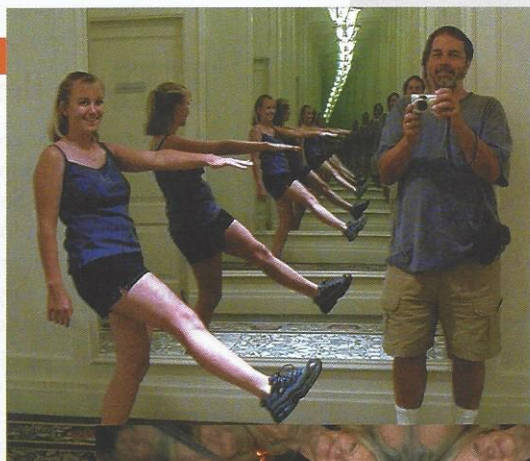


28

CAPÍTULO 28

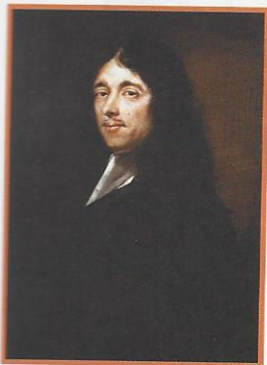
Reflexão e Refração

- 28.1 Reflexão
- 28.2 Lei da reflexão
- 28.3 Refração
- 28.4 A origem da refração
- 28.5 Dispersão e arco-íris
- 28.6 Reflexão interna total
- 28.7 Lentes
- 28.8 Defeitos em lentes



1 Peter Hopkinson estimula o interesse da turma com esta hilária demonstração em pé por apenas uma das pernas em frente a um grande espelho, em que ele ergue a perna direita enquanto a perna esquerda, invisível, o sustenta por trás do espelho. **2** Por que as pernas do pato, mas não seus pés, aparecem refletidos no centro da foto? **3** O professor de física Fred Myers, em pé entre espelhos paralelos, tira uma foto de sua filha McKenzie, que é engenheira de projetos. **4** Quantos espelhos produzem estas reflexões múltiplas da professora de física texana Karen Jo Matsler?

O advogado e matemático francês Pierre de Fermat nasceu em 1601. Ele trabalhou na University of Toulouse, antes de se mudar para Bordeaux, quando estava com vinte e poucos anos. Ele era fluente em latim, grego, italiano e espanhol, e bem reconhecido por seus versos escritos em diversas línguas. Em 1629, ele produziu um trabalho importante sobre as ideias acerca de máximos e mínimos, que acabou sendo útil para Newton, assim como para Leibniz, ao desenvolverem o cálculo independentemente. Em correspondência com Blaise Pascal, em 1654, Fermat ajudou a estabelecer os fundamentos da teoria das probabilidades.



Para os matemáticos, Fermat é mais lembrado por seu famoso “último teorema”, um caso especial que estabelece

que a soma dos cubos de dois números inteiros não pode ser o cubo de outro número inteiro. Por mais de 300 anos, os matemáticos ficaram atormentados com uma nota de margem de página escrita em latim em um dos livros de Fermat, que pode ser traduzida como “Eu tenho uma prova verdadeiramente maravilhosa desta proposição, a qual esta margem é pequena demais para conter”. Somente em 1994 o teorema foi provado (por Andrew Wiles, da Princeton University, EUA), usando métodos que não estavam disponíveis para Fermat, de modo que parece improvável que Fermat realmente tivesse uma prova dele. Isso não diminui o gênio que ele manifestou de outras maneiras.

Fermat tinha uma maneira única de descobrir a trajetória da luz. Ele estabeleceu que, entre todos os possíveis caminhos que a luz pode percorrer de um ponto a outro, ela percorrerá de fato aquele que requer o menor tempo. A reflexão e a refração, os principais assuntos do próximo capítulo, podem ser elegantemente compreendidas com este princípio.

28.1 Reflexão

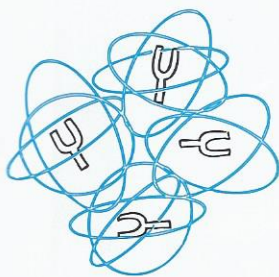


FIGURA 28.1

A luz interage com os átomos assim como o som interage com diapasões tipo forquilha.

A maior parte das coisas que vemos ao nosso redor não emitem luz própria. Elas são visíveis porque reemitem a luz que incide em suas superfícies, vinda de uma fonte primária, como o Sol ou uma lâmpada, ou de uma fonte secundária, tal como o céu iluminado. Quando a luz incide na superfície de um material, ou ela é reemitida sem que ocorra alteração na sua frequência, ou é absorvida por ele e o aquece.¹ Dizemos que a luz é *refletida* quando ela retorna ao meio de onde veio – o processo é chamado de **reflexão**.

Quando esta página é iluminada com a luz solar ou de um lampião, os elétrons dos átomos do papel e da tinta passam a oscilar mais energeticamente em resposta às oscilações dos campos elétricos da luz incidente. Os elétrons energizados, então, reemitem a luz que torna possível enxergar a página. Quando a página é iluminada com luz branca, o papel aparece como branco, o que mostra que os elétrons reemitem todas as frequências visíveis. Ocorre muito pouca absorção. Com a tinta, a história é diferente. Exceto por um pouco de reflexão, ela absorve todas as frequências visíveis e, portanto, aparece como preta.

O princípio do mínimo tempo²

A ideia de que a luz segue o caminho mais rápido ao ir de um ponto a outro, como mencionado anteriormente, foi formulada por Pierre Fermat. Essa ideia agora é conhecida como **princípio de Fermat do mínimo tempo**.

Podemos compreender a reflexão empregando o princípio de Fermat do mínimo tempo. Considere a seguinte situação: na Figura 28.2, vemos dois pontos, A e B, com um espelho comum abaixo deles. Como podemos ir de A até B o mais rápido possível, isto é, no mínimo tempo? A resposta é muito simples – indo em



FIGURA 28.2

¹ Outro destino para a luz incidente, menos comum, é absorção seguida de reemissão numa frequência mais baixa – o que se chama de fluorescência (Capítulo 30).

² Este material e o de muitos exemplos do princípio de mínimo tempo foram adaptados da obra de R. P. Feynman, R. B. Leighton e M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, Cap. 26 (Reading, MA: Addison-Wesley, 1963).

linha reta de A até B! Mas se acrescentarmos a condição de que a luz deve incidir sobre o espelho ao ir de A até B no mínimo tempo, a resposta não é tão fácil assim. Seria necessário ir tão rápido quanto possível de A até o espelho, e daí para B, como mostrado pelas linhas sólidas na Figura 28.3. Isto resulta num caminho curto até o espelho, mas em um caminho muito comprido do espelho até B. Se, em vez disso, considerarmos um ponto sobre o espelho um pouco mais para a direita do anterior, aumentaremos ligeiramente a primeira distância, mas diminuiremos consideravelmente a segunda, de modo que o comprimento do caminho total mostrado pelas linhas tracejadas é menor – e, portanto, o tempo de propagação também. Como podemos encontrar o ponto exato de incidência sobre o espelho para o qual o tempo total é o mais curto possível? Podemos encontrá-lo empregando um truque geométrico muito interessante.

