

# 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 cientes das novas possibilidades e dos desafios que envolvem o ensino de ciências em geral;
  - Que para se ensinar física não precisamos ficar presos ao livro didático;
  - Os estudantes devem ficar cientes que podemos usar os softwares de matemática para facilitar o ensino de física;
- Que ensinar física não é ensinar a resolver problemas e que a física é uma mera aplicação da matemática.

### PRÉ-REQUISITOS

- Os alunos deveram 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”. Essa 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.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:

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

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

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

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

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 acima 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.

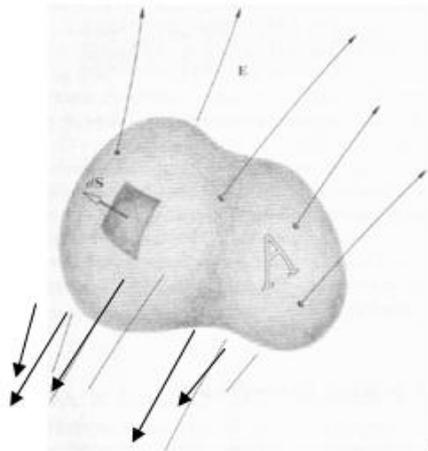


Figura 1 – A lei de Gauss.

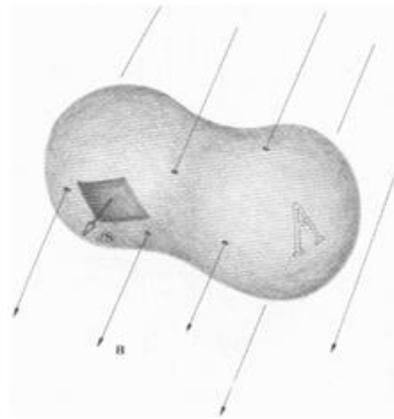
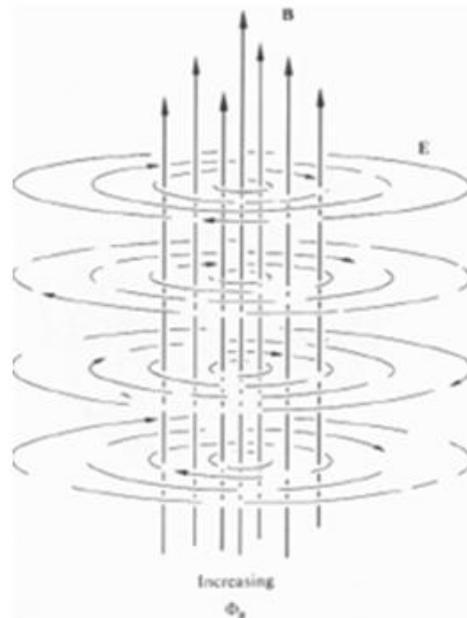
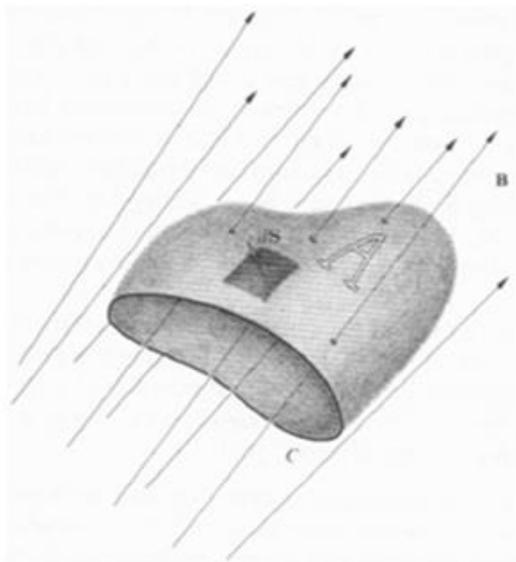


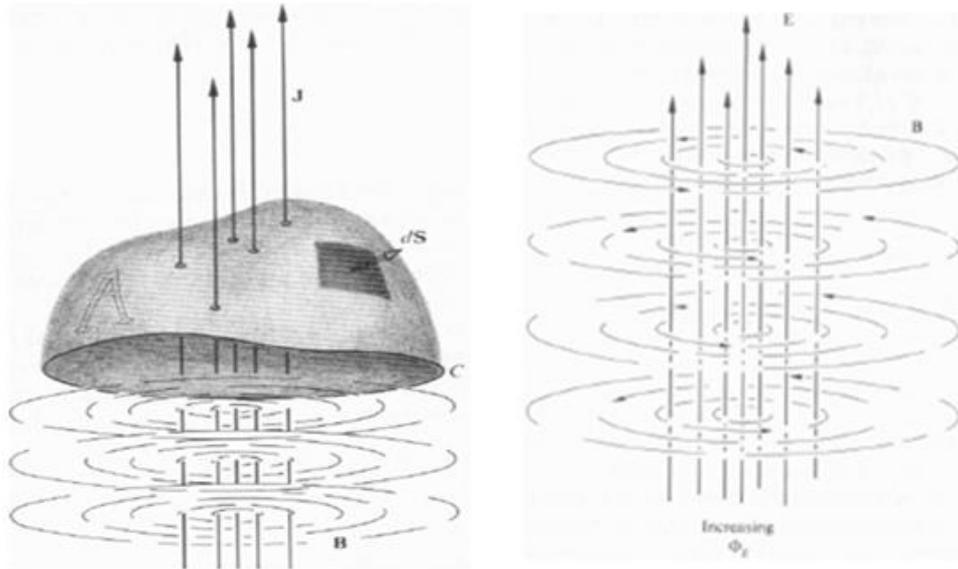
Figura 2 - Ausência de monopolos magnéticos.

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  $\vec{E}$ .



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  $\vec{B}$ .



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  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{H/m}$ , determinadas empiricamente, são denominadas respectivamente de permissividade e permeabilidade do vácuo.

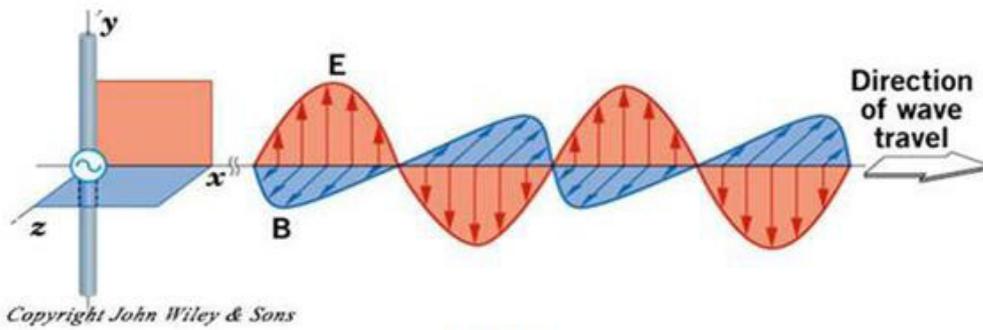
Analisando com um pouco de mais detalhes temos que:  
Simetria das Equações

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.

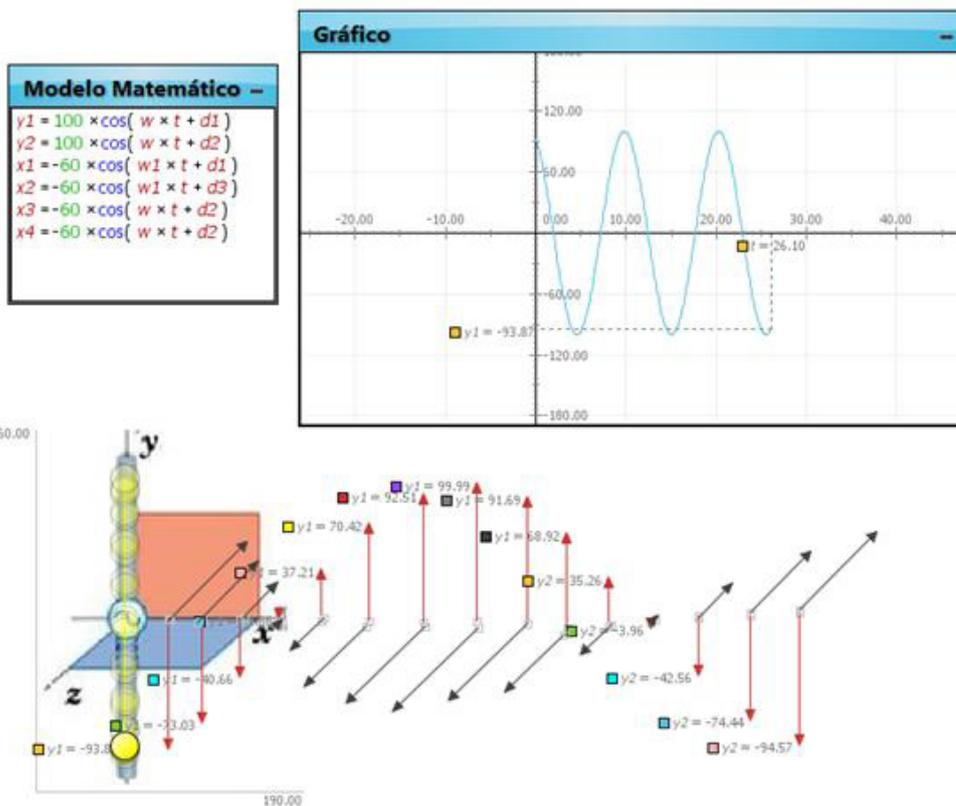
Equação de ondas:

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

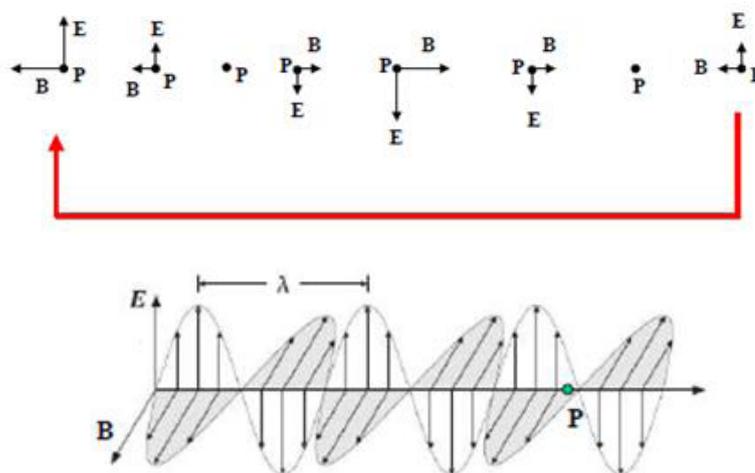


Este tipo de equação já era conhecido na época, de forma que Maxwell pode concluir que se tratava de uma onda com velocidade de propagação  $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ .

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



Num ponto P distante (onda plana):



Veja a animação no link :

[http://www.walter-fendt.fendt.de/ph14br/emwave\\_br.htm](http://www.walter-fendt.fendt.de/ph14br/emwave_br.htm).

