

## PROPAGAÇÃO DA LUZ NOS MEIOS MATERIAIS: REFLEXÃO, REFRAÇÃO E DISPERSÃO

### META

Discutir sucintamente sobre a natureza da luz (e outras ondas eletromagnéticas), e analisar sua propagação nos meios materiais. Definir o índice de refração do meio e aprender sua conexão com propriedades eletromagnéticas do material. Analisar comportamento de raios luminosos na interfase entre dois meios: reflexão e refração, bem como efeito de dispersão.

### OBJETIVOS

Ao final desta aula, o aluno deverá:

Entender a descrição geométrica da propagação da luz (através dos raios), e o princípio de Fermat.

Saber através de quais tipos de materiais a luz pode, ou não pode se propagar.

Entender qual é o significado físico do índice de refração do meio.

Manipular as fórmulas que descrevem as leis de reflexão e refração da luz.

Entender o efeito de dispersão de luz.

Saber explicar fenômenos como arco-íris, brilho dos diamantes, prismas de Porro e princípio de funcionamento de fibras ópticas.

### PRÉ-REQUISITO

Trigonometria básica; mecânica básica; aulas 05-07

## Introdução

Entre todas as ondas eletromagnéticas, a luz visível é aquela que tem maior importância para humanidade, sem qualquer dúvida. Esse fato justifica a atenção especial que daremos a ela e dedicaremos o resto das aulas para descrição de fenômenos exibidos por essa luz, referindo-se muito menos a outros tipos de ondas eletromagnéticas. Embora os fenômenos que vamos estudar dependem de certa forma da frequência das ondas, a maior parte das considerações vale para todos os tipos das ondas eletromagnéticas.

### 8.1 Natureza da luz e maneiras de descrever sua propagação

Desde os tempos muito antigos a raça humana questionava sobre a natureza da luz. No final, o que é a luz? Aprendemos nas aulas 06 e 07 que a luz é uma onda eletromagnética, e, portanto, exibe natureza ondulatória. Mas, isto não é uma verdade completa, como veremos mais para frente.

No Mundo Antigo os filósofos gregos acreditavam que a luz era formada por pequenas partículas, as quais se propagavam em linha reta e com alta velocidade. Essa explicação permaneceu indiscutível por muito tempo até que, por volta do ano de 1500, Leonardo da Vinci percebeu a semelhança entre a reflexão da luz e o fenômeno do eco e levantou a hipótese de que a luz era um movimento ondulatório. Na busca pela definição sobre a natureza da luz surgiram, no século XVII, duas correntes de pensamento científico: a teoria corpuscular da luz, que era defendida por Isaac Newton; e o modelo ondulatório da luz, que era defendido por Christian Huygens. Segundo Newton, a luz era formada por partículas; já Huygens defendia a hipótese de que a luz era uma onda. Essas duas correntes provocaram intensas polêmicas entre os cientistas da época, que marcou a história da física. No entanto, o conhecimento sobre a verdadeira natureza da luz só foi descoberto no século XIX, após a morte dos defensores dessas teorias.

No início deste século, as experiências de Thomas Young e Augustin Fresnel sobre interferência e difração da luz demonstraram a existência de fenômenos ópticos para os quais a teoria corpuscular da luz seria inadequada, abrindo possibilidade de que a luz correspondesse a um movimento ondulatório. Depois das descobertas de Maxwell, que provou que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no espaço é igual à velocidade de propagação da luz (aproximadamente 300.000 km/s), a teoria corpuscular foi, aos poucos, sendo rejeitada. Parecia que a teoria ondulatória levaria a vitória final. Não por muito tempo!

No início do século XX, a teoria que afirmava que a luz era puramente uma onda eletromagnética, (ou seja, a luz tinha um comportamento apenas ondulatório), começou a ser questionada. Várias experiências que investigavam interação da luz com a matéria (como absorção, emissão e espalhamento) não podiam ser explicadas com base nessa preposição. Entre elas, a lei da radiação de corpo negro, o efeito fotoelétrico e o espalhamento de raios X por elétrons. Os resultados dessas experiências foram entendidos considerando a luz como um conjunto de inúmeros pacotes de energia chamados **fótons**, que exibem propriedades corpusculares (chocam-se com elétrons

como partículas). A explicação destas experiências levou ao desenvolvimento de uma nova disciplina de física, que estuda leis que governam o mundo dos átomos, elétrons e núcleos: **mecânica quântica!**

Então, no final, o que é luz e qual é a sua natureza? A posição da física moderna é a seguinte: a luz (bem como as outras ondas eletromagnéticas) tem **natureza dual**: ondulatória e corpuscular. Sob algumas circunstâncias, a luz demonstra natureza ondulatória: ela exhibe polarização (discutiremos isso na aula 09) e sofre interferência e difração (aula 10), que são indiscutivelmente efeitos ondulatórios. Por outro lado, quando interage com a matéria, a luz se comporta como conjunto de fótons, i.e., exhibe natureza particular. Se você não entendeu isso, não se preocupe muito: ninguém realmente entende essas coisas, são peculiaridades e estranhezas da mecânica quântica!

Bom, vamos deixar a natureza particular da luz para o futuro, quando vocês começarem a estudar mecânica quântica. Neste curso, vamos discutir somente sua natureza ondulatória, que explica muitos fenômenos comuns. Analisaremos agora como podemos descrever a propagação da luz. Já aprendemos nas aulas anteriores que temos duas possibilidades: (1) usando raios, e (2) utilizando frentes (ou fronteiras) de onda.

O ramo da óptica que utiliza os raios para descrever a propagação da luz, denomina-se **óptica geométrica**. Ela se caracteriza pela simplicidade matemática, e é capaz de descrever vários (mas não todos) os efeitos ópticos.

A óptica geométrica é baseada em três princípios.

- Propagação Retilínea da Luz: em um meio homogêneo e transparente a luz se propaga em linha reta. Cada uma dessas "retas de luz" é chamada de raio de luz.
- Independência dos Raios de Luz: quando dois raios de luz se cruzam, um não interfere na trajetória do outro, cada um se comportando como se o outro não existisse.
- Reversibilidade dos Raios de Luz: se o sentido de propagação de um raio de luz é revertido, ele continua a percorrer a mesma trajetória, em sentido contrário.

Todos os três princípios podem ser derivados a partir do Princípio de Fermat, de Pierre de Fermat, que diz que quando a luz percorre a distância de um ponto a outro, ela segue a trajetória que minimiza o tempo do percurso.

O domínio de validade da óptica geométrica está nas escalas muito maiores do que o comprimento de onda da luz considerada, e nos quais as fases das diversas fontes luminosas não têm qualquer correlação entre si. A óptica geométrica se aplica ao estudo do fenômeno da reflexão e refração luminosa, sendo frequentemente utilizada na área de análise dos espelhos e lentes. Por outro lado, ela não pode ser aplicada para explicar interferência e difração, por exemplo, já que nesses fenômenos a correlação entre as fases das ondas têm papel importantíssimo.

Nessa aula, usaremos a descrição da óptica geométrica, enquanto nas próximas duas utilizaremos descrição oferecida por óptica ondulatória.

## 8.2 Propagação da luz através dos meios materiais; índice de refração

Já sabemos que a luz, bem como qualquer outra onda eletromagnética, não precisa de nenhum meio para se propagar. Porém, ela se propaga através dos meios materiais também. Como? Isso depende do tipo de meio.

Através dos **materiais condutores**, por exemplo, a luz não se propaga. Ela é refletida pela superfície do condutor. Por esta razão os metais são tão bons refletores: os melhores espelhos são feitos deles. O efeito acontece porque os condutores possuem uma espécie de elétrons livres, aqueles que não são fortemente ligados aos núcleos atômicos e podem se locomover através do metal com facilidade. Quando a onda eletromagnética tenta penetrar no interior do condutor, os elétrons livres se organizam de tal maneira a expulsar o seu campo elétrico. Sem campo elétrico, o campo magnético também é apagado, e a onda não se propaga pelo interior. No caso do condutor ideal (cuja resistividade é zero), o processo é realizado completamente e  $\vec{E} = 0$  em todos os pontos do interior, i.e., a luz é totalmente refletida. No caso do condutor real (resistividade não zero), a luz penetra parcialmente no interior até certa espessura, e, portanto a reflexão não é total.

Os **materiais dielétricos** (isolantes) não possuem a espécie de elétrons livres, i.e., todos os elétrons são ligados aos seus respectivos núcleos. Portanto, não existe efeito da “blindagem” e expulsão do campo elétrico. A luz se propaga através do interior do material, mas com uma velocidade  $v$  reduzida em relação à velocidade no vácuo  $c$  ( $v < c$ ). A redução da velocidade ocorre porque os campos elétricos e magnéticos da onda induzem oscilações das partículas eletricamente carregadas (íons, elétrons), que, por sua vez, produzem ondas eletromagnéticas secundárias. Superposição das últimas com onda incidente altera as características da luz que se propaga no interior, reduzindo sua velocidade. Como  $v = \lambda \cdot f$ , a redução da velocidade implica também na redução de comprimento de onda de luz (a frequência permanece a mesma, pois esta é a característica originada da fonte da luz).

