

Aula 7

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

META

- Fazer com que o estudante pense no ensino de ciências como algo “orgânico” que está em profunda transformação;
- Fazer com que os alunos percebam, através de uma atividade lúdica, que podemos ensinar física através de experimentos muito simples;
- Fazer com que os estudantes percebam que podemos usar os *softwares* de ensino de matemática no ensino de física;
- Fazer com que os alunos percebam as aplicações da física no cotidiano.

OBJETIVOS

- Ao final desta aula, o aluno deverá:
- Estar ciente das novas possibilidades e dos desafios que envolvem o ensino de ciências em geral;
- Perceber que para se ensinar física não precisamos ficar presos ao livro didático;
- Entender que podemos usar os *softwares* de matemática para facilitar o ensino de física;
- Considerar que ensinar física não é ensinar a resolver problemas e que a física é uma mera aplicação da matemática.

PRÉ-REQUISITOS

- Os alunos deverão ter cursado as disciplinas de Psicologia da Educação, Física A, B e C.

Vera Lucia Martins de Mello

INTRODUÇÃO

Como dissemos na aula anterior, o tópico ondas é muito vasto e compreende todo tipo de onda mecânica e ondas eletromagnéticas. Assim, dividimos este tópico em duas aulas. Nesta aula vamos tratar do tema ondas eletromagnéticas encerrando o tema sobre “Ondas”. Esta aula está baseada inteiramente no material preparado para o *e-física* [1] em cima das notas do Prof. Gil da Costa Marques.

Se levarmos em conta que o espectro eletromagnético vai desde as ondas de rádio, curtas, micro ondas, ondas visíveis, ultra violeta, até os raios x e gama, temos o quão vasto é este tema. Do mesmo modo, suas aplicações são inúmeras. Vamos então, fazer uma breve introdução deste tema para poder introduzir os recursos didáticos para uma aula sobre este vasto tema.

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

James Clerk Maxwell deu a mais significativa contribuição à ciência do eletromagnetismo. Em 1864 Maxwell sugeriu que se pode encontrar a descrição de todos os fenômenos eletromagnéticos a partir das soluções de um conjunto de quatro equações a derivadas parciais de primeira ordem no tempo e no espaço. Essas equações são hoje conhecidas como as Equações de Maxwell. Elas são equações para os campos elétricos e magnéticos, uma vez conhecidas as distribuições das cargas elétricas e das correntes.

Animação → http://www.walter-fendt.de/ph14br/emwave_br.htm
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/emWave/emWave-port.html>

Maxwell foi um pouco mais além da fenomenologia do eletromagnetismo conhecido naquela época e acrescentou um novo termo a uma das equações, termo esse, conhecido como a corrente de deslocamento tornando a lei de Ampère mais geral. Esse novo termo, a corrente de deslocamento é tal que prevê o surgimento de um campo magnético pelo mero fato do campo elétrico variar com o tempo. Ou seja, um campo elétrico variável tem o mesmo papel que uma corrente elétrica. Estas equações, conhecidas atualmente como equações de Maxwell, estão discutidas em detalhes nos textos básicos de eletromagnetismo (ver referência 4.1). Elas são:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.24a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.24b)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (1.24c)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.24d)$$

onde o sistema internacional (MKS) foi adotado. O último termo da eq. (1.24d) representa a corrente de deslocamento introduzida por Maxwell.

Cada uma destas equações corresponde a uma lei física descoberta empiricamente. De acordo com a ordem usada na página anterior temos:

Lei de Gauss, diz que o fluxo de campo elétrico através de uma superfície fechada é igual à quantidade de carga contida dentro dela.

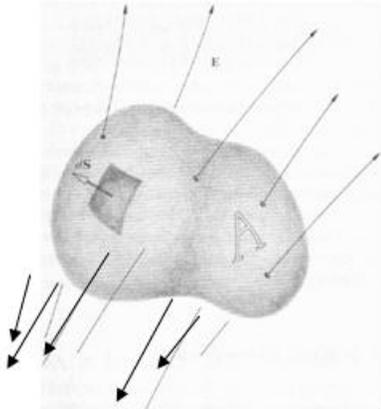


Figura 1 – A lei de Gauss.

