tipo de onda: as eletromagnéticas, como a luz e as ondas de rádio.

Embora representem o mesmo princípio físico, ondas mecânicas e eletromagnéticas são bastante diferentes entre si. Vale a pena dar uma boa olhada nessas diferenças e, de quebra, aproveitar para relembrar e entender melhor alguns aspectos do texto sobre a relação entre Eletricidade e Magnetismo, que já trabalhamos. Mas primeiro, vamos ver as diferenças entre os tipos de onda pegando como exemplo a luz e o som.

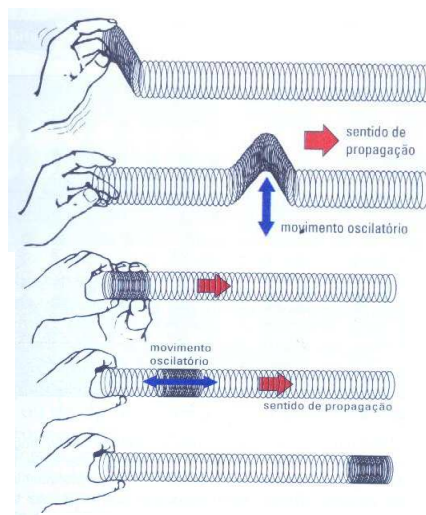
A luz e o som são vibrações que se propagam através do espaço como ondas. Entretanto, elas são dois *tipos* de ondas diferentes! O som é uma propagação de vibrações, no tempo e no espaço, através de um MEIO MATERIAL - o ar. Sem a presença de um meio material, o som não pode se propagar, embora muitos filmes de ficção científica insistam em mostrar o som de grandiosas explosões de naves espaciais, isso seria impossível na vida real, pois o som, como onda mecânica, não se propaga no vácuo. Ondas mecânicas são as ondas produzidas por uma perturbação num meio material, como, por exemplo, uma onda na água do mar, a vibração de uma corda de violão ou a voz de uma pessoa.

Podemos entender melhor esse conceito pensando no exemplo da criança brincando no balanço: ela não pode se balançar se não houver algo que vá para frente e para trás no parque, certo? Ou para cima e para baixo, como uma vibração ou uma perturbação em um meio qualquer que estava quietinho até essa “vibração”. E todas as vibrações que necessitam de um meio qualquer para poderem se propagar são chamadas **ondas mecânicas**.

Já a luz é uma **onda eletromagnética**, portanto pode se propagar no vácuo - o que é ótimo, senão, de que maneira a luz do sol e das estrelas atravessaria o espaço até chegar ao nosso planeta? O fenômeno das ondas eletromagnéticas é a base da física moderna, mas apresentam um pequeno inconveniente: ao contrário da vibração em uma corda de violão ou de uma onda no mar, elas não podem ser observadas, apenas imaginadas - ou você conhece alguém que já tenha visto uma onda de rádio se propagando por aí? Felizmente, porém, elas tendem a se comportar de maneira muito parecida com as ondas mecânicas, por possuírem as mesmas características básicas. Assim, para conseguir imaginar uma onda eletromagnética e seu comportamento, primeiro é preciso saber quais são as propriedades que ela tem em comum e que uma onda mecânica apresenta: são elas a **frequência**, o **período**, o **comprimento de onda**, a **velocidade de propagação**, a **amplitude** e a **energia**. Mas não se assuste com esses nomes, se você já foi à praia ou brincou de pular-corda alguma vez na vida, pode ter certeza que já conhece bem esses elementos característicos de uma onda...

Existem dois tipos diferentes de onda mecânica: a onda transversal e a longitudinal. Com certeza você já teve contato com ambas, em situações que talvez nem tenha percebido, como a torcida de um jogo de futebol fazendo a famosa “ola” ou uma fileira de pedras de dominó caindo em seqüência: uma onda transversal parece apenas oscilar, enquanto uma onda longitudinal parece *empurrar*. São exemplos possíveis devido a principal propriedade de uma onda, que é não transportar **matéria**; uma onda transporta apenas **energia**.

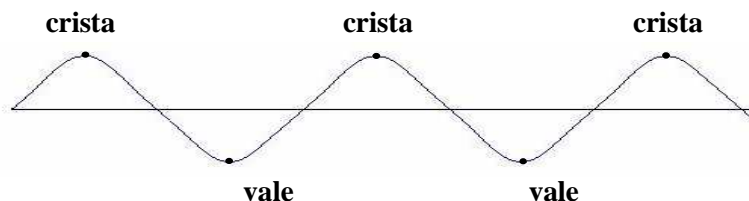
Essa classificação das ondas é feita de acordo com sua direção de oscilação, comparada com a direção de propagação: quando a direção das vibrações é perpendicular à direção de propagação, a onda é chamada **transversal**; quando a direção das vibrações é a mesma que a direção de propagação, a onda é chamada **longitudinal**. Simples, não? Ondas transversais podem ser produzidas com o auxílio de uma mola, conforme mostra a figura:



GASPAR, Alberto, vol.2, p.33

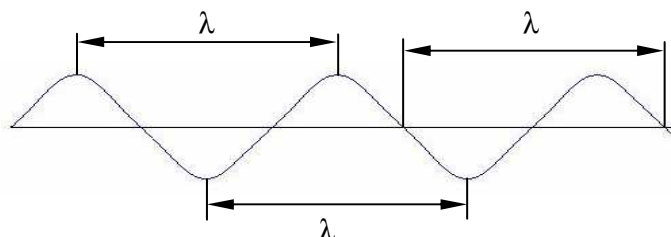
São exemplos de ondas **transversais** as ondas em uma corda e as ondas eletromagnéticas, assim como as ondas sonoras são um exemplo de onda **longitudinal**. Já as ondas sísmicas, responsáveis pelos terremotos e tsunamis, são ondas mecânicas que podem ser tanto transversais quanto longitudinais.

Agora, para entender os elementos que constituem uma onda, vamos usar como exemplo uma onda transversal se propagando em uma corda. A corda esticada representará o ponto de equilíbrio, o local (ou posição) em que a perturbação é nula. As posições de maior deslocamento da corda em relação ao ponto de equilíbrio são chamadas de **crista** e **vale**.