O que muda na descrição de propagação de uma onda eletromagnética através de um dielétrico? Se o material fosse homogêneo e isotrópico, somente se deve substituir  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  nas equações de Maxwell por novas quantidades  $\epsilon$  e  $\mu$  que descrevem propriamente as características eletromagnéticas do meio dielétrico.  $\epsilon$  é a permissividade elétrica, e  $\mu$  a permeabilidade magnética do material. Eles usualmente são descritos em termos de permissividade e permeabilidade do vácuo,  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$ , através das seguintes relações:

$$\begin{aligned}\epsilon &= \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \\ \mu &= \mu_r \cdot \mu_0\end{aligned}\tag{8.1}$$

onde  $\epsilon_r$  e  $\mu_r$  são números maiores do que um (sem dimensão), que dependem das características do material.  $\epsilon_r$  é a permissividade elétrica relativa, frequentemente chamada **constante dielétrica**, enquanto  $\mu_r$  é permeabilidade magnética relativa do

material. Introduzindo essas duas novas quantidades físicas, a análise das equações de Maxwell, apresentada na aula 06, permanece a mesma. Todas as conclusões sobre ondas eletromagnéticas, tiradas a partir desta análise, também permanecem as mesmas, com exceção da velocidade de propagação das ondas, que agora é:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \leq c \quad (8.2)$$

A razão entre a velocidade da luz no vácuo e velocidade da luz no material define uma quantidade física que é muito importante para descrição das propriedades ópticas deste material: o **índice de refração**:

$$n = \frac{c}{v} \quad (8.3)$$

Como  $v \leq c$ , o  $n$  é sempre maior do que um. Substituindo (8.1) e (8.2) em (8.3) segue:

$$n = \frac{1}{\frac{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}{1}} = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}$$

Para a maioria dos materiais que transmitem ondas luminosas  $\mu_r \approx 1$ . Portanto:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (8.4)$$

i.e., o índice de refração é igual a raiz quadrada da constante dielétrica. A relação (8.4) representa a conexão entre as propriedades elétricas e as propriedades ópticas dos materiais.

A teoria eletromagnética mostra que a constante dielétrica, que determina como o material dielétrico responde ao campo eletromagnético aplicado, depende da frequência do campo. Através da equação (8.4), a mesma propriedade se aplica também para o índice de refração:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r(f) \Rightarrow n = n(f) \quad (8.5)$$

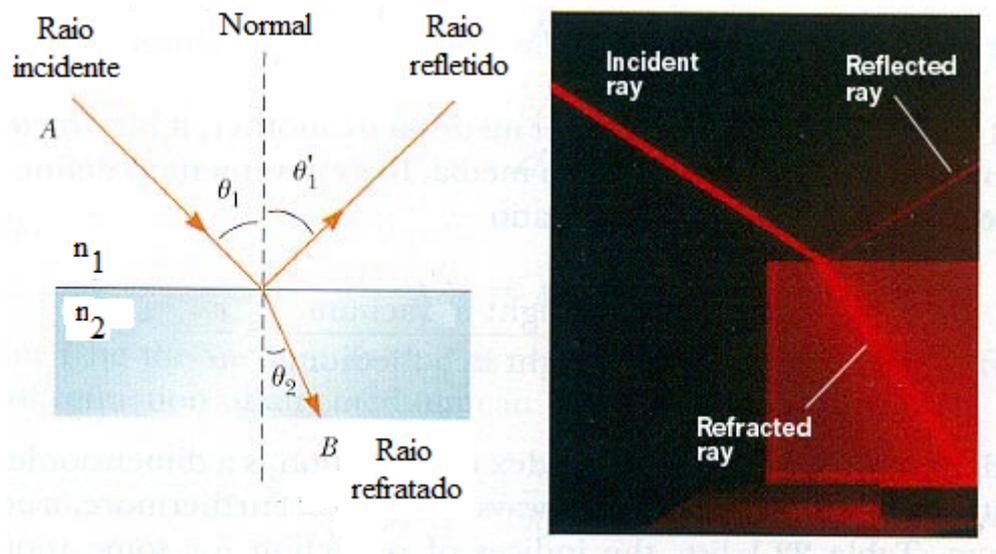
A equação (8.5) leva a conclusão que a velocidade de propagação da onda eletromagnética através de um dielétrico depende da frequência da onda:

$$v = v(f) \quad (8.6)$$

Veremos mais para frente que esta propriedade explica efeitos ópticos importantes, como por exemplo, a dispersão e desvio de feixe luz que atravessa de um meio para outro.

### 8.3 Reflexão e refração das ondas eletromagnéticas

Até agora analisamos propagação de uma onda eletromagnética através de somente um meio, seja ele vácuo ou material dielétrico. Vamos analisar agora o que acontece quando a luz muda o meio de propagação, atingindo a superfície que divide um meio 1 (com índice de refração igual a  $n_1$ ) e um meio 2 (com índice de refração igual a  $n_2$ ). Neste caso, sabemos da experiência que a feixe de luz é parcialmente refletida (volta para o meio 1), e parcialmente refratada (ou transmitida) para o meio 2. Figura 8.1 mostra esse processo utilizando descrição de óptica geométrica, i.e., representando a propagação da luz através de raios (feixes).



**Figura 8.1:** Incidência de um raio de luz na superfície entre dois meios: o raio incidente é dividido em raio refletido e raio refratado.

Os processos de reflexão e refração são descritos em termos de três leis simples que relacionam o ângulo da incidência  $\theta_1$  (ângulo que forma o raio incidente com a normal da superfície), o ângulo de reflexão  $\theta_1'$  (ângulo que forma o raio refletido com a normal da superfície), e o ângulo de refração  $\theta_2$  (o ângulo que forma o raio refratado com a normal da superfície).

1. Todos os raios incidente, refletido e refratado estão contidos no mesmo plano, que é perpendicular ao plano de interface entre dois meios.
2. Ângulo da incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão:

$$\theta_1 = \theta_1' \quad (8.7)$$

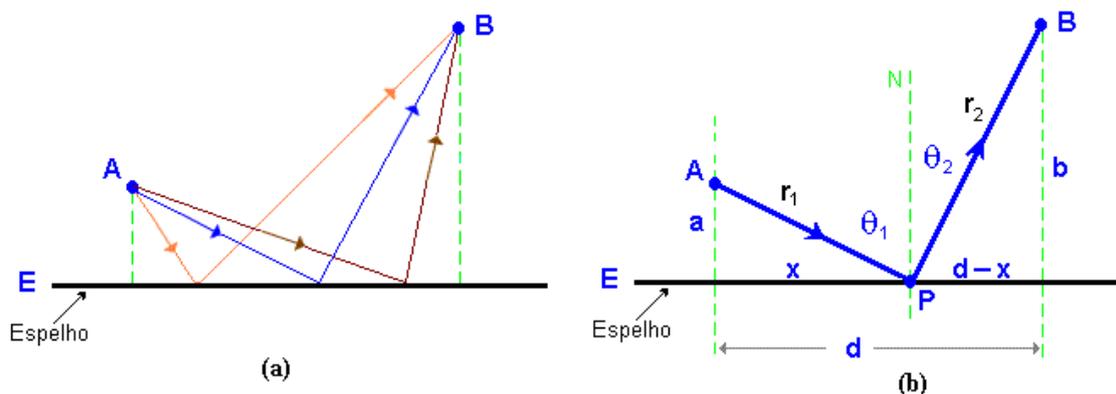
3. Relação entre ângulo de incidência e ângulo da refração depende da relação entre índices da refração de dois meios, e é expressa pela **lei de Snell**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (8.8)$$

Essas três leis generalizam os fatos observados em muitos eventos, mas também podem ser derivadas a partir de **princípio de Fermat**, já mencionado na introdução desta aula. Este princípio anuncia que a luz, que passa de um ponto A do espaço para outro ponto B, **sempre segue aquela trajetória que leva menos tempo a ser percorrida**. Expressado matematicamente, o princípio significa dizer que a integral

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \int_A^B \frac{ds}{v}$$

assume um valor mínimo quando a luz viaja com a velocidade  $v$ , entre os pontos A e B. Quando a luz está percorrendo a distância AB diretamente, através de um único meio, é óbvio que a trajetória será uma linha reta que conecta os pontos A e B. Mas, o que acontecerá se a luz atingir o ponto B não diretamente, mas via reflexão pelo espelho, como ilustrado na figura 8.2 (a)? Qual trajetória a luz seguirá?



**Figura 8.2:** Geometria utilizada na dedução da lei de reflexão pelo princípio de Fermat.

Bom, o tempo que a luz precisa para se deslocar do ponto A para o ponto B é igual a soma dos tempos gastos pelos raios incidentes e refletidos,

$$t = t_{AP} + t_{PB} = \frac{r_1}{v} + \frac{r_2}{v} = \frac{r_1 + r_2}{v}$$

respeitando a notação introduzida na figura 8.2 (b). Utilizando o teorema de Pitágoras, segue:

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v}$$

Segundo cálculo diferencial, se houver um valor de  $x$  que minimize tempo  $t$ , então  $dt/dx$  será igual a zero. Logo, calcularemos a derivada, obtendo

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} \right\} = 0$$

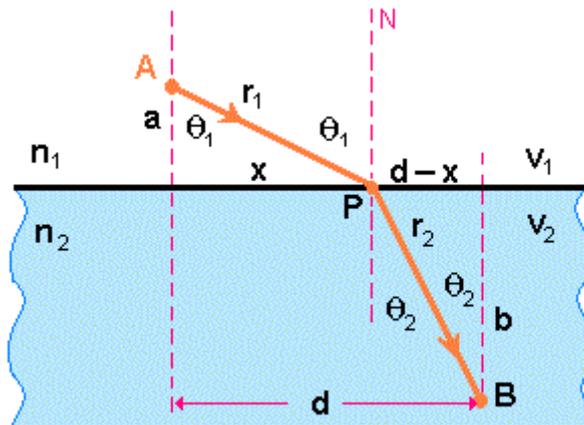
$$\Rightarrow \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

O lado esquerdo é exatamente o seno do ângulo de incidência  $\theta_1$ , e o lado direito o seno do ângulo de reflexão  $\theta_2$ . Então, segue que

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 = \theta_2$$

que é exatamente a lei de reflexão.