Marcamos um ponto artificial, B' , no outro lado do espelho, a uma distância abaixo do mesmo igual à distância do ponto B até o espelho (Figura 28.4). A distância mais curta entre A e este ponto artificial B' é muito simples de determinar: trata-se de uma linha reta. Agora esta linha reta intercepta o espelho no ponto C, o ponto preciso de reflexão para se ter o caminho mais curto e, daí, o caminho de mínimo tempo para transmissão luminosa de A para B. Um exame cuidadoso mostrará que a distância entre C e B é igual à distância entre C e B' . Vemos que o caminho de A até B' , passando por C, é igual ao comprimento do caminho que vai de A até B “ricocheteando” em C.

Uma inspeção adicional das Figuras 28.4 e 28.5 e um pouco de raciocínio geométrico mostrará que o ângulo da luz incidente de A para C é igual ao ângulo de reflexão de C para B.

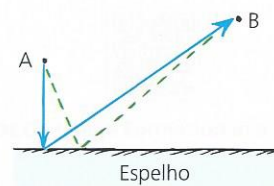


FIGURA 28.3

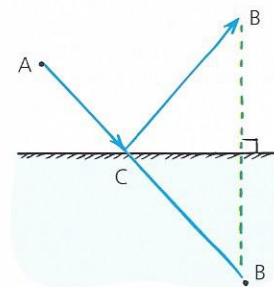


FIGURA 28.4

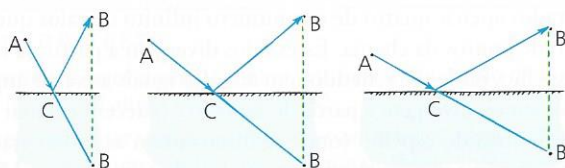


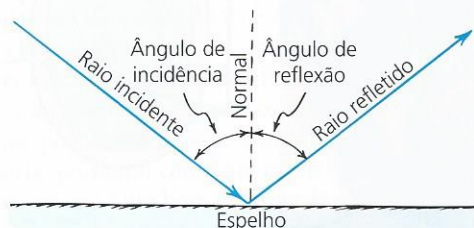

FIGURA 28.5

28.2 Lei da reflexão

Como mostrou Fermat, o ângulo de incidência da luz será igual ao ângulo de reflexão da luz. Esta é a **lei da reflexão**, que vale para todos os valores de ângulo (Figura 28.5):

O ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão.

A lei da reflexão é ilustrada na Figura 28.6, com setas que representam os raios de luz. Em vez de medir os ângulos dos raios incidentes e refletidos da superfície refletora, é costume medi-los em relação a uma linha perpendicular ao plano da superfície refletora. Essa linha imaginária é chamada de *normal*. O raio incidente, a normal e o raio refletido pertencem todos ao mesmo plano. Esse tipo de reflexão em uma superfície lisa é chamado de reflexão *especular*. Os espelhos produzem excelentes reflexões especulares.

O revestimento branco de telhados refletem de volta cerca de 85% da luz incidente, o que, em dias quentes de verão, reduz em muito os custos com ar-condicionado e as emissões de carbono. Em dias frios de inverno, quando o calor é desejável, todavia, isso não é uma boa ideia. Mas para regiões de verões quentes e invernos amenos, pinte seu telhado de branco! (Como mencionado no Capítulo 27, também existem para isso tintas marrons resfriantes que ajudam refletindo luz infravermelha.)



SCREENCAST: Reflection

FIGURA 28.6
A lei da reflexão.

PAUSA PARA TESTE

Os pontos artificiais B', marcados nas figuras 28.4 e 28.5, mostram como a luz encontra o ponto C na reflexão que a leva de A até B. Por meio de uma construção similar, mostre que a luz originada em B e refletida para A também é refletida no mesmo ponto C.

VERIFIQUE SUA RESPOSTA

Marque um ponto artificial A' abaixo do espelho, a uma distância deste que é igual à distância que o ponto A guarda do espelho; então trace uma linha reta de B até A' para encontrar C, como mostrado na parte esquerda da figura. Ambas as construções foram superpostas, no lado direito da figura, o que mostra que C é um ponto comum a ambas. Vemos que a luz seguirá o mesmo caminho que seguiria se fosse no sentido oposto. Sempre que você enxergar os olhos de outra pessoa no espelho, pode estar certo de que ela também estará enxergando os seus.

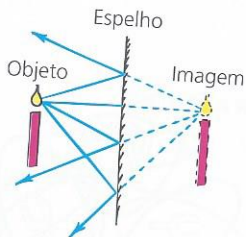
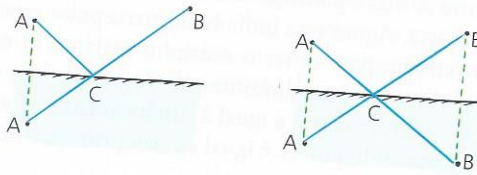


FIGURA 28.7

Uma imagem virtual é formada atrás do espelho, localizada numa posição para a qual convergem os prolongamentos dos raios refletidos (as linhas tracejadas).

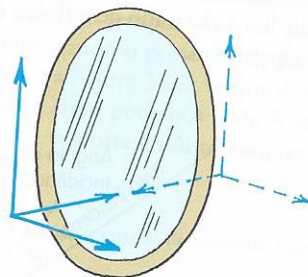
Espelhos planos

Suponha que a chama de uma vela esteja localizada em frente a um espelho plano. Os raios de luz são emitidos da chama, em todas as possíveis direções. Na Figura 28.7, são mostrados apenas quatro de um número infinito de raios que saem de um número infinito de pontos da chama. Esses raios divergem a partir da chama da vela e incidem no espelho, onde são refletidos em ângulos iguais aos seus ângulos de incidência. Os raios, então, divergem a partir do espelho e parecem emanar de um ponto particular situado atrás do espelho (onde se interceptam as linhas tracejadas). Um observador enxerga a imagem da chama como estando neste ponto. Mas os raios de luz não provêm realmente deste ponto, razão pela qual a imagem é denominada *imagem virtual*. A imagem está atrás do espelho e tão distante dele quanto o objeto está do espelho, sendo que a imagem e o objeto têm o mesmo tamanho. Quando você se olha no espelho, por exemplo, o tamanho de sua imagem é o mesmo que teria seu irmão gêmeo se ele estivesse localizado atrás do espelho, a uma distância do mesmo igual àquela que você próprio guarda do espelho, na frente dele – desde que a superfície do espelho seja plana (chamamos de *espelho plano* um desse tipo).

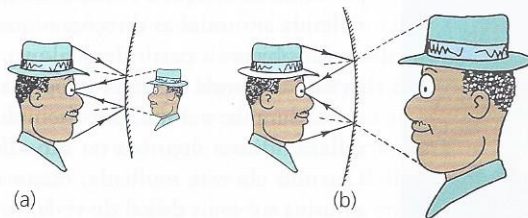
Quando o espelho é curvo, os tamanhos e as distâncias do objeto e da imagem até ele não são mais iguais. Não abordaremos os espelhos curvos neste livro, exceto para dizer que a lei da reflexão continua sendo válida neste caso também. Um espelho curvo comporta-se como se fosse formado por uma sucessão de espelhos pla-

FIGURA 28.8

A imagem de Marjorie se encontra atrás do espelho, a uma distância igual à distância entre ela própria e o espelho. Observe que ela e a sua imagem apresentam a mesma cor para as roupas – uma evidência de que a luz não tem sua frequência alterada ao ser refletida. Curiosamente, seu eixo de orientação esquerda-direita não é invertido, assim como o eixo vertical, orientado de baixo para cima. O eixo que está invertido, é o eixo horizontal que vai da parte frontal de Marjorie para a parte posterior a ela. É por isso que a face de sua mão esquerda está de frente para a face da mão direita da imagem.



nos, cada um deles com uma orientação ligeiramente diferente. Em cada ponto, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (Figura 28.9). Observe que num espelho curvo, diferentemente do que ocorre em um plano, as normais (mostradas pelas linhas pretas tracejadas do lado esquerdo do espelho) em diferentes pontos da superfície não são paralelas entre si.