Cristas são os pontos *superiores* da onda, enquanto os vales são seus pontos *inferiores*. E a distância entre o topo da crista e o ponto médio da onda (ou seja, o máximo deslocamento da posição de equilíbrio) recebe o nome de **Amplitude**. Brincando de produzir ondas em uma mola ou corda, você vai perceber que para produzir uma onda com *maior* amplitude, é necessário empregar *mais* energia: a energia aumenta (ou diminui) com a amplitude elevada ao quadrado.

Imagine agora que está segurando em uma das extremidades da mesma corda, pedindo a um amigo que segure firmemente a outra ponta, e comece a brincar fazendo ondulações, como mostra a figura.



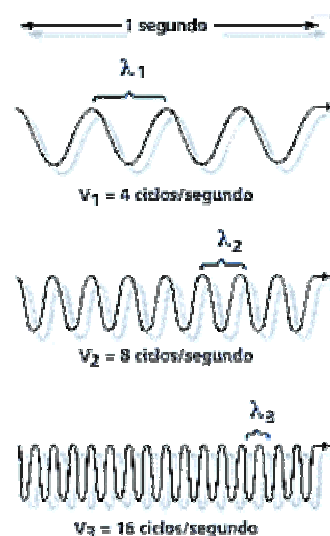
O que chamamos de **comprimento de onda** corresponde à distância entre dois pontos "iguais" (consecutivos) da onda. Por exemplo, a distância entre dois vales, ou entre duas cristas. O comprimento de onda é representado pela letra grega *lambda* (λ).

A **freqüência** é o número de vibrações (ida e volta) medido em um intervalo de tempo, determinando o número de comprimentos de onda (oscilações completas) que passam em intervalo de tempo. É representada pela letra grega *ni* (ν).

Você deve ter percebido que para "criar" uma onda nessa corda imaginária, é necessário se imaginar dando um pulso rápido com o braço, movendo-o para cima e para baixo, não é? Isso acontece porque (no caso) seu braço está desempenhando o papel de **fonte** da onda, e a energia que você está empregando no pulso é quem será responsável pela freqüência da onda. No Sistema Internacional de Unidades, utilizamos o **Hertz** para medir a freqüência de uma onda, que significa a quantidade de eventos que ocorrem em **um segundo**.

O número de vibrações produzidas em sua corda imaginária, por segundo, depende da energia transferida para ela: é necessária uma *maior* quantidade de energia para produzir uma *maior* quantidade de ondas por segundo.

Diretamente relacionado com o inverso da freqüência de uma onda, temos o **período**, que representa o tempo decorrido para que um ciclo de vibração (uma onda completa) seja produzido; o tempo que um evento leva para ocorrer por completo, uma única vez. Por exemplo, é o tempo que o balanço leva para realizar uma oscilação completa, de ida e volta. É simbolizado pela letra (**T**) e medido em segundos no Sistema Internacional de Medidas



(S.I.). Como dissemos, a **Frequência** e o **período** são grandezas físicas **inversamente relacionadas**: quanto maior for o período, menor será a frequência de oscilação de uma onda, de forma que:

$$v = 1 / T \text{ ou } T = 1 / v$$

Considerando que em uma onda a variação de espaço (ΔS) considerada é representada pelo comprimento de onda (λ), e o intervalo de tempo (Δt) é representado pelo período (T), a já conhecida expressão de velocidade média ($V_m = \Delta S / \Delta t$), para uma onda, será substituída por:

velocidade = comprimento de onda X frequência
 ou
velocidade = comprimento de onda X [1 / Período]

Porém, no caso de uma onda mecânica, é preciso levar em consideração que ela se propaga em um meio, cuja estrutura molecular interfere em sua velocidade de propagação. Por exemplo, a velocidade de propagação de uma onda sonora na água é de 1445 m/s, a uma dada temperatura, que é diferente da sua velocidade de propagação no ar, que é de 340 m/s, a certa temperatura.

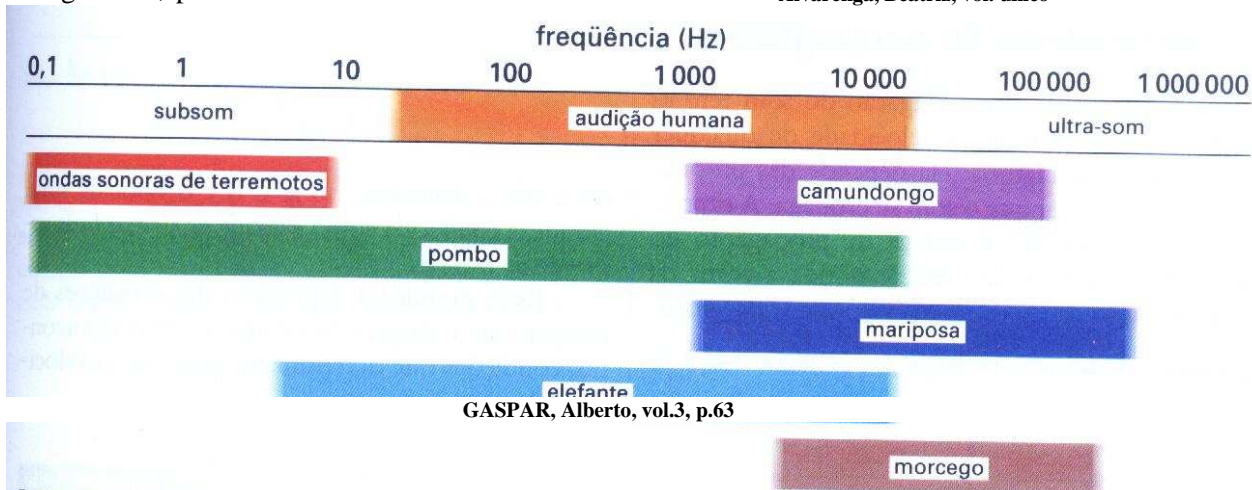
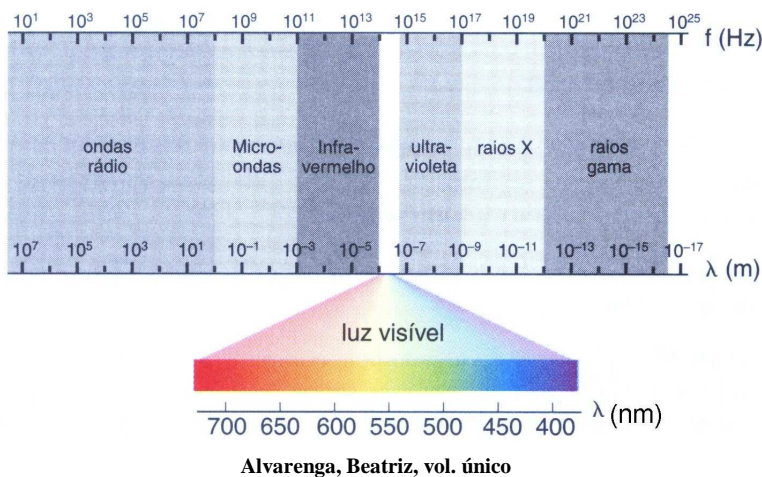
Já as ondas eletromagnéticas, embora não necessitem de um meio para se propagar, a velocidade também sofre uma alteração, de acordo com a natureza do meio no qual ela se propaga. Ou seja: uma onda eletromagnética irá mudar sua velocidade, se mudarmos o meio em que ela se propaga.

