

POLARIZAÇÃO E ESPALHAMENTO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS; PRINCÍPIO DE HUYGENS

META

Explicar aos estudantes o fenômeno de polarização das ondas eletromagnéticas, as diferenças entre vários tipos de polarização e as maneiras de se produzir este efeito. Discutir o espalhamento da luz e explicar alguns fenômenos naturais que se baseiam nele. Introduzir conhecimento básico sobre óptica ondulatória, descrita através do princípio de Huygens.

OBJETIVOS

Ao final desta aula, o aluno deverá:

Entender a descrição ondulatória da propagação de luz (através das frentes de onda), e o princípio de Huygens.

Saber diferença entre ondas polarizadas linearmente, circularmente e elipticamente.

Saber como se pode produzir uma onda polarizada.

Entender o mecanismo de espalhamento da luz.

Entender por que o céu é azul e o pôr-do-sol vermelho.

PRÉ-REQUISITO

Trigonometria básica; aulas 05-08

Introdução

Nessa aula aprofundaremos o conhecimento sobre ondas eletromagnéticas, discutindo o seu efeito de polarização. O efeito envolve consideração da direção (ou plano) em que o campo elétrico oscila durante movimento ondulatório. Como a onda eletromagnética interage com a matéria através do seu campo elétrico (que exerce a força sobre partículas carregadas, como elétrons e íons), é obvio que o assunto é muito importante. Além da polarização, aprenderemos como ocorre espalhamento das ondas luminosas por moléculas do ar na atmosfera, e quais são consequências deste efeito na nossa vida cotidiana. Finalmente, começaremos a estudar a óptica ondulatória através da formulação do princípio de Huygens, que utiliza frentes de onda em vez de raios para descrever o movimento ondulatório. Essa descrição será útil para explicar fenômenos ondulatórios, como interferência e difração, que não podem ser tratados com base na óptica geométrica.

9.1 Ondas eletromagnéticas não polarizadas e linearmente polarizadas

A polarização, já discutida nas aulas anteriores, é uma característica de todas as ondas transversais (sejam elas mecânicas ou eletromagnéticas). No caso das ondas eletromagnéticas, esta característica é conectada com a direção ao longo da qual o campo elétrico oscila. Fontes comuns da luz, como Sol ou lâmpadas incandescentes e fluorescentes, emitem luz que **não é polarizada** (digamos: **luz natural**). Nesta luz, o campo elétrico oscila aleatoriamente em todas as direções transversais possíveis (figura 9.1 à esquerda). Portanto, campo elétrico que oscila em qualquer determinada direção pode ser representado como uma combinação linear de duas componentes perpendiculares entre si, como mostra figura 9.1 direita. Por isso, considera-se que a luz não-polarizada tem dois graus da liberdade.

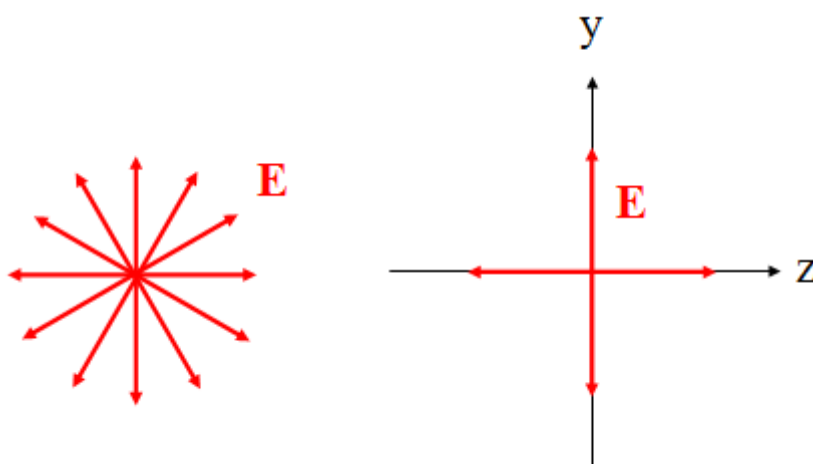


Figura 9.1: Luz natural, não polarizada. Campos elétricos oscilam no plano YZ , perpendicular a direção de propagação que está saindo do papel, em todas as direções possíveis. Qualquer um desses campos é representado como combinação linear das suas componentes ao longo de eixos Y e Z .

A luz não polarizada é um resultado de inúmeros processos de irradiação dos átomos ou moléculas que constituem a fonte e são diferentemente ligados e aleatoriamente orientados. Como consequência, a luz resultante contém uma mistura de ondas eletromagnéticas com campos elétricos que vibram em várias direções.

Situação contrária ocorre quando a luz é produzida por um só átomo ou molécula. Neste caso, o campo elétrico oscila em uma só determinada direção, durante toda propagação, definindo uma **onda linearmente polarizada**, que já foi discutida nas aulas anteriores (figura 9.2).

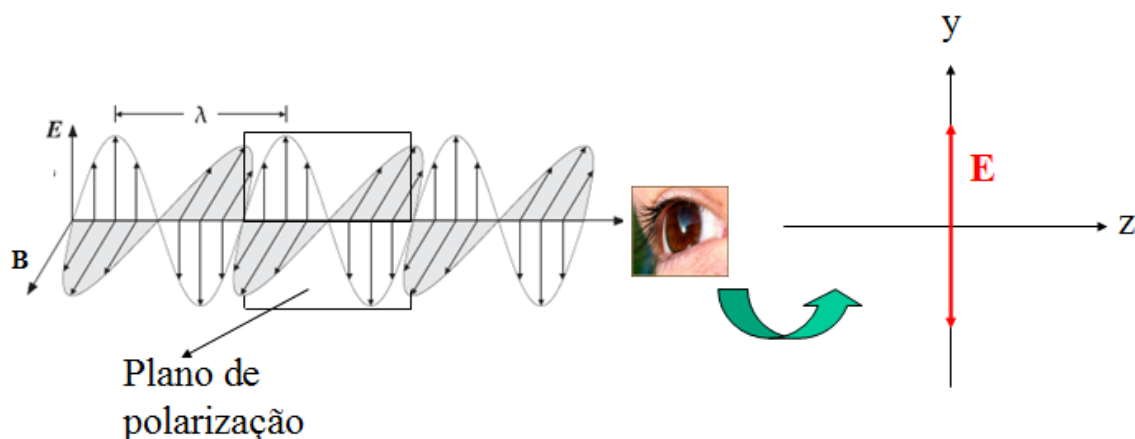


Figura 9.2: Onda linearmente polarizada no plano YZ, ao longo de eixo Y.

Agora, podemos perguntar se existe maneira de se produzir uma onda linearmente polarizada a partir de um feixe de onda não polarizada? A resposta é positiva, e envolve a utilização de materiais com características especiais, chamados filtros polarizadores.

A construção do filtro polarizador depende, em geral, do comprimento da onda em questão. Para microondas (λ de alguns centímetros) um bom filtro polarizador é uma grade de fios condutores próximos e paralelos, isolados entre si e igualmente espaçados. Quando uma microonda não polarizada atinge a grade, o componente do campo elétrico paralelo às grades é anulado pela ação dos elétrons livres nos fios condutores, enquanto o componente perpendicular à grade a atravessa sem qualquer alteração. Como resultado, um feixe de microondas na saída é polarizado perpendicularmente ao plano dos fios (figura 9.3).

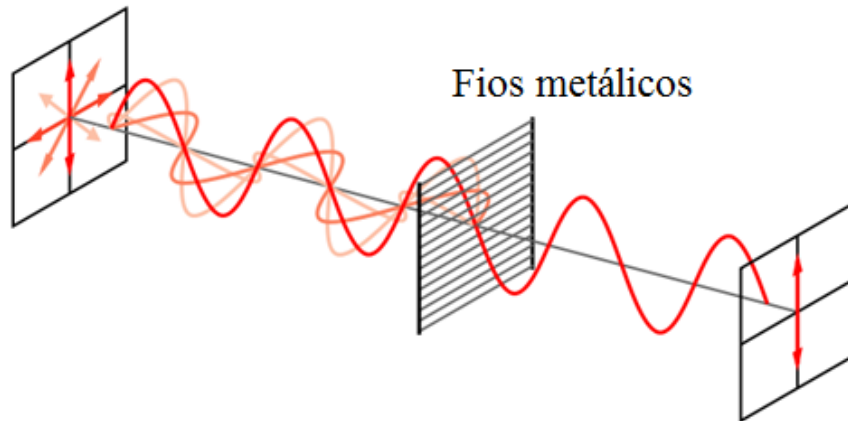


Figura 9.3: Filtro polarizador para microondas: uma grade de fios condutores paralelos.