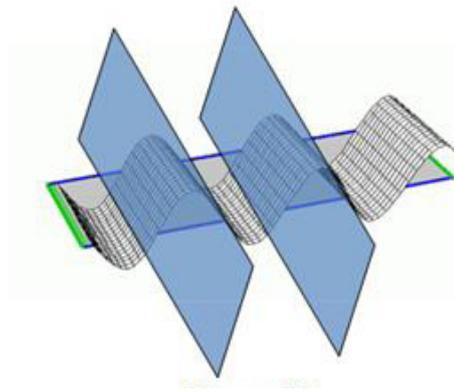
Tais ondas recebem o nome de ondas eletromagnéticas. Sua velocidade de propagação é dada por:

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

onde  $\mu$  e  $\epsilon$  estão associadas a propriedades magnéticas ( $\mu$ ) e elétricas ( $\epsilon$ ) 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  $\mu$  e  $\epsilon$ , 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.

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



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).

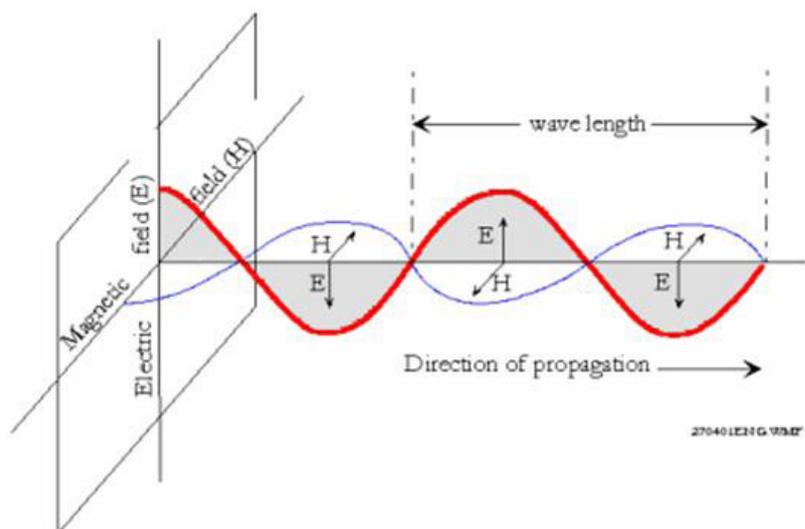
Dessa forma Maxwell percebeu que a descrição dos fenômenos associados à luz pode ser entendida a partir do eletromagnetismo. Deu-se assim, o que denominamos hoje de unificação do eletromagnetismo com a óptica.

## 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).

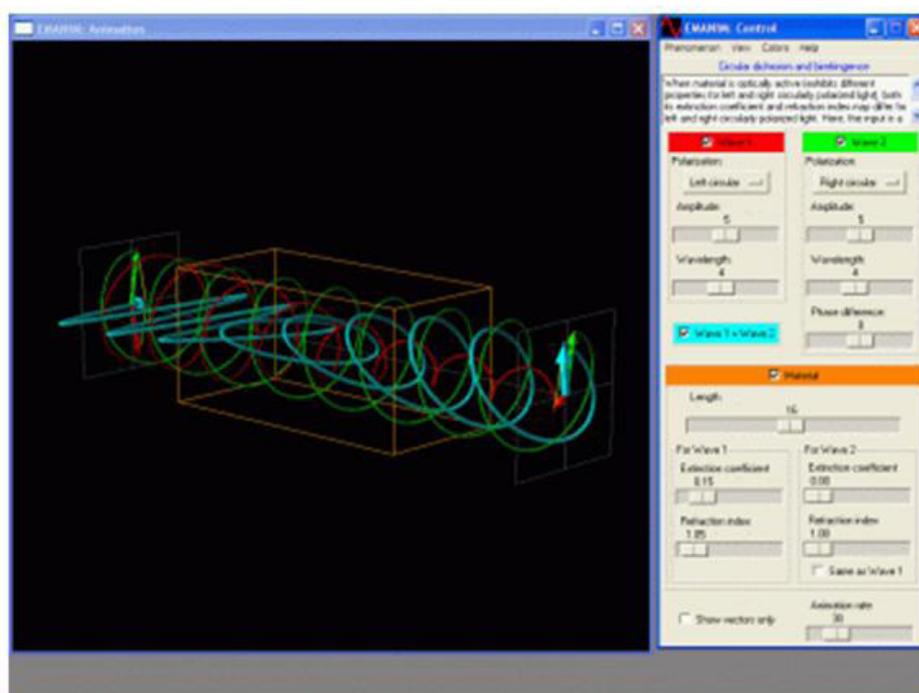


## POLARIZAÇÃO

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.



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:

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

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

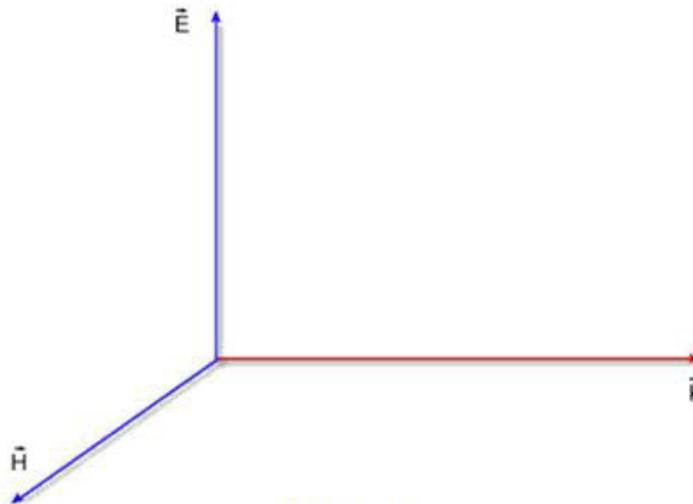
A partir das equações de Maxwell, e das soluções propostas acima, pode-se verificar que os vetores  $\vec{E}_0$  e  $\vec{B}_0$  e  $\vec{k}$  são perpendiculares entre si. Isto é:

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

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

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

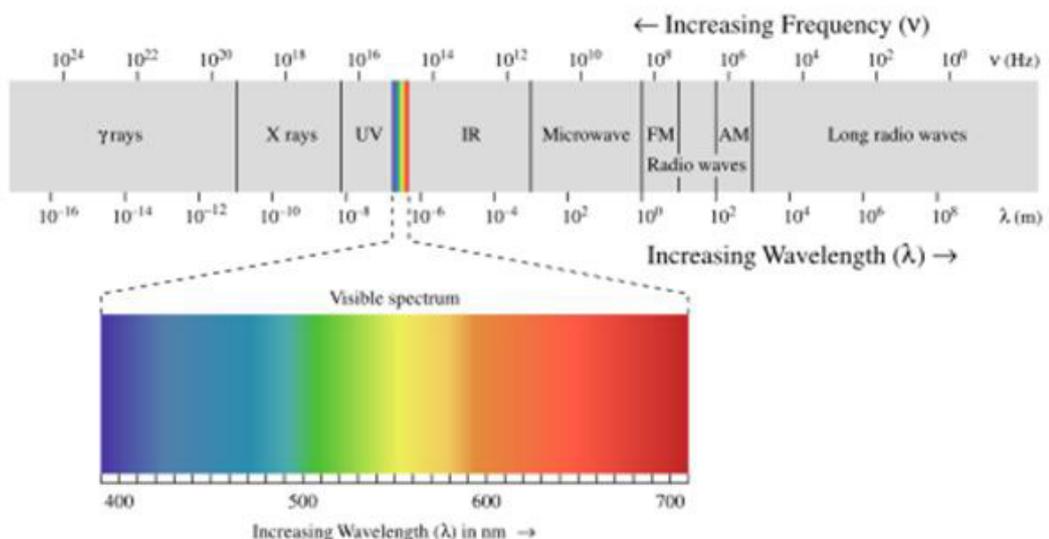
Assim, um aspecto importante a respeito das ondas eletromagnéticas harmônicas, é que o campo elétrico oscila numa direção que é ortogonal à direção na qual oscila o campo magnético.



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 ELETROMAGNETICO

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.



### 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.).

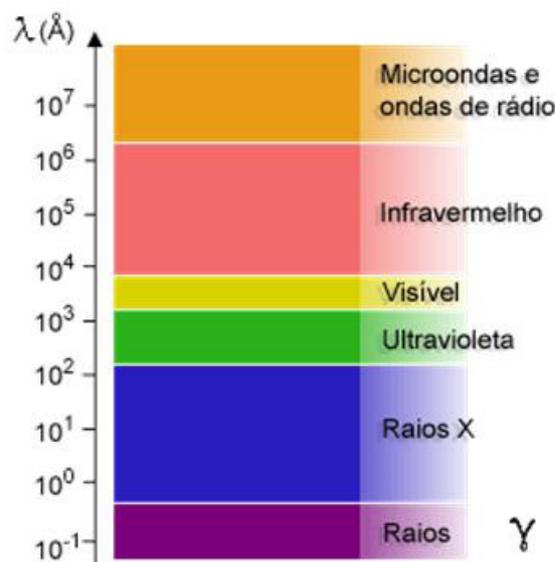
As micro-ondas têm utilizações industriais. São utilizadas em radares da polícia rodoviária e em comunicações.

### 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  $37^\circ\text{C}$  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).



### 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  $\gamma$ . O comprimento de onda dessa radiação está dentro do domínio de valores entre 10 e 0,01 nm.

Os raios  $\gamma$  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.



Raios  $\gamma$ 

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 átomos 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 dispõem 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://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?

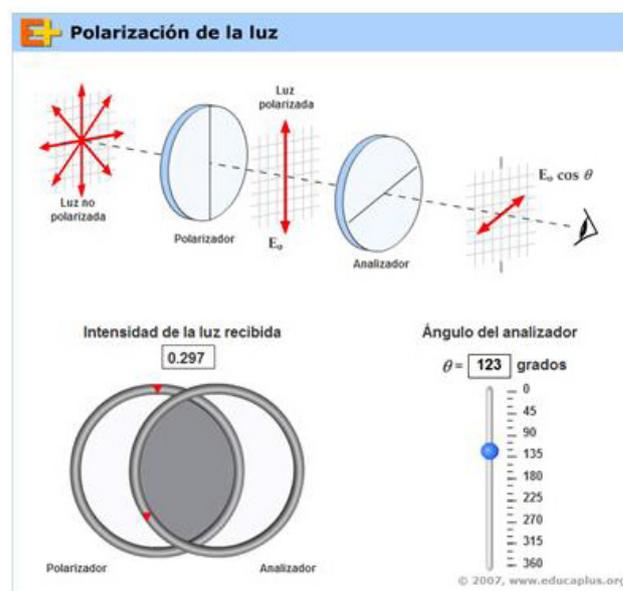
6 – Qual é a diferença entre transmissão de rádio AM e FM?

7 – APPLETS DE ENSINO

Analise os applets abaixo:

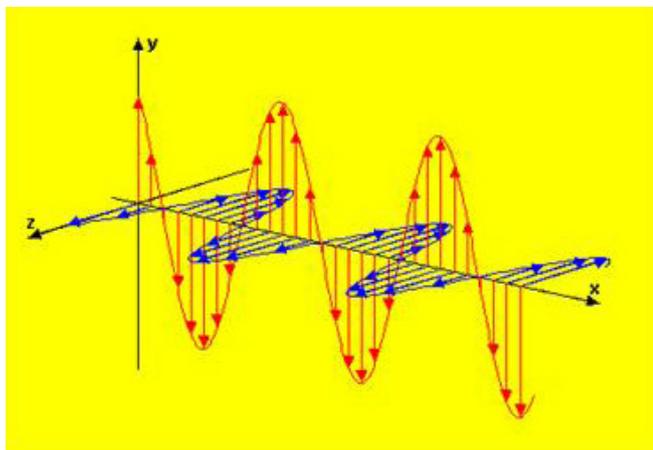
7.1 – Site de Ensino → EducaPlus.org.