Espectro Eletromagnético e Sonoro

Calma, não é de assombração que nós iremos falar agora, mas das diferenças entre os tipos de ondas eletromagnéticas. Afinal, ondas de rádio não são idênticas às de TV, embora ambas sejam ondas eletromagnéticas. Mas em que elas diferem? Basicamente, pela frequência correspondente a cada tipo de onda.

O conjunto de todas as ondas de rádio, TV, microondas, radiação infravermelha, luz, radiação ultravioleta, raios X e raios gama, constitui o chamado **espectro eletromagnético**. Ondas sonoras (que são ondas mecânicas longitudinais) também possuem seu próprio espectro, denominado (adivinha?) **espectro sonoro**: ele é composto por todas as faixas de frequências sonoras, audíveis ou não pelo ser humano.

Agora que já estamos familiarizados com as propriedades das ondas eletromagnéticas, podemos estudar como elas



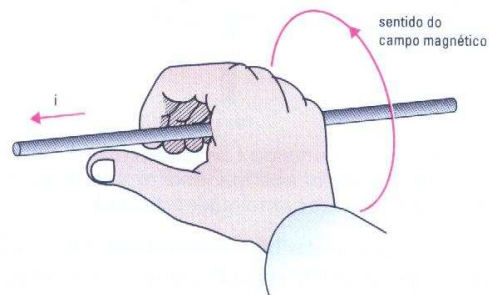
são produzidas – e entender melhor o conteúdo já estudado no texto sobre a relação entre eletricidade e magnetismo. Afinal, ondas mecânicas são originadas a partir de um **pulso**, e toda onda só pode ser criada a partir de uma **fonte**: como são criadas, então as ondas eletromagnéticas?

Você se lembra do que acontece se conectarmos um condutor aos terminais de um gerador, como uma pilha ou bateria? Sabemos que a diferença de energia potencial entre os pólos estabelece um campo elétrico no interior do condutor; e que é devido a esse campo elétrico externo que os elétrons livres do condutor passam a se movimentar. Assim, uma carga, ao se movimentar, faz variar a intensidade de seu campo elétrico, porque ele passa a se movimentar junto com ela. Mas, essa variação na intensidade do campo elétrico irá induzir um campo magnético circular em torno do fio (que pode ser facilmente detectado, conforme a experiência de Ørsted, lembra-se?). É possível deduzir o sentido do campo magnético “agarrando mentalmente” o fio condutor (nunca toque em um fio condutor durante a passagem de corrente!) com a mão direita, de forma que seu dedo indicador esteja no sentido em que passa a corrente elétrica.

Assim como a variação de um campo elétrico produz um campo magnético, a variação de um campo magnético também induz um campo elétrico variável, como já estudamos na experiência de Faraday, certo? Agora, imagine um fio percorrido por uma corrente contínua. Há um campo elétrico no fio, o que faz com que seus elétrons-livres se desloquem. Há também um campo magnético ao redor do fio, já que há corrente elétrica: no momento em que você ligar (ou desligar) o fio do gerador, a corrente passará de uma intensidade zero (desligado) ao valor da corrente contínua e durante esse intervalo de tempo, os elétrons livres do fio estão acelerando (ou desacelerando), o que causará uma variação no campo elétrico dos elétrons; conseqüentemente, uma variação no campo magnético ao redor do fio.

Essas variações do campo cessam quando a corrente contínua se estabelece, assumindo sua intensidade fixa: e agora você entende por que, na sala de aula, só observou a interferência no rádio quando ligou (e desligou) o fio na pilha, mas não quando ele permaneceu ligado.

Portanto, se a corrente no fio for alternada, o campo elétrico vai variar, fazendo seus elétrons livres se moverem alternadamente no fio: esses elétrons se movem fazendo um vai-e-vem, acelerando e desacelerando, variando assim seu campo elétrico. Ao mesmo tempo, com a variação d corrente, o campo magnético por ela induzido também vai variar. Como é que se chama mesmo esse tipo de perturbação que se propaga? Ah, sim, uma onda: só que uma onda eletromagnética, pois ambas as informações (a variação dos campos elétrico e magnético) irão se propagar. Mesmo que os elétrons parem de se movimentar, os campos elétrico e magnético permanecerão existindo, e a informação das variações sofridas continuará se propagando na forma de uma onda eletromagnética, rumo ao infinito (como é mostrado no filme “Contato”).



GASPAR, Alberto, vol. 3, p. 214

QUESTÕES

- 1 - Como podemos gerar uma onda eletromagnética?
- 2 - O que diz a regra da mão direita?
- 3 - Explique a relação entre corrente elétrica e magnetismo.
- 4 - O que são ondas mecânicas?
- 5 - Diferencie ondas longitudinais de ondas transversais.
- 6 - Represente uma seqüência de ondas, identificando na figura a amplitude da onda e o seu comprimento de onda.
- 7 - Quais as diferenças entre uma onda eletromagnética e uma onda sonora?
- 8 - Qual a menor e a maior frequências que estão no espectro da luz visível?
- 9 - Por que não podemos ver as ondas que se encontram no intervalo que nossos ouvidos captam?
- 10 - Explique o significado físico da expressão: $V = \lambda \cdot v$.
- 11 - Imagine a seguinte situação: duas pessoas aqui na Terra, dispostas de costas, uma para a outra, com capacetes que simulassem os dos astronautas, se afastariam dando alguns passos, em direções opostas. Em seguida, elas tentariam se comunicar. Seria possível essa comunicação? E se elas virassem de forma a ficarem de frente uma para a outra, seria possível a comunicação, mesmo com os capacetes? E se elas estivessem no espaço, o que aconteceria? Poderia ou não ocorrer essa comunicação, sem o auxílio de algum equipamento como aparece em filmes?