Se o espelho é plano ou curvo, o sistema olho-cérebro normalmente não pode revelar a diferença entre um objeto e sua correspondente imagem refletida. Assim, a ilusão de que existe um objeto atrás do espelho (ou em certos casos, na frente de um espelho côncavo) deve-se meramente ao fato de que a luz vinda do objeto entra no olho exatamente da mesma maneira, fisicamente falando, como ela entraria se o objeto estivesse realmente na posição da imagem.

Apenas uma parte da luz que incide numa superfície é refletida por ela. Sobre uma superfície de vidro claro, por exemplo, e considerando uma incidência normal (luz perpendicular à superfície), somente 4% da luz é refletida pela superfície, enquanto, incidindo sobre uma superfície limpa e polida de alumínio ou prata, cerca de 90% da luz incidente é refletida.

PAUSA PARA TESTE

1. Que evidência você pode citar para justificar a afirmação de que a frequência da luz não se altera com a reflexão?
2. Se você deseja tirar uma fotografia de sua imagem enquanto fica em pé a 5 m da frente de um espelho plano, a que distância você deveria focar sua máquina fotográfica para obter uma foto nítida?

VERIFIQUE SUA RESPOSTA

1. A cor de uma imagem é idêntica à cor do objeto que dá origem a imagem. Olhe-se num espelho e observe que a cor de seus olhos não se altera na imagem.
2. Ajuste o foco de sua máquina para 10 m; a situação é equivalente a ficar em pé a 5 m da frente de uma janela aberta, olhando para seu irmão gêmeo que está em pé 5 m atrás da janela.

Reflexão difusa

Quando a luz incide sobre uma superfície rugosa ou granular, ela é refletida em muitas direções diferentes. Isso é chamado de *reflexão difusa*. (Figura 28.10). Se a superfície for tão lisa que as distâncias entre suas sucessivas elevações forem menores do que cerca de um oitavo do comprimento de onda da luz incidente, existirá muito pouca reflexão difusa, de modo que a superfície é dita estar *polida*. Uma superfície, portanto, pode parecer polida para uma radiação de longo comprimento de onda, mas não polida para a luz de curto comprimento de onda. O “prato” constituído por uma grade formada por hastes metálicas mostrado na Figura 28.11 parece muito rugoso para as ondas luminosas e, assim, dificilmente se comporta como um espelho. Mas para as ondas de rádio, que possuem um longo comprimento de onda, ela parece bastante polida e se comporta, portanto, como um excelente refletor. A reflexão apresentada pelas paredes de seu quarto é um bom exemplo de reflexão difusa. A luz é refletida de volta para o quarto, porém não produz imagem alguma. Diferentemente da reflexão especular, a reflexão difusa não produz uma imagem especular.



VIDEO: Image Formation in a Mirror

FIGURA 28.9

(a) A imagem virtual formada por um espelho *convexo* (um espelho curvado para fora) é menor e está mais próxima do espelho que o objeto. (b) Quando o objeto está próximo a um espelho *côncavo* (um espelho curvado para dentro, como uma “caverna”), a imagem virtual é maior e está mais afastada do espelho que o objeto. Em ambos os casos, a lei da reflexão continua valendo para cada raio luminoso.

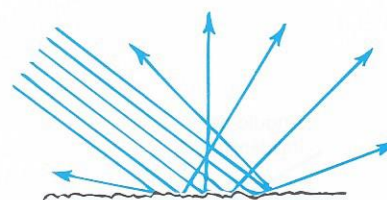


FIGURA 28.10

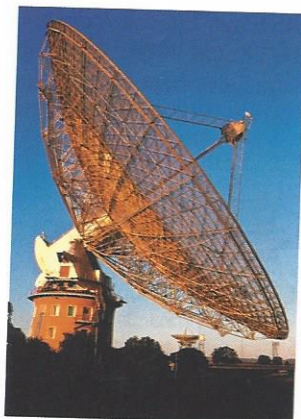
Reflexão difusa. Embora cada raio obedeça à lei da reflexão, os inúmeros e diferentes ângulos de orientação de uma superfície rugosa, onde os raios luminosos incidem, causa sua reflexão em diversas direções.

FIGURA 28.11

Um prato parabólico, constituído por uma grade metálica vazada, se comporta como um refletor difuso para luz de curto comprimento de onda, mas para ondas de rádio com longo comprimento de onda, ele se comporta como se fosse uma superfície polida.

**FIGURA 28.12**

Uma visão ampliada da superfície de papel comum.



A luz que se reflete nesta página é difusa. A página pode parecer lisa para uma onda de rádio, mas para uma onda luminosa, ela é rugosa. Os raios luminosos que incidem na página se deparam com milhões de minúsculas superfícies planas orientadas em todas as direções. A luz incidente, portanto, é refletida em todas as direções o que possibilita enxergar objetos a partir de qualquer direção ou posição. Você pode enxergar a rodovia à frente de seu carro durante a noite, por exemplo, por causa da reflexão difusa ocorrida na superfície da rodovia. Quando ela está molhada, existe menos reflexão difusiva e é mais difícil de vê-la. A maior parte de nosso ambiente é vista por reflexão difusiva.

PAUSA PARA TESTE

Como pode a superfície da água de um lago exibir imagens tanto por reflexão especular quanto difusa?

VERIFIQUE SUA RESPOSTA

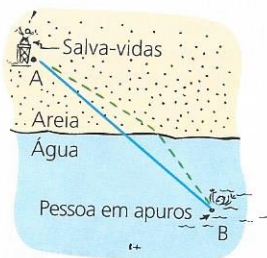
Onde a água estiver muito tranquila e a superfície muito lisa, se formarão imagens. Isso é reflexão especular. Onde a água estiver rugosa e não apresentar imagens refletidas, a reflexão é difusa.

Refração

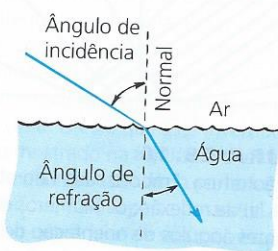
Lembre, do Capítulo 26, que a rapidez média de propagação da luz é menor no vidro e em outros materiais transparentes do que através do espaço vazio. A luz se propaga em materiais diferentes com diferentes valores de rapidez.³ Ela se propaga a 300.000 km/s no vácuo, com uma rapidez ligeiramente menor no ar e, na água, com cerca de três quartos da rapidez com a qual se propaga no vácuo. Num diamante, a luz se propaga com cerca de 40% do valor de sua rapidez no vácuo. Quando a luz sofre um desvio ao atravessar obliquamente de um meio para outro, chamamos este processo de **refração**. É comum observar que um raio luminoso se curva e toma um percurso mais longo quando incide obliquamente sobre vidro ou água. Mas o caminho mais longo escolhido, apesar disso, é o caminho que requer o mínimo tempo para ser percorrido pela luz. Um caminho em linha reta requereria mais tempo. Podemos ilustrar isso com a seguinte situação.