Link → <http://www.educaplus.org>



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](http://www.walter-fendt.de/ph14br/emwave_br.htm).



### 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 segundo grau. 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 radio 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, todos as pessoas hoje em dia possui um rádio ou uma televisão.

### REFERÊNCIAS

- 1 – MARQUES, G.C.. Ensino de Física On-line - e-física. Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/>>. Acesso em 28/08/2012.
- 2 – PARRIS, Rick. Peanut Software Homepage. Disponível em: <<http://math.exeter.edu/rparris/winplot.html>>. Acesso em 28/08/2012.



# Aula 8

## ÓPTICA & LUZ

### **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 alunos percebam as aplicações da física no cotidiano.

### **OBJETIVOS**

- Ao final desta aula, o aluno deverá:
  - estar cientes das novas possibilidades e dos desafios que envolvem o ensino de ciências em geral;
  - Que para se ensinar física não precisamos ficar presos ao livro didático;
- Que ensinar física não é ensinar a resolver problemas e que a física é uma mera aplicação da matemática.

### **PRÉ-REQUISITOS**

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

**Vera Lucia Martins de Mello**

### INTRODUÇÃO

Nesta aula trataremos sobre a natureza da luz que é um assunto tão corriqueiro e ao mesmo tempo muito complexo. Antes da introdução da física moderna na matriz do ensino médio esse assunto era raramente abordado nos livros didáticos. Hoje em dia, a grande maioria dedica um capítulo inteiro para este tema. Por outro lado, este tema está por trás da maioria das aplicações da física moderna, como exemplo, a fibra ótica, o laser, as leitoras de DVD/CD.

No final desta aula consta um texto muito interessante sobre pressão da radiação para um melhor entendimento sobre os efeitos da radiação solar sobre a ionosfera terrestre.

Devido a grande aplicabilidade da luz, surgiram na literatura e na web vários materiais didáticos, de difusão científica sobre o tema. Então, apresentaremos um resumo baseado no material do Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (USP) - CEPA [1], e ao longo do texto lhe convidaremos a fazer uma reflexão e comparação com outros textos e materiais de apoio.

### TEXTO TEÓRICO [1]

Os fenômenos associados com a luz estão entre aqueles com os quais o ser humano tem uma relação mais íntima e constante ao longo da sua existência. A luz está presente em todas as atividades do dia a dia do homem. Muitos são os fenômenos associados às propriedades da luz. Alguns, como a formação de sombras e de penumbras é corriqueira. Comuns são também os fenômenos da reflexão e da refração da luz. Por exemplo, a nossa imagem em um espelho é o produto da reflexão da luz. Abaixo, vemos os raios da Lua refletidos nas águas do mar. Como veremos, a Lua é uma fonte secundária de luz. Ela reflete a luz proveniente do Sol. Também vemos como a imagem de uma caneta é distorcida pela água de um copo (refração da luz).



Figura 1 – Disponível em: <http://efisica.if.usp.br/optica/basico/luz/demonstracao/>.



Figura 2 - Disponível em: <http://efisica.if.usp.br/optica/basico/luz/cotidiano/>.

Fenômenos envolvendo a luz podem ser menos comuns e, às vezes, requerem aparatos especiais para serem observados. Dentre esses podemos citar a interferência e a difração da luz. Outros fenômenos são bem mais sutis de serem observados e interpretados, como o efeito fotoelétrico ou o espalhamento Raman.

A área da óptica é um campo de estudos fascinante. De maneira simplificada, podemos dizer que ela é o ramo da Física que estuda a propagação da luz e sua interação com a matéria.

Em muitas áreas da ciência e tecnologia, o entendimento de determinados conceitos pode ser difícil porque seus efeitos não são facilmente visualizados. Na óptica, entretanto, o simples uso de um laser permite a visualização de um dado efeito como função de vários parâmetros, facilitando o aprendizado. Isto se deve principalmente à coerência (mesma fase de onda), monocromaticidade (mesma frequência) e colimação da luz proveniente deste instrumento, que permitem a observação de fenômenos tais como interferência e difração, nos quais a natureza ondulatória da luz se manifesta claramente. Entretanto, para se chegar ao desenvolvimento deste dispositivo, e de vários outros que são importantes no cotidiano, um longo caminho foi percorrido e este percurso gerou um histórico bastante rico. Alguns aspectos que merecem destaque estão ligados às ideias sobre a natureza da luz e aos caminhos paralelos que a óptica e o eletromagnetismo trilharam durante séculos. Para se entender um pouco estes fatos, no e-livro Óptica Básico, existe uma breve revisão histórica do desenvolvimento dos conceitos principais ligados à óptica.

“A óptica é a área da Física que estuda a Luz: sua natureza, suas propriedades e suas aplicações. A óptica se propõe também a estudar a interação da luz com a matéria” [1].

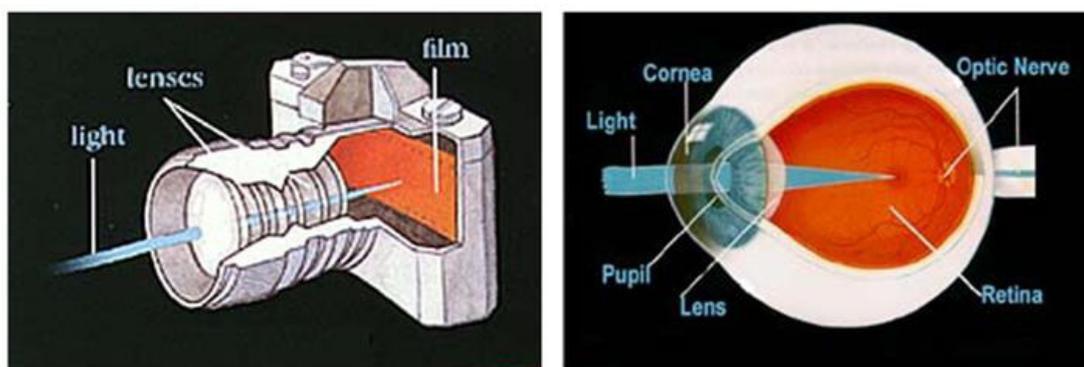


Figura 3 – Disponível em: [http://www.pasadenaeye.com/faq/faq15/faq15\\_text.html](http://www.pasadenaeye.com/faq/faq15/faq15_text.html)

## A NATUREZA DA LUZ

Desde a antiguidade os filósofos e os cientistas (estes depois do renascimento) se dedicaram a explicar os fenômenos envolvendo a luz. Desde a época de Newton, uma das questões centrais foi o debate sobre a natureza da luz. Este debate envolveu grandes filósofos e cientistas. A questão central poderia ser resumida da seguinte forma:

Teria a luz uma natureza ondulatória ou uma natureza corpuscular?



Figura 4 - Luz como ondas se propagando



Figura 5 - Fótons se propagando = Raios de luz

A evolução do conceito de fóton

Hoje sabemos que a luz é composta de partículas denominadas de fótons. Sendo a luz constituída dessas partículas diminutas, podemos nos perguntar por que só neste século nos demos conta disso?

O homem conhece a luz e seus efeitos desde eras remotas. É claro que ela despertava a curiosidade dos antigos. A formação de sombras e penumbras ocorre no dia-a-dia de todos os seres humanos. Os eclipses já eram utilizados alguns séculos antes de Cristo como um meio de determinar a distância da Terra até a Lua. Tales de Mileto, seis séculos antes de Cristo, já aprendera o método de triangulação para medir distâncias, inferindo a altura da Pirâmide de Gizé a partir da sombra projetada no solo pela pirâmide. Eratóstenes utilizou a sombra de uma haste fincada no solo (um gnomon) para determinar o raio da Terra.

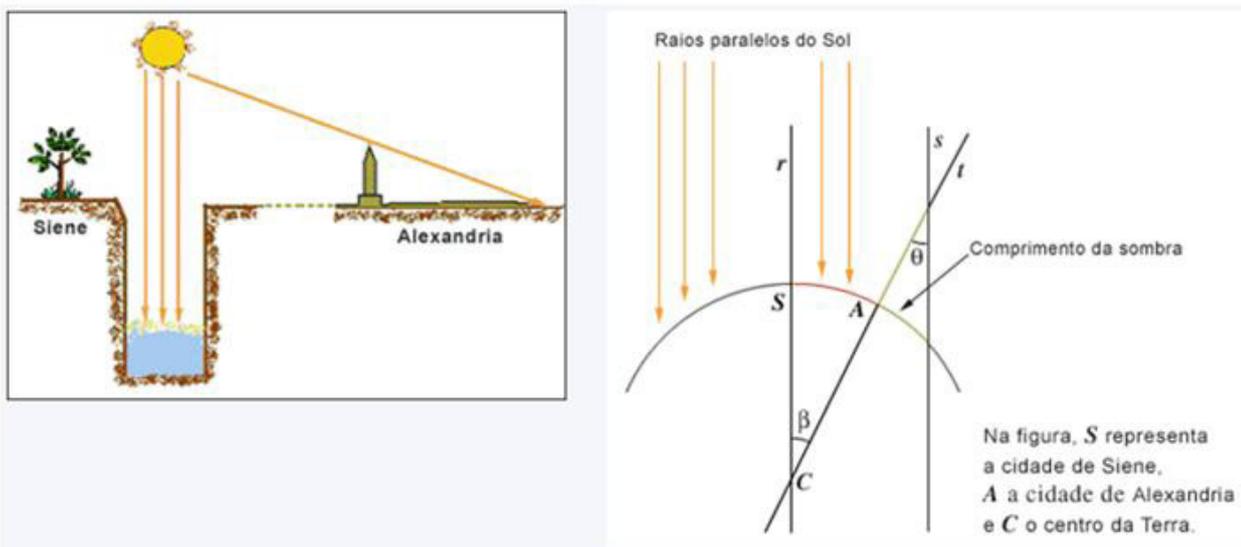


Figura 6 - Método de Eratóstenes para se medir o raio da Terra

As sombras e penumbras podem ser explicadas pelo Princípio da Propagação Retilínea da Luz. Princípio esse já enunciado pelos gregos e aparece na obra de Euclides (300 a.C.).

Outros fenômenos associados à luz, como a reflexão e a refração, já eram conhecidos na antiguidade. Fala-se muito em instrumentos utilizados com muita engenhosidade por Arquimedes na defesa de Siracusa. Dentre eles estavam alguns espelhos para provocar confusão nas hostes inimigas (os romanos).

A suspeita de que a luz tinha velocidade finita começou provavelmente com Galileu. Na época de Newton, ele já tinha conhecimento da determinação da sua velocidade feita por Roemer. De acordo com ele, a luz levaria sete minutos para passar do Sol à Terra. Esses fatos, bem como outros, poderiam ser explicados se a luz fosse composta por partículas. Por isso, Newton elaborou uma teoria para a luz, cujo ponto básico é a sua constituição por corpúsculos de luz. O livro de Newton começa definindo:

“Por raios de luz entendo as partes mínimas da luz e as que tanto são sucessivas nas mesmas linhas como simultâneas em várias linhas”.