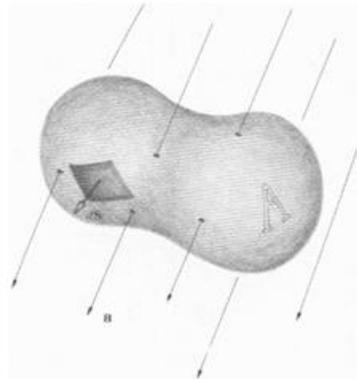


Figura 2 - Ausência de monopolos magnéticos.

A equação (1.24b) diz que não existe monopolo magnético.

A equação (1.24c) é a lei da indução de Faraday que afirma que a variação temporal do campo magnético \vec{B} gera uma circulação do campo elétrico \vec{E} .

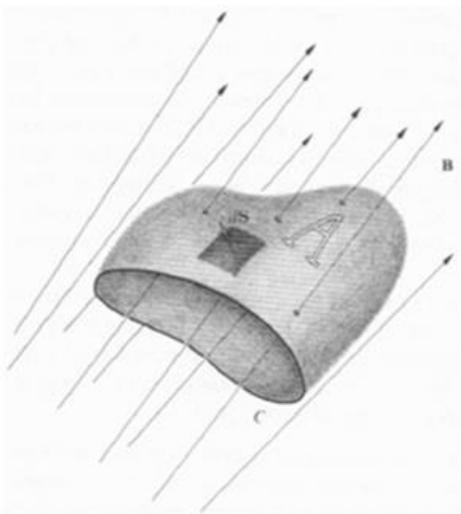


Figura 3

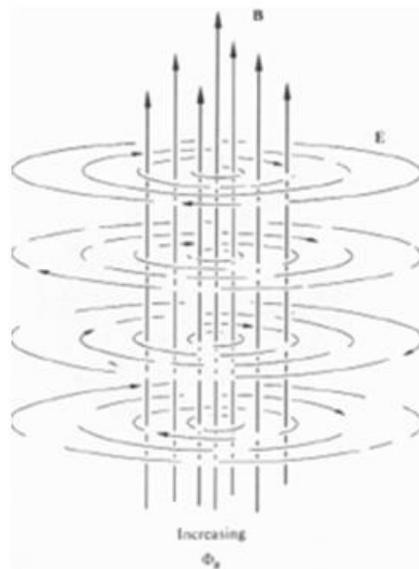


Figura 4

A equação 1.24d é a lei de Ampère-Maxwell diz que a variação temporal do campo elétrico \vec{E} gera uma circulação do campo magnético \vec{B} .

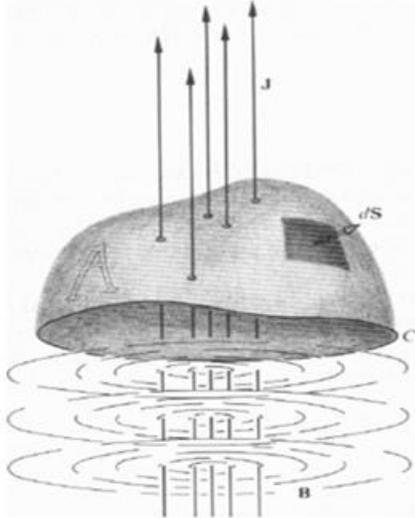


Figura 5

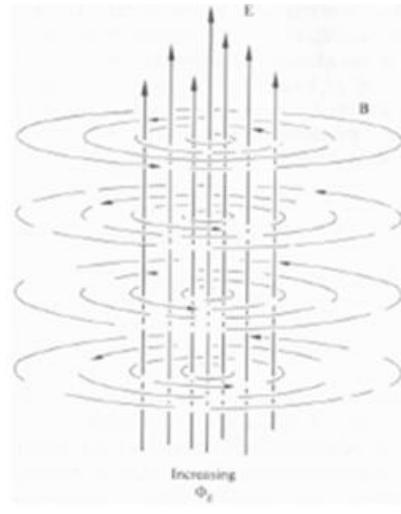


Figura 6

O significado das grandezas que aparecem neste conjunto de equações é o usual: \vec{E} é o campo elétrico, \vec{B} é a indução magnética, \vec{j} é a densidade de portadores livres, $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ é a densidade de corrente devida aos portadores livres, $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ é o deslocamento elétrico e $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ é o campo magnético. Introduzimos assim, a polarização elétrica \vec{P} e a magnetização \vec{M} , que correspondem à resposta do meio devido a presença dos campos elétrico e magnético, respectivamente. As constantes $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, determinadas empiricamente, são denominadas respectivamente de permissividade e permeabilidade do vácuo.