No caso da luz, o filtro polarizador mais conhecido é o **polaróide** (nome derivado da empresa Polaroid), frequentemente usado em óculos de Sol. Polaróide é um tipo de material com propriedade de **dicroísmo**: absorve luz seletivamente, muito mais ao longo de uma determinada direção cristalina do que ao longo da direção perpendicular a essa (que é chamada eixo polarizador). Como resultado, um polaróide transmite mais de 80% da intensidade da luz polarizada ao longo de eixo polarizador, e menos de 1% da luz polarizada perpendicularmente a este eixo. Portanto, na saída é obtida luz linearmente polarizada. A figura 9.4 mostra como se produz uma onda polarizada.

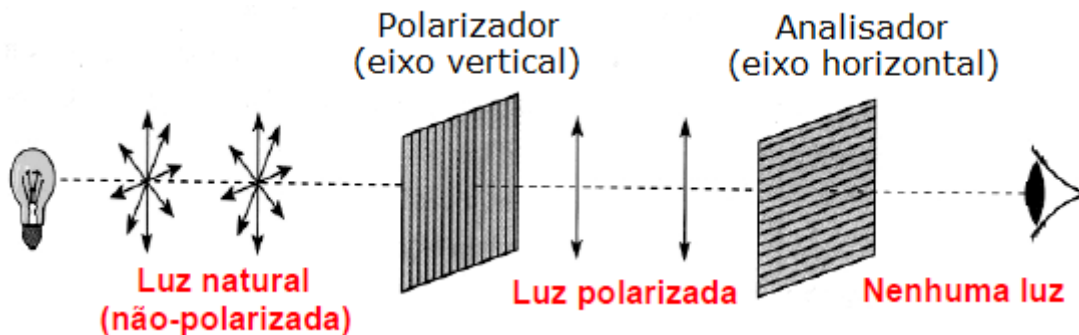


Figura 9.4: Equipamento típico utilizado para polarização da luz natural.

O primeiro filtro, o polarizador, permite obter a luz linearmente polarizada. Como nossos olhos não conseguem diferenciar a luz natural da luz polarizada, um segundo filtro, chamado analisador, é usado para verificar se a luz está polarizada. Este segundo filtro também é um polaróide, porém com o eixo polarizador perpendicular ao eixo do polarizador. Se a luz for eliminada pelo analisador, ela estava polarizada; caso contrário, não estava polarizada.

No caso geral, o eixo do analisador faz um ângulo θ com eixo do polarizador. Se assumimos que o eixo do analisador está paralelo ao eixo y (figura 9.5), passará pelo analisador somente o componente do campo elétrico paralelo ao eixo y : $E_y = E \cdot \cos \theta$.

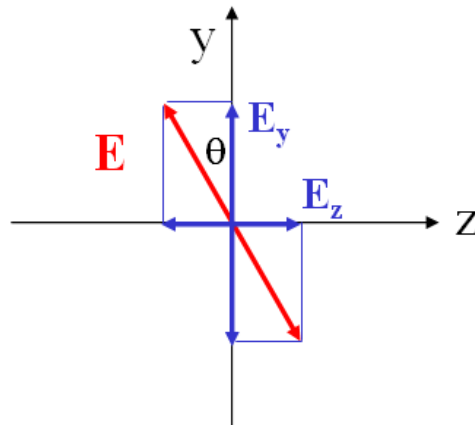


Figura 9.5: A luz linearmente polarizada (campo elétrico \vec{E}) está atingindo o analisador, cujo eixo polarizador está ao longo da direção do eixo y . O que passa é somente a componente E_y .

A intensidade da luz que incide no analisador é: $I_0 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{\max}^2$ (aula 06), enquanto a intensidade que sai do analisador é: $I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{\max}^2 \cos^2 \theta$. Portanto, a intensidade transmitida através de um analisador cujo eixo é deslocado por ângulo θ em relação ao polarizador é:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \theta \quad (9.1)$$

conhecida como a **lei de Malus**, que vale somente quando o feixe que incide sobre analisador já está linearmente polarizado. Quando $\theta = 90^\circ$ (i.e., os eixos polarizadores do polarizador e do analisador são perpendiculares) nenhuma luz passa e a intensidade na saída é igual a zero (figura 9.6).

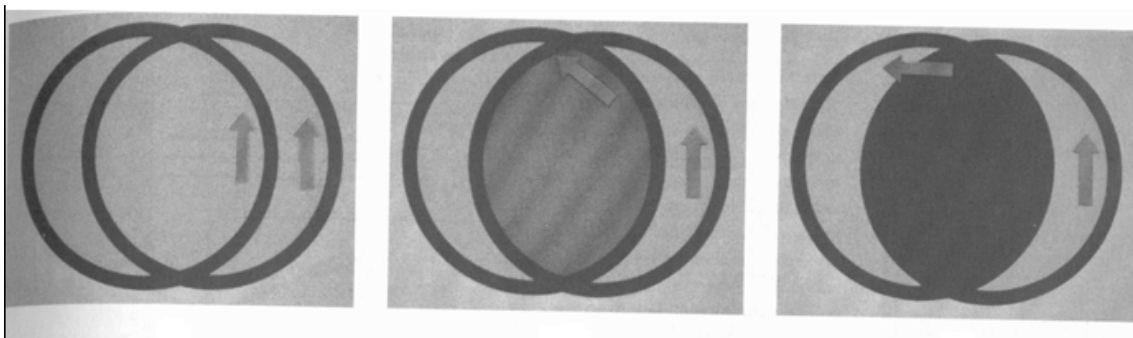


Figura 9.6: Dois filtros polarizadores sobrepostos, mostrando três situações: quando seus eixos são paralelos ($\theta = 0$), inclinados sob algum ângulo (θ), e perpendiculares ($\theta = 90^\circ$).

E o que acontece quando a luz não polarizada incide sobre um polarizador? Como os campos elétricos desta luz oscilam em todas as direções possíveis, é preciso fazer uma

média sobre os ângulos em relação do eixo polarizador. A intensidade da luz linearmente polarizada na saída é:

$$I = I_0 \cdot \langle \cos^2 \theta \rangle$$

Utilizando a identidade trigonométrica $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1$, podemos expressar $\cos^2 \theta$ como $\cos^2 \theta = 1/2 \cdot (\cos 2\theta + 1)$. Segue:

$$I = I_0 \cdot \left\langle \frac{1}{2} \cos(2\theta) + \frac{1}{2} \right\rangle$$

A média sobre $\cos(2\theta)$ é igual a zero, pois metade dos ângulos θ é positiva e outra metade negativa em relação ao eixo polarizador. Portanto, a intensidade da luz natural transmitida (I) através de um polarizador é igual:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \quad (9.2)$$

onde I_0 é a intensidade da luz natural que incide sobre polarizador.

Uma das grandes vantagens de uso dos óculos com filtros polarizadores é eliminação do reflexo dos objetos iluminados. A luz natural, ao ser refletida em placas de vidro, polariza-se. Os óculos polaróides, atuando como analisadores, não permitem a passagem da luz refletida polarizada. O mesmo ocorre com filtros polaróides embutidos em máquinas fotográficas. Assim, os reflexos podem ser eliminados (figura 9.7).



Sem óculos polaróides.



Com óculos polaróides.

Figura 9.7: Eliminação de reflexo usando óculos com filtros polarizadores.