Imagine que você é um salva-vidas numa praia e localiza uma pessoa em apuros na água. Na Figura 28.13, mostramos as posições relativas: a sua, a da linha da água da praia e a da pessoa em apuros na água. Você se encontra no ponto A, e a pessoa, no ponto B. Você consegue correr mais rapidamente do que nadar. Você deveria deslocar-se em linha reta até B? Um pouco de raciocínio mostrará que o caminho em linha reta não é a melhor escolha, pois se, em vez disso, você gastasse um pouco mais de tempo correndo sobre a areia, economizaria um bocado de tempo por ter de nadar uma distância menor na água. O caminho correspondente ao mínimo tempo é mostrado pela linha tracejada, que claramente não é o caminho correspondente à menor distância. O grau de desvio da trajetória na posição da linha da água na praia, é claro, depende de quão mais rápido você consegue correr do que nadar. A situação é análoga àquela de um raio luminoso incidente sobre um volume de água, como mostrado na Figura 28.14. O ângulo de incidência é maior do que o ângulo de refração por um valor que depende dos valores relativos da rapidez de propagação no ar e na água.

Considere a lâmina de vidro da espessura de uma vidraça de janela, na Figura 28.15. Quando a luz se propaga do ponto A para o ponto B através do vidro, ela seguirá um caminho retilíneo. Neste caso, a luz incide perpendicularmente no vidro, e vemos que a distância mais curta através do ar e do vidro corresponde ao mínimo

**FIGURA 28.13**

Refração.

**FIGURA 28.14**

Refração.

tempo. Mas e quanto à luz que vai do ponto A para o ponto C? Ela percorrerá o caminho retilíneo indicado pela linha tracejada? A resposta é *não*, pois se ela assim o fizesse, gastaria mais tempo dentro do vidro, onde a luz se propaga com uma rapidez menor do que no ar. Em vez disso, a luz tomará um caminho menos inclinado dentro do vidro. O tempo economizado em tomar este caminho mais curto através do vidro ligeiramente mais longo compensa o tempo adicional requerido para percorrer o caminho ao mínimo tempo – o caminho mais rápido. O resultado disso é um deslocamento lateral do feixe luminoso, pois os ângulos de entrada e de saída no vidro são iguais. Você percebe este deslocamento lateral quando olha através de uma chapa de vidro espessa formando um certo ângulo com a superfície. Quanto mais este ângulo de visão difere do ângulo reto, mais pronunciado é o deslocamento.

Outro exemplo interessante é o de um prisma, em que as faces opostas do vidro não são paralelas (Figura 28.16). A luz que vai do ponto A ao ponto B não seguirá o percurso retilíneo mostrado pela linha tracejada, porque um tempo excessivo seria gasto em atravessar o vidro. Em vez disso, a luz acabará seguindo o caminho mostrado pela linha sólida – um caminho ligeiramente mais comprido através do ar – e atravessando uma seção mais estreita do vidro para chegar até o ponto B. Por esse raciocínio, poderia-se pensar que a luz deveria tomar um caminho mais próximo ao vértice superior do prisma, procurando a parte mais estreita do vidro. Mas se ela o fizesse, a distância extra que teria de percorrer no ar resultaria num tempo total de propagação mais longo. O caminho seguido é aquele que corresponde ao tempo mínimo.

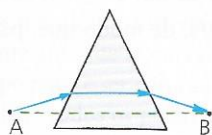


FIGURA 28.16
Um prisma.

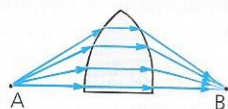


FIGURA 28.17
Um prisma curvo.

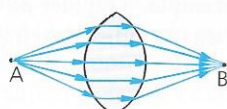


FIGURA 28.18
Uma lente convergente.

É interessante observar que um prisma curvado apropriadamente oferecerá diversos caminhos de mesmo tempo para a luz ir de um ponto A, no ar de um lado do prisma, para um ponto B no ar do lado oposto do prisma. (Figura 28.17). O encurvamento diminui a espessura do vidro em relação à situação correspondente no prisma ordinário, de maneira a compensar de forma correta as distâncias adicionais que a luz tem de percorrer até pontos mais altos em sua superfície. Para posições adequadas de A e de B e para o encurvamento apropriado das superfícies do prisma, todos os caminhos levam exatamente o mesmo tempo para ser percorridos pela luz. Neste caso, toda a luz vinda do ponto A e que incide sobre o vidro é focada para o ponto B. Vemos que a forma desse prisma é a metade superior de uma lente convergente (Figura 28.18), que será abordada com mais detalhes mais adiante neste capítulo.

Sempre que assistimos a um pôr do sol, vemos o disco solar por vários minutos após ele ter descido além do horizonte. A atmosfera terrestre é rarefeita no topo e densa no fundo. Como a luz se propaga mais rápido no ar rarefeito do que no ar mais denso, a luz vinda do Sol consegue nos alcançar mais rapidamente se, em vez de seguir em linha reta, ela evitar o ar mais denso tomando um caminho alternativo mais elevado e mais comprido a fim de penetrar na atmosfera de maneira mais íngreme (Figura 28.19). Como a densidade da atmosfera muda gradualmente, a luz é gradualmente desviada, descrevendo uma trajetória final curva. Curiosamente, esse caminho de mí-

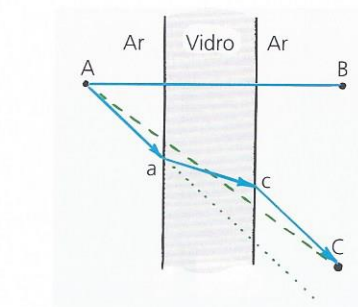
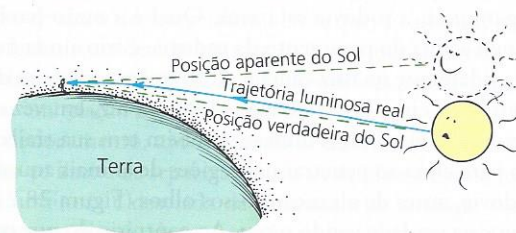


FIGURA 28.15
A refração no vidro. Embora a linha tracejada AC seja o caminho mais curto, a luz percorre um caminho ligeiramente mais longo através do ar, entre A e a, do que o caminho mais curto através do vidro até c, e daí para C. A luz emergente está deslocada, mas continua paralela à luz incidente.



SCREENCAST: Refraction

FIGURA 28.19
Devido à refração atmosférica, o Sol, quando se encontra próximo ao horizonte, parece estar mais alto no céu do que realmente está naquele momento.

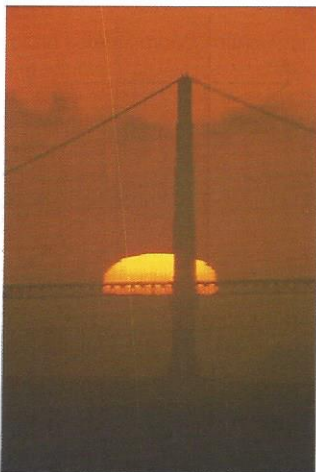


FIGURA 28.20

A forma do Sol é distorcida pela refração diferencial.

nimo tempo nos fornece um período diurno maior a cada dia do que se a luz se propagasse sem encurvar. Além disso, quando o Sol (ou a Lua) está próximo ao horizonte, os raios luminosos vindos da borda inferior do disco solar se encurvam mais acentuadamente do que os raios vindos da borda superior. Isso produz um encurtamento do diâmetro vertical, fazendo com que o Sol pareça uma abóbora (Figura 28.20).