12 - Apontando um controle remoto para uma TV, conseguimos fazer com que ela ligue. Por que a luz de uma lanterna apontada para a TV, não consegue fazê-la ligar, uma vez que tanto no controle quanto na lanterna o que são emitidas são ondas eletromagnéticas?

13 - Observando o mar, de um navio ancorado, um turista avaliou em 12 m a distância entre as cristas de ondas que se sucediam. Além disso, constatou que se escoaram 50 segundos até que passassem por ele 19 cristas, incluindo a que passava no instante em que começou a marcar o tempo e a que passava quando terminou de contar. Determine a velocidade de propagação das ondas.

14 - Na superfície de um líquido contido num recipiente são geradas 10 ondas por segundo. Sabendo que a distância entre duas cristas consecutivas é de 2,5 cm, determine a velocidade de propagação e o período da onda.

Recurso de Ensino 5

ROTEIRO DE ATIVIDADES EXPLORATÓRIAS SOBRE FENÔMENOS ONDULATÓRIOS

As experiências serão distribuídas pela sala e os alunos divididos em grupo de 4 ou 5 estudantes, que realizarão rodízios para fazer as experiências.

EXPERIÊNCIA 1: PROJETOR DE LUZ

Materiais

- projetor de luz: caixa com lâmpada de filamento reto e fenda (o filamento da lâmpada tem que estar paralelo à fenda)
- 1 espelho
- 1 bloco de acrílico
- 1 folha de papel sulfite

Procedimentos

- 1 - Ligue o projetor e posicione a fenda sobre uma folha de papel sulfite. Observe o feixe (raio) de luz.
 - 2 - Coloque o espelho na trajetória da luz e observe. Varie a inclinação do espelho em relação ao feixe incidente.
 - 3 - Retire o espelho e repita o procedimento anterior com o bloco de acrílico. Observe especialmente a trajetória do feixe.
 - 4 - Relate suas observações e ilustre com figuras.
-

EXPERIÊNCIA 2: MOLAS

Materiais

- 1 mola slink
- 1 mola longa rígida

Procedimentos

- 1 - Estique a mola slink com a ajuda de um colega segurando em cada extremidade. Enquanto um aluno mantém a extremidade fixa, o outro deverá produzir vibrações verticais (transversais) na mola. Observe e desenhe o que acontece nas duas extremidades. Também produzam vibrações horizontais (longitudinais).
 - 2 - Agora, cada aluno deverá produzir um único pulso ao mesmo tempo. Inicialmente produzam o pulso vibrando a mola na vertical. Observe o que acontece com os dois pulsos ao longo de toda a mola. Desenhe.
 - 3 - Novamente os dois alunos deverão produzir um único pulso, só que agora um deverá vibrar a mola para cima e o outro para baixo. Observe e desenhe o que acontece com os pulsos ao longo de toda a mola.
 - 4 - Ligue as extremidades das duas molas e estique o conjunto. Produza um pulso em uma das extremidades. Observe e desenhe o que aconteceu com o pulso ao longo de toda a mola.
 - 5 - Relate suas observações e ilustre com figuras.
-

EXPERIÊNCIA 3: LASER – Experiência de Demonstração Investigativa

Materiais

- 1 ponteira laser
- várias fendas
- 1 fio de cabelo
- cílios postiços ou cerdas de um pincel
- 1 folha de papel sulfite branco

Procedimentos

- 1 - Ligue a ponteira laser. (Cuidado! Não direcione o laser para o seu olho e nem para o olho dos colegas, pois pode prejudicar sua visão).
 - 2 - Aponte o feixe de luz do laser em direção à fenda. Enquanto isso outro aluno deve pegar a folha de papel, colocar atrás da fenda e procurar pela formação de um ponto luminoso.
 - 3 - Repita o experimento com as outras fendas, fio de cabelo e cílios postiços ou de pincel.
 - 4- Relate suas observações e ilustre com figuras.
-

EXPERIÊNCIA 4: RESSONÂNCIA

MATERIAIS

- 1 régua flexível
- barbante
- 1 mola flexível
- 5 arruelas para servir de massa para o pêndulo
- 1 Suporte para fixar a régua

Procedimentos

- 1 - Faça um furo no centro da régua, passe o barbante e prenda três arruelas, de modo que fiquem penduradas.
 - 2 - Numa das extremidades da régua faça um novo furo para prender levemente a mola e coloque as outras duas arruelas na outra extremidade da mola.
 - 3 - Fixe um determinado comprimento do pêndulo, por exemplo 10 cm, e faça-o oscilar e observe o que acontece com a mola. Aumente o comprimento de 2 em 2 cm mais ou menos, observando sempre o que acontece com a mola.
 - 4- Relate suas observações e ilustre com figuras.
-

EXPERIÊNCIA 5 – CUBA DE ONDAS Experiência de Demonstração Investigativa

Materiais

- cuba de ondas
- retro projetor
- 6 blocos de acrílico de diferentes tamanhos

Procedimento

- 1 - Coloque a cuba sobre o retro projetor.
- 2 - Ligue a lâmpada sobre a cuba e o motor. Observe a formação das ondas e relate o fenômeno ocorrido, representando-os com ilustrações.

Desenho

Relato

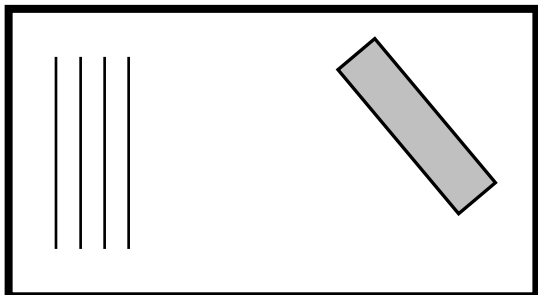


3 - Coloque os blocos de acrílico no meio da cuba de ondas, conforme as ilustrações a seguir e relate o fenômeno ocorrido, representando-os com ilustrações.