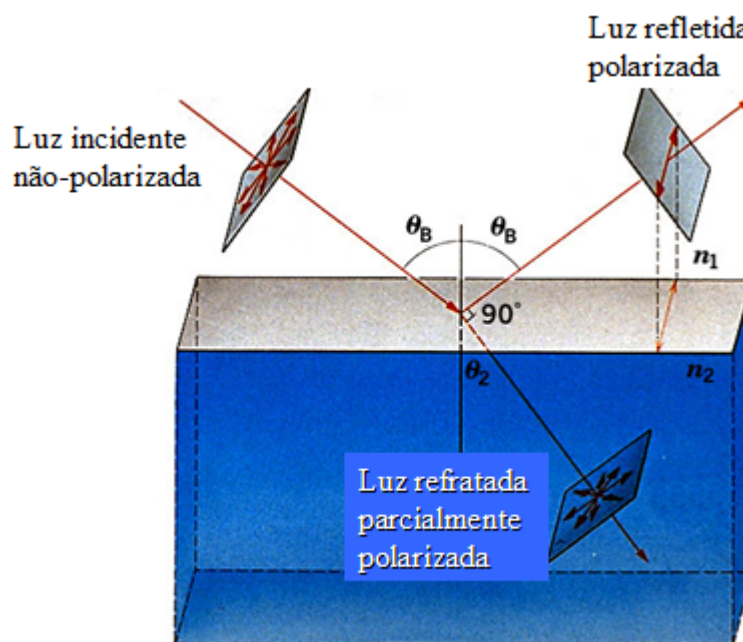
Além da utilização dos filtros polarizadores, existe mais uma maneira de se produzir luz linearmente polarizada a partir de um feixe de luz natural: **através da reflexão por um determinado ângulo!**

Pois é, analisando o processo de reflexão da luz natural, observou-se que para maioria dos ângulos de incidência, os componentes da onda luminosa com campo elétrico \vec{E} perpendicular ao plano da incidência são refletidas mais acentuadamente do que as componentes com \vec{E} paralelo a este plano. Como resultado, as ondas refletidas são parcialmente polarizadas ao longo da direção perpendicular ao plano da incidência.

Mostra-se, a partir da análise das equações de Maxwell, que existe um ângulo de incidência específico, θ_B , que produz uma situação em que a luz refletida é 100% linearmente polarizada. Neste caso,

- (1) as componentes da onda luminosa com \vec{E} paralelo ao plano da incidência são totalmente refratadas, e
- (2) as componentes com \vec{E} perpendicular ao plano de incidência são parcialmente refletidas e parcialmente refratadas.

Portanto, a luz refletida é linearmente polarizada ao longo da direção perpendicular ao plano da incidência (figura 9.8). Ela é bem mais fraca do que a luz incidente, porque grande parte da última é refratada!



Copyright John Wiley & Sons

Figura 9.8: Polarização da luz através da reflexão.

Como se determina esse ângulo específico, θ_B ? Em 1812, o cientista inglês Sir David Brewster percebeu que quando o ângulo de incidência é θ_B , os raios refletidos e refratados são perpendiculares (figura 9.8). Neste caso, o ângulo de refração é igual a:

$$\theta_2 = 180^\circ - \theta_B - 90^\circ = \frac{\pi}{2} - \theta_B$$

Aplicando a lei de Snell:

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_2 = n_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_B \right)$$

segue:

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \cos \theta_B$$

Portanto, o ângulo θ_B é determinado pela equação:

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1}, \quad \text{i.e., } \theta_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (9.3)$$

e depende da razão entre os índices de refração do meio da refração (n_2) e do meio da incidência (n_1). A equação (9.3), que, aliás, pode ser deduzida a partir das equações de Maxwell, chama-se **lei de Brewster**. O ângulo θ_p é chamado **ângulo de Brewster**.

9.2 Luz circularmente ou elipticamente polarizada

Além de poder ser linearmente polarizada, a luz pode estar circularmente ou elipticamente polarizada também. Estes tipos de polarização podem ser entendidos através da superposição específica de duas ondas linearmente polarizadas. Como já foi mencionado na aula 06, as ondas eletromagnéticas obedecem ao princípio de superposição. Isso significa o seguinte: se duas ondas passam ao mesmo instante (t) pelo mesmo ponto do espaço (\vec{r}), a onda resultante terá seu campo elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{B}) definidos como a soma dos campos elétricos (\vec{E}_1, \vec{E}_2) e magnéticos (\vec{B}_1, \vec{B}_2) das ondas individuais:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t) \\ \vec{B}(\vec{r}, t) &= \vec{B}_1(\vec{r}, t) + \vec{B}_2(\vec{r}, t) \end{aligned} \quad (9.4)$$

Vamos primeiro analisar superposição de duas ondas com as mesmas amplitudes, que se propagam na direção positiva do eixo z , uma polarizada ao longo do eixo x e outra ao longo do eixo y . Vamos também supor que estas duas ondas estão em fase (figura 9.9). A superposição dessas ondas define uma onda resultante com campo elétrico igual a $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$.

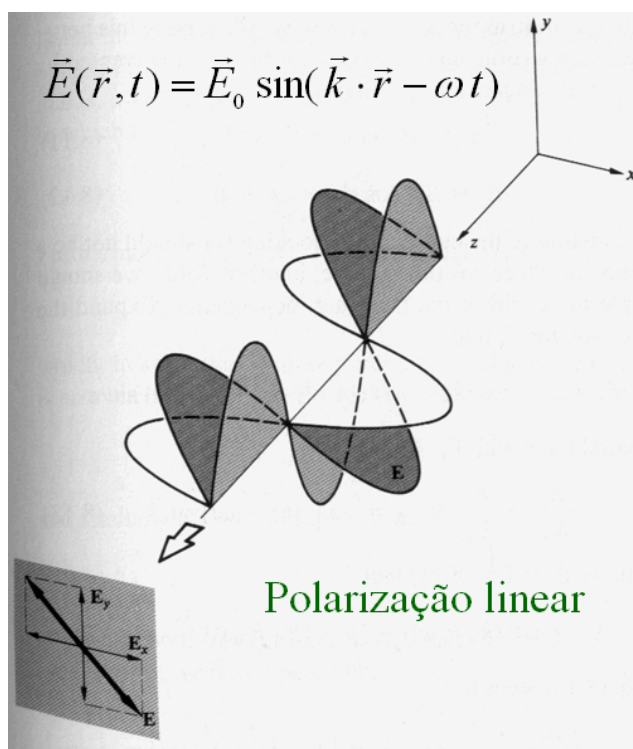


Figura 9.9: Superposição de duas ondas linearmente polarizadas e em fase. O resultado é uma onda também linearmente polarizada.

É fácil ver que o resultado da superposição também é uma onda linearmente polarizada, cujo plano de polarização está inclinado em relação ao plano XZ ou YZ por um ângulo de 45° . A amplitude do campo elétrico resultante é $\sqrt{2}$ vezes maior do que as amplitudes dos campos elétricos das ondas originais (veja figura 9.9). Podemos generalizar esse caso e alegar que a **superposição de quaisquer duas ondas em fase e linearmente polarizadas**, quaisquer que sejam planos de polarização delas, **resulta em uma onda linearmente polarizada**, porém com plano de polarização alterado.

Agora, o que aconteceria se somarmos duas ondas linearmente polarizadas, com a mesma amplitude, mas que não estão em fase? Veremos que assim geramos uma situação bem diferente!

Vamos primeiramente considerar o caso quando a diferença de fase é de um quarto de ciclo, isto é, de 90° . Esse ângulo é equivalente ao atraso de um quarto de ciclo ($T/4$) entre duas ondas idênticas (a primeira é solta em $t = 0$ e outra em $t = T/4$), ou equivale à diferença de caminhos entre elas igual a $\lambda/4$ (refresque sua memória sobre essas coisas que foram consideradas na aula 05). Então, teremos duas ondas que se propagam na direção positiva do eixo z , uma polarizada ao longo do eixo x e outra polarizada ao longo do eixo y , mas de tal maneira que o valor do campo elétrico \vec{E}_x é máximo quando o valor de \vec{E}_y é igual a zero e vice-versa. Como as funções seno e cosseno são defasadas por um ângulo de 90° , podemos representar a variação do campo elétrico ao

longo do eixo x com uma função seno, e a variação do campo elétrico ao longo do eixo y com uma função cosseno, como foi ilustrado na figura 9.10.