PAUSA PARA TESTE

Suponha que nosso salva-vidas do exemplo anterior fosse uma foca, em vez de um ser humano. Como seria o caminho de mínimo tempo de A até B?

VERIFIQUE SUA RESPOSTA

A foca pode nadar mais rápido do que consegue correr, e sua trajetória se desvia como mostrado na figura; isso é análogo com a luz que emerge do fundo de um pedaço de vidro imerso no ar.



Índice de refração

A luz desacelera ao entrar em um meio transparente. Exatamente em quanto a rapidez da luz difere de sua rapidez no vácuo é dado pelo índice de refração, n , do material:

$$n = \frac{\text{rapidez da luz no vácuo}}{\text{rapidez da luz no material}}$$

Por exemplo, a rapidez da luz no diamante é 124.000 km/s, de modo que, para o diamante, o índice de refração é

$$n = \frac{300.000 \text{ km/s}}{124.000 \text{ km/s}} = 2,42$$

Para o vácuo, $n = 1$.

No caso de vidro óptico do tipo *crown*, comum em oculares, n vale 1,52, o que significa que a luz desacelera da rapidez c , no ar, para a rapidez $c/n = c/1,52 = 0,66c$. Quanto maior o valor de n , maior o desvio da luz por uma lente, o que permite que a lente seja menos espessa. O valor de n no caso das lentes de plástico de elevado índice atinge 1,76, de modo que a luz desacelera e se curva mais ainda, e a lente pode ser mais fina – o que é uma boa notícia para pessoas míopes que desejam usar lentes mais leves. E quanto à rapidez da luz quando ela sai da lente? Está certo – ela volta a ser c , a rapidez normal de luz no ar.

A lei quantitativa da refração, chamada de lei de Snell, é creditada a W. Snell, um astrônomo e matemático do século XVII:

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

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios existentes de cada lado da superfície delimitadora, e θ_1 e θ_2 são os respectivos ângulos de incidência e de refração. Se três desses valores são conhecidos, o quarto pode ser calculado a partir dessa relação. Talvez na parte experimental de seu curso você venha a usar a lei de Snell.

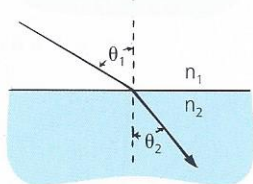
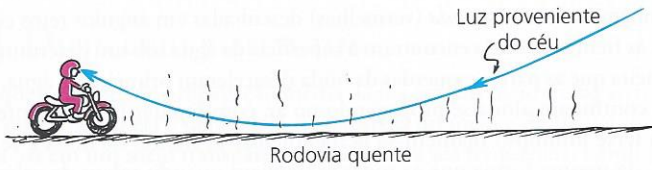


FIGURA 28.21

A refração se relaciona aos índices de refração de acordo com a lei de Snell.

Miragens

Todos estamos familiarizados com miragens que se vê ao dirigir o carro numa rodovia cujo piso está muito quente. Partes distantes da rodovia parecem estar molhadas, mas quando chegamos lá, a rodovia está seca. Qual é a razão para isso? O ar está muito aquecido logo acima do pavimento da rodovia, e frio ainda mais acima. A luz se propaga mais rapidamente na fina camada de ar quente rarefeito do que no ar frio mais denso que está por cima do ar quente. Assim, a luz, em vez de nos alcançar, vinda do céu, seguindo trajetórias retilíneas, também tem sua trajetória de mínimo tempo encurvada para cima ao penetrar nas regiões de ar mais aquecido próximo ao pavimento da rodovia, antes de alcançar nossos olhos (Figura 28.22). Onde vemos “molhado”, estamos na verdade vendo o céu. Ao contrário do que muita gente erro-



neamente pensa, uma miragem não é um “ilusão mental”. Ela é formada por raios luminosos reais e pode ser fotografada, como mostra a Figura 28.23.

Quando olhamos para um objeto que se encontra sobre uma chapa ou rodovia muito quente, percebemos um efeito tremeluzente e ondulante. Isso se deve aos diversos caminhos luminosos de mínimo tempo existentes para a luz se propagar através de regiões do ar com uma variedade de temperaturas e, conseqüentemente, de densidades. As estrelas parecem “piscar” por causa de um fenômeno análogo que ocorre no céu, onde a luz atravessa camadas instáveis de nossa atmosfera.

Nos exemplos precedentes, como a luz aparentemente “sabe” das condições existentes e de quais compensações o caminho de mínimo tempo requer? Ao se aproximar da vidraça de uma janela, um prisma ou uma lente com um determinado ângulo, como a luz sabe que se ela se deslocar um pouco além através do ar, economizará tempo, optando por um ângulo menos inclinado e, portanto, por um caminho mais curto através do vidro? Como a luz vinda do Sol sabe que deve se propagar acima da atmosfera por uma distância extra, antes de tomar o caminho mais curto através do ar mais denso, a fim de economizar tempo? Como a luz vinda do céu sabe que ela pode nos alcançar no mínimo tempo se mergulhar em direção a uma rodovia muito quente antes de se curvar para cima, indo até nossos olhos? O princípio do mínimo tempo parece ser não causal, como se a luz tivesse uma “mente” própria, que pudesse “avaliar” todos os possíveis caminhos, calcular os tempos correspondentes a cada um e escolher aquele que requer o mínimo tempo para ser percorrido. Será que é assim? Por mais intrigante que isso possa parecer inicialmente, existe uma explicação mais simples, que não atribui presciência à luz – a refração é uma consequência do fato de que a luz se propaga com diferentes valores de rapidez média em meios diferentes.

PAUSA PARA TESTE

Se a rapidez da luz fosse a mesma no ar com diversas temperaturas e densidades, será que os períodos iluminados do dia ainda seriam ligeiramente mais longos, as estrelas ainda piscariam à noite, existiriam as miragens e o disco solar ainda pareceria achatado ao pôr do sol?

VERIFIQUE SUA RESPOSTA

Não, pois nenhuma refração ocorreria.

28.4 A origem da refração

A refração ocorre sempre que a luz tem sua rapidez média de propagação *alterada* ao passar de um meio transparente para outro. Pode-se compreender isso considerando um par de rodas de carrinho de brinquedo, conectadas a um eixo, tal que as rodas possam rodar suavemente rampa abaixo, vindas da calçada em direção a um gramado. Se as rodas encontram o gramado sob um determinado ângulo, como mostra a Figura 28.23, elas serão desviadas de sua trajetória retilínea. Note que, ao alcançar o gramado, onde as rodas rodam mais lentamente devido à interação com a grama, a roda esquerda desacelera primeiro. A roda direita, sendo mais rápida do que a esquerda durante algum tempo, tende a se adiantar em relação a esta. Tal ação faz com que o eixo das rodas gire e mude a direção de seu deslocamento, aproximando-se da “normal” (a linha tracejada mais fina, perpendicular ao limite de separação entre a calçada e a grama, na Figura 28.24).

Uma onda luminosa é desviada de uma maneira análoga, como mostrado na Figura 28.25. Observe a direção de propagação da luz, indicada pela seta azul (o raio de

FIGURA 28.22

A luz vinda do céu ganha rapidez no ar próximo ao pavimento, pois ele está mais aquecido e menos denso do que o ar que está por cima dele. Quando a luz incide com pouca inclinação em relação ao piso, e se curva para cima, o observador enxerga uma miragem.



FIGURA 28.23

Uma miragem. A aparência molhada da rodovia não se deve à reflexão do céu pela água, mas sim à refração da luz vinda do céu ao atravessar o ar mais quente e mais rarefeito próximo à superfície da rodovia.