3.1 - Reflexão

Desenho

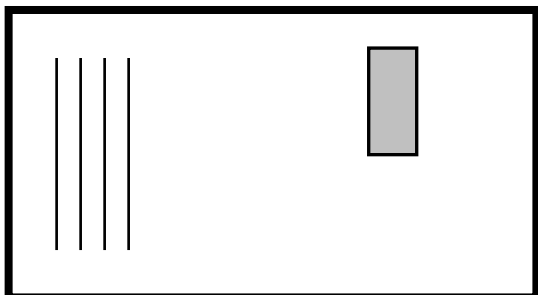
Relato



3.2 - Difração

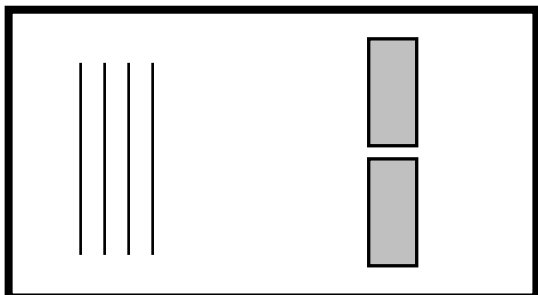
Desenho

Relato



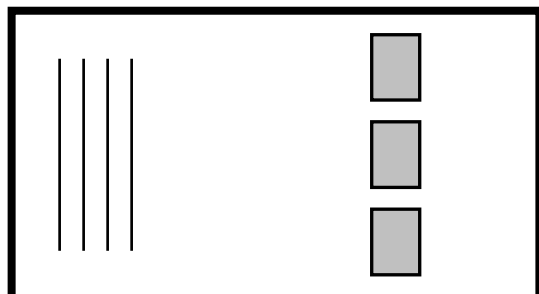
Desenho

Relato



3.3 - Interferência

Desenho



Relato

Recurso de Ensino 6

A ACEITAÇÃO DO MODELO ONDULATÓRIO PARA A LUZ E ALGUMAS DE SUAS CONSEQUÊNCIAS

Vamos agora conversar sobre a natureza da luz, ou seja, o que é a luz. Essa questão já foi respondida de várias maneiras, respostas estas muitas vezes contraditórias entre si. Vamos contar um pouco desta história e nos deter no estudo de um experimento muito importante na história da ciência: o experimento de Thomas Young, que ajudou a consolidar o modelo ondulatório para a luz.

Controvérsias que Antecederam O Experimento de Young

Em 1665, Robert Hooke¹, propôs uma teoria ondulatória para a luz e vinte anos mais tarde essa teoria foi melhorada pelo cientista holandês Christiaan Huygens². Embora Hooke tivesse proposto um modelo de propagação transversal para a luz, Huygens, em comparação com as ondas sonoras, propôs um modelo de propagação longitudinal. Já nessa época se sabia que a luz não precisava de um meio material visível para se propagar, conforme já estudamos. No entanto Huygens e seus contemporâneos não podiam imaginar um espaço completamente vazio, sem nenhuma matéria, como hoje fazemos sem problemas aparentes. Eles imaginavam que deveria existir pelo espaço uma matéria muito sutil, chamada ÉTER, na qual a luz se propagaria. Nenhum deles podia ver, sentir ou medir qualquer presença dessa matéria, mas para esses cientistas, o ÉTER era fundamental para explicar um universo sem “vazios” e a matéria na qual as ondas luminosas se propagavam. Segundo Huygens, o ÉTER LUMINÍFERO, seria um meio invisível, rarefeito e elástico, como uma camada gasosa.

Na época havia outra teoria concorrente: a corpuscular, na qual Isaac Newton³ acreditava (esse aí é o mesmo que elaborou as tais “Leis de Newton”). Ele observou a dispersão da luz por um prisma nas cores do arco-íris e explicou esse fenômeno assumindo que a luz é composta por muitos tipos de minúsculas partículas, cada uma



Fig 1. Os cientistas contemporâneos Huygens e Newton.

¹ Cientista inglês com contribuições em diversas áreas entre elas a biologia e a paleontologia. É mais conhecido pela famosa “Lei de Hooke” para a força elástica.

² Físico e matemático Holandês. Realizou várias contribuições na matemática e na mecânica.

³ Físico, matemático e astrônomo inglês. Responsável pela consolidação da mecânica clássica, com contribuições também na ótica. Um dos primeiros a desenvolver o cálculo diferencial e integral.

correspondente a uma cor, todas misturadas, viajando à mesma velocidade. Newton mostrou que a luz “branca” é a soma de todas as outras cores, pois ao passá-las por outro prisma, a cor branca era obtida novamente.

Assim, nesta época tínhamos duas teorias concorrentes: uma corpuscular e outra ondulatória. E, embora a teoria corpuscular encontrasse algumas dificuldades em explicar certos fenômenos, as duas aparentemente eram consideradas satisfatórias. Então, qual foi a considerada correta? Possivelmente devido ao prestígio que Newton alcançara por causa do sucesso de sua teoria sobre movimentos⁴, a teoria corpuscular foi aceita e defendida durante muitos anos por cientistas que acreditavam que Newton não podia estar errado.

Em 1801, Thomas Young, um físico, médico e egiptólogo inglês, apresentou para a Royal Society uma experiência que reavivou a teoria ondulatória da luz. Ele mostrou que a luz pode sofrer *interferência*, manifestando assim uma natureza ondulatória.

Antes de ver o fecho da história, vamos fazer uma pausa para entender a interferência luminosa.

O Fenômeno da Interferência Entre Ondas

As ondas mecânicas ou eletromagnéticas têm uma propriedade muito interessante que é denominada superposição, ou interferência. Podemos resumir essa propriedade afirmando que duas ondas, sob certas condições, podem se reforçar ou se atenuar. Vamos ver como isso ocorre com a ajuda de uma corda. Se duas pessoas derem dois “safanões” nas extremidades da corda ao mesmo tempo, quando as ondas se encontrarem elas irão se interferir de maneira construtiva, resultando numa onda instantânea com uma amplitude maior. Como as duas ondas estão em movimento contrário, após se encontrarem, cada uma continua isoladamente o seu trajeto. Chamamos esse tipo de interferência, em que a amplitude

das duas ondas se reforçam,, de interferência construtiva. Em contrapartida, chamamos de interferência destrutiva, quando as amplitudes das ondas que se encontram são atenuadas.