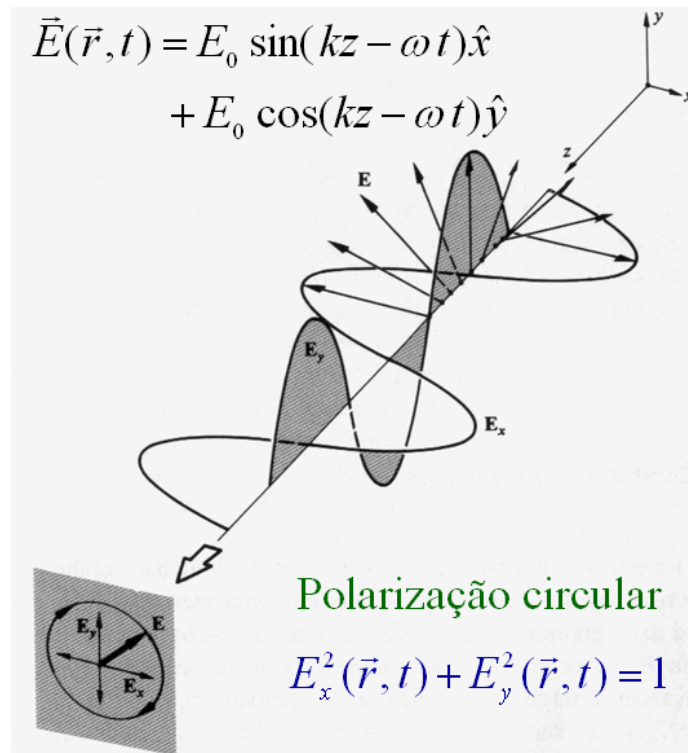


Figura 9.10: Superposição de duas ondas linearmente polarizadas, com a mesma amplitude E_0 e uma diferença de fase igual a 90° .

A superposição das ondas na figura 9.10 resulta em uma onda cujo campo elétrico \vec{E} não oscila ao longo de uma direção fixa durante o movimento, mas muda a direção descrevendo uma trajetória que se assemelha ao movimento helicoidal. Se nós ficarmos na frente da onda e projetarmos o vetor $\vec{E}(t)$ durante o movimento em um plano, perceberemos que esse vetor tem comprimento fixo (não oscila), e gira com velocidade constante descrevendo um círculo! Digamos que esta onda é **circularmente polarizada**. Se o sentido de movimento do $\vec{E}(t)$ é horário, a onda é denominada **dextrógira**, no caso contrário **levógira** (sempre em relação ao observador que está na frente da onda, i.e., a onda se aproxima do observador).

Quando a diferença de fase entre as ondas individuais é diferente de 90° , ou as ondas possuem amplitudes diferentes, o resultado é uma onda cujo campo elétrico gira descrevendo uma elipse, em vez de um círculo. Digamos que esta onda é **elipticamente polarizada**.

Finalmente, como se produz uma onda eletromagnética circularmente ou elipticamente polarizada? No caso das ondas com frequências nas faixas de ondas de rádio e microondas, essa polarização é feita pelas duas antenas perpendiculares com circuitos elétricos projetados de tal maneira a produzir uma diferença de fase apropriada entre as ondas emitidas. No caso das ondas luminosas, utilizam-se materiais com propriedade de

birrefringência, aqueles que possuem dois diferentes índices de refração ao longo de dois eixos cristalinos perpendiculares entre si (n_1, n_2 ; $n_1 \neq n_2$). Neste tipo de materiais a luz polarizada ao longo de um desses eixos viaja com velocidade $v_1 = c/n_1$, enquanto a luz polarizada ao longo de outro eixo viaja com velocidade $v_2 = c/n_2$. A diferença entre as velocidades v_1 e v_2 faz com que as duas ondas que incidiram no material em fase saiam do material com uma diferença de fase induzida (uma é atrasada em relação à outra). Quando o material birrefringente possui espessura apropriada para produzir uma diferença de fase de 90° (i.e., diferença dos caminhos igual a $\lambda/4$), o cristal converte a luz linearmente polarizada em luz circularmente polarizada. O cristal é assim chamado de placa de um quarto de onda. Exemplos de cristais birrefringentes são alumina (Al_2O_3) e calcita (CaCO_3).

9.3 Espalhamento da luz

Alguém de vocês já se perguntou por que o nosso céu é azul, o Sol parece amarelo e o pôr-do-sol vermelho? Bom, veremos que todas estas aparências ocorrem por conta da maneira em que a luz proveniente do Sol interage com as partículas da atmosfera.

Quando olhamos os objetos e percebemos suas cores, isso não ocorre porque eles emitem a luz com aquela cor. É porque estes objetos refletem (ou dispersam) a luz de uma determinada cor associada a um comprimento de onda. Uma folha, por exemplo, utiliza todas as cores para fazer a fotossíntese menos o verde, pois esta é refletida. Por isso nós vemos a folha com cor verde. Uma camisa vermelha exibe essa cor por que a tinta da camisa absorve todos os componentes da luz branca, exceto o componente vermelho que está refletido.

A mesma coisa acontece quando a luz solar atinge a atmosfera. A luz sofre “reflexão” das moléculas do ar, bem como das pequenas partículas de poeira ou outros resíduos. Só que este processo não chamamos de reflexão, mas utilizamos outro termo: **espalhamento da luz**. Como funciona esse espalhamento? Quando um feixe de luz incide sobre um átomo ou molécula, o campo elétrico oscilante proveniente do feixe exerce uma força sobre as partículas carregadas (elétrons). Essas cargas começam a vibrar com a mesma frequência do campo elétrico, produzindo radiação eletromagnética com exatamente a mesma frequência que é emitida em direções diversas. Portanto, a luz é primeiramente absorvida pelas moléculas e depois re-emitida em todas as direções. Como consequência, cada molécula do ar funciona como uma nova fonte de luz, que espalha ou desvia a luz incidente para outras direções. Nesse processo não há troca de energia entre moléculas e luz, isto é, a luz espalhada muda somente sua direção de propagação e não seu comprimento de onda ou frequência. O espalhamento é, portanto, elástico, e denominado como **espalhamento Rayleigh**. Esse tipo de espalhamento ocorre sempre quando a luz interage com as partículas com tamanho menor do que o seu comprimento de onda (que é o caso das moléculas de ar, usualmente oxigênio e nitrogênio).

OK. E o que tudo isso tem que ver com a cor do céu? Bem, o espalhamento é um processo que não ocorre todas as vezes quando a luz interage com a molécula. Às vezes não acontece nada, e luz passa pela molécula sem ser espalhada. O processo é, portanto, probabilístico e descrito por alguma probabilidade de ocorrência (alias como todos os processos no mundo dos átomos, descritos pela mecânica quântica). Mostra-se que a probabilidade das moléculas espalharem a luz depende da frequência da luz: cores distintas são espalhadas em quantidades diferentes, isto é, a intensidade das cores espalhadas não é a mesma. Essa intensidade é proporcional à frequência elevada à quarta potência (ou equivalentemente, é inversamente proporcional ao comprimento da onda elevada à quarta potência):

$$\text{intensidade da luz espalhada: } I \propto f^4 \text{ (ou } \lambda^{-4} \text{)}$$

Portanto, as componentes da luz branca com frequências maiores são bem mais espalhadas do que componentes com frequências menores. Levando em conta que a luz azul tem um comprimento de onda médio de 400 nm e a luz vermelha de 700 nm, podemos estimar a razão entre intensidades das cores azul e vermelha espalhadas:

$$\frac{I_{\text{azul}}}{I_{\text{vermelho}}} \propto \left(\frac{400 \text{ nm}}{700 \text{ nm}} \right)^{-4} = \left(\frac{700}{400} \right)^4 = 9,4$$

Então, moléculas de ar espalham a cor azul quase 10 vezes mais do que cor vermelha! A luz vermelha é muito mais frequentemente transmitida e continua em sua direção original. Esta situação é ilustrada na figura 9.11.