Analisando com um pouco de mais detalhes temos que:

Simetria das Equações

Olhando as quatro equações, duas a duas, a 1ª com a 3ª e a 2ª com a 4ª, temos que, elas diferem pelo fato de que, nas primeiras as cargas estão em repouso e na segunda estão em movimento. Logo, se tomarmos uma carga em movimento e observá-la em um RI que se move com esta (mesma velocidade) temos que, o campo magnético terá que se tornar em elétrico. Ou seja, estes devem ser duas faces de uma mesma grandeza, denominada de campo eletromagnético.

Como dissemos acima, as equações de Maxwell podem ser combinadas de forma a gerar uma nova equação que descreve a onda eletromagnética.

Equação de ondas:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1.26)$$

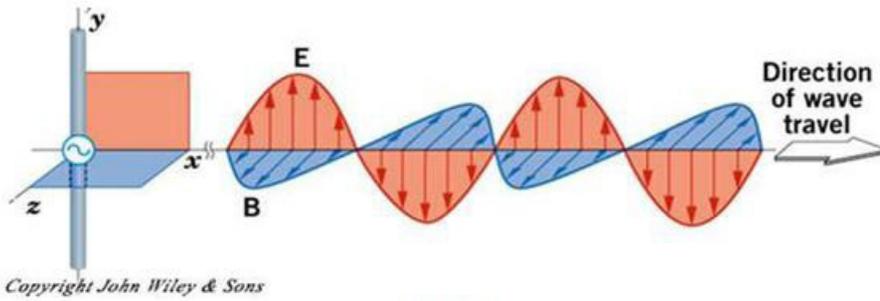


Figura 7

Este tipo de equação já era conhecido na época, de forma que Maxwell pode concluir que se tratava de uma onda com velocidade de propagação $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$.

Q1. Abra o *applet* “antena” e discuta se ele ajuda no entendimento do processo de geração de uma onda EM.

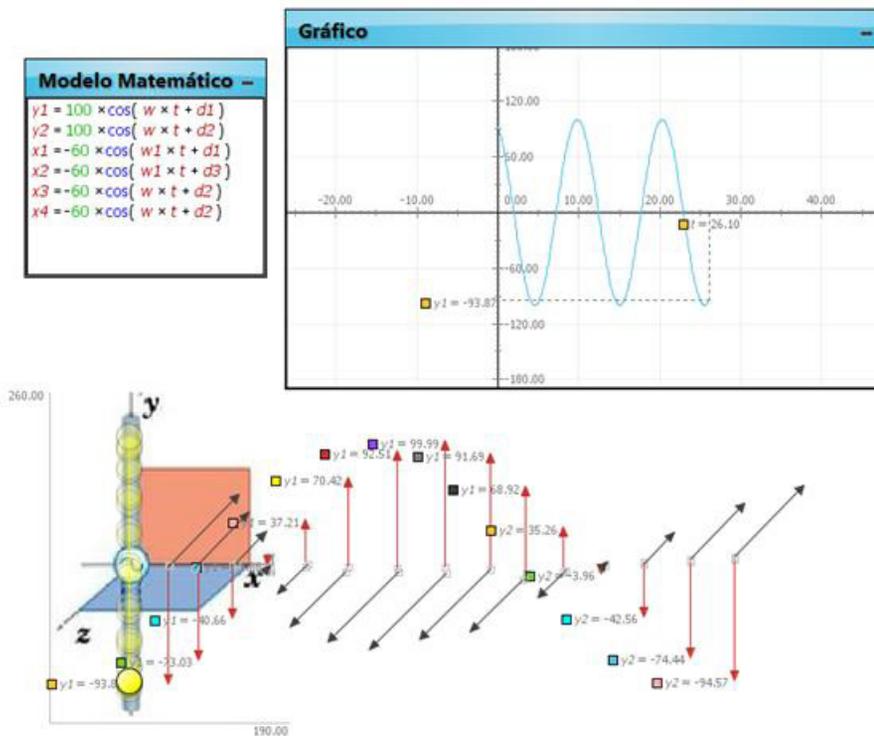


Figura 8

Num ponto P distante (onda plana):