Newton se interessou pela óptica antes que pela mecânica. Publicou seu primeiro trabalho em óptica aos 29 anos. Preocupou-se com um fenômeno que naquela época era célebre: o fenômeno das cores. Esse fenômeno, objeto do trabalho de decomposição da luz em diversas cores ao passar por um prisma, já fora detalhadamente descrito por ele aos 23 anos, em 1666. No seu livro "Óptica" Newton afirma que "é evidente que a luz consiste em partes" e se utiliza de termos como "corpos minúsculos" e "partículas de luz".



Figura 7 - Disco de Newton.



Figura 8 - Refração da luz por um prisma.

Muitos físicos, de valor excepcional, se opuseram à teoria de Newton. Dentre eles, Robert Hooke e Christiaan Huyghens. A ideia dominante era a de que a luz era a pressão ou o movimento de alguma perturbação que atravessa um determinado meio. Muito próximo, portanto, do que hoje denominamos de ondas.

A ideia da teoria corpuscular da luz prevaleceu (a despeito da oposição) durante o século XVII. Em parte graças ao prestígio de Newton e em parte por falta de evidências contrárias à teoria de Newton.

A teoria de Newton sofreu, no entanto, um grande abalo com os trabalhos de Young e Fresnel a respeito do fenômeno da interferência da luz. A teoria de Newton não é compatível com esse fenômeno.

Podemos ilustrar essa questão imaginando um dispositivo que contém duas fendas (elas estão a certa distância uma da outra) com um anteparo a certa distância delas. Podemos fazer três experiências. Em cada uma delas enviamos um feixe de partículas.

- Manter a fenda inferior fechada.
- Manter a fenda superior fechada.
- Manter as duas fendas abertas.

O resultado de Young e Fresnel mostrava que a luz exibia interferências. As ondas, ao se superporem (com as duas fendas abertas), podem produzir máximos (quando ocorre interferência construtiva) ou mínimos (interferência dita destrutiva). As experiências de Young e Fresnel levaram à Teoria Ondulatória da Luz. A luz seria constituída por vibrações (oscilações de campos elétricos e magnéticos, como se viu depois) transversais à direção de propagação.

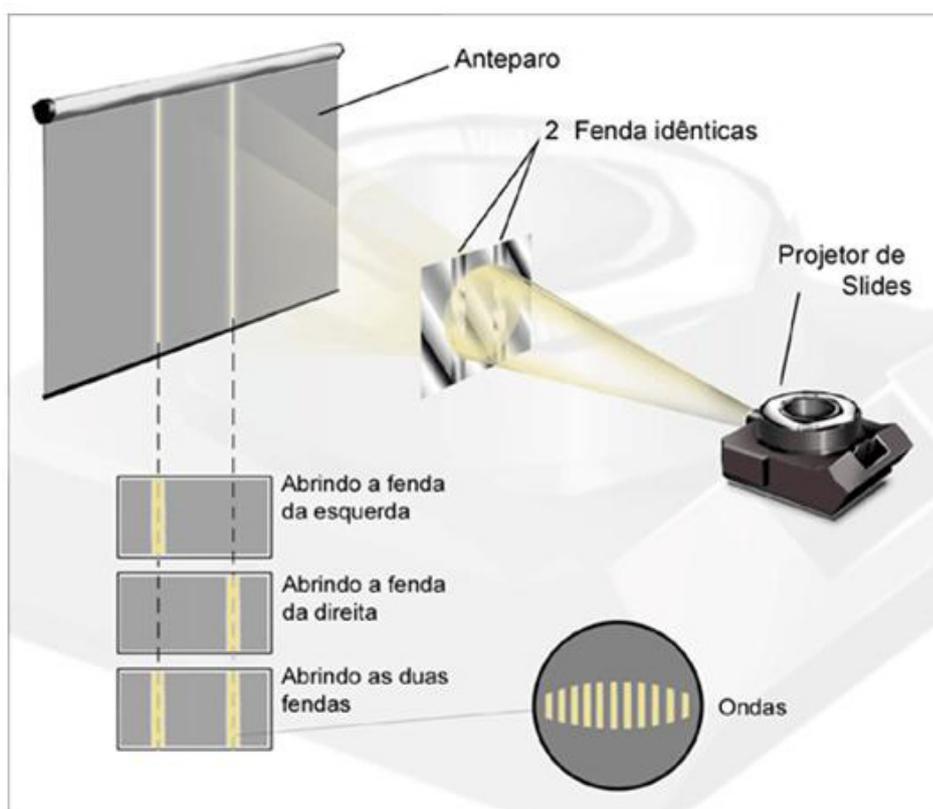


Figura 9 – Disponível em: <http://efisica.if.usp.br/optica/basico/fotons/historia/>.

## O PRINCÍPIO DE HUYGENS

A teoria ondulatória de Huygens (de 1678), voltada para explicar a propagação de uma perturbação como um fenômeno ondulatório é baseado num só princípio:

“Cada ponto numa frente de onda se comporta como fonte de ondas secundárias: a frente de ondas num instante posterior é a envoltória dessas ondas secundárias.”

Consideremos primeiramente a propagação de ondas esféricas, já que, todo ponto atingido pela onda se torna a origem de fontes secundárias esféricas.

Se em algum instante de tempo temos uma onda esférica, então depois de um tempo  $t$ , e considerando-se cada ponto como a origem de fontes secundárias, teremos depois desse intervalo de tempo várias ondas secundárias, pois cada ponto sobre a superfície se convertem em fontes de ondas secundárias. Vê-se que a envoltória dessas ondas secundárias é também uma onda esférica.

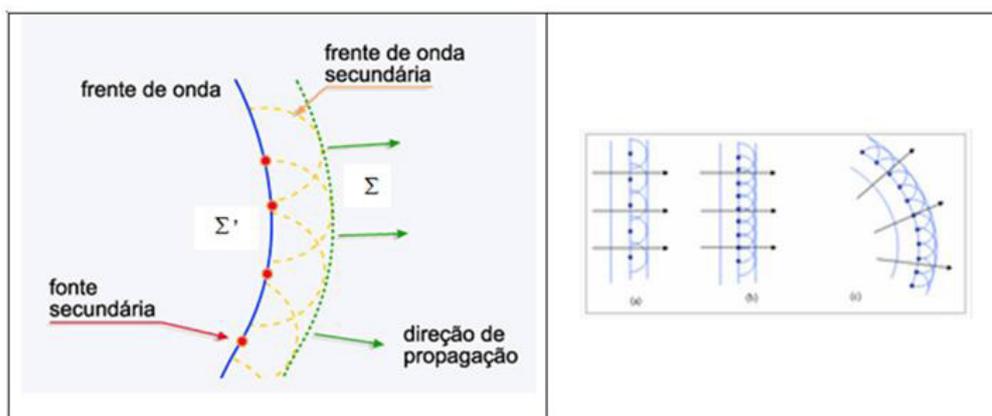


Figura 10 - Princípio de Huygens

Na realidade temos a formação de duas envoltórias esféricas. Temos como resultado, no entanto, um grande número de ondas secundárias. O que acontece com essas ondas secundárias? Huygens foi capaz de demonstrar que no volume entre as superfícies  $\Sigma$  e  $\Sigma'$  as ondas secundárias se cancelam. O resultado é que depois de um tempo  $t$  temos outra perturbação esférica, pois só na região da envoltória  $\Sigma$  o resultado é não nulo.

Mais geralmente, isto é, para qualquer tipo de onda, vale o princípio de que os vários pontos de uma superfície arbitrária ( $S$ ) se tornam centros de ondas secundárias. A envoltória geométrica dessas ondas em qualquer tempo posterior representa a posição da frente de ondas. Essa é a base da construção de Huygens.

O lugar geométrico varrido pelas frentes de onda é a região iluminada.

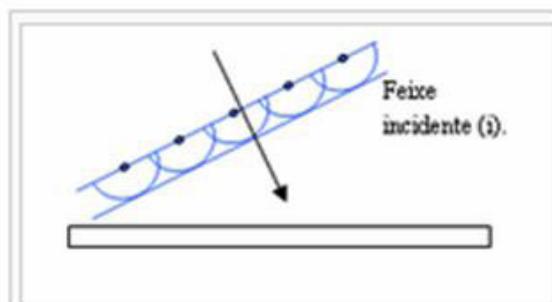


Figura 11 – Frente de ondas incidentes

A construção de Huygens nos leva à ideia de raios luminosos. Isso acontece porque podemos pensar a luz como se propagando ao longo de raios os quais, por definição, são perpendicular às frentes de onda.

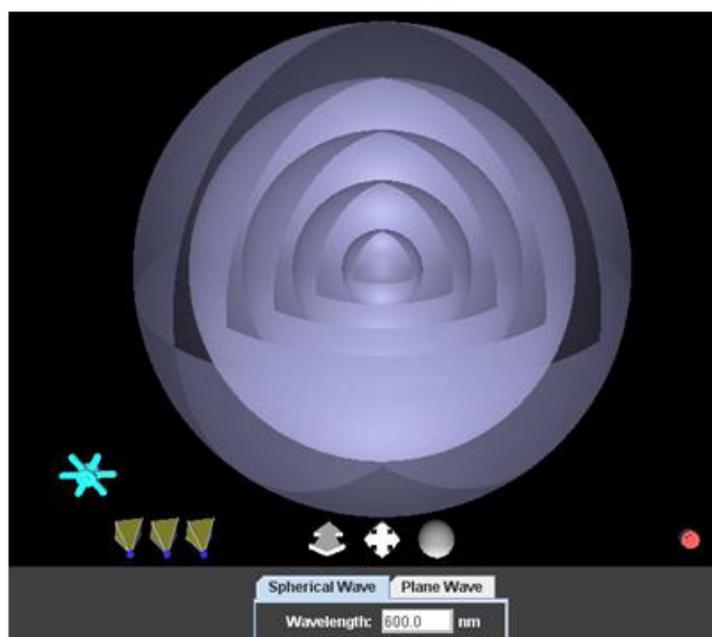


Figura 12 - Frente de Onda Esférica - Optics Project.

Nos meios homogêneos a luz tem a mesma velocidade em qualquer direção. Pela construção de Huygens, podemos facilmente verificar que a luz se propaga em linha reta. Isso pode ser verificado facilmente para ondas esféricas ou planas.

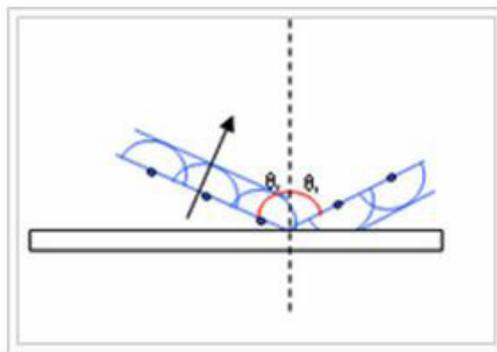


Figura 13 - Frente de ondas refletidas.

Tomemos uma frente de onda que esteja se deslocando com velocidade  $v$  em um meio com índice de refração  $n$ . Ao percorrer uma distância  $d$  ele gasta um tempo  $t$ , tal que,

$$t = \frac{d}{v} = \frac{nd}{c}$$

O produto do índice de refração pela distância percorrida no meio,  $nd$ , denominamos de caminho óptico associado ao percurso no meio óptico.