VIDEO: Model of Refraction

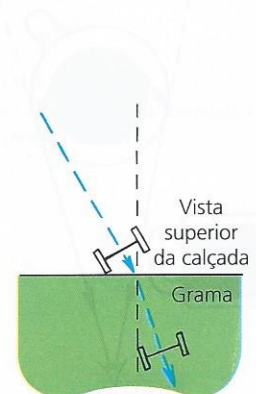
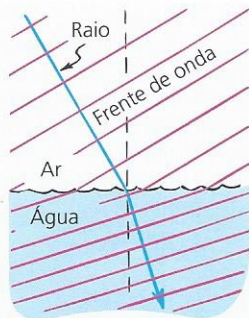


FIGURA 28.24

A direção de rolamento das rodas se altera quando uma delas desacelera antes da outra.

**FIGURA 28.25**

A direção de propagação das ondas luminosas se altera quando uma parte de cada frente de onda desacelera antes do restante da mesma.

**FIGURA 28.27**

Quando a luz desacelera ao passar de um meio para outro, como indo do ar para a água, ela é refratada, aproximando-se da normal. Quando ela acelera ao passar de um meio a outro, como indo da água para o ar, ela é refratada, afastando-se da normal.

**FIGURA 28.29**

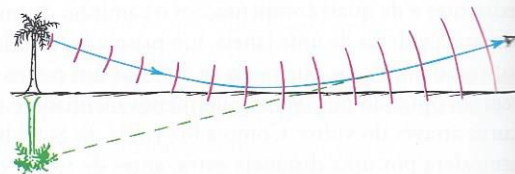
Devido à refração, uma caneca de cerveja parece conter mais líquido do que ela realmente contém.

luz), e também as *frentes de onda* (vermelhas) desenhadas em ângulos retos com o raio. Na figura, as frentes de onda encontram a superfície da água sob um determinado ângulo, de maneira que as partes esquerdas da onda desaceleram primeiro na água, enquanto as demais continuam ainda se propagando no ar, com rapidez praticamente igual a c . O raio ou feixe luminoso mantém-se perpendicular às frentes de onda e se desvia na superfície, da mesma forma que as rodas se desviam quando rolam da calçada para o gramado. Em ambos os casos, o desvio é uma consequência da alteração da rapidez.

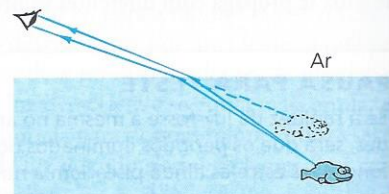
A variabilidade da rapidez de propagação luminosa fornece uma explicação ondulatória para as miragens. A Figura 28.26 nos mostra algumas frentes de onda provenientes do topo de uma árvore, num dia quente. Se a temperatura do ar fosse uniforme, a rapidez média de propagação da luz seria a mesma em todas as partes do ar; a luz que se propagasse em direção ao solo terminaria alcançando-o. Mas o ar está mais quente e menos denso próximo ao solo, de modo que as frentes de onda aceleram enquanto se propagam para baixo, o que faz com que elas se desviem para cima. Assim, o observador que olha para baixo enxerga o topo da árvore – isso é uma miragem.

FIGURA 28.26

Uma explicação ondulatória para uma miragem. As frentes de onda da luz se propagam mais rápido no ar quente próximo ao solo, encurvando-se para cima.



A refração da luz é responsável por muitas ilusões; uma delas é o aparente encurvamento de uma vara quando parcialmente imersa em água. A parte submersa parece mais próxima à superfície do que ela de fato está. De maneira semelhante, quando você vê um peixe na água, ele parece estar mais perto da superfície e mais próximo do que na verdade está (Figura 28.28). Se olharmos diretamente para baixo, na água, um objeto que está submerso a 4 metros da superfície parecerá estar apenas 3 metros. Devido à refração, objetos submersos parecem estar ampliados.

**FIGURA 28.28**

Devido à refração, um objeto submerso parece estar mais próximo à superfície do que realmente está.

Vemos que podemos interpretar o desvio da luz na superfície da água de pelo menos duas maneiras diferentes. Podemos dizer que a luz que vem do peixe e alcança o olho do observador o faz no tempo mínimo, tomando um caminho ascendente mais curto em direção à superfície da água e um caminho correspondentemente mais longo através do ar. Nesta visualização, é o tempo mínimo que dita qual será o caminho a ser tomado. Ou podemos dizer que as ondas luminosas que se dirigem para cima, em um certo ângulo com a superfície da água, são desviadas quando se aceleram ao emergirem no ar, ondas essas que acabam alcançando o olho do observador. Nesta visualização, a variação ocorrida na rapidez da luz, da água para o ar, é que dita qual será o caminho tomado, e este caminho coincide com o do tempo mínimo de propagação. Seja qual for a visualização escolhida, os resultados são os mesmos.

PAUSA PARA TESTE

Se a rapidez de propagação da luz fosse a mesma em todos os materiais, ainda ocorreria a refração quando a luz passasse de um meio para outro?

VERIFIQUE SUA RESPOSTA

Não.

28.5 Dispersão e arco-íris

Sabemos que a rapidez de propagação média da luz em um meio transparente é menor do que c ; quão menor ela é dependerá da natureza do meio e da frequência da luz. A rapidez da luz em um meio transparente depende da sua frequência. Lembre do Capítulo 26: a luz cujas frequências se igualam às frequências naturais, ou de ressonância, das oscilações dos elétrons nos átomos e moléculas do meio transparente, é absorvida. As luzes com frequências próximas das frequências de ressonância não são absorvidas, mas interagem mais frequentemente com a matéria, numa sequência de absorções e reemissões, e assim se propagam nela de modo mais lento. Uma vez que a frequência natural ou de ressonância da maior parte dos materiais transparentes se situa na região ultravioleta do espectro, a luz de alta frequência se propaga mais lentamente do que a luz de frequência mais baixa. A luz violeta se propaga cerca de 1% mais lentamente no vidro comum do que a luz vermelha. As ondas luminosas com as cores entre o vermelho e o violeta se propagam com seus próprios valores de rapidez intermediários.

Como as diferentes frequências da luz se propagam com diferentes valores de velocidade em materiais transparentes, elas se refratam em diferentes graus. Quando a luz branca é refratada duas vezes, como em um prisma, a separação existente entre as diversas cores da luz é completamente notável. Essa separação da luz em cores dispostas segundo a frequência é chamada de *dispersão* (Figura 28.30). É ela que possibilitou a Isaac Newton produzir o espectro inteiro ao expor seu prisma de vidro à luz solar.

A ilustração mais espetacular da dispersão é o arco-íris. Para um arco-íris ser visto, o Sol deve estar brilhando numa parte do céu e as gotas de água existentes numa nuvem, ou caindo na forma de chuva, devem estar presentes na parte oposta do céu. Quando viramos nossas costas para o Sol, vemos o espectro das cores formando um arco. Visto de um avião voando durante o meio-dia, os arcos formam um círculo completo. Todos os arco-íris seriam completamente redondos se o chão não estivesse no caminho.