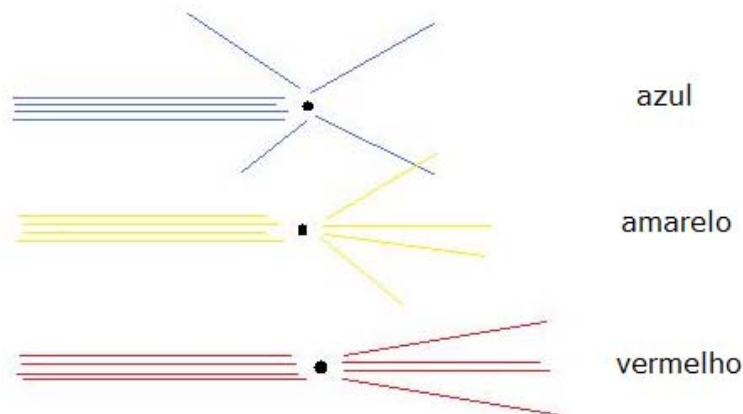


Figura 9.11: Espalhamento da luz pelas moléculas de ar; a cor azul é muito mais espalhada do que outras cores.

Quando olhamos para céu, nossos olhos percebem os raios da luz espalhada, e como ela consiste predominantemente da luz azul, nós vemos o céu com esta cor! Por causa disso, o céu é azul!

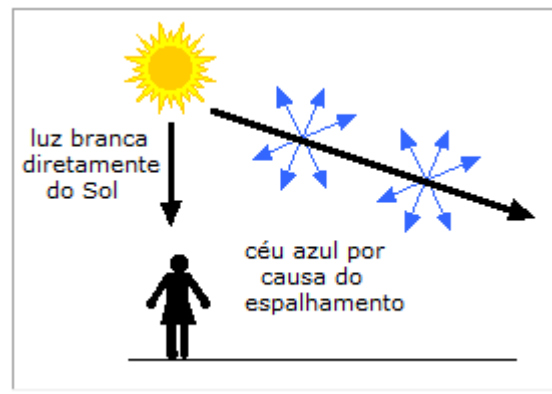


Figura 9.12: Explicação da aparência azul do céu: não olhando diretamente para o Sol, nós percebemos a luz espalhada pelas moléculas presentes no ar, e esta consiste predominantemente das frequências que correspondem à cor azul.

Agora, alguém pode perguntar por que não vemos o céu com cor violeta se a luz violeta tem comprimento de onda menor que a luz azul, e, portanto se dispersa mais? A resposta é a seguinte: porque não há suficiente luz ultravioleta. O Sol produz muito mais luz azul que violeta.

Onde não há atmosfera (como no espaço interestelar, ou na Lua), os raios do sol não sofrem dispersão, logo eles percorrem uma linha reta do Sol até o observador. Se os astronautas não olharem diretamente para o Sol, eles vêem um céu negro (figura 9.13)!

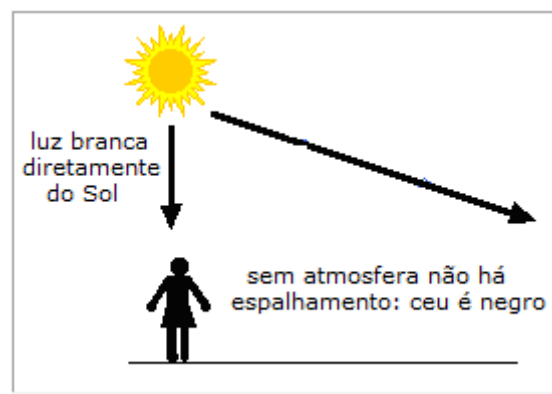


Figura 9.13: Sem atmosfera nós veríamos o céu com cor preta, pois não haveria efeito de dispersão da luz.

Por que o Sol parece amarelo? Porque no caminho para nossos olhos, muita luz violeta e azul são retiradas devido ao espalhamento. As outras cores que permaneceram no feixe, juntamente, têm aparência de amarelo. No espaço interestelar, olhando diretamente ao Sol, ele pareceria branco, pois nenhuma componente sua seria retirada devido à ausência de moléculas da atmosfera.

Finalmente, por que o pôr-do-sol parece avermelhado? Porque o feixe de luz solar já passou uma grande distância através da atmosfera e sofreu muitos processos de

espalhamento. Nestes processos as componentes da luz com frequências maiores foram bastante retiradas. Até chegar aos nossos olhos, “sobreviveram” somente componentes com frequências menores, i.e., com a cor predominantemente vermelha (figura 9.14).

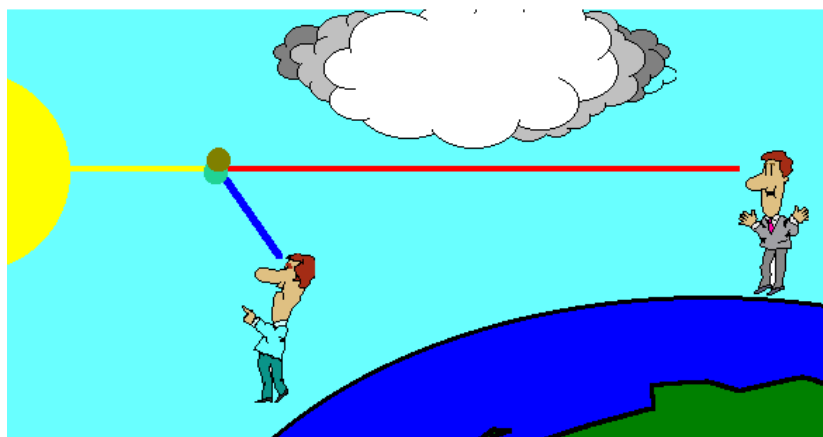


Figura 9.14: O pôr-do-sol é vermelho porque aos nossos olhos chega luz sem as componentes azuis, retiradas através de muitos processos de espalhamento.

9.4 Princípio de Huygens

Até este momento analisávamos a propagação da luz com o auxílio da óptica geométrica, que se baseia na utilização de raios. Mesmo usando essa descrição simplificada, conseguimos explicar vários efeitos ondulatórios, e derivar, por exemplo, leis da reflexão e refração das ondas eletromagnéticas. Porém, nem todos os efeitos ondulatórios são de “alcance” da óptica geométrica. Interferência e difração, que estudaremos na última aula, são exemplos mais óbvios. Para que estes fenômenos pudessem ser analisados, foi preciso desenvolver algum método mais geral, que levasse em conta explicitamente a natureza ondulatória da propagação das ondas.

Em 1678 o cientista holandês Christian Huygens formulou um princípio que permite a construção geométrica de uma nova frente de onda a partir do conhecimento da frente de onda em um instante anterior. Ele descobriu que **todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais de ondas secundárias, que se espalham na frente com uma velocidade igual à velocidade de propagação da onda.** A nova frente de onda em um instante posterior é determinada pela construção de uma superfície que tangencie as ondas secundárias.

O princípio de Huygens é ilustrado na figura 9.15. É fácil se convencer que a forma da frente de onda permanece constante desde que o meio seja isotrópico e que não haja nenhum obstáculo na trajetória da onda (figura 9.16).

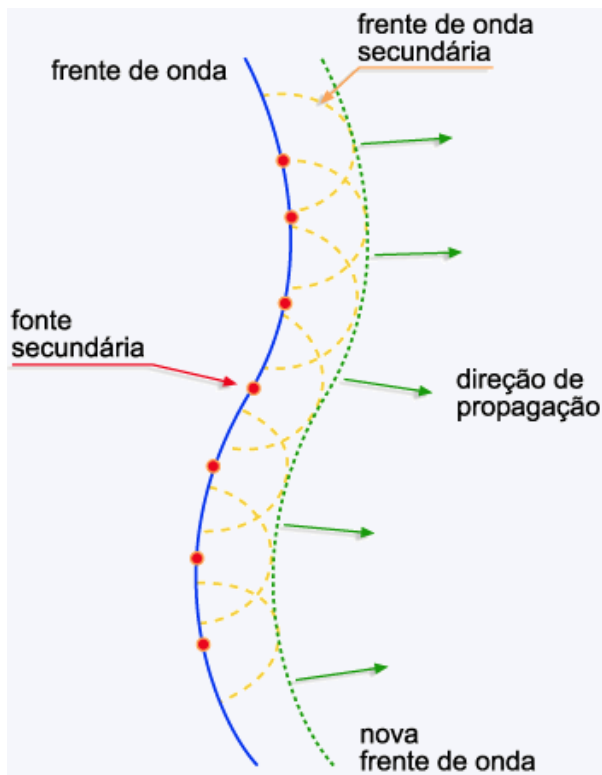
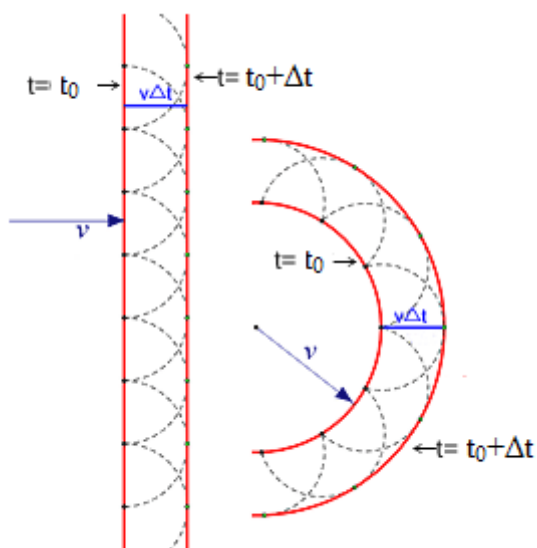
**Figura 9.15:**