Em geral, quando falamos em luz, conseguimos visualizar o fenômeno de interferência associado ao de difração. Nesse fenômeno, quando uma

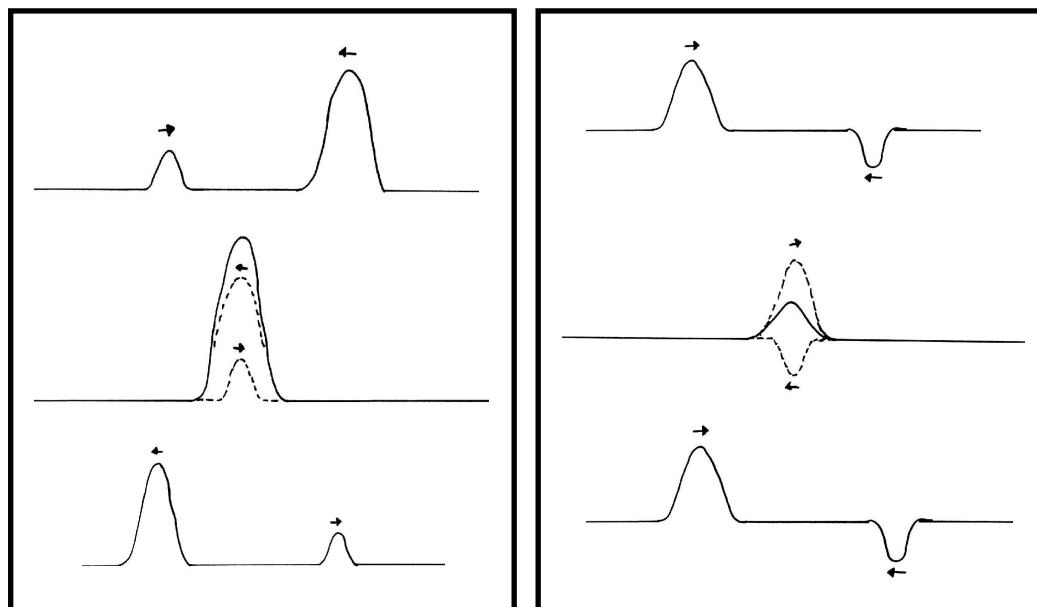


Fig 2. Interferência construtiva e destrutiva em uma corda.

onda passa por um orifício que tenha mais ou menos as dimensões do seu comprimento de onda (λ), a onda faz curvas. Ou seja, as ondas têm a capacidade de contornar obstáculos.

Por causa da difração é que conseguimos ouvir sons com boa intensidade mesmo se o emissor estiver atrás de um muro ou dentro de um quarto. Para a luz esse fenômeno não é tão fácil de perceber pois o orifício tem que ser bem pequeno para melhor visualização, já que a luz tem comprimento de onda muito pequeno.

O esquema na página seguinte ilustra o fenômeno da difração.

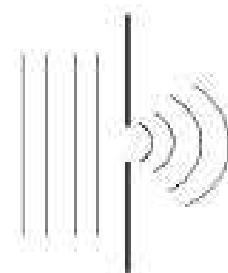


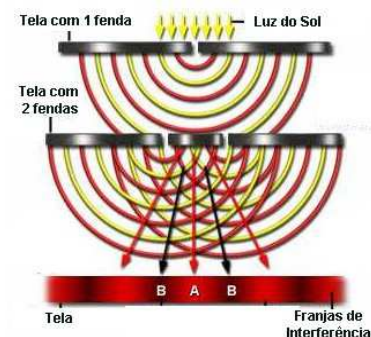
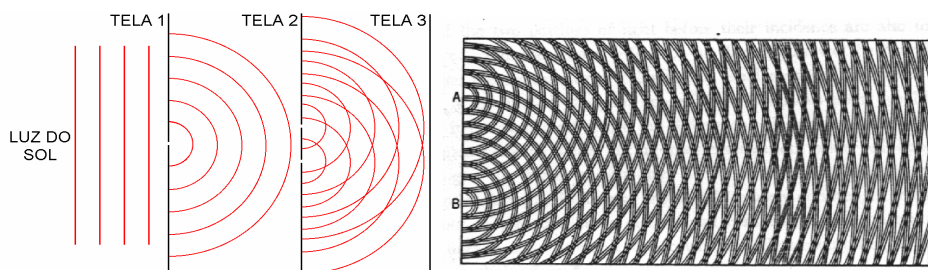
Fig. 3 - O fenômeno da difração

⁴ Não é a toa que ele aparece tanto nos livros didáticos!

Na ilustração ao lado, uma frente de onda paralela se propaga em direção a um orifício com dimensões da ordem de λ . O feixe então é difratado e se espalha pelo espaço ao redor do obstáculo. Quando esse feixe espalhado se encontra com algum anteparo, os máximos e mínimos da própria onda se interferem construtivamente ou destrutivamente e assim temos um padrão de claros e escuros que chamamos de franjas de interferência. Podemos visualizar esse fenômeno em uma cuba de ondas, ou mesmo com luz e fendas apropriadas.

O Experimento de Duas Fendas de Thomas Young

Na época em que Young fez o experimento não existiam nem mesmo lâmpadas como as de hoje e nenhuma tecnologia para a confecção de fendas adequadas. Assim, Young fez a luz do Sol passar por uma tela preta, com um pequeno orifício para produzir, por difração, um feixe de luz solar estreito num quarto escuro. Na trajetória do feixe, ele colocou uma segunda tela preta com dois pequenos furos circulares, um próximo ao outro; e por detrás dessa tela, colocou outra branca. Os raios de luz provenientes das duas fendas difratam e se interferem construtivamente em alguns pontos e destrutivamente em outros. Ao projetar a luz na tela branca, foram obtidas franjas de interferência, ou seja, manchas claras e escuras alternadas.



A Aceitação da Teoria Ondulatória para a Luz

O experimento de Thomas Young foi muito importante, pois evidenciou a natureza ondulatória para a luz, já que apenas ondas podem se interferir e difratar. Ao apresentar seus resultados, Young teve o cuidado em mostrar que o próprio Newton argumentou sobre o fato de que a luz manifestava aspectos ondulatórios. Mas, os defensores das idéias de Newton não o levaram a sério, pois Young não apresentou nenhuma formulação matemática. Mesmo sem que fosse possível explicar satisfatoriamente o experimento pela teoria corpuscular, o modelo ondulatório caiu no esquecimento novamente.