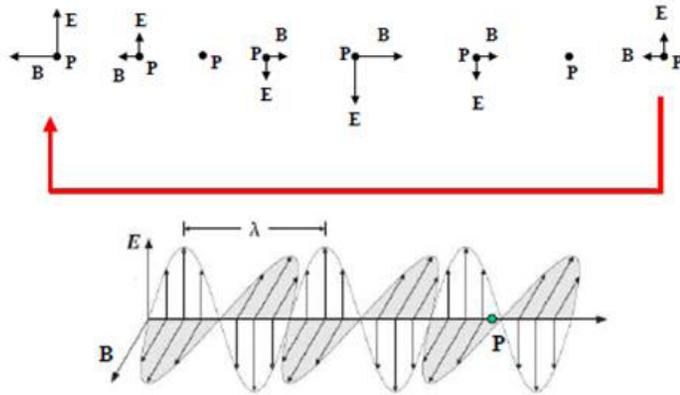


Figura 10

Veja a animação no link :

http://www.walter-fendtfendt.de/ph14br/emwave_br.htm.

Tais ondas recebem o nome de ondas eletromagnéticas. Sua velocidade de propagação é dada por:

$$v = \sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.28a)$$

onde μ e ϵ estão associadas a propriedades magnéticas (μ) e elétricas (ϵ) do meio. São as constantes denominadas de permeabilidade magnética e permissividade elétrica do meio. As ondas eletromagnéticas têm, portanto, uma velocidade de propagação que depende das propriedades eletromagnéticas do meio. Portanto, os campos elétrico e magnético podem se propagar como ondas no espaço. Os campos são os componentes da onda. A razão para a sua propagação, mesmo no vácuo, tem haver com o fenômeno da indução no eletromagnetismo. Um campo elétrico variando com o tempo, induz um campo magnético variando com o tempo e esse último ao variar, induz um campo elétrico variando com o tempo e assim sucessivamente.

É interessante enfatizar que quando estas equações foram obtidas pouco se conhecia sobre a natureza da luz. Apenas quando Maxwell substituiu os valores de μ e ϵ , conhecidos empiricamente através de medidas de capacitância e indutância, obteve-se que a onda eletromagnética tinha uma velocidade de propagação igual à da luz, e assim pode ser feito o relacionamento entre a óptica e o eletromagnetismo.

$$c = v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.28b)$$

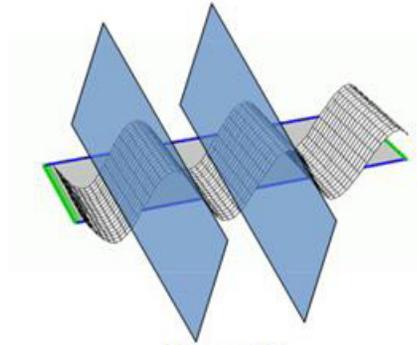


Figura 11

Existe ainda um conjunto de equações similares para o campo magnético. Todas são equações diferenciais lineares, de segunda ordem, que podem ter uma infinidade de soluções, dependendo das condições de contorno impostas pela geometria de cada situação particular.

A análise de Maxwell lhe permitiu concluir que:

“The agreement of the results seems to show that light and magnetism are affections of the same substance, and that light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws”.

(A concordância entre os resultados parece mostrar que a luz e o magnetismo são componentes da mesma substância, e a luz é uma perturbação eletromagnética que se propaga através do campo de acordo com as leis do eletromagnetismo).

Dessa forma Maxwell percebeu que a descrição dos fenômenos associados à luz pode ser entendida a partir do eletromagnetismo. Deu-se assim, o que denominamos hoje de unificação do eletromagnetismo com a óptica.

ONDAS TRANSVERSAIS

Podem-se classificar as ondas em duas grandes categorias quanto à direção de propagação em relação à direção na qual a onda oscila. Quanto a esse aspecto temos dois tipos de ondas: Ondas Longitudinais e Ondas Transversais. Nas ondas longitudinais, as ondas oscilam na mesma direção de propagação da onda.

As ondas transversais são aquelas para as quais as oscilações ocorrem numa direção que é ortogonal à direção de propagação da onda.

Pode-se provar que as ondas eletromagnéticas são ondas transversais. Isto é, enquanto as ondas se propagam, por exemplo, ao longo do eixo x os campos elétricos e magnéticos oscilam ao longo do plano $y-z$, que é um plano perpendicular a essa direção (ver figura abaixo).