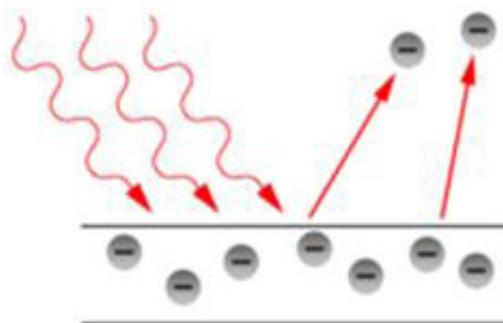
Questões:

Q1 – Abra o modelo Huygens do software Modellus e verifique essa lei.

## DUALIDADE ONDA PARTÍCULA

A partir dos trabalhos de Young e Fresnel, a teoria de Newton caiu no esquecimento. Foi de outra forma retomada depois do trabalho pioneiro de Einstein em 1905 sobre o efeito fotoelétrico.

Esse efeito pode ser resumido assim. Podemos arrancar elétrons de uma placa se fizermos incidir luz sobre ela. Essa é a origem do nome "fotoelétrico". Sabemos que, para arrancar um elétron, devemos despender certa quantidade de energia, pois os elétrons estão presos (ligados) à placa.



Se a luz não fosse constituída por corpúsculos, haveria a necessidade de um intervalo de tempo entre a luz incidir e o elétron sair. Isso porque se acreditava na necessidade de o elétron acumular energia vinda da radiação luminosa. Ademais, qualquer onda eletromagnética serviria (dizemos de qualquer comprimento de onda). Algumas seriam apenas mais eficientes do que outras. Isto é, arrancariam em menor tempo do que outras. Duas surpresas ocorreram. A primeira é a de que só radiação com uma frequência acima de certo valor podia arrancar elétrons. E a segunda é a de que, para essa radiação, não havia a necessidade de se esperar nada. Einstein então, em 1905, interpretou, corretamente, que o efeito fotoelétrico com essas características só poderia ser explicado se a luz fosse composta por partículas denominada por ele de quanta de luz. Hoje estas são denominadas de fótons. Os fótons observados deram razão a Einstein. Desde então as evidências têm-se acumulado em favor da teoria corpuscular da luz, que é a teoria vigente.

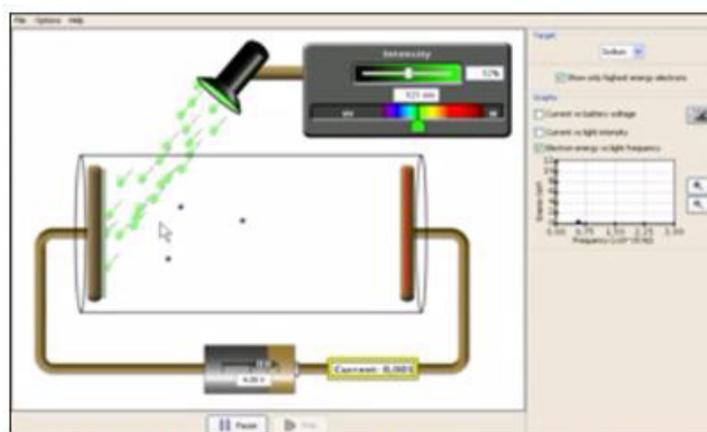


Figura 15 – Efeito Fotoelétrico. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=bnR1syXU5dU>.

Como todas as partículas, os fótons exibem uma natureza dualística: onda e partícula. Os fótons em alguns fenômenos exibem mais claramente a natureza ondulatória (como na interferência de Young) e em outros se torna mais evidente a natureza de partículas (como no efeito fotoelétrico). Hoje, com o dualismo onda-matéria podemos conciliar a ideia de Newton com os resultados de Young e de Fresnel.

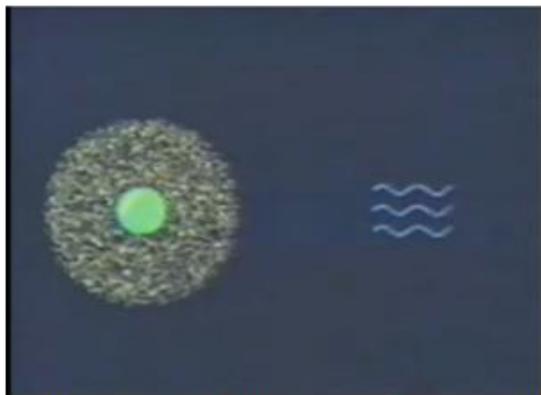


Figura 16 - Quantum de Energia. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=CEuMmMxD-vI>.

A confirmação inequívoca de que a luz exibe a natureza corpuscular veio com a descoberta, em 1923, do efeito Compton (em homenagem ao seu descobridor, Arthur Compton). Nesse efeito, o fóton exibe um comportamento típico de bola de bilhar. Isto é, a colisão entre o fóton e um elétron obedece às regras de colisão entre partículas.

X-ray Physics: Compton Effect

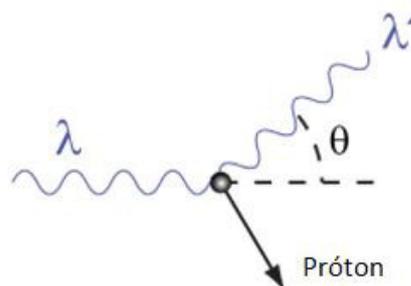


Figura 17 - Efeito Compton. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=zYZNTzviBxs&feature=related>.

Os fótons são afinal, como todas as partículas. Os elétrons, por exemplo, exibem a mesma natureza dualística: onda e partícula. Hoje, com o dualismo onda-matéria podemos conciliar a ideia de Newton com os resultados de Young e de Fresnel. Apesar dessas características serem excludentes, elas são de fato complementares.

Acesse o vídeo - <http://www.youtube.com/watch?v=CEuMmMxD-vI>.

## A VELOCIDADE DA LUZ

A luz ao incidir sobre um determinado meio tende a se propagar através dele. A velocidade com que a luz se propaga depende do meio material.

A velocidade máxima de propagação da luz denominada de  $c$  ocorre num meio do qual extraímos toda a matéria. Tal meio é o que denominamos de vácuo. Por exemplo, podemos considerar o meio entre a Terra e o Sol, ou entre a Terra e as estrelas como sendo o vácuo. A partir da formulação da Teoria da Relatividade Restrita e das experiências de Michelson e Morley ficou constatado que a velocidade da luz é uma constante universal ou física.

Medidas experimentais modernas determinam que essa velocidade é de aproximadamente

$$c = 299.792.458 \frac{m}{s} \quad (1.1)$$

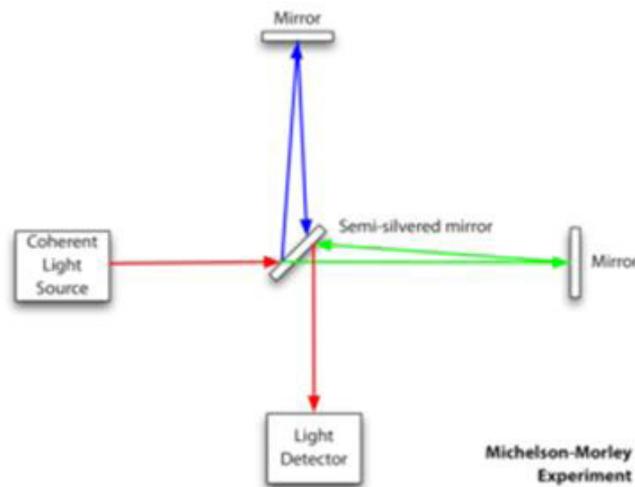


Figura 18 - Experimento de Michelson e Morley. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Experimento\\_de\\_Michelson\\_e\\_Morley](http://pt.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Michelson_e_Morley).

A relação entre a velocidade da luz num determinado meio e a velocidade da luz no vácuo é dada por:

$$C=nV \quad (1.2)$$

onde  $n$  é o índice de refração do meio. Assim, como a luz se propaga na água a uma velocidade maior do que no ar, temos que  $n$  para a água é maior que 1. O índice de refração entre dois meios quaisquer é dado pela razão inversa entre os seus índices de refração:

$$N_{12} = n_2/n_1 = v_1/v_2 \quad (1.3)$$

Após a teoria de Maxwell, podemos relacionar  $n$  com as propriedades eletromagnéticas do meio.

## PRESSÃO DA RADIAÇÃO

### Modelo Clássico

A pressão de radiação é a pressão exercida sobre certa superfície devido a incidência de uma onda eletromagnética. Apesar de não possuir massa, isto ocorre porque uma onda eletromagnética possui momento linear. Logo, o princípio da conservação do momento linear exige que a interação da radiação eletromagnética sobre a superfície deve transmitir momento linear. Isto é, Maxwell mostrou que a magnitude do momento transferido  $\Delta p$  pela radiação em uma absorção total por um corpo é proporcional à variação da energia deste [2]:

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c}$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz. A direção do momento adquirido pelo corpo é o da onda incidente.

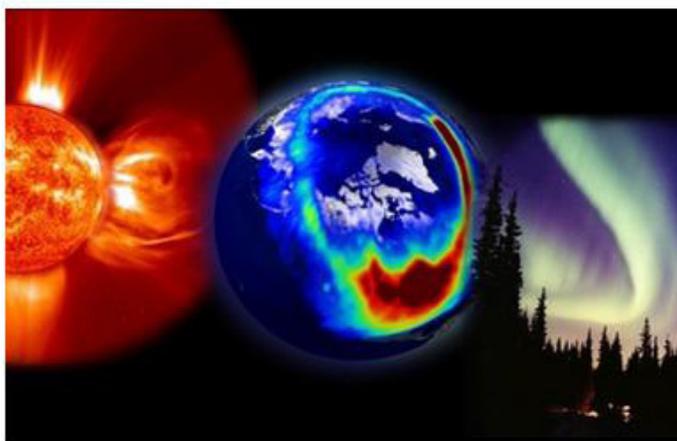


Figura 19 - Vento Solar. Aurora Boreal. Disponível em: <http://www.tecnoclasta.com/>.

No caso de um onda refletida, a lei da conservação do momento impõe que a variação do momento deve ser o dobro do caso da absorção total:

$$\Delta p = \frac{2 * \Delta U}{c}$$

Suponha que a radiação esteja sendo refletida ou absorvida por uma superfície de área  $A$  que esta tem intensidade  $I$ . Logo, a variação de energia em uma reflexão total é

$$\Delta U = 2IA\Delta t$$

e a variação no momento linear é

$$\Delta p = \frac{2 * I * A \Delta t}{c}$$

Usando a segunda lei de Newton temos

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2 * I * A}{c}$$

Calculando-se a razão entre a força atuante sobre a superfície e a área total de atuação encontra-se a pressão de radiação.

$$P = \frac{f}{A} = \frac{2 * I}{c}$$

A pressão da radiação é um efeito muito importante em astrofísica. Ela é um dos efeitos que mantém uma estrela estável. Ou seja, que a atração gravitacional não colapse em um ponto todo o gás desta.