Mais tarde, em 1816, o francês Augustin Fresnel propôs uma teoria matemática para as ondas e os trabalhos de Young começaram a ter crédito. Em um concurso da Academia Francesa de Ciências, Fresnel submeteu o seu trabalho a um grupo de simpatizantes da teoria corpuscular. Um destes cientistas, Simon Denis Poisson, mostrou com cálculos que se a teoria ondulatória fosse correta um fato aparentemente impossível deveria ocorrer: ao projetar a sombra de um disco, haveria um pequeno ponto brilhante no centro. Fresnel se propôs a realizar o experimento e, para o espanto de todos, ele obteve o resultado previsto por Poisson.

Entretanto, a aceitação da teoria ondulatória para a luz não ocorreu de uma hora para outra. Gradualmente, os cientistas tomaram conhecimento dos experimentos de Young e Fresnel e a teoria corpuscular foi deixada de lado. Em 1818, Fresnel, aproveitando-se de uma idéia de Young em carta para um grande amigo seu, desenvolveu uma teoria que explicava muitos fenômenos não entendidos na época, mas para isso precisou se desfazer da hipótese de que a luz era uma onda longitudinal. Fresnel mostrou que muito podia se avançar no estudo sobre a luz se esta fosse uma onda transversal. Isso gerou sérias discussões sobre o ÉTER, pois se o ÉTER LUMINÍFERO de Huygens era tido como um gás, os gases não resistem a esforços transversais. Assim, Fresnel propôs a idéia de um ÉTER sólido, o que criava sérias dificuldades em tentar explicá-lo. Afinal, como conceber um meio material sutil, invisível, elástico e sólido?

⁵ Shamos (1959), p. 100.

Por volta de 1850, a teoria ondulatória estava largamente aceita e os físicos trabalhavam no sentido de entender esse modelo e aplicá-lo aos fenômenos relacionados com a luz, embora as dúvidas e polêmicas em torno do ÉTER persistissem.

Avanços na Compreensão da Natureza da Luz

Em 1862, o físico escocês James Clerk Maxwell formulou quatro equações fundamentais que constituem a base da eletricidade e do magnetismo. Como resultado de suas equações foi possível prever a existência de ondas eletromagnéticas. Para o espanto de todos, a velocidade prevista para essas ondas era exatamente igual à velocidade da luz, já conhecida na época.

Em 1887, dois cientistas norte-americanos, Albert Michelson e Edward Morley, tentaram medir, de maneira bastante rigorosa, o movimento da Terra em relação ao ÉTER e não obtiveram nenhum resultado, o que só poderia ser explicado caso a Terra, à medida que se movia, arrastasse o ÉTER junto a ela. Cada vez mais a existência do ÉTER estava se tornando complicada.

Em 1905, Albert Einstein criou a teoria especial da relatividade e abandonou o conceito de ÉTER. A partir daí, entendemos a luz como uma onda eletromagnética, a qual não necessita de um suporte material para se propagar. Esse mesmo cientista revolucionou o modelo para a natureza da luz como veremos mais adiante.

Outras Conseqüências do Modelo Ondulatório

Muitos outros fenômenos luminosos são decorrência das características ondulatórias para a luz, assim como a difração e a interferência. Vamos analisar mais um pouco esses fenômenos.

1. Reflexão

Tanto a luz como as ondas mecânicas podem se refletir quando atingem algum outro meio material com características diferentes, ou seja, um obstáculo. Para a luz, o ângulo de reflexão será o mesmo que o ângulo de incidência.

Podemos perceber a reflexão das ondas mecânicas em molas, ou na cuba de ondas. O eco é um exemplo de reflexão de ondas sonoras em obstáculos como cavernas ou montanhas. Para a luz, o melhor exemplo que poderíamos discutir é o espelho que reflete para os nossos olhos praticamente toda luz que sobre ele incide.

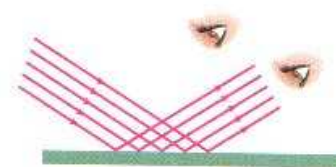


Fig. 6 – Reflexão luminosa.

2. Refração

Os raios luminosos, além de serem refletidos pelos objetos, podem também ser refratados. Esse fenômeno acontece quando a luz atravessa uma superfície de separação entre dois meios diferentes. Quando isso acontece, a velocidade da luz muda e assim ela passa a seguir outra trajetória, sofrendo um desvio em relação ao ângulo em que incidiu na superfície de separação.

Podemos perceber a refração luminosa num copo d'água com um objeto em seu interior. O objeto em questão parece quebrado, mas isso é uma ilusão criada pela refração, pois a luz sofre um desvio ao passar da água para o ar.

Embora estejamos tratando a reflexão e a refração de maneira separada, de modo geral, todas as superfícies refletem parte da luz que incide sobre ela, absorvendo ou refratando o resto.

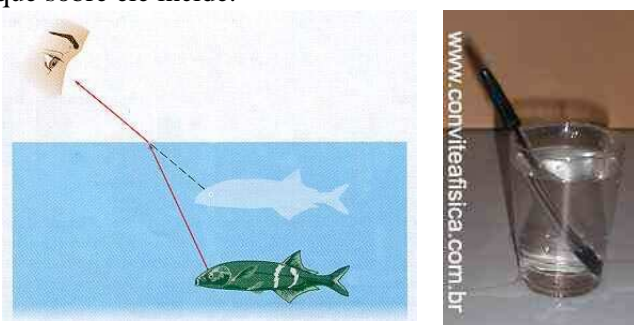


Fig. 7 e 8 – Refração da luminosa.

3. Ressonância

Um outro interessante fenômeno que está relacionando com a luz e as ondas mecânicas é conhecido como ressonância, que pode ser observada na interação das ondas tanto com objetos macroscópico, como um balanço, quanto com os átomos e moléculas constituintes da matéria.

Para entender a ressonância, imaginemos uma criança oscilando em um balanço. Você pode nunca ter percebido, mas a frequência de oscilação do balanço não depende da altura que ela atinge, mas apenas da massa da criança e do comprimento da corda do balanço. Isso é conhecido como frequência natural de vibração do objeto.