Para deduzir a lei da refração, usando o princípio de Fermat, usaremos a geometria mostrada na figura 8.3., com o plano contendo a trajetória da luz perpendicular ao plano que separa as regiões de índices de refração  $n_1$  e  $n_2$ . A luz propaga-se do ponto A na região com índice  $n_1$  para um ponto a uma distância desconhecida  $x$  da base da perpendicular ao plano de separação entre os dois meios materiais. O comprimento da perpendicular é  $a$ . A luz continua o seu caminho na região com índice  $n_2$  até um ponto B, situado a uma distância  $b$  do plano de separação.



**Figura 8.3:** Geometria utilizada na dedução da lei de Snell pelo princípio de Fermat.

De forma similar ao caso da reflexão, existem várias trajetórias possíveis para o raio de luz ser refratado ao percorrer dois meios materiais distintos. O tempo para percorrer do ponto A até B é igual à soma dos tempos para percorrer de A até a superfície P e de P a B. Como os meios têm índices de refração distintos, a luz terá consequentemente velocidades diferentes. Sejam estas velocidades no meio 1 e 2 iguais a  $v_1$  e  $v_2$ , respectivamente. Assim,

$$t = t_{AP} + t_{PB} = \frac{r_1}{v_1} + \frac{r_2}{v_2}$$

Expressando velocidades pelos índices de refração (através da equação 8.3), segue

$$t = \frac{n_1 r_1}{c} + \frac{n_2 r_2}{c}$$

Observando figura 8.3, concluímos que

$$r_1 = \sqrt{a^2 + x^2} \quad \text{e} \quad r_2 = \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

Portanto, o tempo necessário para a luz se propagar ao longo do trajeto A - B é

$$t = \frac{1}{c} \cdot \left[ n_1 \sqrt{a^2 + x^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2} \right]$$

Calculando de novo  $dt/dx$ , obtemos

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c} \cdot \left[ \frac{n_1 x_1}{\sqrt{a^2 + x^2}} + \frac{n_2 x_2}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} \right]$$

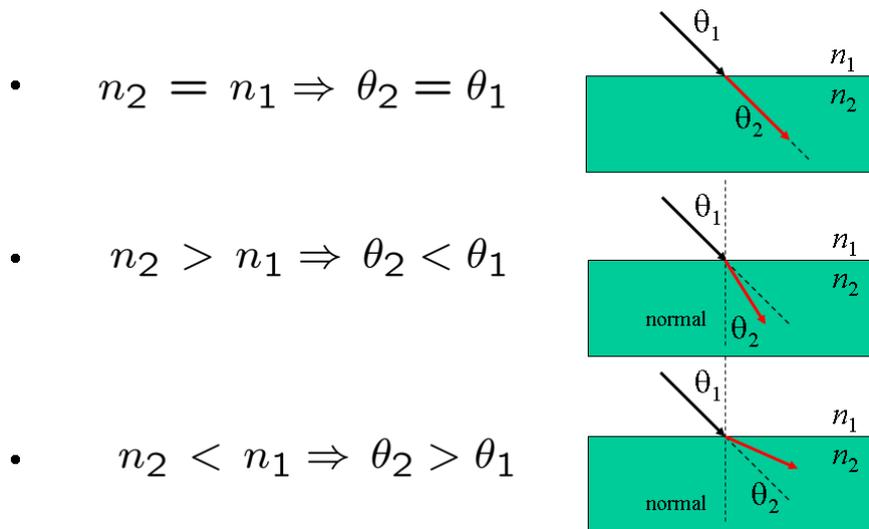
De acordo como princípio de Fermat a trajetória real a ser percorrida pelo raio de luz será aquela que satisfaz a relação  $dt/dx = 0$ . Isto significa que,

$$\frac{n_1 x_1}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{n_2 x_2}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

Usando relações geométricas tiradas da figura 8.3, podemos reescrever a equação acima em termos dos ângulos de incidência  $\theta_1$  e refração  $\theta_2$ , como a seguir,

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

que é a própria lei de Snell. A partir dessa dedução podemos concluir que **o desvio que a luz sofre ao atravessar a divisa entre dois meios é uma consequência do fato de que a sua velocidade de propagação muda**. Veja, se as velocidades  $v_1$  e  $v_2$  fossem mesmas, os índices  $n_1$  e  $n_2$  seriam os mesmos também, e, portanto, segundo a lei de Snell,  $\theta_1$  seria igual a  $\theta_2$ . Neste caso a luz passaria do ponto A para o ponto B na figura 8.3 diretamente, seguindo a linha reta e sem nenhum desvio. Essa situação é representada no topo da figura 8.4.



**Figura 8.4:** Possíveis situações que podem ocorrer quando o raio de luz atravessa a divisa entre dois meios.

Quando os índices de refração dos meios são diferentes, a luz necessariamente desviará da trajetória reta: **aproximando se da normal se  $n_1 < n_2$** , e **afastando se da normal se  $n_1 > n_2$**  (figura 8.4). A trajetória de um raio de luz é reversível, que significa se nós invertêssemos a direção de propagação da luz na figura 8.4, as trajetórias mostradas permaneceriam as mesmas!

A Lei de Snell também implica que a magnitude de desvio da luz depende da razão entre índices de refração dos dois meios. Este fato destaca ainda mais a importância que o índice de refração tem na caracterização óptica dos materiais. A Tabela 8.1 mostra os índices de refração de alguns materiais característicos.

Meio	n
Vácuo	1,00
Ar	1,0003 $\approx$ 1
Água	1,33
Quartzo fundido	1,46
Vidro	1,52 – 1,89
Diamante	2,42

**Tabela 8.1:** Índices de refração de alguns materiais.

Veja que o índice de refração do vácuo (ou ar) é o menor possível (pois neste caso  $v = c$ ). Isso significa que a luz, incidindo do ar para qualquer outro material, sempre desviará aproximando-se da normal.



Portanto, fique consciente de que as imagens que você percebe debaixo d'água são enganadoras, pois os objetos não estão no lugar onde você pensa que estão, mas deslocados devido ao efeito de refração da luz. Na figura ao lado é apresentado um exemplo de refração da imagem de um lápis ao ser submerso num copo cheio de água.

No final, o que acontece com os aspectos ondulatórios da luz durante sua reflexão ou refração?

Primeiro, sabemos que a frequência, sendo uma característica da fonte ondulatória, não muda. Após o ato de reflexão, a luz continua se propagando através do mesmo meio, sua velocidade também não muda, e portanto o comprimento de onda permanece o mesmo. Após o ato de refração, porém, a luz muda o meio de propagação, sua velocidade é diferente, e portanto o comprimento de onda também.

Vamos analisar o caso quando o meio de incidência é o vácuo (ou ar). Neste caso, se a frequência é designada por  $f_0$ , e os comprimentos de onda da luz incidente e refratada  $\lambda_0$  e  $\lambda$ , respectivamente, temos:

$$\left. \begin{array}{l} \text{vacuo: } c = f_0 \cdot \lambda_0 \\ \text{meio: } v = f_0 \cdot \lambda \end{array} \right\} \text{dividindo: } \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = n \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (8.9)$$

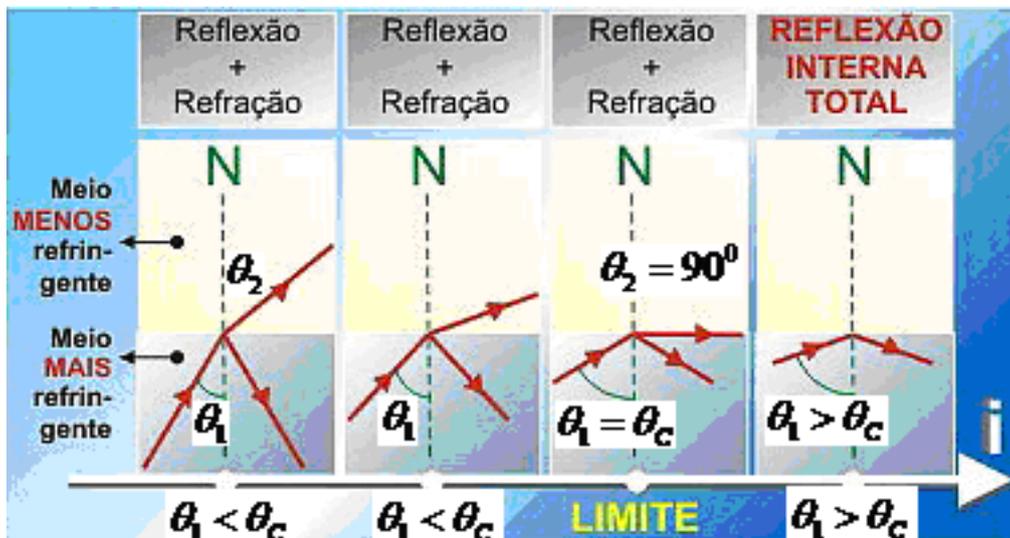
A equação 8.9 mostra o comprimento de onda da luz que se propaga através de um meio material em relação ao comprimento de onda no vácuo.

A questão sobre o comportamento da intensidade, amplitude, fase e do estado de polarização da luz incidente e refratada é bem mais complicada. Mostra-se que estas quantidades dependem do ângulo da incidência, índices de refração dos meios e do estado de polarização da luz incidente. Porém, para obter uma resposta detalhada, precisa-se de uma análise mais profunda das equações de Maxwell, tarefa que sai do foco e dos objetivos deste curso.

### 8.4 Reflexão interna total

A lei de Snell permite uma possibilidade bem interessante: sob algumas condições específicas a luz poderia sofrer somente reflexão, sem qualquer parte sendo refratada. O efeito existe de verdade, e chama-se **reflexão interna total**.