### Modelo Quântico

A pressão de radiação é devida ao fato da radiação denotar energia. Max Planck, ao conceber a física quântica e apresentar seu artigo sobre a distribuição de energia no espectro normal, a 2 de fevereiro de 1900, estabeleceu experimentalmente que para cada unidade da escala de frequência (Hz), a energia mecânica, em J-s = N-M<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, é de  $h = 6,602.10^{-34}$  J-s. Se formos analisar por este parâmetro, em vista de que newtons equivalem a hectogramas-força, podemos converter a constante de Planck  $h$  para gramas-força gF, e dividirmos 1 g por ela, o resultado é um valor que, em escala de frequência, equivale a frequência de energia mecânica de um grama.

Do ponto de vista do modelo fotoelétrico da radiação temos que cada fóton de frequência  $\nu$  ao se chocar sobre uma superfície qualquer irá transmitir um momento  $p = h/\lambda$  a esta. Como força é dada por:

$$F = \frac{dp}{dT}$$

e pressão é definido como força por unidade de área ( $P = F/A$ ), temos que  $n$  fótons exerceram uma pressão igual a:

$$P = \frac{n}{A} * \frac{dp}{dT}$$

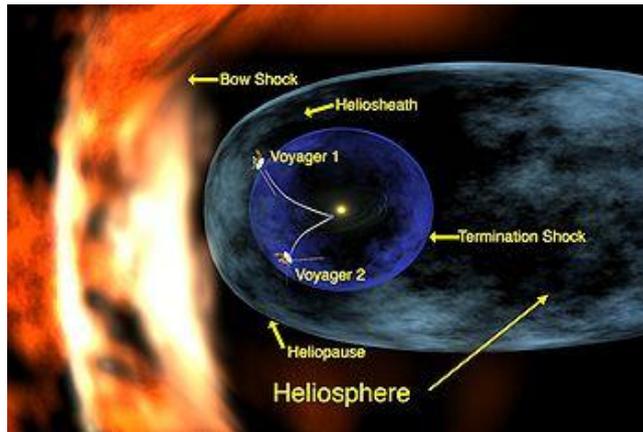


Figura 20 – Formação da Heliosfera em torno da Terra. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_Solar](http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_Solar).

## ATIVIDADES APPLETS

1 - Analise os applets sobre difração da luz por uma fenda simples e dupla.

Simples: <http://www.walter-fendt.de/ph14e/singleslit.htm>

Dupla: <http://www.walter-fendt.de/ph14e/doubleslit.htm>

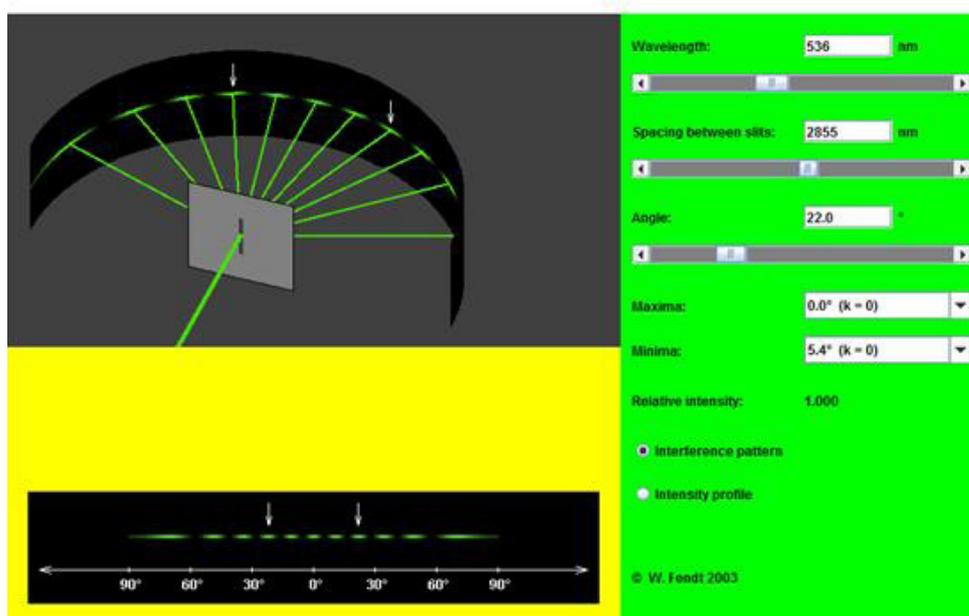
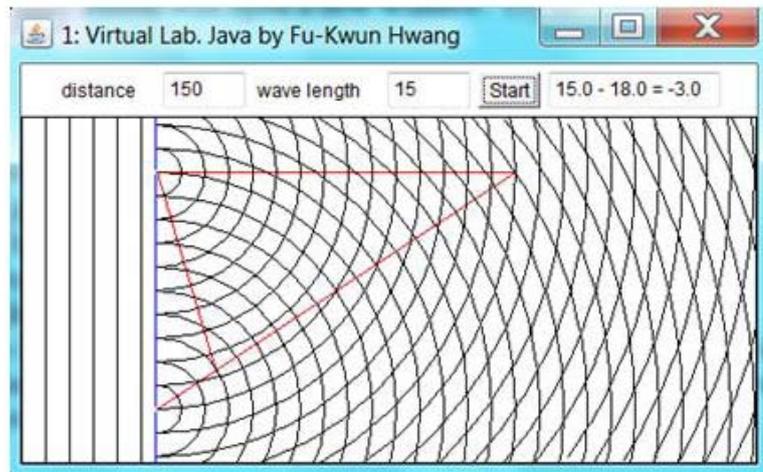


Figura 21 – Disponível em: <http://www.walter-fendt.de/ph14e/doubleslit.htm>

2 - Analise os applets sobre difração da luz por uma fenda dupla, acessando o link <http://www.fisica.ufpb.br/prolicen/>



2 - Analise os applets sobre difração da luz por uma fenda dupla, acessando o link <http://www.fisica.ufpb.br/prolicen/>

3 - Analise os applets do site da universidade do Colorado, acessando o link <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>.

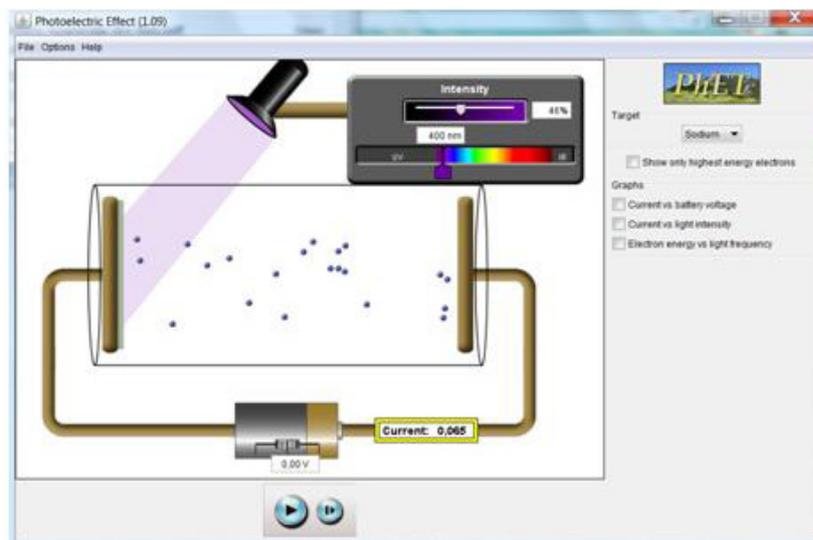


Figura 22 - Projeto Prolicen. Applets do professor Fu-Kwun Hwang. Disponível em: <http://www.fisica.ufpb.br/prolicen/>.

4 - Analise os applets da King's Centre of Visulitation in Science: Efeito Compton: <http://www.kcvs.ca/site/projects/physics.html>

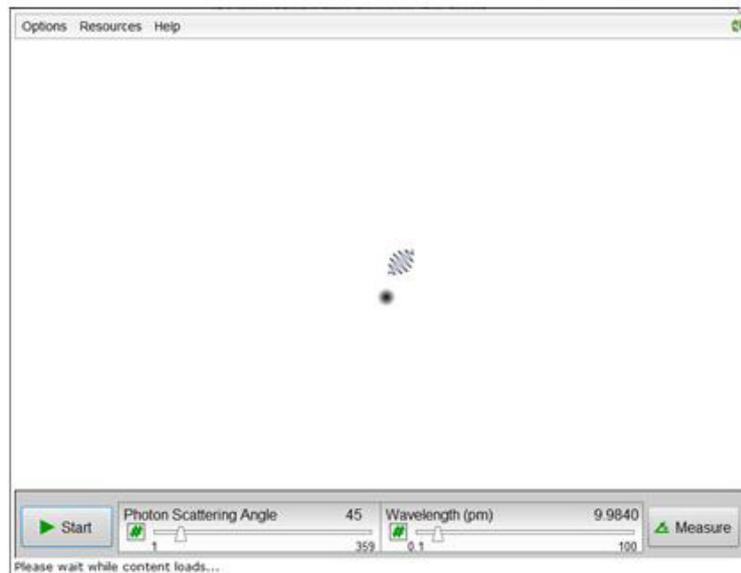


Figura 24 – Disponível em: <http://www.kcvs.ca/site/projects/physics.html>.

### Efeito Fotoelétrico

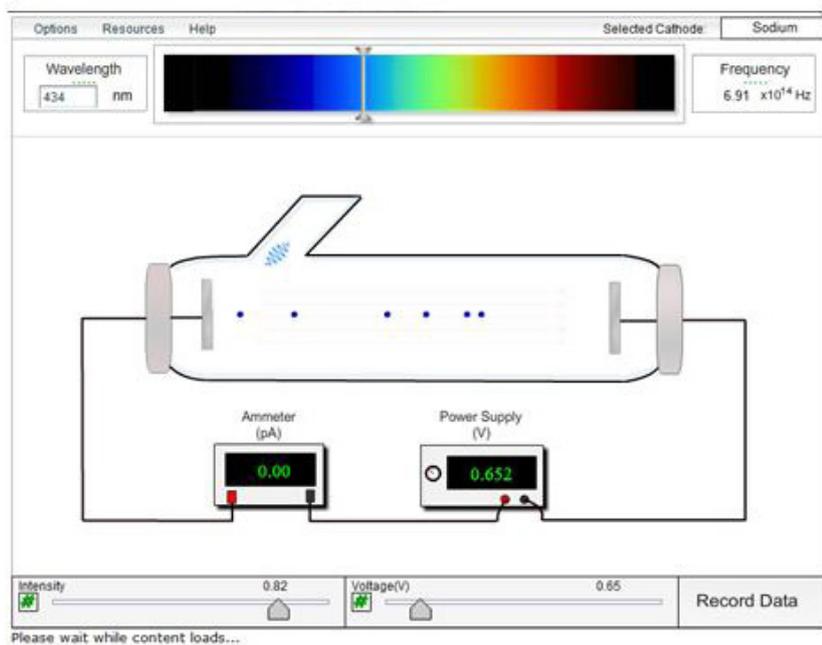


Figura 25 – Disponível em: <http://www.kcvs.ca/site/projects/physics.html>.

### VÍDEO AULA

5 - Novo Telecurso. Natureza da Luz.

[http://www.youtube.com/watch?v=EKew0LTzgKU&feature=results\\_main&playnext=1&list=PLAEFD3124BDBA530A](http://www.youtube.com/watch?v=EKew0LTzgKU&feature=results_main&playnext=1&list=PLAEFD3124BDBA530A)

6 - Novo Telecurso. Natureza da Luz - Parte 2.