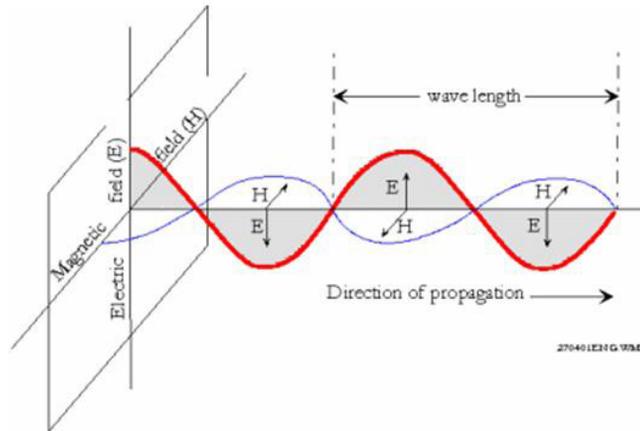


Figura 12

POLARIZAÇÃO

Polarização de uma onda eletromagnética diz respeito ao comportamento da direção dos campos elétricos e magnéticos quando analisado num plano perpendicular ao sentido de propagação da onda.

As ondas eletromagnéticas podem ser polarizadas de duas formas distintas.

No caso de uma onda plana polarizada, o campo elétrico oscila sempre num plano. O mesmo ocorrerá, naturalmente, com o campo magnético. Ele oscilará nesse caso num outro plano perpendicular ao plano de oscilações do campo elétrico. Esses dois planos contêm as possíveis direções do campo elétrico (e do campo magnético) e da direção de propagação da onda.

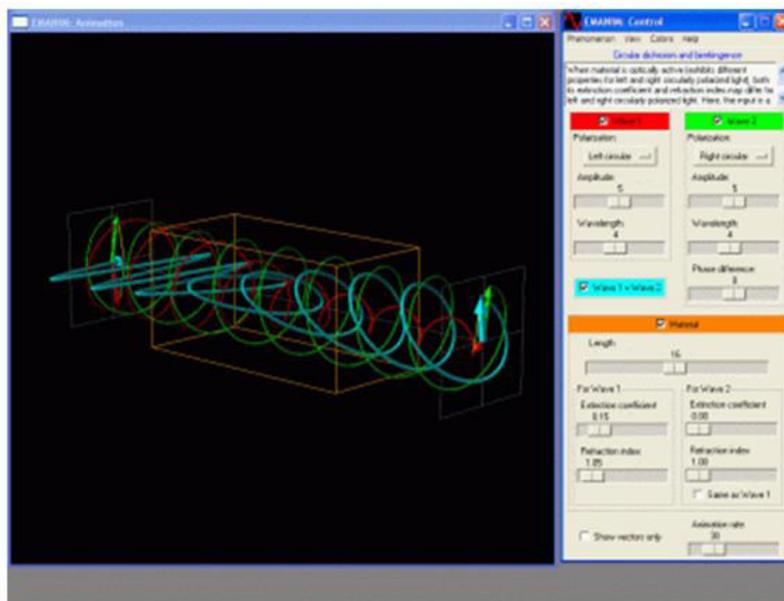


Figura 13

Uma onda circularmente polarizada é tal que, na medida em que a onda se propaga, o campo elétrico executará um movimento tal que, observando-se o seu comportamento a partir do plano perpendicular ao movimento, seu movimento será semelhante aquele do movimento circular uniforme.

SUPERPOSIÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A superposição de duas ondas gera uma nova onda.

A superposição de duas ondas monocromáticas não é uma onda monocromática.

Para a superposição de ondas monocromáticas escrevemos:

$$\vec{E}(r, t) = \sum_i \vec{E}_{i0} e^{i(\vec{k}_i \vec{r} - \omega_i t)}$$

$$\vec{B}(r, t) = \sum_i \vec{B}_{i0} e^{i(\vec{k}_i \vec{r} - \omega_i t)}$$

Para a superposição de um número muito grande de ondas, que se aproxime de um contínuo, substituímos a soma por uma integral sobre as frequências, isto é:

$$\vec{E}(r, t) = \int \vec{E}_0(\omega) e^{i(\vec{k}(\omega) \vec{r} - \omega t)} d\omega$$

$$\vec{B}(r, t) = \int \vec{B}_0(\omega) e^{i(\vec{k}(\omega) \vec{r} - \omega t)} d\omega$$

A partir das equações de Maxwell, e das soluções propostas acima, pode-se verificar que os vetores \vec{E}_0 e \vec{B}_0 e \vec{k} são perpendiculares entre si. Isto é:

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{B}_0 = 0$$

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{k} = 0$$

$$\vec{B}_0 \cdot \vec{k} = 0$$

Assim, um aspecto importante a respeito das ondas eletromagnéticas harmônicas, é que o campo elétrico oscila numa direção que é ortogonal à direção na qual oscila o campo magnético.