As belas cores de um arco-íris são dispersas a partir da luz solar por milhões de minúsculas gotículas esféricas de água, que atuam como prismas. Você pode compreender isso melhor considerando uma única gota individualmente, como mostrado na Figura 28.31. Siga o raio luminoso quando ele entra na gota próximo à sua superfície superior. Parte da luz é refletida ali (não mostrada) e a restante é refratada pela água. Nesta primeira refração, a luz é dispersa nas cores de seu espectro, o violeta sendo a mais desviada e o vermelho, a menos desviada das cores. Alcançando o lado oposto da gota, cada uma das cores é parcialmente refratada para o ar exterior (não mostrada) e parcialmente refletida de volta para a água. Chegando à superfície inferior da gota, cada cor é de novo parcialmente refletida (não mostrada) e refratada para o ar. Essa segunda refração é análoga à correspondente refração em um prisma, onde a refração na segunda superfície aumenta a dispersão já produzida pela primeira superfície.

Dois refrações e uma reflexão podem de fato resultar em que o ângulo entre o raio incidente e os raios que saem da gota esteja compreendido entre 0° e 42° (0° correspondendo a uma inversão de 180° na luz). Existe uma forte concentração na intensidade luminosa, entretanto, próxima ao ângulo máximo de 42° . Isso é o que está mostrado na Figura 28.31.

Embora cada gota disperse o espectro inteiro de cores, um observador qualquer está em condições de ver a luz concentrada vinda de uma determinada gota com uma cor apenas (Figura 28.32). Se a luz violeta de uma única gota chega ao olho de um determinado observador, a luz vermelha vinda da mesma gota incide em algum lugar em direção aos pés. Para ver a luz vermelha, a pessoa deve olhar para uma gota que esteja mais elevada no céu. A luz vermelha será vista quando o ângulo formado entre um feixe de luz solar e a luz vinda do fundo da gota for igual a 42° . A cor violeta será vista quando o ângulo formado entre os subfeixes e a luz desviada for 40° .

Por que a luz dispersa pelas gotas de chuva forma um arco? A resposta para essa pergunta envolve um pouco de raciocínio geométrico. Primeiro, um arco-íris não é um arco bidimensional plano como parece ser. Ele parece plano pela mesma razão por que uma explosão de fogos de artifício no céu parece ser um disco – devi-



SCREENCAST: Rainbows

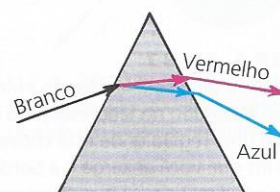


FIGURA 28.30 A dispersão causada por um prisma torna visíveis as componentes da luz branca.

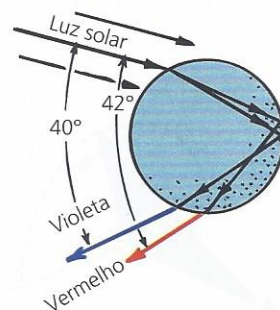


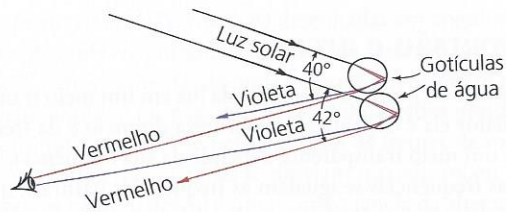
FIGURA 28.31 A dispersão da luz solar causada por um único pingo de chuva.



VIDEO: The Rainbow

FIGURA 28.32

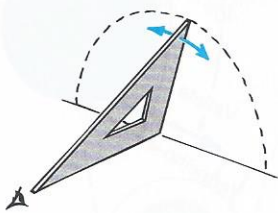
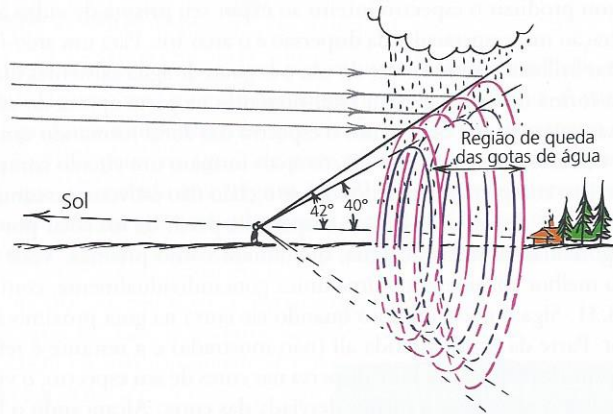
A luz solar incidente sobre duas gotas de chuva, como mostrado, emerge delas com luz dispersa. O observador vê a luz vermelha, proveniente da gota superior, e a luz violeta, proveniente da gota inferior. Milhões de gotas como essa produzem o espectro inteiro da luz visível.



do à falta de marcas de referência para distância. O arco-íris que você enxerga é, na verdade, um cone tridimensional com a ponta (o vértice) localizada em seu próprio olho (Figura 28.33). Considere um cone feito de vidro, com a forma daqueles cones de papel que às vezes se encontram junto a bebedouros. Se você mantivesse a ponta desse cone de vidro bem próxima a seu olho, o que veria? Você enxergaria o vidro com a forma de um círculo. O mesmo acontece no caso de um arco-íris. Todas as gotas que dispersam a luz do arco-íris em direção a você situam-se em um cone – um cone com diferentes camadas formadas por gotas que dispersam a luz vermelha para seu olho pelo lado externo do cone, a luz laranja abaixo da vermelha, a amarela abaixo da laranja e assim por diante, até a luz violeta, na superfície interna cônica. Quanto maior a espessura dessa região que contém tais gotas, maior a espessura da parede cônica através da qual você enxerga, e mais vívido é o arco-íris.

FIGURA 28.33

Quando seu olho está localizado entre o Sol (não mostrado no lado esquerdo da figura) e uma região onde está chovendo, o arco-íris que você enxerga é a borda de um cone tridimensional que se estende através da região de chuva. (As inúmeras camadas de gotas formam inúmeros arcos bidimensionais, parecidos com os quatro esboçados aqui.)

**FIGURA 28.34**

Somente gotas de chuva que se encontram ao longo da linha tracejada dispersam a luz vermelha para um observador no vértice de um cone de 42° de ângulo; portanto, a luz vermelha é vista formando um arco.

Para compreender isso mais detalhadamente, considere apenas o desvio na luz vermelha. Você vê o vermelho quando o ângulo formado entre os raios incidentes do Sol e os raios dispersados se iguala a 42° . É claro que todas as gotas existentes no céu dispersam raios com 42° em todas as direções possíveis – para cima, para baixo e para os lados. Mas a luz vermelha que você vê vem das gotas que se situam em um cone para o qual o ângulo entre o eixo e o lado é igual a 42° . Seu olho está situado no vértice deste cone, como mostrado na Figura 28.34. Para enxergar o violeta, você olha numa direção que forma 40° com o eixo do cone (de modo que a espessura do vidro do cone mencionado no parágrafo anterior é variável – muito fina na ponta e mais espessa à medida que nos afastamos do vértice). Seu cone de visão, que intercepta a nuvem de gotas que origina o arco-íris que você enxerga, é diferente do da pessoa próxima a você. Portanto, quando seu amigo diz: “Veja que lindo arco-íris”, você pode responder: “Certo, mova-se para o lado para que eu possa vê-lo também”. Cada um de nós vê seu próprio arco-íris.

Outro fato sobre os arco-íris: cada um deles sempre lhe parece plano devido à ausência de coisas que sirvam como marcas de referência para se estimar distâncias, mencionada anteriormente. Quando você se move, seu arco-íris o acompanha. Você jamais pode se aproximar lateralmente de seu próprio arco-íris, ou vê-lo em sua totalidade como mostrado exageradamente na Figura 28.33. Você *jamais* conseguirá alcançar o final do arco-íris. Daí a expressão “procurar um pote de ouro no fim do arco-íris”, que significa perseguir algo impossível de ser alcançado.