<http://www.youtube.com/watch?v=DBtE2xxSm5s>

7 – Dualidade Onda Partícula.

<http://www.youtube.com/watch?v=rqwKPJ3wluI&feature=related>

8 - Dualidade Onda Partícula. Dr. Quantum.

<http://www.youtube.com/watch?v=2NuLa29WKnI&feature=related>

9 – Princípio de Huygens.

<http://www.youtube.com/watch?v=QDrnFDAyEjE>

10 – Cuba de Ondas.

<http://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&v=ORgFE-QQM2w&NR=1>

11 – Efeito Fotoelétrico.

<http://www.youtube.com/watch?v=5BcdTs2CSTg>

### EXPERIMENTOS DE BAIXO CUSTO

Projeto Experimentos de Física com Materiais do Dia a Dia - UNESP/Bauru [3]:

#### 12 - PULVERIZADOR

Objetivo:

O objetivo deste experimento é visualizar um feixe de luz, observando sua existência e comportamento.

Contexto:

A luz, para a maior parte dos fenômenos cotidianos, propaga-se em forma de raios. Estes são compostos de partículas (fótons), e se propagam sempre retilinearmente a partir da fonte. Feixe de luz é um conjunto de raios luminosos.

Ideia do Experimento:

Uma lanterna é colocada em uma posição fixa iluminando um obstáculo (parede). Nesta situação, só é possível observar a luz que é gerada pela lanterna e o efeito que ela causa no obstáculo. É aparentemente possível que a luz descreva qualquer trajetória até atingir a parede (como por exemplo, uma trajetória curva ou em zigue-zague). Pulveriza-se água colorida com leite ao longo do feixe de luz que vai da lanterna até a parede. Assim, é possível observar que o feixe luminoso criado pela lanterna, propaga-se em linha reta e não de qualquer outro modo até o obstáculo.

Tabela do Material:

Item	Observações
Pulverizador	Usados para regar plantas.
Lanterna	
Leite	Duas ou três colheres (sopa).
Água	

Montagem:

Coloque água dentro do pulverizador e adicione leite até que a água fique esbranquiçada;

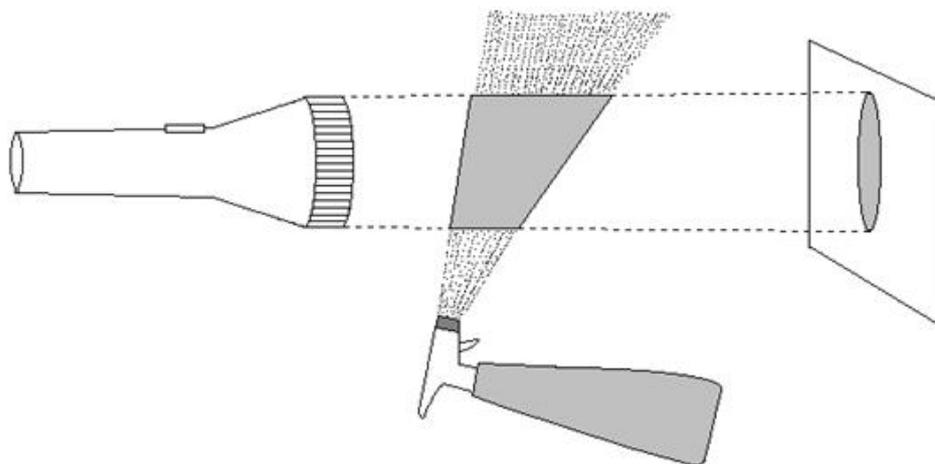
Posicione a lanterna de modo que ilumine o obstáculo.

Comentários:

O local no qual o experimento for realizado deve permanecer escurecido ou na penumbra.

Se o experimento for realizado em sala de aula, o pulverizador pode ser substituído por dois apagadores. Batendo um apagador no outro, em uma posição, de preferência, acima do feixe, produz-se uma nuvem de pó na região deste. Este procedimento resulta no mesmo efeito do pulverizador.

Esquema Geral de Montagem:



### 13 - CARTÕES FURADOS

Objetivo:

Este experimento tem por objetivo demonstrar que os raios de luz se propagam em linha reta.

### Contexto:

A luz, para a maior parte dos fenômenos cotidianos, propaga-se em forma de raios. Estes são compostos de partículas (fótons), e se propagam sempre retilinearmente a partir da fonte. Em algumas situações, a luz também pode comportar-se como onda. Isto é perfeitamente explicado pela Física.

### Ideia do experimento:

Três cartões iguais com um pequeno orifício no meio são dispostos em fila de forma que fiquem exatamente alinhados. Em um extremo é colocada uma vela acesa cuja chama fica alinhada com os furos dos cartões. No outro extremo fica o observador. Há duas situações de observação. Na primeira, os furos dos cartões ficam alinhados e é possível ver a chama da vela do outro lado porque a luz se propaga em linha reta através dos furos. No segundo caso, retira-se qualquer um dos três cartões do alinhamento e não mais é possível ver a luz porque ela esbarra em um dos cartões. Para que se pudesse enxergar a luz, ela teria que ter uma trajetória curva. Com os resultados de ambas as disposições, se conclui que a luz se propaga em linha reta.

### Tabela do Material:

Item	Observações
Cartolina	Pode ser substituída por qualquer tipo de papelão não muito grosso.
Vela	Pode ser substituída por uma lanterna.

### Montagem:

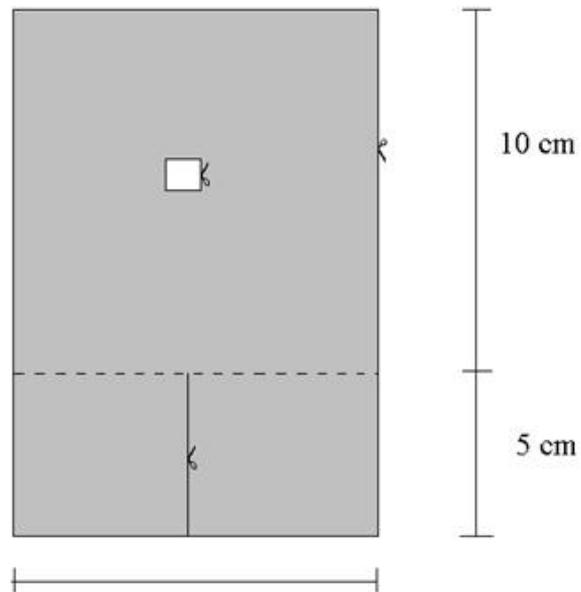
Corte três retângulos (10cm x 15cm) iguais de cartolina (veja figura abaixo);

Faça um corte reto (5cm) no meio do lado menor de cada cartão;

No lado cortado, dobre cada parte para um lado de modo que se crie um apoio para que o cartão fique na vertical;

Coloque os cartões em fila de modo que fiquem exatamente alinhados;

Em um extremo da fila, coloque uma vela acesa cuja chama fique alinhada com os furos dos cartões.

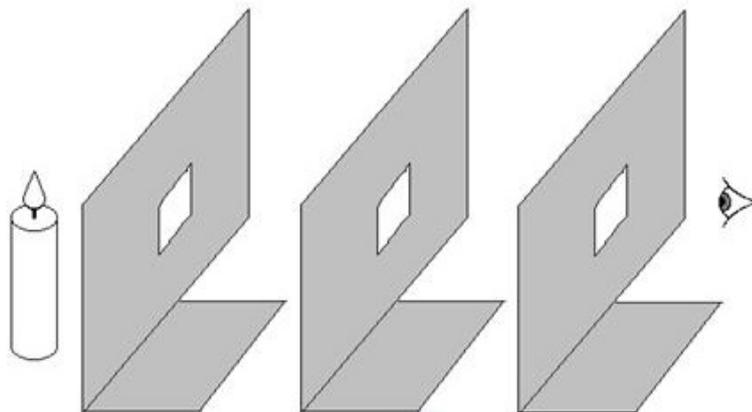


Comentários:

Para o bom andamento do experimento é importante que os cartões sejam exatamente iguais;

A altura da chama da vela deve ser igual à dos furos dos cartões.

Esquema Geral de Montagem:



#### 14 - PENTE REFLEXIVO

Objetivo:

O objetivo deste experimento é observar a reflexão e comprovar a lei que rege este fenômeno.

### Contexto:

Reflexão é o fenômeno pelo qual a luz ao encontrar um obstáculo é rebatida. Para melhor compreender este fenômeno é preciso antes definir as duas etapas da reflexão. Na primeira etapa (incidência) o raio de luz chega até o espelho. Ao ângulo que este raio forma com o espelho dá o nome de ângulo de incidência. Já na segunda etapa, o raio de luz sai do espelho (reflexão). Ao ângulo que este raio forma com o espelho dá o nome de ângulo de reflexão. Para a reflexão existe uma lei: o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

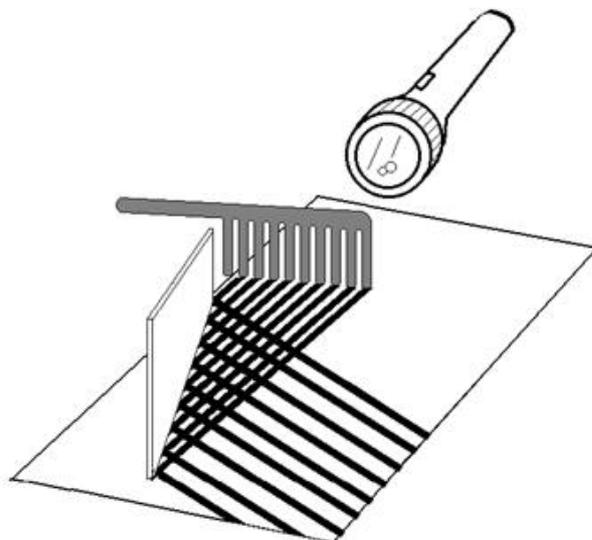
### Ideia do Experimento:

Um espelho é colocado na posição vertical em contato com a superfície de uma mesa. Em sua frente, coloca-se um pente com os dentes encostados na mesma superfície. Posiciona-se uma lanterna de modo que a sombra produzida pelos dentes do pente atinja o espelho fazendo sombra na superfície, tanto quando incide no espelho, como quando refletem. Para conferir a lei da reflexão coloque um papel na superfície da mesa, em baixo do espelho e do pente. Risque o papel com um lápis na base do espelho. Risque a trajetória de um dos raios que saem do pente e são refletidos pelo espelho. Observe que no papel aparecerá a trajetória de um dos feixes de luz. É possível medir com um transferidor os ângulos de incidência e reflexão e constatar que eles são iguais.

### Tabela do Material:

<i>Item</i>	<i>Observações</i>
Pente	
Espelho	Desses pequenos com as bordas alaranjadas. São encontrados em qualquer supermercado ou bazar.
Lanterna	
Papel	
Lápis ou caneta	
Transferidor	Este instrumento só será utilizado para medir os ângulos de incidência e reflexão. Por isso, sua ausência não comprometerá o funcionamento do experimento, uma vez que é possível observar a olho nu a semelhança dos ângulos.