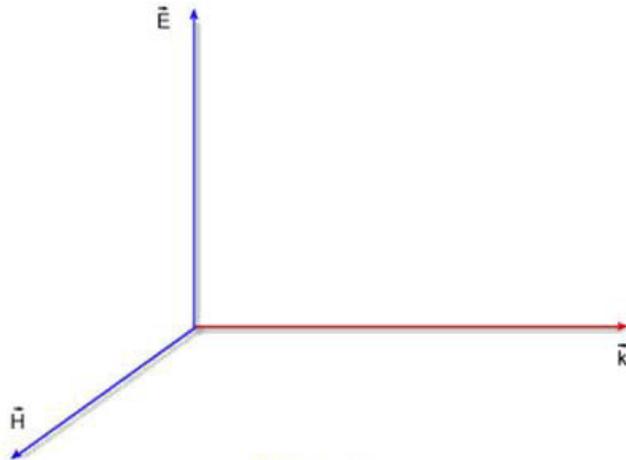


Figura 14

As ondas eletromagnéticas foram previstas pela primeira vez por Maxwell e observadas por Heinrich Hertz. Como as demais ondas, as ondas eletromagnéticas podem ser caracterizadas pela frequência ou, equivalentemente, pelo seu comprimento de onda. O conjunto de frequências define o espectro da radiação.

O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Denominamos de luz a uma parte do espectro eletromagnético. São as ondas eletromagnéticas cujos comprimentos de onda estão compreendidos no intervalo entre 400 e 700 nm (nanômetros). A luz visível é, assim, apenas uma onda eletromagnética. Outros tipos são igualmente importantes.

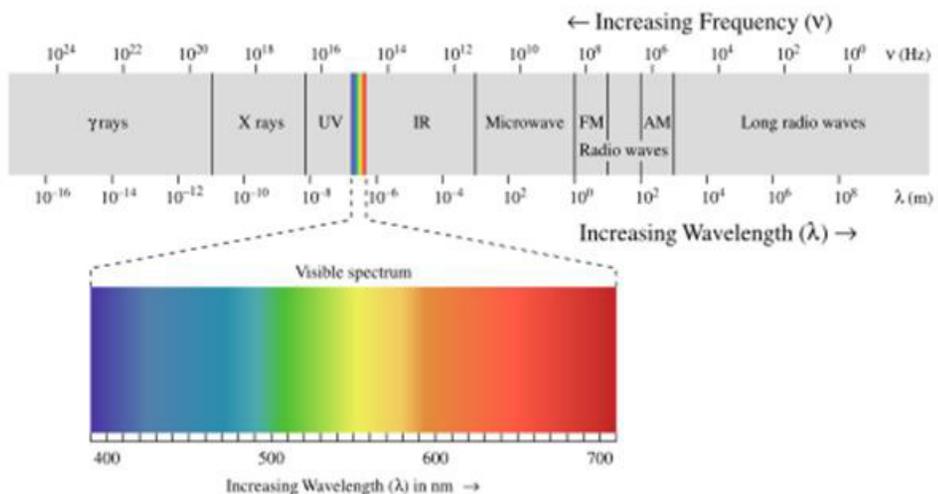


Figura 15

Ondas de Rádio

São as de menor frequência dentro do espectro eletromagnético. Parte desse espectro é utilizado para comunicações em geral (via rádio e celulares). As estações de rádio FM operam num domínio de frequências próximo de 10^8 Hz. As estações de rádio AM operam em frequências próximas de 10^6 Hz. Ondas de rádio têm frequência de até 300 MHz (mega-hertz).

Micro-ondas

É um subconjunto das ondas de rádio. Têm frequências compreendidas no intervalo entre 300 MHz e 300 GHz. As micro-ondas têm três características importantes que definem a sua utilidade na fabricação de fornos de micro-ondas: elas são absorvidas pelos alimentos em geral; são refletidas por metais e conseguem atravessar uma gama bem grande de materiais que usamos como embalagens de alimentos (vidro, papel, plástico, etc.).

As micro-ondas têm utilizações industriais. São utilizadas em radares da polícia rodoviária e em comunicações.

Radiação infravermelha

São as ondas com frequências próximas do espectro visível. Possui frequências abaixo da luz visível de tom avermelhado. O comprimento de onda estaria no domínio entre 700 nm e 1mm.