A primeira condição do efeito ocorrer é que a luz tem que passar de um meio com índice de refração maior (diz-se, o meio mais refringente) para o meio com índice de refração menor (meio menos refringente). Neste caso, o raio desvia-se, afastando-se da normal da superfície.



**Figura 8.5:** Ilustração da reflexão interna total.

Essa situação é ilustrada na figura 8.5, onde o ângulo de incidência é denotado por  $\theta_1$  e o ângulo de refração por  $\theta_2$ . Quando o  $\theta_1$  é pequeno, ocorre o caso, vamos dizer “normal”: ambas as reflexão e refração estão presentes. Porém, se começarmos aumentar ângulo  $\theta_1$ , o ângulo  $\theta_2$  também aumentará. Continuando esse processo, chegará um momento quando o  $\theta_2$  atingirá 90 graus e ângulo  $\theta_1$  será menor do que isso (pois  $\theta_2 > \theta_1$ ). Fisicamente isso significa que o raio refratado será paralelo a interface entre os meios. O ângulo incidente que produz esta situação chama-se **ângulo crítico**, denotado na figura 8.5 por  $\theta_c$ . Quando o ângulo de incidência ultrapassa o valor do ângulo  $\theta_c$ , nenhum raio pode atravessar para outro lado da superfície, e a luz está “presa” dentro do material mais refringente. Ocorre a reflexão interna total!

Como calcular o valor do ângulo crítico? Utilizando a lei de Snell:  $n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$ , onde  $n_1 > n_2$ , segue:  $\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \theta_2$ . Quando  $\theta_2 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \theta_1 = \theta_c$ . Portanto,

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \frac{\pi}{2}, \text{ i.e.,}$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (8.10)$$

A magnitude do ângulo crítico depende da razão entre os índices de refração dos dois meios: quanto menor for o índice  $n_1$  em relação ao índice  $n_2$ , menor fica o ângulo crítico e o efeito de reflexão total é mais facilmente produzido.

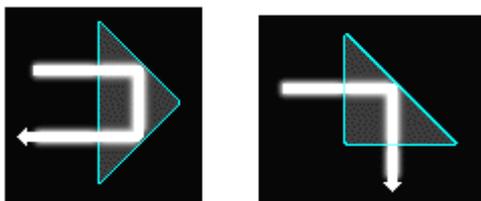
**Exemplo:** interface vidro-ar

$$n_1 = 1,52 \text{ (vidro)}$$

$$n_2 = 1,00 \text{ (ar)}$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,00}{1,52} = 0,658 \Rightarrow \theta_c = 41,1^\circ.$$

Então, se a luz tentando sair do vidro para o ar, cair na interface sob o ângulo de incidência maior que  $41,1^\circ$ , ela ficará totalmente refletida. Esse fato é utilizado na prática através de um dispositivo simples, chamado **prisma de Porro**. O prisma de Porro básico é uma peça de vidro de base triangular com todos os ângulos de  $90^\circ$  (figura 8.6).

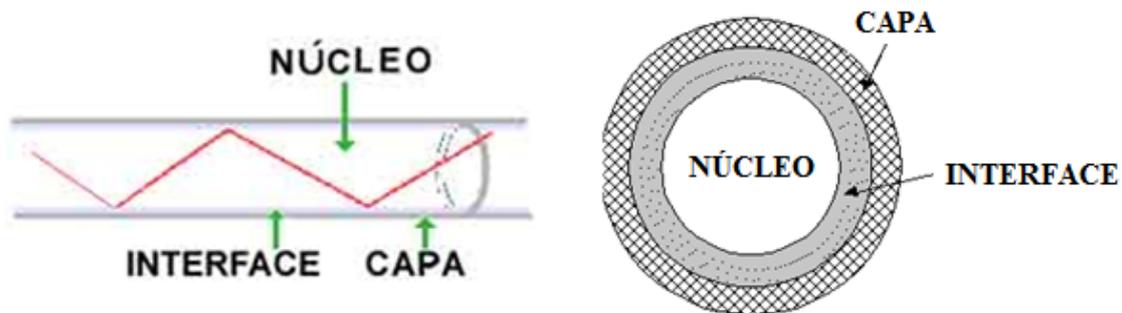


**Figura 8.6:** Prismas de Porro, refletores ideais da luz.

Quando a luz entra perpendicularmente no prisma, na sua saída forma um ângulo de incidência igual a  $45^\circ$ . Como este ângulo é maior do que ângulo crítico, a luz é totalmente refletida para o vidro. O prisma de Porro é um refletor ideal (não há perda nenhuma de luz por refração) e é usado em muitos dispositivos ópticos.

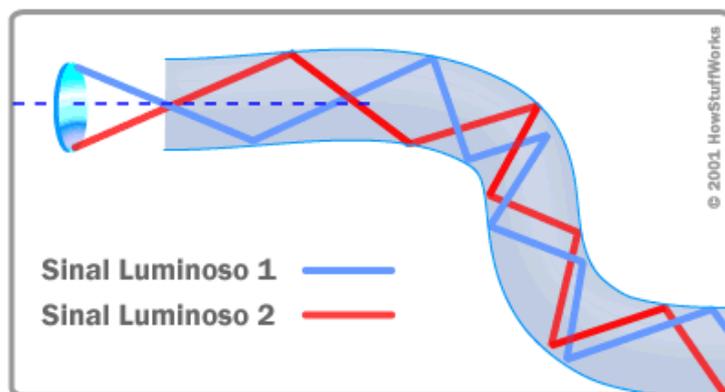
Outra grande utilização prática do efeito de reflexão total está nas **fibras ópticas**. Estas fibras são usadas como meio de transmissão de ondas eletromagnéticas (como a luz). Feitas de plástico ou de vidro (materiais transparentes), podem ter diâmetros variáveis (mais finos que um fio de cabelo até vários milímetros).

Em uma fibra óptica, a luz viaja através do núcleo (material de alto índice de refração, usualmente sílica  $\text{SiO}_2$ ), refletindo-se constantemente na interface (material de menor índice de refração). Esta reflexão é total, porque o ângulo da incidência da luz é sempre maior do que o ângulo crítico (figura 8.7).



**Figura 8.7:** Ilustração de uma fibra óptica e do princípio de propagação da luz através dela.

Refletindo-se na interface, a luz permanece presa no interior do núcleo, não importando o ângulo em que a fibra seja curvada, mesmo que seja um círculo completo. Além disso, usando frequências ligeiramente diferentes, é possível transmitir milhares de sinais ópticos por uma única fibra, sem perigo de aparecer linha cruzada (figura 8.8).



**Figura 8.8:** Transporte de mais de um sinal óptico através de uma fibra óptica.

As fibras ópticas são muito usadas, hoje em dia, na medicina e nas telecomunicações, para transporte de voz e dados. Uma fibra é incomparavelmente mais eficiente para transporte de sinais de comunicação que um fio de cobre. Diferentemente de um fio de cobre, a fibra não sofre interferências de campos elétricos e magnéticos.

Mais uma manifestação do efeito de reflexão total chama bastante atenção: **o brilho dos diamantes!** Veja, aprendemos que quanto maior o índice de refração de um material transparente, menor é o ângulo crítico. Depois que um feixe de luz entra em um material de grande índice de refração, só sai se incidir, internamente, com um ângulo menor que o ângulo crítico.

O diamante tem um índice de refração  $n = 2,40$ . Com esse valor, o ângulo crítico do diamante (em relação ao ar) é pouco maior que  $24^\circ$ . Uma vez dentro do diamante, a luz só sai se incidir na superfície interna com um ângulo menor que esse. De  $24^\circ$  até  $90^\circ$  a luz se reflete de volta.



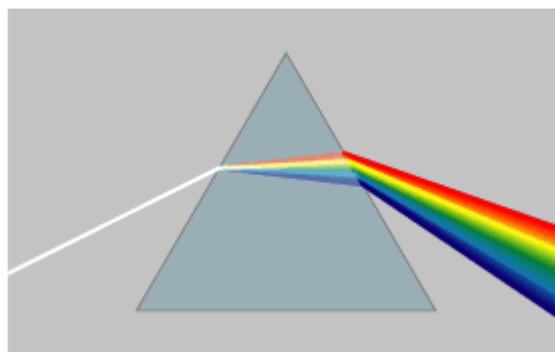
**Figura 8.9:** O diamante brilha devido ao efeito de inúmeras reflexões totais de luz no seu interior.

Assim, o diamante consegue aprisionar a luz em seu interior fazendo-a sofrer inúmeras reflexões totais e muito pouca refração para o meio exterior. Além disso, ele é lapidado de maneira que a luz fique mais tempo dentro dele de modo que a luz incidente numa das faces seja totalmente refletida nas outras.

### 8.5 Dispersão

Nesta aula, na seção 7.2, concluímos que a velocidade da onda eletromagnética e o índice de refração do meio dependem da frequência da onda (equações 8.5 e 8.6). Este fato causa um fenômeno conhecido como **dispersão**, que se manifesta como separação de uma onda real, que contém muitas frequências, em suas componentes espectrais com diferentes frequências. A dispersão sempre ocorre em um meio material (dielétrico), já que no vácuo a velocidade das ondas de quaisquer frequências é mesma:  $c$  !