Esquema Geral de Montagem:



### 15 - BURAQUINHO

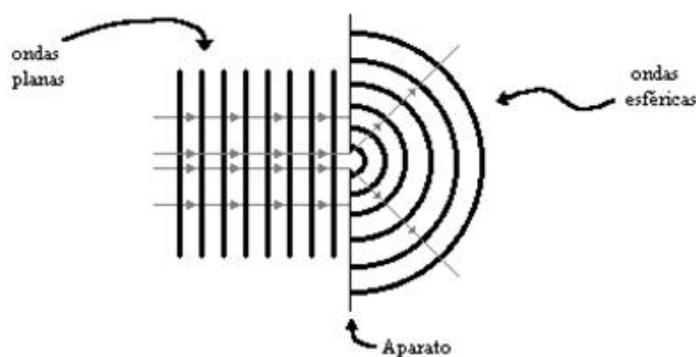
Objetivo:

Este experimento tem como objetivo compreender qual o efeito visual resultante de uma difração.

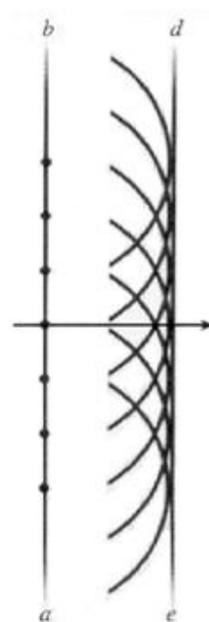
Contexto:

Existem dois estudos feitos acerca da natureza de propagação da luz. Um deles prevê que a luz é composta de minúsculas partículas (fótons) que se propagam sempre em linha reta formando raios. A este estudo dá-se o nome de óptica geométrica. A outra linha de raciocínio diz que a luz é uma onda e se comporta como tal. Esta teoria é chamada óptica ondulatória. Por ser descrita por essas duas teorias, diz-se que a luz apresenta dualidade partícula-onda. Neste experimento só nos ateremos ao comportamento ondulatório da luz.

Quando a fonte luminosa se encontra razoavelmente afastada, a luz praticamente se propaga na forma de ondas planas. Se estas frentes de ondas se chocarem contra um aparato que contém um orifício com diâmetro comparável ao comprimento de onda da luz, ocorrerá um espalhamento destas frentes. Este fenômeno recebe o nome de difração. Só a teoria ondulatória explica tal fenômeno. Porém, se pensarmos que os raios de luz são perpendiculares às frentes de onda, o que ocorreria seria um espalhamento dos raios, como mostra a figura abaixo.



A teoria ondulatória de Huygens pode explicar bem este fenômeno. Cada frente de onda é formada pela soma de infinitas ondas esféricas, como ilustra a figura abaixo. Quando esta frente de onda, ao se propagar, encontra uma barreira com um pequeno orifício, é como se apenas uma das ondas esféricas passa pelo furo, permitindo que só esta se propague a partir daí, o que resultaria em uma onda esférica que se propaga radialmente do orifício.



Ideia do Experimento:

Um pequeno orifício feito num papel funciona como uma lente de aumento, permitindo que se veja uma imagem ampliada de um objeto que se encontra muito próximo do olho do observador. Isso se deve ao fenômeno de difração que neste caso, faz com que os raios que saem do objeto sejam espalhados, tornando a imagem maior que o objeto (figura abaixo). Também é possível corrigir miopia com difração, pois, este fenômeno, faz com que a luz se comporte da mesma maneira que quando é submetida a uma lente divergente, que é a lente utilizada na correção desta patologia.

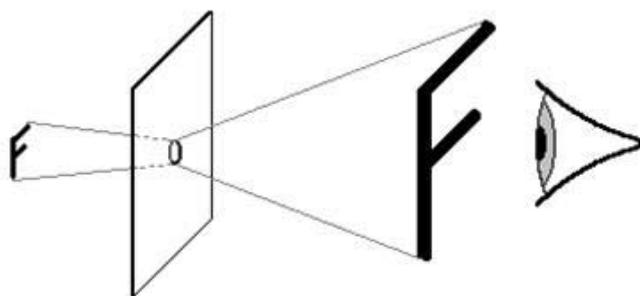


Tabela do Material:

Item	Comentários
Cartolina	De preferência escura, porém, pode ser utilizado qualquer papel.
Alfinete	

Montagem:

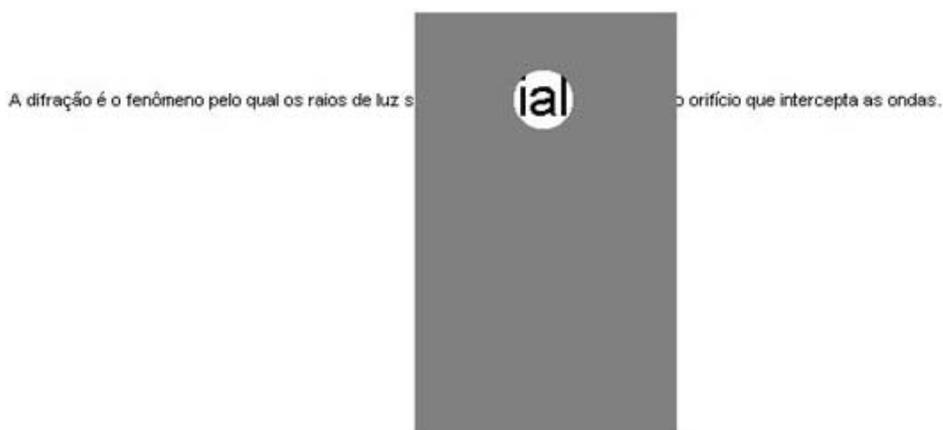
Faça, com o alfinete, um furo no papel;  
 Aproxime do olho, algo que quer ser lido a aproximadamente 10 cm;  
 Coloque o papel com o furo e olhe através dele.

Comentários:

Pode-se então notar que além da imagem ficar mais nítida, houve um aumento dela;

Se a pessoa que realizar o experimento for portador de um grau não tão alto de miopia, pode utilizar este pequeno orifício para conseguir enxergar algo que esteja longe, sem os óculos.

Esquema Geral de Montagem:



O orifício que aparece na figura acima, apesar de parecer grande, tem o diâmetro de uma seção transversal em um alfinete.

### 16 - ÁGUA ÓPTICA

Objetivo:

O objetivo deste experimento é construir um sistema em que uma coluna de água conduza luz de forma curva, o que mostra o fenômeno da reflexão total.

Contexto:

Quando um raio de luz se propaga em um meio com um determinado índice de refração e tenta atravessar para outro meio com índice de refração menor do que este em que ela vem se propagando, parte da luz será refratada e a outra parte será refletida. Se aumentarmos o ângulo de incidência do raio de luz neste novo meio, chegará a um ângulo em que toda luz será refletida. A este ângulo damos o nome de Ângulo Limite e a este fenômeno Reflexão Total.

Ideia do Experimento:

Um sistema é arranjado de modo tal que a água que escoar de um furo feito em uma garrafa e iluminado por uma lanterna, conduza alguns raios desta luz emitida pela lanterna durante sua trajetória. Colocando um aparato (como a mão, por exemplo) no final do feixe de água que sai da garrafa, observa-se uma luminosidade de espessura do feixe d'água. Pode-se concluir então que o feixe d'água conduz a luz até o aparato. É interessante salientar que este é o mesmo princípio utilizado pela condução de luz dentro da fibra óptica.

Tabela do Material:

<i>Item</i>	<i>Comentários</i>
Garrafa de óleo de cozinha	Plástica e transparente.
Tinta acrílica	Pode-se também usar qualquer tipo de tinta ou fita isolante para impedir que a luz atravesse uma das faces da garrafa de óleo.
Pincel para aplicar a tinta	
Lanterna	
Água	
Recipiente para colher a água	Pode ser utilizado uma bacia ou um recipiente grande qualquer. O experimento também pode ser realizado em uma pia, sendo que, a água que escoar da garrafa pode vir direto da torneira e ser recolhida pela pia quando sai da garrafa.

**Montagem:**

Corte a parte superior da garrafa, retirando a boca. Limpe o interior dela com detergente;

Faça um furo, com aproximadamente meio centímetro de diâmetro, em uma das faces da garrafa de óleo, o mais baixo possível;

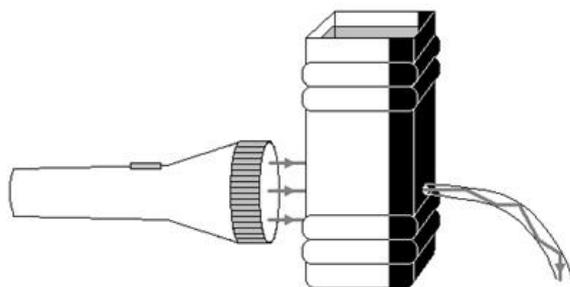
Pinte com tinta a face da garrafa em que foi feito o furo. Nós usamos tinta acrílica e deixamos secar por aproximadamente um dia;

Tape o furo, coloque água na garrafa e ilumine, com a lanterna, a face oposta à face que está pintada;

Solte o furo e coloque a mão no feixe da água que escorre da garrafa.

**Comentários:**

Para que o experimento seja realizado com sucesso o ambiente deve permanecer o mais escuro possível.

**Esquema Geral de Montagem:****CONCLUSÃO**

Como acabamos de ver o tema luz não é um dos temas mais abordados no ensino médio nem no terceiro grau, mas é um do mais rico em aplicações, animações, vídeo aula e experimentos de baixo custo. Pelo que foi visto aqui, pelo fato da luz estar ligada a um dos nossos mais importantes sentidos, o da visão, este possui inúmeras aplicações na nossa vida cotidiana. Assim, não podíamos deixar de abordá-lo em nosso curso. Gastar uma aula sobre o tema tornaria mais atrativo e enriqueceria muito o curso de física.

**RESUMO**

Começamos esta aula com um texto sobre o tema “Luz”. Este foi preparado para ser um e-livro, mas serve bem aos nossos propósitos. Complementamos este texto com um texto paradidático denominado “Pressão da Radiação”. Finalmente, analisamos vários applets de ensino, vídeo aulas e experimentos de baixo custo.

### RESPOSTA ÀS QUESTÕES

1 – Analisar o modelo matemático do software Modellus.

#### COMENTÁRIO SOBRE AS ATIVIDADES

Através de um texto preparado para ser inserido em um e-livro (e-física) apresentamos o conteúdo “Luz”. Este texto é uma mistura de texto de divulgação e texto didático. Ao longo dele usamos muitas ilustrações e experimentos de baixo custo, de modo que os conceitos introduzidos ficassem bem explicitados.

O texto pressão da radiação é muito interessante, pois mostra e ilustra a importância da ionosfera terrestre e os ventos solares. Ele ilustra o problema do buraco na camada de ozônio e pode ser usado pelo professor para abordar a problemática do efeito estufa.

Os applets de ensino, assim como os vídeo aulas são muito interessantes e complementam o conteúdo da aula. A maioria dos experimentos de baixo custo são de fácil confecção e reprodução. Todos eles são muito ilustrativos e enriquecedores.

#### REFERÊNCIAS

- [1] CEPA. Marques, Gil da Costa. Disponível em: <<http://cepa.if.usp.br/projetos/>>; <<http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/>>. Acesso em: 27/08/2012.
- [2] - Halliday, Resnick and Walker. Fundamentos da Física Vol. III. Ed. LTC. 7a Ed.
- [3] - Projeto Experimentos de Física com Materiais do Dia a Dia - UNESP/Bauru. Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/experimentosde-fisica/>>. Acesso em 27/08/2012.