Existem muitas aplicações para a radiação infravermelha. Mais recentemente ela tem sido utilizada em equipamentos para visão noturna, quando não há luz suficiente. Um corpo (como o corpo humano) a 37°C emite radiação eletromagnética na região infravermelha. Assim, basta detectar a radiação emitida e traduzi-la em termos de imagens numa tela. Objetos mais quentes aparecendo com tons diferentes de objetos mais frios.

Radiação infravermelha é também utilizada em redes sem fio e aquecimento de objetos (como retirar gelo das asas de um avião antes da decolagem).

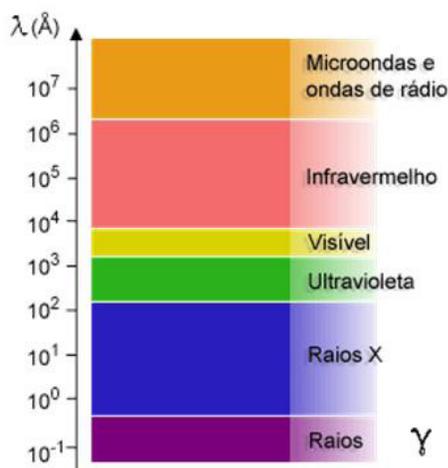


Figura 16

Radiação ultravioleta

Também são ondas com frequências próximas do espectro visível, mas na outra extremidade do espectro em relação ao vermelho. A frequência dessa radiação está acima daquela associada à luz visível de tom violeta.

A utilidade dos raios ultravioletas se faz sentir quando vamos à praia. O corpo fica bronzeado como uma reação natural, fisiológica, à exposição da pele a radiação ultravioleta proveniente do Sol. Como resposta contra a radiação ultravioleta, o corpo produz a melanina. Essa substância dá a tão apreciada coloração ao corpo humano. Desnecessário dizer que exposição excessiva à radiação UV podem acarretar consequências desastrosas do ponto de vista da saúde humana. A pele, os olhos e o sistema imune podem ter problemas agudos e às vezes crônicos.

Lâmpadas ultravioletas podem ser utilizadas para esterilizar ferramentas em hospitais e laboratórios. A radiação UV pode ser útil no processo de pasteurização de sucos de fruta.

Raios X

É a radiação cujos fótons que a compõem têm a energia das mais altas. Estão abaixo apenas dos raios γ . O comprimento de onda dessa radiação está dentro do domínio de valores entre 10 e 0,01 nm.

Os raios γ são parte do conjunto de radiações ditas ionizantes, representam, portanto risco à saúde.

Radiação ionizante é todo tipo de partícula (onda) capaz de ionizar átomos e moléculas. Radiação alfa, beta ou gama são exemplos de radiação ionizante.

Os raios x são empregados na área médica (diagnósticos), na área científica (cristalografia) e na construção civil.



Figura 17



Figura 18

Raios γ

São as ondas de maior frequência do espectro eletromagnético. Elas são compostas por fótons de maior energia. Assim, ela é capaz de ionizar quase todos os átomo e moléculas. Representam altíssimo risco para a saúde.



1. Compare o texto acima com um texto de um livro didático e com o seu curso de Física C. Discuta se a transposição didática feita nesta aula e a feita pelo livro que escolheu estão boas ou deixam a desejar.

2. Leia os textos contidos nos *links* abaixo que se dispõe a explicar o funcionamento de um forno de micro-ondas. Comente sobre a qualidade deles. Faça uma análise se é necessário conhecer as equações de Maxwell para poder entender estes textos.

http://pt.wikipedia.org/wiki/Forno_de_micro-ondas

<http://www.efeitojoule.com/2008/09/como-funciona-forno-microondas.html>

<http://casa.hsw.uol.com.br/culinaria-de-microondas.htm>

3. O que são raios infravermelhos e quais as suas aplicações?

4. O que são raios ultravioletas e porque eles são tão nocivos à pele?

5. Por que usamos os raios X para obter uma imagem dos nossos ossos?

6. Qual é a diferença entre transmissão de rádio AM e FM?

7. APPLET DE ENSINO

Analise os *applets* abaixo:

7.1 – Site de Ensino → EducaPlus.org.