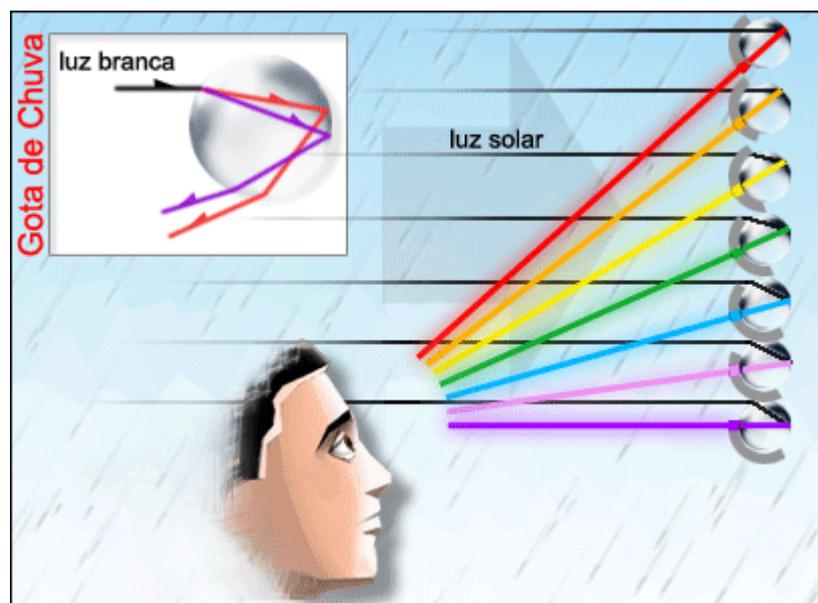
O exemplo mais conhecido da dispersão é separação da luz branca em todas as cores através de um prisma de vidro (figura 8.10).



**Figura 8.10:** Separação da luz branca em cores que a compõem: um efeito de dispersão.

Como isso ocorre? A luz branca é uma onda eletromagnética que contém muitas frequências, em toda faixa visível. Como cada frequência corresponde a determinada cor (aula 07), podemos dizer que a luz branca é mistura de todas as cores. Quando o raio da luz branca incide na interface entre ar e vidro, ela é refratada e desvia-se, aproximando-se da normal da superfície. Porém, os componentes com frequências diferentes serão desviados diferentemente. Na maioria dos materiais transparentes  $n(f \text{ de vermelho}) < n(f \text{ de amarelo}) < n(f \text{ de azul}) \dots$ , que significa que o índice de refração aumenta conforme se aumenta a frequência da onda  $f$ . Então, segundo a lei de Snell, componentes com menores frequências (como luz vermelha) desviam menos do que componentes com maiores frequências (como luz azul, por exemplo). O resultado é uma gama das cores na saída da prisma!

Outra manifestação impressionante do efeito de dispersão é a formação do **arco-íris**. O arco-íris é um fenômeno óptico e meteorológico que ocorre em razão da presença de gotículas de água na atmosfera. O fenômeno é explicado a partir dos conceitos da reflexão e refração da luz. A luz branca, quando irradiada pelo sol, penetra nas gotas de água suspensas na atmosfera. Ao mudar de meio de propagação, nesse caso do ar para a água, a luz sofre refração que é acompanhado pelo desvio de luz. Esse desvio de luz faz separar vários raios de luz que possuem uma frequência para cada tipo de cor, sendo a maior frequência para a luz violeta e o menor para a luz vermelha. Após a refração, os raios que surgiram da decomposição da luz branca sofrem agora a reflexão. Eles são refletidos internamente pelas paredes das gotas de água, retornando, assim, para atmosfera e formando o arco-íris (figura 8.11).



**Figura 8.11:** A luz branca se separa em diferentes cores (frequências, ou comprimentos de onda) ao entrar numa gota de chuva, como a luz vermelha sendo refratada por um

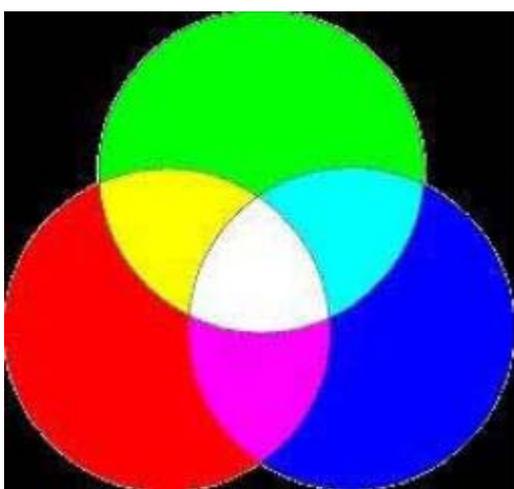
ângulo menor que a luz azul. Ao sair da gota de chuva, os raios vermelhos são retornados por um ângulo maior que os raios azuis, produzindo o arco-íris.

A formação do fenômeno de arco-íris é possível mediante a existência de gotículas de água na superfície e luz ao mesmo tempo (então, com sol e chuva ao mesmo tempo).

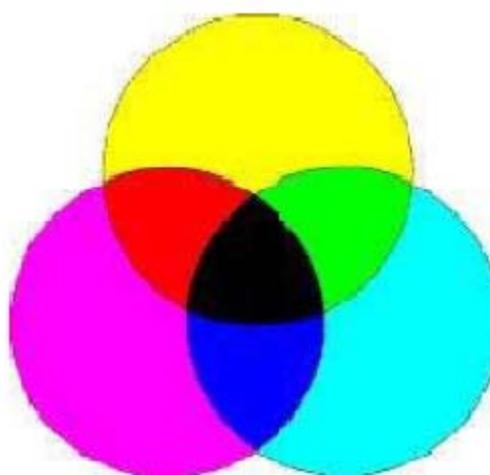
#### -- Somando e subtraindo cores. As cores da televisão

Não é necessário usar todas as cores visíveis para obter o branco. Basta usar três cores, ditas primárias: o vermelho, o azul e o verde. Projetando, sobre uma tela branca, feixes de luz com essas três cores primárias, observamos que a soma delas, no centro, é branca. A SOMA do vermelho com o verde é o amarelo e, assim por diante. Qualquer cor visível pode ser obtida somando essas três cores, variando adequadamente a intensidade de cada uma delas. Na verdade, com essas três cores conseguimos cores que nem estão no espectro solar, como o marrom. Isso é usado na tela da televisão. Se você olhar bem de perto verá que a tela é coberta de pontos com apenas essas três cores. Vistos de longe, os pontos se mesclam e vemos toda a gama multi-colorida. Aliás, todas as cores que você vê na TV ou em monitores de computador são a SOMA dessas três: vermelho, verde e azul (“Red”, “Green” e “Blue”, RGB).

SUBTRAIR cores consiste em eliminar uma ou mais das componentes da luz. Por exemplo, misturar tintas equivale a subtrair cores. Desde crianças, sabemos que a tinta azul misturada com tinta amarela dá a tinta verde. O que acontece é que os pigmentos da tinta azul absorvem as componentes do lado vermelho e os pigmentos da tinta amarela absorvem as componentes do lado azul. Sobram as componentes intermediárias, isto é, o verde.



Somando as cores primárias.



Subtraindo cores do branco.

#### 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. Enquanto a luz se propaga do vácuo ( $n = 1$ ) para um meio como o vidro ( $n > 1$ ), o comprimento de onda da luz se altera? A frequência se altera? A velocidade se altera? Explique.
2. Explique por que um remo na água parece dobrado.
3. Explique por que um diamante perde a maior parte de seu brilho quando é submerso em bissulfeto de carbono e por que uma imitação de diamante de zircônia cúbica perde todo o seu brilho no xarope de milho.

#### Resposta

O brilho do diamante origina-se do efeito de reflexão interna total, i.e., do fato que o ângulo crítico para interface diamante-ar é bem pequeno. Como o bissulfeto de carbono tem índice de refração maior que o ar, diminui a razão entre os índices de refração do bissulfeto e o diamante, aumentando ao mesmo tempo o valor do ângulo crítico (veja equação 8.10). Assim, a luz tem menos chance de ficar “presa” dentro do diamante, e o seu brilho diminui.

4. Um feixe de laser atravessando uma solução não homogênea de açúcar segue uma trajetória curva. Explique.

#### Resposta

Índice de refração depende da densidade do material. Como densidade muda ao longo da trajetória da luz (material não homogêneo), a luz sofrerá desvios diferentes, que resultará em uma trajetória curva.

### Exercícios

#### -- Reflexão e refração

1. Um estreito feixe de luz amarela de sódio, com comprimento de onda de 589 nm no vácuo, incide do ar sobre uma superfície plana de água a um ângulo  $\theta = 35,0^\circ$ . Determine o ângulo de refração  $\theta_2$  e o comprimento de onda da luz na água.

### Resposta

Meio da incidência é o ar:  $n_1 = 1,00$ . Ângulo de incidência é:  $\theta_1 = 90^\circ - 35^\circ = 65^\circ$  (pois o ângulo  $\theta$  é dado em relação à superfície, enquanto o ângulo da incidência se define em relação à normal da superfície). Meio refrativo é água:  $n_2 = 1,33$ , com ângulo de refração  $\theta_2$ . Aplicando a lei de Snell:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_2 = 0,681 \Rightarrow \theta_2 = 43^\circ.$$

Para achar o comprimento de onda  $\lambda_2$  da luz na água, usaremos o fato que a frequência da luz no ar ( $c/\lambda_1$ , onde  $\lambda_1 = 589 \text{ nm}$ ) é igual a frequência de luz na água ( $v/\lambda_2$ , onde  $v$  é velocidade de propagação da luz na água):

$$\frac{c}{\lambda_1} = \frac{v}{\lambda_2} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{v}{c} \cdot \lambda_1 = \frac{1}{n_2} \cdot \lambda_1 = \frac{589 \text{ nm}}{1,33} = 442,8 \text{ nm}.$$

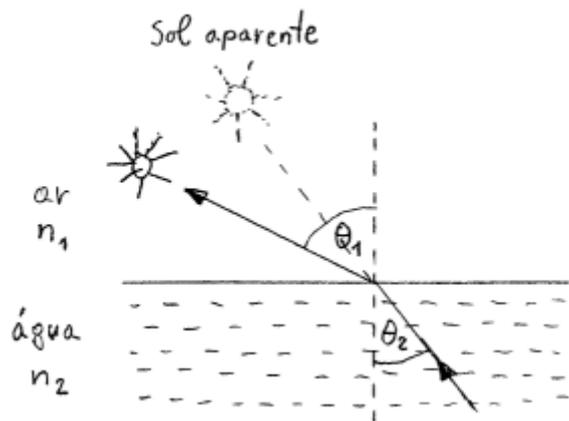
Utilizamos o fato que a razão  $c/v$  define o índice de refração da água.