Agora, se você está atrás da criança e quiser que o balanço atinja alturas mais altas; o que você faz? Ora, pela experiência, você sabe que o ideal é empurrá-lo cada vez que ele for reiniciar o movimento para frente novamente (ou seja, cada vez que ele completa um período). Perceba então que você aplica a força sempre na mesma frequência da oscilação do balanço.

Essa é a essência do fenômeno de ressonância: a absorção da energia de uma onda por um corpo é máxima se a frequência da onda é a mesma da frequência natural do objeto.

A ressonância surge em fenômenos com a luz quando esta interage com as moléculas de um corpo. Cada tipo de molécula tem uma frequência natural diferente. É como se os átomos que formam as moléculas estivessem ligados por molas que podem oscilar. Assim, se a frequência da onda for igual à frequência de oscilação das moléculas, a absorção de energia é máxima.

Esse é o princípio de funcionamento do forno de microondas, que emite ondas eletromagnéticas que tem frequência igual à frequência de oscilação das moléculas de água. Por isso, apenas os objetos contendo água (ou aqueles que contenham moléculas com frequência de oscilação bem parecida) são aquecidos no forno de microondas.

QUESTÕES

1 - (UFMG) Um muro muito espesso separa duas pessoas em uma região plana, sem outros obstáculos. As pessoas não se vêem, mas apesar do muro se ouvem claramente.

- a) Explique por que elas podem se ouvir.
- b) Explique por que elas não podem se ver.

2 - O circuito elétrico de um rádio, por exemplo, possui uma frequência natural de oscilação, que pode ser ajustada com o auxílio do botão de sintonia. Uma estação de rádio é então sintonizada pelo fenômeno de ressonância. Com base nessas afirmações, qual deve ser a frequência ajustada do circuito para que uma estação de 100 MHz seja sintonizada? Justifique.

3 - Na experiência de difração com um laser, explique por que não é formada uma figura de difração quando o tamanho da fenda for da ordem de centímetros?

4 - Usando o conceito de reflexão da luz, explique porque conseguimos enxergar nosso corpo inteiro em um espelho cujo comprimento é menor que nossa altura.

5 - Explique porque conseguimos enxergar a Lua se ela não é uma fonte de luz (emite luz própria)?

6 - Explique por que temos a impressão que uma régua colocada num balde de água está quebrada?

7 - Explique, usando o fenômeno de interferência, por que é importante que os fornos de microondas contenham pratos giratórios para que os alimentos sejam cozidos de forma homogênea.

Banco de Questões

1 - A principal característica de uma onda mecânica é a propagação de energia sem que a matéria do meio seja transportada. Por exemplo, ao imprimirmos certa energia para formar uma onda numa mola (meio), os pulsos se propagam ao longo desta. Contudo, ao final do processo, a mola volta à sua posição inicial. Analise se essas ondas são mecânicas, e, em caso afirmativo, determine o seu meio:

- a) Som.
- b) Ondas do mar.
- c) Luz
- d) Ondas de TV

2 - Qual a principal diferença entre as ondas eletromagnéticas e mecânicas?

3 - Marque com um "X" a coluna correspondente à natureza correta para cada tipo de onda.

Onda	Mecânica	Eletromagnética
Ondas do mar		
Raios-x		

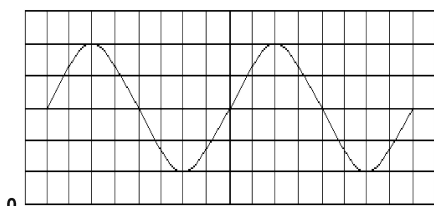
Ondas de rádio		
Ondas numa corda		
O som de um trovão		
A luz emitida por um raio		
Uma bandeira tremulando		
Música		
Microondas		

4 - Por que quando há um relâmpago, primeiro vemos um clarão e depois ouvimos o seu estrondo?

5 - Descubra qual é o erro nesse verso:

Eu preciso de você
 como as ondas do mar necessitam da água
 como a bandeira se entristece sem o vento
 como a Terra depende do Sol
 como o som e a luz precisam do ar

6 - A figura abaixo representa uma onda periódica propagando-se numa corda imaginária. Nessa representação, o lado de cada quadradinho corresponde a 20 cm.



Determine:

- O comprimento de onda (λ) desta onda.
- A altura máxima que a corda atingiu, sabendo que o nível zero no gráfico representa o solo.
- Se essa onda é transversal ou longitudinal.

7 - Como fizemos em classe, podemos produzir uma onda balançando para cima e para baixo a ponta de uma mola (ou corda) esticada. Ao aumentarmos apenas a velocidade com que balançamos a mola, qual dessas características da onda irá se modificar: amplitude, velocidade de propagação ou frequência? Justifique.

8 - Para o exemplo do exercício anterior, se agora balançamos a mola de maneira que elevamos a nossa mão mais para cima e para baixo, qual das características anteriores irá se modificar? Justifique.

9 - Como definimos as cristas e vales de uma onda longitudinal, como as ondas sonoras?

10 - Qual é o período de uma onda de frequência 0,25 Hz? Explique o que isso significa, pensando nos vales e cristas das ondas?

11 - Duas ondas se propagam em meios diferentes (por exemplo, uma corda) rumo a um objeto. A onda 1 tem frequência 10 Hz, enquanto que a onda 2 tem frequência de 20 Hz. Sabendo que a velocidade de propagação da onda 1 é de 1000 m/s, enquanto que a onda 2 possui velocidade de propagação de apenas 10 m/s, calcule o número de cristas que atingem o objeto durante 1 minuto para cada uma das ondas.

12 - Para o exercício anterior, qual é o comprimento de onda de cada uma das ondas descritas?

13 - Uma onda sonora se propaga no ar, nas condições normais de temperatura e pressão, com a velocidade de 340 m/s. Calcule a frequência dessa onda, sabendo que o seu comprimento de onda é igual a 34 m. Repita o procedimento para uma onda com comprimento de onda de 34 cm. Quais dessas duas ondas podem ser sentidas pelos ouvidos humanos?

14 - Diferentes ondas eletromagnéticas podem ter diferentes valores de frequência, mas suas velocidades são sempre iguais. No ar, seu valor é próximo de 300000km/s. Calcule o comprimento de onda para diferentes ondas com frequências de 10^7 Hz, 10^{13} Hz, 10^{16} Hz e 10^{19} Hz. Como denominamos cada uma dessas ondas?