Link → <http://www.educaplus.org>

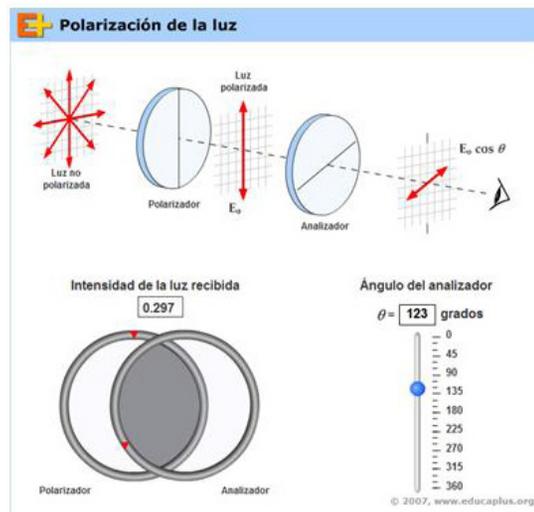


Figura 18

7.2 - Esta animação mostra uma onda eletromagnética, denominada onda plana polarizada, que se propaga na direção x positivamente. Os vetores do campo elétrico (vermelho) são paralelos ao eixo y , os vetores do campo magnético (azul) são paralelos ao eixo z .

Link → http://www.walter-fendt.de/ph14br/emwave_br.htm.

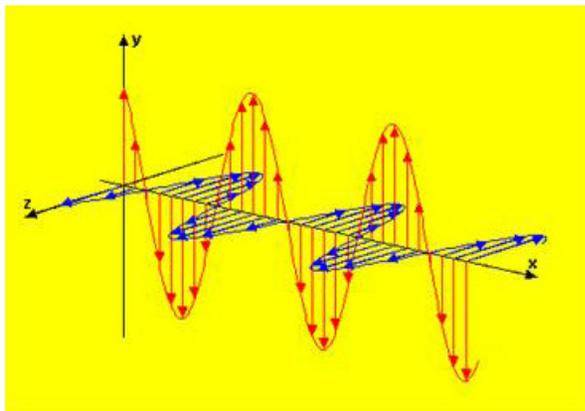


Figura 19

CONCLUSÃO

Devido a grande aplicabilidade na vida prática moderna, não podemos deixar de ministrar pelo menos uma aula sobre “*Ondas Eletromagnéticas*” em um curso de física. Apesar da dificuldade matemática deste tema, é possível ministrar uma aula mais conceitual usando simulação matemática, *applets* de ensino e vídeo aulas.

RESPOSTA ÀS QUESTÕES

1. Ele deve achar o nosso texto muito sofisticado e, portanto inadequado a uma aula para o ensino médio. Mas, espero que ele goste do texto.
2. Eles tem que assistir as aulas e comentar.
3. Raios infravermelhos são aqueles cuja frequência está logo abaixo da luz vermelha. Em geral elas serve para aquecer os objetos e tem efeito calmante sobre os seres vivos.
4. Raios ultravioletas são aqueles cuja frequência está logo acima da luz violeta. Seu comprimento de onda é menor que a da luz violeta e possui maior capacidade de penetração na matéria. Por isso eles podem penetrar nas células vivas e causar mutações genéticas.
5. Os raios X possuem alta energia e pequeno comprimento de onda de modo que eles podem atravessar alguma extensão de matéria. Assim, como eles são absorvidos de forma diferente pelos tecidos humanos estes permitem a formação de imagem dos órgãos internos do corpo ou da matéria em geral.

6. A transmissão de informações usando ondas de rádio AM (modulada por amplitude) usam as variações da intensidade da onda para codificar as informações. Já as ondas FM (modulada pela frequência) usam as frequências para codificar as informações.

COMENTÁRIO SOBRE AS ATIVIDADES

Apesar deste tópico da física ter poucos experimentos de baixo custo, muitos dos experimentos de demonstração são de fácil realização e possui muitos applets de ensino, simulações matemáticas e vídeo aulas, que compensam a falta do primeiro.

As aplicações tecnológicas das ondas eletromagnéticas são enormes e só isso justifica uma aula sobre este tema. Essa é uma das aulas que apesar de não podemos montar um rádio ou amplificador em sala de aula, todas as pessoas hoje em dia possui um rádio ou uma televisão.

REFERÊNCIAS

MARQUES, G.C. **Ensino de Física On-line - e-física**. Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/>>. Acesso em 28/08/2012.

PARRIS, Rick. **Peanut Software Homepage**. Disponível em: <<http://math.exeter.edu/rparris/winplot.html>>. Acesso em 28/08/2012.