2. O comprimento de onda da luz vermelha de um laser de hélio-neônio no ar é 632,8 nm. (a) Qual é sua frequência? (b) Qual é seu comprimento de onda no vidro, cujo índice de refração é 1,50? (c) Qual é sua velocidade no vidro?

3. Um mergulhador vê o Sol a um ângulo aparente de  $45,0^\circ$  com a vertical. Qual é a direção real do Sol?

### Resposta

A situação é ilustrada na figura abaixo. O mergulhador vê o Sol sob o ângulo de  $\theta_2 = 45^\circ$  em relação à normal, enquanto a posição real do Sol é determinada com ângulo  $\theta_1$ .



Como a refração é um processo irreversível, o caminho da luz que vêm do Sol até o mergulhador pode ser invertido, e a lei de Snell aplicada:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

onde  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 1,33$  e  $\theta_2 = 45^\circ$ . O resultado é:  $\theta_1 = 70,12^\circ$ .

4. Um feixe de laser incide a um ângulo de  $30,0^\circ$  com a vertical sobre uma solução de xarope de milho em água. Se o feixe é refratado a  $19,24^\circ$  com a vertical, (a) qual é o índice de refração da solução de xarope? Suponha que a luz seja vermelha, com comprimento de onda no vácuo de  $632,8 \text{ nm}$ . Descubra (b) seu comprimento de onda, (c) sua frequência e (d) sua velocidade na solução.

5. Um raio de luz que estava inicialmente na água penetra em uma substância transparente a um ângulo de incidência de  $37,0^\circ$  e o raio transmitido é refratado a um ângulo de  $25,0^\circ$ . Calcule a velocidade da luz na substância transparente.

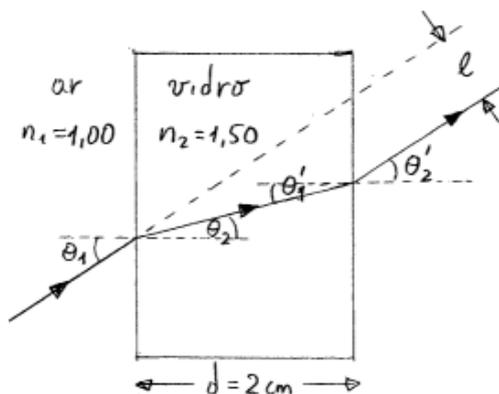
#### Dica

Utilize a lei de Snell (considerando  $n_1 = 1,33$  para água) para achar o índice de refração da substância  $n_2$ , e depois calcule a velocidade ( $v_2 = 1,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

6. Um raio da luz incide sobre um bloco de vidro plano ( $n = 1,50$ ) cuja espessura é de  $2,00 \text{ cm}$  a um ângulo de  $30,0^\circ$  com a normal. Trace o feixe luminoso através do vidro e encontre os ângulos de incidência e de refração em cada superfície.

#### Resposta

Raio de luz incide de ar ( $n_1 = 1,00$ ) com ângulo  $\theta_1 = 30^\circ$  em relação à normal, e entra no vidro ( $n_2 = 1,50$ ) fazendo ângulo  $\theta_2$  em relação à normal (figura abaixo).



A partir da lei de Snell, esse ângulo pode ser facilmente calculado:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_2 = 19,5^\circ .$$

Ângulo de incidência na segunda superfície do vidro é obviamente igual ao ângulo de refração na primeira:

$$\theta_1' = \theta_2 = 19,5^\circ$$

Ângulo de refração na segunda superfície pode ser encontrado a partir da lei de Snell:

$$n_2 \cdot \sin \theta_1' = n_1 \cdot \sin \theta_2' \Rightarrow \sin \theta_2' = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \theta_1' = \frac{1,50}{1,00} \cdot \sin(19,5^\circ) = 0,5$$

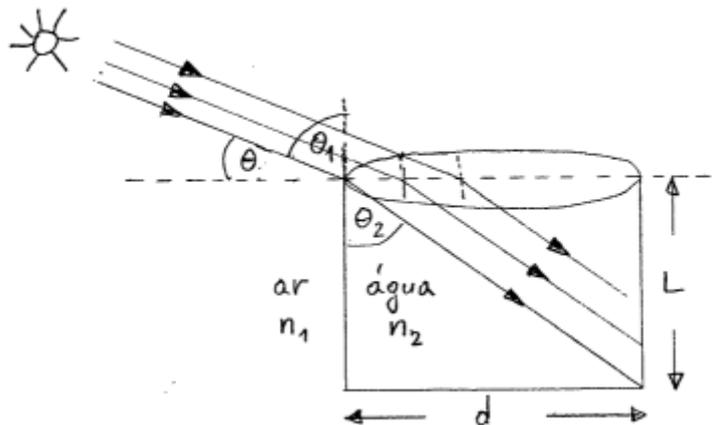
$$\Rightarrow \theta_2' = \theta_1 = 30^\circ .$$

Esse resultado é esperado, pois na segunda superfície acontece o mesmo processo como na primeira superfície, somente invertido. Portanto, a luz que incide sobre um bloco plano de vidro desvia paralelamente sua trajetória por uma distância  $l$ .

7. Um tanque cilíndrico opaco com a parte superior aberta tem diâmetro de 3,00 m e está preenchido completamente com água. Quando o Sol poente atinge um ângulo de  $28,0^\circ$  acima do horizonte, a luz solar deixa de iluminar qualquer parte do fundo do tanque. Qual é a profundidade do tanque?

Resposta

A situação descrita no problema é ilustrada na figura abaixo. O ângulo da incidência é  $\theta_1 = 90^\circ - \theta = 90^\circ - 28^\circ = 62^\circ$ , índice de refração do ar e água  $n_1 = 1,00$  e  $n_2 = 1,33$ , respectivamente, diâmetro do tanque  $d = 3,00 m$ .

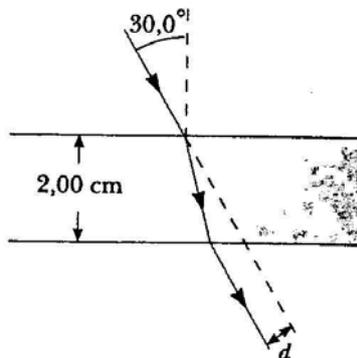


Com objetivo de achar profundidade  $L$ , primeiramente aplicaremos lei de Snell para calcular ângulo de refração  $\theta_2$ :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_2 = 41,6^\circ.$$

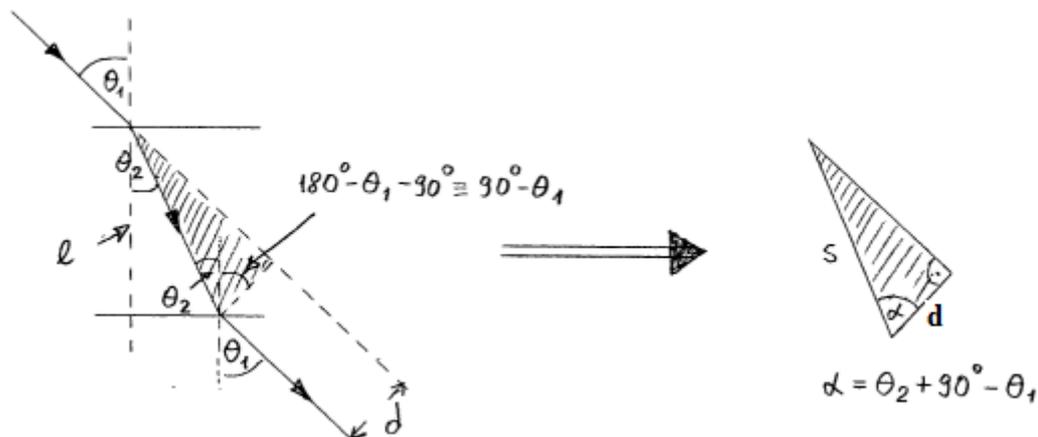
Agora utilizando geometria simples teremos:  $\text{tg} \theta_2 = \frac{d}{L} \Rightarrow L = \frac{3,00\text{m}}{\text{tg}(41,6^\circ)} = 3,38\text{m}.$

8. Quando a luz ilustrada na figura abaixo atravessa o bloco de vidro, ela é deslocada lateralmente pela distância  $d$ . Se  $n = 1,50$ , qual é o valor de  $d$ ?



Resposta

Os dados conhecidos são: o meio incidente é o ar ( $n_1 = 1,00$ ) e o ângulo de incidência é  $\theta_1 = 30^\circ$ . O bloco é de vidro ( $n_2 = 1,50$ ) com espessura  $l = 2,00\text{cm}$ .



O valor  $d$  será calculado a partir da geometria do triângulo destacado na figura a esquerda, e apresentado na figura a direita. Para este triângulo temos que determinar a hipotenusa  $s$  e o ângulo  $\alpha$ .