Ilustração de aplicação do princípio de Huygens para a construção de uma nova frente de onda no instante $t + \Delta t$, a partir do conhecimento da posição da frente de onda no instante anterior t . Vamos supor que a velocidade da onda é v , portanto, depois do intervalo de tempo Δt , ela se deslocou a uma distância $v \cdot \Delta t$. Na curva que descreve a frente de onda no instante t (curva azul) escolhem-se vários pontos (representados na figura com cor vermelha). Depois disso, constroem-se diversas circunferências com centros nos pontos vermelhos, e com raios $v \cdot \Delta t$, que são ondas secundárias. A envoltória dessas ondas secundárias fornece a nova frente da onda, no instante $t + \Delta t$.

**Figura 9.16:**

Aplicação do princípio de Huygens no caso da propagação de uma onda plana (esquerda) e uma onda circular ou esférica (à direita). Se a velocidade de propagação é a mesma em todas as direções (meio homogêneo e isotrópico), então as novas frentes de onda permanecem com a mesma forma como as velhas. Uma onda plana continua ser uma onda plana, e a onda esférica continua a ser esférica.

O princípio de Huygens é especialmente útil quando uma onda encontra um obstáculo no seu caminho. Nesse caso o princípio permite prever o comportamento ondulatório complexo depois do encontro. A figura 9.17 à esquerda mostra a passagem de uma onda plana através de uma fenda estreita. De acordo com Huygens, a fenda pode ser considerada como uma fonte pontual de ondas secundárias, de modo que a onda atrás da fenda já não é plana, mas sim esférica. Para uma abertura mais larga, o que temos de

fazer é dividi-la em partes pequenas, e considerar cada uma como uma fonte pontual. A onda atrás do obstáculo resulta da sobreposição das ondas esféricas emitidas por todo o conjunto dessas fontes pontuais, como a figura 9.17 à direita mostra.

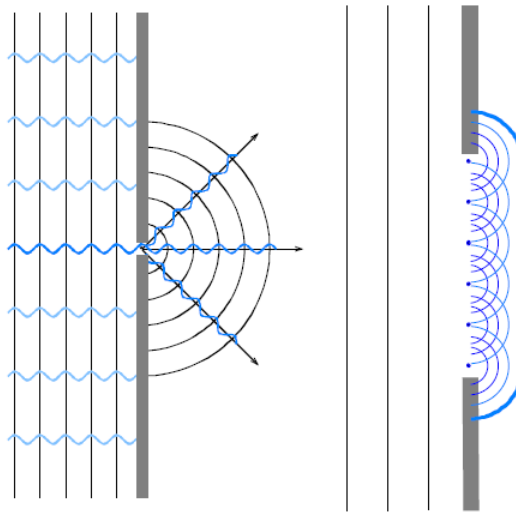


Figura 9.17: Aplicação do princípio de Huygens no caso quando uma onda plana encontra obstáculos em forma de uma fenda pequena (à esquerda) ou uma fenda maior (à direita).

O princípio de Huygens permite também descrever os processos de reflexão e de refração das ondas numa superfície que separa dois meios. No texto a seguir, vamos considerar uma onda plana que incide sobre uma superfície de separação entre dois meios, nos quais as velocidades de propagação das ondas são diferentes. Suponhamos que a velocidade da onda no meio 1 (parte de cima nas figuras abaixo) é igual a v_1 (índice de refração n_1) e no meio 2 (em baixo) é igual a v_2 (índice de refração n_2). A figura 9.18 representa a reflexão da onda incidente sobre a interface entre os dois meios. O que nos interessa é a relação entre os ângulos de incidência θ_i e de reflexão θ_r (ambos contados a partir da normal da superfície).

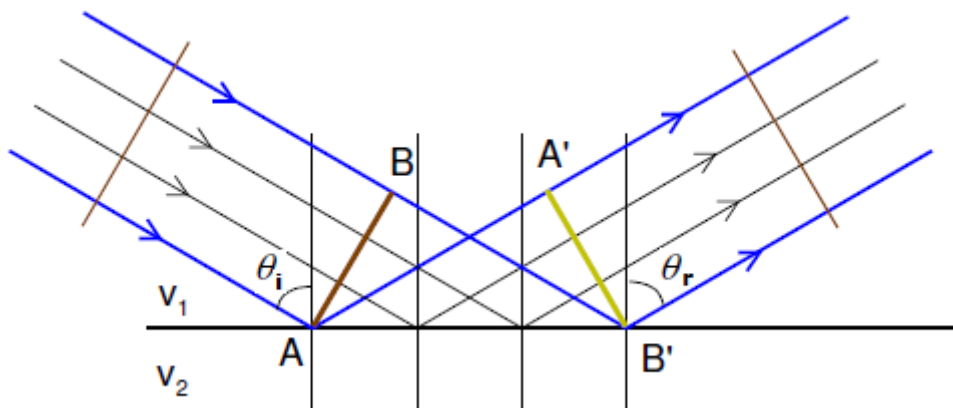


Figura 9.18: Aplicação do princípio de Huygens no caso da reflexão das ondas.

As retas AB e $A'B'$ correspondem à posição da frente da onda num instante t_0 e algum tempo mais tarde, $t_0 + \Delta t$. Ao analisar os triângulos ABB' e $AA'B'$, podemos concluir o seguinte: (1) ambos os triângulos são triângulos retângulos (a frente de onda é sempre perpendicular aos raios), (2) ambos têm a hipotenusa AB' comum, e (3) $AA' = BB'$ porque $AA' = v_1 \cdot \Delta t$ e $BB' = v_1 \cdot \Delta t$ também. Portanto, os triângulos têm as hipotenusas e um dos dois catetos iguais. Pelo teorema de Pitágoras concluímos que os outros catetos também são iguais, o que significa que os triângulos ABB' e $AA'B'$ são congruentes. Portanto, os ângulos $\angle BAB'$ e $\angle A'B'A$ devem ser iguais. Percebam que esses ângulos são iguais aos ângulos θ_i e θ_r , respectivamente, pois são ângulos com catetos perpendiculares. Daqui segue que:

$$\theta_i = \theta_r$$

isto é, o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência, que é a já conhecida lei de reflexão. Essa lei é consequência direta do fato de que a onda se propaga sempre no mesmo meio, com a mesma velocidade. Se isso não fosse verdade, as distâncias percorridas por diferentes partes da onda seriam diferentes e a distância AA' seria diferente do que BB' . É precisamente isso que acontece no caso da refração das ondas quando as velocidades nos dois meios não são iguais. A figura 9.19 está ilustrando essa situação.

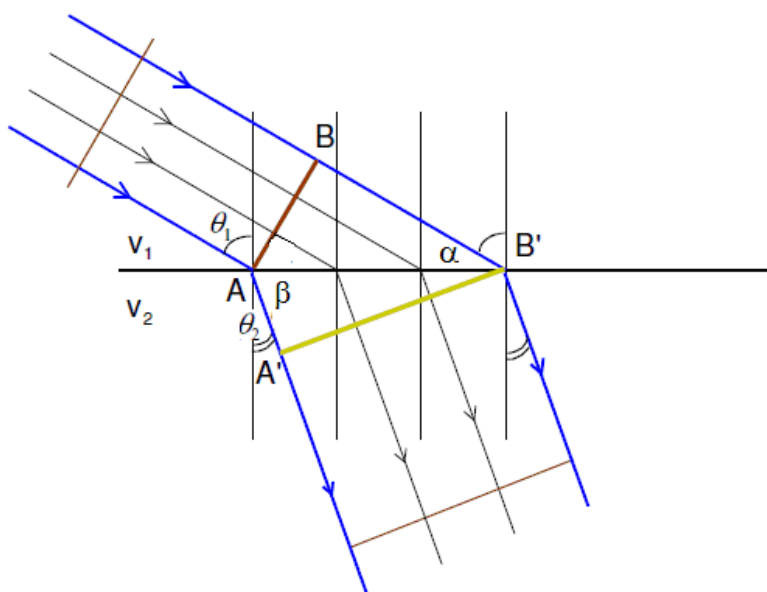


Figura 9.19: Aplicação do princípio de Huygens no caso da refração das ondas.

Vamos considerar os triângulos retângulos ABB' e $AA'B'$. Estes triângulos não são congruentes porque $BB' = v_1 \cdot \Delta t$ e $AA' = v_2 \cdot \Delta t$. Porém, podemos expressar os catetos

AA' e BB' em termos dos ângulos α e β que eles formam com a hipotenusa comum AB':

$$AA' = AB' \cdot \cos \beta$$

$$BB' = AB' \cdot \cos \alpha$$

Portanto,
$$\left. \frac{AA'}{BB'} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \right\}$$

Por outro lado,
$$\frac{AA'}{BB'} = \frac{v_2 \cdot \Delta t}{v_1 \cdot \Delta t} = \frac{v_2}{v_1} .$$

Igualando o lado direito de ambas, segue:
$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} = \frac{v_2}{v_1}$$

Como $\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_1$, $\beta = \frac{\pi}{2} - \theta_2$ e $\cos(\frac{\pi}{2} - \phi) = \sin \phi$ para qualquer ângulo ϕ , o resultado é:

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

Sabendo que o índice de refração do meio é definido como $n = c/v$, a última fórmula pode ser escrita como:

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_2}{n_1} , \text{ ou } n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

onde θ_1 e θ_2 são ângulos de incidência e refração, e n_1 e n_2 índices da refração dos dois meios. É a conhecida lei de Snell.

No final, deve ser ressaltado que as leis de reflexão e de refração acima derivadas aplicam-se às ondas de qualquer natureza, incluindo ondas da luz. A óptica ondulatória, baseada na aplicação de princípio de Huygens, é mais geral do que óptica geométrica. Isso quer dizer que todos os fenômenos explicados pela óptica geométrica também podem ser explicados pela óptica ondulatória. O inverso não vale: alguns fenômenos que podem ser explicados pela óptica ondulatória, não podem ser explicados pela óptica geométrica.

Bibliografia consultada

Alonso, M. S. e Finn, E. J., *Física*, Ed. Edgard Blucher Editora, São Paulo, 1999.

Young, H. D. e Freedman, R. A. *Física IV – Ótica e Física Moderna*, Pearson Education do Brasil (qualquer edição).

Serway, R. A. e Jewett, J. W. *Princípios de Física*, vol. 4, editora Thomson (qualquer edição).

Questões

1. Como podemos observar, as ondas de rádio são quase sempre polarizadas e a luz visível é quase sempre não polarizada. Por quê?

Resposta

As ondas de rádio são produzidas por oscilação das cargas em antenas. Esta oscilação é realizada ao longo de um eixo bem definido (eixo de antena) e, portanto, produz onda eletromagnética, cujo campo elétrico oscila ao longo do mesmo eixo durante a propagação. Isto é, a onda de rádio é linearmente polarizada. Por outro lado, a luz visível é usualmente criada por muitos processos que não são relacionados entre si (emissão de muitos átomos ou moléculas nos corpos quentes, diferentemente ligados e orientados no espaço). Portanto, a onda de luz branca consiste da superposição de muitas ondas polarizadas, que no final resulta em uma onda não polarizada.

2. Quando o ângulo entre duas direções polarizadoras é girado de 0° a 45° , a intensidade do feixe transmitido cai para a metade de seu valor inicial. O que acontece com a energia que não é transmitida?

3. Por que as ondas sonoras não são polarizadas?

Resposta

São ondas longitudinais, nos quais oscilação sempre ocorre ao longo da direção de propagação. Para esse tipo de ondas não tem sentido se definir polarização.

4. Luz não-polarizada incide sobre duas placas polarizadoras orientadas de tal modo que nenhuma luz é transmitida. Colocando-se entre elas uma terceira placa polarizadora, poderá a luz ser transmitida? Em caso afirmativo, explique como.

Resposta

Sim. Passando pelo primeiro polarizador, a luz natural sai linearmente polarizada ao longo do eixo polarizador, com alguma intensidade I_0 . Se a segunda placa estiver com eixo perpendicular à primeira, nenhuma luz aparecerá depois da segunda placa, pois, segundo a lei do Malus, a intensidade seria $I = I_0 \cos^2 90^\circ = 0$. Porém, se colocarmos uma nova placa entre a primeira e a segunda, com eixo polarizador

inclinado pelo ângulo ϕ em relação a primeira placa, na saída da nova placa apareceria luz polarizada ao longo de novo eixo, com intensidade $I_1 = I_0 \cos^2 \phi$. Esta luz incidiria agora sobre terceira placa não sob ângulo de $\pi/2$, como no primeiro caso, mas sob o ângulo $\pi/2 - \phi$ em relação ao eixo polarizador. Portanto, na saída do terceiro polarizador apareceria a luz com intensidade não zero: $I = I_1 \cos^2(\pi/2 - \phi) = I_0 \cos^2 \phi \cdot \cos^2(\pi/2 - \phi) = I_0 \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \phi$.

5. Descreva com suas palavras o princípio de Huygens.
6. Ondas sonoras podem ser refletidas? E refratadas? O princípio de Huygens pode ser aplicado a ondas sonoras?
7. Por que o Universo visto pelos astronautas na órbita da Terra é escuro?

Exercícios

1. Um feixe de luz não polarizada incide sobre duas placas polarizadoras superpostas. Qual deverá ser o ângulo entre as direções de polarização das placas a fim de que a intensidade do feixe transmitido seja um terço da intensidade do feixe incidente?

Resposta

A intensidade da luz não polarizada que incide sobre a primeira placa é I_0 . Na saída da primeira placa luz é linearmente polarizada, com intensidade $I_1 = I_0/2$ (veja fórmula 9.2). Ela então incide sobre segunda placa, cujo eixo polarizador faz um ângulo θ com eixo polarizador da primeira placa. Na saída da segunda placa, a intensidade da luz é:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

$$\text{Fazendo } I_2 = \frac{I_0}{3} \Rightarrow \frac{I_0}{3} = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta \Rightarrow \theta = \arccos \sqrt{\frac{2}{3}} = 35,3^\circ$$

2. Três placas polarizadoras estão superpostas. A primeira e a terceira estão cruzadas; a direção de polarização da placa do meio faz 45° com as direções de polarização das outras duas. Que fração da intensidade de um feixe inicialmente não polarizado é transmitida por este sistema de placas?

Resposta

Intensidade da luz que incide sobre primeira placa: I_0

Intensidade entre a primeira e a segunda placa: $I_1 = \frac{I_0}{2}$

Intensidade entre a segunda e a terceira placa: $I_2 = I_1 \cos^2(45^\circ) = \frac{I_0}{2} \cos^2(45^\circ)$

Intens. depois da terceira placa: $I_3 = I_2 \cos^2(90^\circ - 45^\circ) = \frac{I_0}{2} \cos^2(45^\circ) \cdot \cos^2(45^\circ)$

$$\Rightarrow \frac{I_3}{I_0} = \frac{1}{2} \cdot \cos^4(45^\circ) = 0,125$$

3. Um feixe de luz polarizada incide sobre duas placas polarizadoras. A direção de polarização da primeira placa faz um ângulo θ com a direção de vibração da luz enquanto a direção de polarização da segunda placa é perpendicular a esta mesma direção de vibração. Se 10% da intensidade incidente é transmitida por este sistema, qual é o valor de θ ?