Vamos primeiro utilizar a lei de Snell e calcular ângulo de refração  $\theta_2$ :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{1,00}{1,50} \cdot \sin 30^\circ = \frac{1}{3} \Rightarrow \theta_2 = 19,5^\circ.$$

Analisando na figura a esquerda, o triângulo do lado de destacado, podemos determinar o  $s$ :

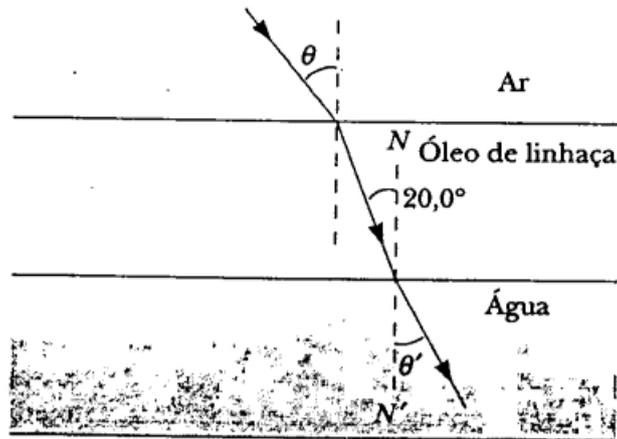
$$\cos \theta_2 = \frac{l}{s} \Rightarrow s = \frac{2,00 \text{ cm}}{\cos(19,5^\circ)} = 2,12 \text{ cm},$$

e concluir que o ângulo  $\alpha = \theta_2 - \theta_1 + 90^\circ = 79,5^\circ$ . Finalmente, a partir da figura a direita segue:

$$\cos \alpha = \frac{d}{s} \Rightarrow d = (2,12 \text{ cm}) \cdot \cos(79,5^\circ) = 0,39 \text{ cm}.$$

9. Descubra quanto tempo leva para a luz atravessar o bloco de vidro descrito no problema 8.

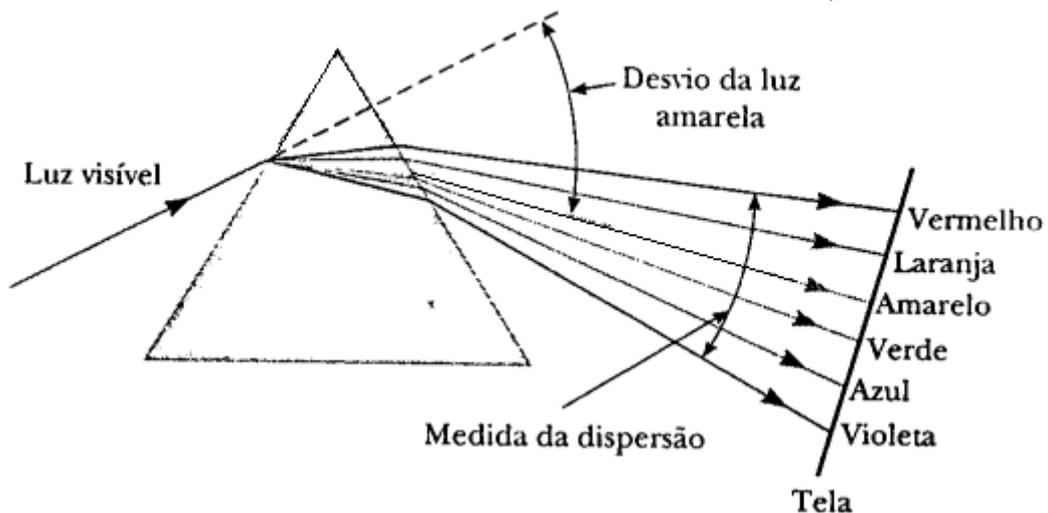
10. O feixe de luz mostrado na Figura abaixo faz um ângulo de  $20,0^\circ$  com a linha normal  $NN'$  no óleo de linhaça. Determine os ângulos  $\theta$  e  $\theta'$ . (O índice de refração do óleo de linhaça é 1,48.)



-- **Dispersão**

11. Um raio de luz incide sobre o ponto médio de uma das faces de um prisma de vidro equiângulo ( $n = 1,50$ ) a um ângulo de incidência de  $30,0^\circ$ . Trace a trajetória do raio de luz através do vidro e encontre os ângulos de incidência e de refração em cada superfície.

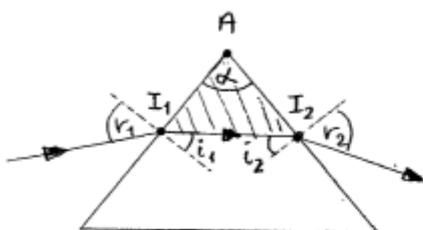
12. O índice de refração para a luz violeta no cristal de sílica é  $1,66$  e o índice de refração para a luz vermelha é  $1,62$ . Um prisma tem um ângulo do vértice de  $60,0^\circ$ , medido entre a superfície em que a luz penetra no prisma e a superfície em que a luz deixa o prisma. Qual será a dispersão angular da luz visível que atravessa o prisma se o ângulo de incidência for  $50,0^\circ$ ? (Veja a figura abaixo.)



Resposta

O ângulo que corresponde a medida de dispersão é igual à diferença entre os ângulos que correspondem aos desvios da luz vermelha e violeta, respectivamente. O que é dado é o ângulo do vértice do prisma,  $\alpha = 60^\circ$ , o ângulo de incidência de luz ( $r_1 = 50^\circ$ ), e os índices de refração do vidro para luz vermelha ( $n = 1,62$ ) e violeta ( $n = 1,66$ ). O índice de refração do ar é  $n = 1,00$ .

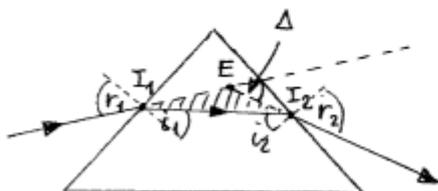
Na figura abaixo é ilustrada e representada a conta para o ângulo de desvio  $\Delta$  para luz de qualquer frequência, em geral.



Triângulo  $I_1 I_2 A$ :

$$\alpha + \left(\frac{\pi}{2} - i_1\right) + \left(\frac{\pi}{2} - i_2\right) = \pi$$

$$\Rightarrow \boxed{\alpha = i_1 + i_2} \quad (1)$$



Triângulo  $I_1 I_2 E$ :

$$(r_1 - i_1) + (r_2 - i_2) + (\pi - \Delta) = \pi$$

$$\Rightarrow \Delta = (r_1 + r_2) - (i_1 + i_2)$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta = r_1 + r_2 - \alpha} \quad (2)$$

Sabendo os índices de refração e utilizando a lei de Snell, primeiramente se calcula o ângulo  $i_1$ , e através da relação (1), determina-se ângulo  $i_2$ . Aplicando mais uma vez a lei de Snell, para a incidência de luz no outro lado do prisma, calcula-se o ângulo  $r_2$ . Através da equação (2), finalmente, determina-se o ângulo de desvio  $\Delta$ . O processo se repete para calcular ângulos de desvio do violeta e desvio do vermelho, cuja subtração dá a medida de dispersão.

### -- Reflexão interna total

13. Para uma luz de 589 nm, calcule o ângulo crítico para os seguintes materiais cercados pelo ar: (a) diamante, (b) vidro flint (cristal) e (c) gelo.

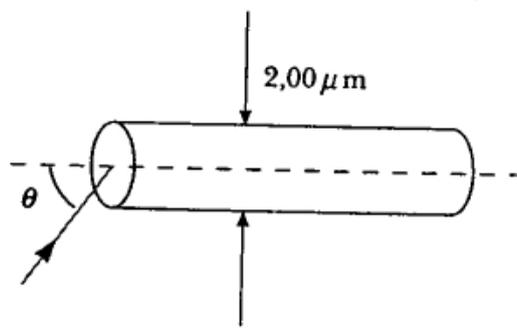
Dica

Os meios da incidência da luz são: diamante ( $n_1 = 2,42$ ), vidro flint ( $n_1 = 1,65$ ) e gelo ( $n_1 = 1,31$ ). Meio da refração é o ar ( $n_2 = 1,00$ ). Para cada caso, o ângulo crítico é calculado a partir da equação:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_1} \Rightarrow \theta_c = \arcsin\left(\frac{1}{n_1}\right)$$

14. Repita o problema 13 para a situação na qual os materiais estejam cercados por água.

15. Determine o ângulo máximo  $\theta$  para o qual os raios luminosos que incidem na extremidade da fibra na figura abaixo realizem reflexão interna total nas paredes da fibra. Considere que a fibra tem índice de refração de 1,36 e que o meio externo é o ar.

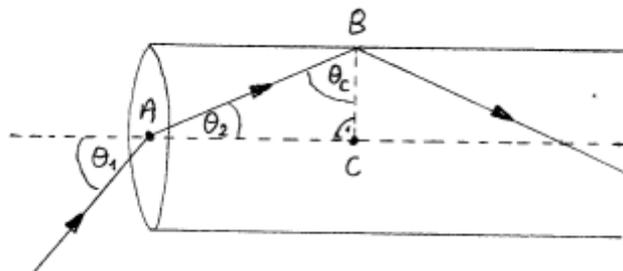


Resposta

Primeiramente, vamos calcular o valor do ângulo crítico para interface fibra-ar:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{1}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,36}\right) = 47,33^\circ$$

A situação de realização do ângulo crítico dentro da fibra é ilustrada na figura abaixo.