Resposta

Antes da primeira placa, a luz polarizada tem intensidade I_0 . Depois da primeira placa, a intensidade é $I_1 = I_0 \cdot \cos^2 \theta$. Depois da segunda placa, a intensidade é $I_2 = I_1 \cos^2(\pi/2 - \theta) = I_0 \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta$. Então:

$$\frac{I_2}{I_0} = 0,10 = \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta = (1 - \cos^2 \theta) \cdot \cos^2 \theta = \cos^2 \theta - \cos^4 \theta$$

Efetuando a substituição da variável: $\cos^2 \theta = t$, chegamos a equação simples quadrática $t^4 - t^2 + 0,1 = 0$, cujas duas soluções determinam dois ângulos possíveis: $\theta = 19,6^\circ$ ou $\theta = 70^\circ$

4. Deseja-se girar em 90° a direção de polarização de um feixe de luz polarizada fazendo-a passar através de uma ou mais placas polarizadoras. Qual é o número mínimo necessário de placas? Justifique sua resposta.

Resposta: 2 placas

5. Numa praia, a luz é, de modo geral, parcialmente polarizada devido às reflexões na areia e na água. Numa praia particular, em determinado dia, próximo ao pôr-do-sol, a componente horizontal do vetor campo elétrico é 2,3 vezes maior do que a componente vertical. Um banhista em pé coloca seus óculos de sol polarizadores; os óculos eliminam o componente horizontal do campo.

(a) Que fração da intensidade luminosa recebida antes da colocação dos óculos atinge agora os olhos do banhista?

(b) O banhista, ainda usando os óculos, deita-se de lado. Que fração da intensidade luminosa recebida antes da colocação dos óculos atinge agora seus olhos?

Resposta

a) A intensidade da luz é dada pela equação: $I_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_{\max}^2$, onde o quadrado da amplitude de campo elétrico pode ser escrito como soma dos quadrados de suas componentes horizontal (E_{hor}) e vertical (E_{ver}): $E_{\max}^2 = E_{\text{hor}}^2 + E_{\text{ver}}^2$. Como $E_{\text{hor}} = 2,3 \cdot E_{\text{ver}}$, segue: $I_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c [(2,3 \cdot E_{\text{ver}})^2 + E_{\text{ver}}^2] = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_{\text{ver}}^2 \cdot 6,29$. A intensidade da luz que atinge olho do banhista depois dele colocar os óculos polarizadores é: $I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_{\text{ver}}^2$, pois a luz que ele recebe tem somente a componente vertical. A fração é, portanto: $\frac{I}{I_0} = \frac{1}{6,29} = 0,159$.

b) 0,841

6. Um feixe de luz que se propaga na água, de índice de refração 1,33, incide sobre uma placa de vidro, de índice de refração 1,53. Para que ângulo de incidência a luz refletida ficará totalmente polarizada?

(Resposta: ângulo de Brewster, de 49°)

7. Quando a luz vermelha, no vácuo, incide sobre um determinado bloco de vidro, com o ângulo de Brewster, o ângulo de refração é 32° .

(a) Qual é o índice de refração do vidro?

(b) Qual é o ângulo de Brewster?

Dica: Combine a lei de Snell e a lei de Brewster.

(Resposta: (a) 1,6; (b) 58°)

Resumo da aula

Polarização é uma característica importante das ondas eletromagnéticas, e envolve a determinação da direção ao longo da qual o campo elétrico oscila durante a propagação. Fontes comuns de luz produzem ondas **não polarizadas** (luz natural), que contém muitos campos elétricos oscilando em todas as direções possíveis (no plano perpendicular a direção de propagação da luz). A luz **linearmente polarizada** possui uma única direção determinada ao longo da qual o campo elétrico oscila. Um feixe de luz não polarizada pode ser convertido em um feixe de luz linearmente polarizada se o primeiro atravessar materiais com propriedade de **dicroísmo**. Estes materiais absorvem luz seletivamente, i.e., absorvem totalmente os componentes de luz com campo elétrico polarizado ao longo de um determinado eixo cristalino, e deixam parcialmente passar os componentes com campo elétrico polarizado ao longo da direção perpendicular a essa

(que é chamada eixo polarizador). Na saída é obtida luz linearmente polarizada, com intensidade:

$$I = \frac{1}{2} I_0$$

caso a luz não polarizada com intensidade I_0 incidisse no material polarizador. Quando a luz linearmente polarizada com mesma intensidade I_0 incide sobre material polarizador, a intensidade da luz na saída é:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \theta$$

onde θ é o ângulo entre direção de polarização da luz incidente e o eixo polarizador do material (lei do Malus). Existe mais uma maneira de produzir a luz linearmente polarizada a partir da luz não polarizada: através da reflexão. Mostra-se que a luz refletida é sempre parcialmente polarizada: contém mais componentes de onda com campo elétrico perpendicular ao plano da incidência do que as componentes com campo paralelo a este plano. A polarização linear é realizada completamente quando o ângulo de incidência é igual ao **ângulo de Brewster** θ_B :

$$\theta_B = \arctg\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

igual a razão entre os índices de refração do meio da refração (n_2) e do meio de incidência (n_1). Além da polarização linear, existem mais dois tipos de polarização: **polarização circular** e **polarização elíptica**. A primeira ocorre quando o campo elétrico da onda efetua um movimento helicoidal durante a propagação, de tal maneira que a sua projeção no plano perpendicular em relação à direção da propagação executa um movimento circular. No segundo caso, a projeção do campo elétrico descreve uma elipse no plano, de vez de um círculo. Um feixe de luz linearmente polarizado pode ser convertido em um feixe circularmente ou elipticamente polarizado ao atravessar os materiais com propriedade de **birrefringência**. Esses materiais possuem dois índices de refração diferentes ao longo de dois eixos cristalinos mutuamente perpendiculares. Os componentes da luz polarizadas ao longo destes eixos propagam-se através do material com velocidades diferentes, e esse fato causa uma diferença de fase entre eles na saída do material. Se esta diferença é igual a 90° , a luz na saída é circularmente polarizada. Outra diferença de fase produz a luz elipticamente polarizada.

Processo de **espalhamento elástico da luz** ocorre sempre quando a luz incide sobre partículas cujo tamanho é menor do que o seu comprimento da onda (**espalhamento de Rayleigh**). Isso é o caso quando a luz solar interage com as moléculas presentes na nossa atmosfera. Nesse processo a luz é primeiramente absorvida pelas moléculas, e depois reemitida com mesmo comprimento da onda, mas com direção de propagação diferente. A intensidade da luz espalhada depende da sua frequência: componentes de luz com frequências maiores (como azul) são muito mais espalhadas do que os componentes com frequências menores (como vermelho). Como consequência deste fato, o céu é azul e o pôr-do-sol vermelho.

O princípio de Huygens oferece construção geométrica de uma nova frente da onda a partir de conhecimento da frente da onda em um instante anterior. Ele afirma que **todos os pontos de uma frente da onda podem ser considerados como fontes pontuais de ondas secundárias que se espalham na frente com uma velocidade igual à velocidade de propagação da onda**. A nova frente da onda em um instante posterior é determinada pela construção de uma superfície que tangencie as ondas secundárias. Este princípio constitui uma base da óptica ondulatória, usada para descrever e explicar fenômenos de incidência das ondas nos obstáculos, bem como a interferência e difração.

Conclusão

Essa aula foi dedicada ao estudo de três assuntos importantes: (1) polarização das ondas eletromagnéticas, (2) espalhamento elástico da luz e (3) o princípio de Huygens. Com este estudo, enriquecemos nosso entendimento das propriedades das ondas eletromagnéticas e dos efeitos que elas causam. Assim, estamos prontos para enfrentar os últimos assuntos neste curso: interferência e difração.

Informações sobre a próxima aula

A próxima aula é a última do curso. Será dedicada ao estudo dos efeitos ondulatórios provocados pelas ondas eletromagnéticas: são interferência e difração.