Esta situação implica que o ângulo  $\theta_2$  é o máximo que produz o efeito de reflexão interna total, isto é, se o  $\theta_2$  fosse maior, o ângulo associado ao ponto B na figura

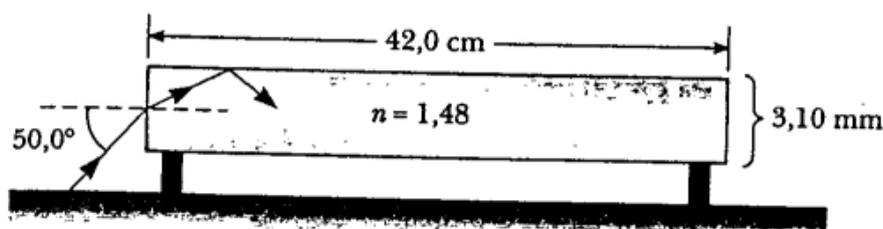
seria menor do que  $\theta_c$ . Isso também implica que o ângulo  $\theta_1$  é o maior possível que produz o efeito de reflexão interna. Analisando o triângulo ABC, e sabendo que a soma dos ângulos no interior do triângulo é igual a  $180^\circ$ , segue:

$$\theta_2 = 180^\circ - 90^\circ - \theta_c = 90^\circ - 47,33^\circ = 42,67^\circ$$

Agora só resta aplicar a lei de Snell para o ponto A, para calcular  $\theta_1$  máximo:

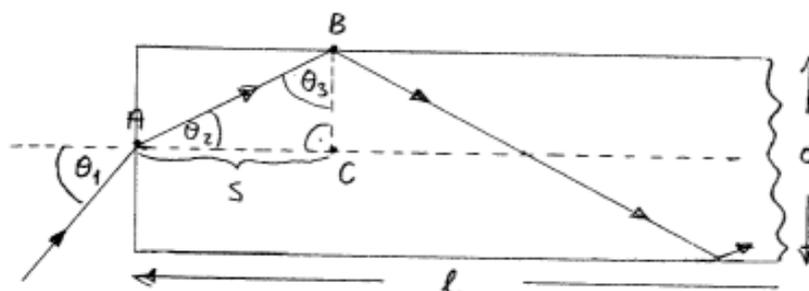
$$n_{ar} \cdot \sin \theta_1 = n_{fibra} \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{1,36}{1,00} \cdot \sin(42,67^\circ) = 0,92 \Rightarrow \theta_1 = 67^\circ.$$

16. Um feixe de laser incide sobre uma extremidade de uma placa de material, como é mostrado na figura abaixo. O índice de refração da placa é 1,48. Determine o número de reflexões internas do feixe antes dele emergir na extremidade oposta da placa.



Resposta

Os dados conhecidos são: comprimento da placa  $l = 42\text{ cm}$ , sua altura  $d = 3,10\text{ mm}$ , ângulo de incidência da luz  $\theta_1 = 50,0^\circ$ , e índices de refração do ar ( $n_{ar} = 1,00$ ) e da placa ( $n_{placa} = 1,48$ ) (veja figura abaixo).



Primeiro calcularemos o ângulo  $\theta_2$ , utilizando lei de Snell:

$$n_{ar} \cdot \sin \theta_1 = n_{placa} \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{1,00}{1,48} \cdot \sin(50,0^\circ) = 0,52 \Rightarrow \theta_2 = 31,17^\circ.$$

Depois, analisando o triângulo ABC, calcularemos o comprimento  $s$  :

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{d/2}{s} \Rightarrow s = \frac{3,10 \text{ mm}}{2 \cdot \operatorname{tg}(31,17^\circ)} = 2,56 \text{ mm}.$$

Uma reflexão interna corresponde ao comprimento igual a  $2 \cdot s$ . Portanto, o número total  $N$  de reflexões é igual a:

$$N = \frac{l}{2 \cdot s} = \frac{420 \text{ mm}}{2 \cdot 2,56 \text{ mm}} = 82.$$

No final, podemos verificar se as reflexões que ocorrem dentro da placa são reflexões totais ou não. Para isso, basta calcular o ângulo crítico  $\theta_c$  para interface placa-ar, e compará-lo com ângulo  $\theta_3$ .

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_{ar}}{n_{placa}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,48}\right) = 42,5^\circ$$

$$\theta_3 = 180^\circ - 90^\circ - \theta_2 = 90^\circ - 31,17^\circ = 58,83^\circ$$

Como  $\theta_3 > \theta_c$ , ocorre reflexão total!

17. Uma fibra de vidro ( $n = 1,50$ ) é submersa em água ( $n = 1,33$ ). Qual é o ângulo crítico para a luz permanecer dentro da fibra óptica?

### Resumo da aula

A luz (e outras ondas eletromagnéticas) exibem natureza dual: ondulatória e corpuscular. Sob algumas circunstâncias a luz demonstra natureza ondulatória: ela exibe efeitos ondulatórios: polarização, interferência e difração. Por outro lado, quando interage com a matéria, a luz se comporta como conjunto de pacotes de energia (fótons), i.e., exibe natureza particular.

A onda eletromagnética não precisa de nenhum meio para se propagar. Porém, ela também se propaga através dos alguns meios materiais. Através dos materiais condutores, a luz não se propaga devido ao fato que os elétrons livres se organizam de tal maneira que expulsam qualquer campo elétrico do interior. Os materiais dielétricos não possuem espécie de elétrons livres, e, portanto, a luz se propaga através do interior do material, mas com uma velocidade  $v$  reduzida em relação à velocidade no vácuo  $c$  ( $v < c$ ). Quantidade física que quantifica esta diminuição se chama índice de refração:

$$n = \frac{c}{v}$$

e é uma característica importante do material dielétrico.

A propagação da luz pode ser descrita de duas maneiras: (1) usando raios (óptica geométrica), e (2) utilizando frentes da onda (óptica ondulatória). A óptica geométrica se caracteriza pela simplicidade matemática, e é capaz de descrever vários (mas não todos) os efeitos ópticos. Porém, sua validade é restrita para as escalas muito maiores do que o comprimento de onda da luz considerada, e nos quais as fases das diversas fontes luminosas não têm qualquer correlação entre si.

A óptica geométrica é baseada no princípio de Fermat, que diz que quando a luz percorre a distância de um ponto a outro, ela segue a trajetória que minimiza o tempo do percurso. A partir deste princípio, podem ser derivadas as leis de reflexão e refração, que relacionam o ângulo de incidência ( $\theta_1$ ), o ângulo de reflexão ( $\theta_1'$ ) e o ângulo de refração ( $\theta_2$ ) (todos contados a partir da normal da superfície) e obedecidas pelos raios de luz quando encontram interface entre dois meios, com índices de refração dos meios  $n_1$  e  $n_2$ .

1. Todos os raios incidente, refletido e refratado estão contidos no mesmo plano, que é perpendicular ao plano de interface entre dois meios.
2. O ângulo da incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão:

$$\theta_1 = \theta_1'$$

3. A relação entre o ângulo de incidência e o ângulo da refração depende da relação entre os índices da refração dos dois meios, e é expressa pela **lei de Snell**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

A lei de Snell demonstra que a luz desvia sua trajetória quando passa de um meio para outro. Quanto será este desvio, e se ele acontecerá aproximando-se ou afastando-se da normal da superfície entre os meios, depende da razão entre índices de refração.

Quando a luz passa de um meio com índice de refração maior (mais refringente) para um meio com índice de refração menor, ela desvia afastando-se da normal. Nesse caso, quando o ângulo da incidência ultrapassa certo valor (ângulo crítico), o ângulo da refração fica maior que  $90^\circ$ , isto é, a luz é completamente refletida para dentro do meio incidente (está “presa” no material). O efeito se chama **reflexão interna total**. O valor do ângulo crítico depende da razão entre os índices de refração do meio incidente ( $n_1$ ) e outro meio ( $n_2$ ):

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

A reflexão interna total é responsável pelo brilho intenso do diamante, e constitui o princípio de funcionamento das fibras ópticas, entre outras aplicações.

O fato de que a velocidade da onda eletromagnética e o índice de refração do meio dependem da frequência da onda, causa um fenômeno conhecido como **dispersão**, que se manifesta como separação de uma onda real, que contém muitas frequências, em suas componentes espectrais com diferentes frequências. Os exemplos de dispersão são inúmeros, sendo mais conhecidos (1) separação da luz branca em todas as cores através de um prisma de vidro, e (2) manifestação do arco-íris. Ambos ocorrem porque a luz branca, sendo composta por várias frequências (cores), refrata quando entra no vidro do prisma ou na gotícula da água na atmosfera. As ondas com frequências diferentes desviam diferentemente no ato de refração, e, portanto, na saída todas as frequências são separadas e entregues ao nosso olho como um espectro de cores.

### Conclusão

Nessa aula discutimos sucintamente a natureza física da luz, e começamos a estudar como ela se propaga através dos meios materiais. Aprendemos que os condutores não transportam luz, e que os isolantes (dielétricos) sim. Caracterizamos as propriedades ópticas dos dielétricos através de uma propriedade física chamada índice de refração. Vimos que a propagação da luz pode ser descrita pelos raios (óptica geométrica) e pelas frentes da onda (óptica ondulatória). Nessa aula utilizamos o primeiro tipo de descrição para determinar as leis de reflexão e refração da luz quando ela muda o meio de propagação. A partir dessas leis, investigamos o interessante fenômeno de reflexão interna total, utilizado na construção das fibras ópticas. Conhecemos também o fenômeno da dispersão, responsável pela aparição do fenômeno do arco-íris, entre outros.

### Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula estudaremos os tipos de polarização da luz (polarização linear, circular e elíptica), e discutiremos maneiras como esta polarização pode ser conseguida (usando materiais com características especiais – polaróides, ou refletindo a luz por ângulos especiais). Aprenderemos por que o céu do nosso planeta é azul, através da informação sobre espalhamento das ondas eletromagnéticas. Finalmente, discutiremos um pouco óptica ondulatória, apreendendo o famoso princípio de Huygens.