Frequentemente, um segundo arco-íris, maior e com as cores invertidas, pode ser visto num arco com um ângulo cônico maior, ao redor do arco primário. Não

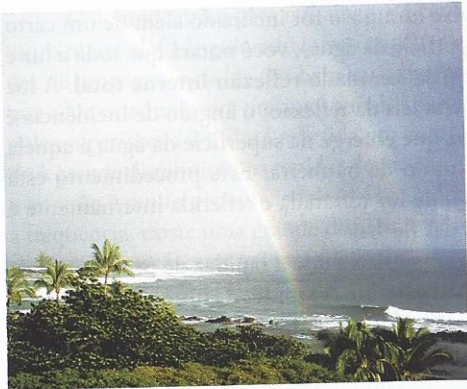


FIGURA 28.35

Duas refrações e uma reflexão no interior de uma gota de chuva produzem luz em todos os ângulos acima de 42° , com a intensidade concentrada onde vemos o arco-íris, entre 40° e 42° . Nenhuma luz sai da gota de água formando um ângulo superior a 42° , a menos que tenha sofrido duas ou mais reflexões dentro da gota. Portanto, o céu é mais brilhante dentro do arco-íris do que fora dele. Observe o arco-íris secundário mais fraco, à direita do primário.

trataremos deste arco secundário, a não ser para mencionar que ele é formado em circunstâncias análogas e como resultado de uma dupla reflexão no interior das gotas de chuva (Figura 28.36). Devido às perdas ocorridas nesta reflexão adicional (e das perdas adicionais ocorridas nas refrações), o arco secundário é menos brilhante, e as cores estão invertidas.

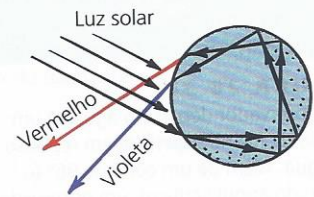


FIGURA 28.36

Uma dupla reflexão no interior de uma gota produz um arco secundário.

PAUSA PARA TESTE

1. Se você apontar para uma parede, com seu braço estendido formando cerca de 42° em relação a ela, e depois girar seu braço num círculo completo, mantendo o ângulo de 42° formado com a normal à parede, que forma seu braço estará descrevendo? E que forma a ponta de seu dedo estará percorrendo sobre a parede?
2. Se a luz se propagasse nas gotas de chuva com a mesma rapidez com a qual se propaga no ar, ainda teríamos arco-íris?



VERIFIQUE SUA RESPOSTA

1. Seu braço estará descrevendo um cone, e seu dedo, percorrendo um círculo. Isso acontece de modo semelhante no caso dos arcos-íris.
2. Não.

28.6 Reflexão interna total

Numa noite de sábado, quando você estiver tomando seu banho, encha a banheira o mais que puder e entre na mesma trazendo uma lanterna à prova d'água com você. Desligue as luzes do banheiro. Aponte a lanterna submersa diretamente para cima e, então, lentamente vá inclinando-a para fora da superfície. Observe como a intensidade do feixe luminoso emergente vai diminuindo e como cada vez mais luz é refletida da superfície da água para o fundo da banheira. Para um determinado valor de ângulo, chamado de *ângulo crítico*, você notará que o feixe luminoso não mais passará da água para o ar, através da superfície. A intensidade do feixe emergente se reduz a zero quando ele tende a tangenciar a superfície do líquido. O **ângulo crítico** é o valor mínimo do ângulo de incidência dentro de um meio para o qual a luz é

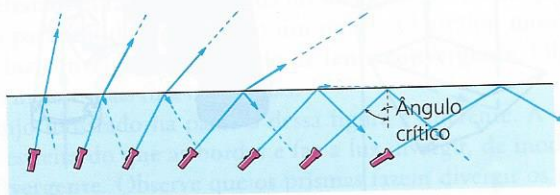


FIGURA 28.37

A luz emitida de dentro da água é parcialmente refratada e parcialmente refletida na superfície. O tracejado em azul indica a direção da propagação da luz; e o comprimento das setas, as proporções de luz refratada e refletida. Acima do ângulo crítico, o feixe é totalmente refletido para dentro.

completamente refletida. Quando o feixe luminoso for inclinado além de um certo ângulo crítico (48° com a normal à superfície da água), você notará que toda a luz é refletida de volta para a banheira. Isso é denominado **reflexão interna total**. A luz incidente na superfície ar-água obedece às leis da reflexão: o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. A única luz que emerge da superfície da água é aquela que foi refletida de forma difusa no fundo da banheira. Este procedimento está mostrado na Figura 28.37. A proporção de luz refratada e refletida internamente é indicada pelos comprimentos relativos das flechas.

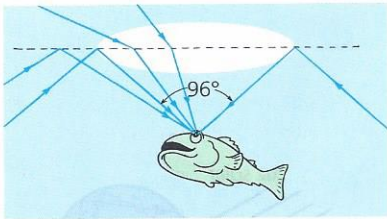


FIGURA 28.38

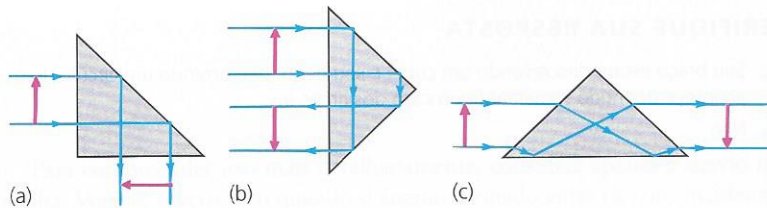
Um observador debaixo d'água vê um círculo de luz na superfície em repouso da água. Além de um cone de 96° (o dobro do ângulo crítico), um observador qualquer vê a reflexão do interior da água ou do fundo.

A reflexão interna total ocorre em materiais onde a rapidez de propagação da luz é menor do que a rapidez da luz em seu exterior. A rapidez da luz é menor na água do que no ar, de modo que todos os raios luminosos na água que chegam à superfície com ângulos de incidência maiores do que 48° são refletidos para o interior da água. Portanto, seu peixinho dourado de estimação no interior do aquário olha para cima a fim de enxergar uma visão refletida dos lados e do fundo do aquário. Diretamente acima dele, ele tem uma visão comprimida do mundo exterior (Figura 28.38). A visão externa de 180° , de um horizonte ao seu oposto, é vista por um ângulo de 96° – o dobro do ângulo crítico. Uma lente fotográfica chamada *olho de peixe* é utilizada em efeitos especiais para comprimir analogamente uma vista muito ampla.

A reflexão interna total ocorre em vidro circundado por ar, pois a rapidez de propagação da luz no vidro é menor do que no ar. O ângulo crítico para o vidro é cerca de 43° , dependendo do tipo de vidro. Assim, a luz interior ao vidro, que incide nele formando ângulos superiores a 43° com a superfície, é refletida por completo internamente. Nenhuma luz escapa além desse valor de ângulo; em vez disso, toda ela é refletida para o interior do vidro – mesmo que a superfície externa contenha sujeira ou poeira, daí a utilidade dos prismas de vidro (Figura 28.39). Um pouco de luz é perdida na reflexão, antes de penetrar no vidro do prisma, mas uma vez ali estando, a reflexão com a face cortada em 45° é total – 100%. Em comparação, espelhos prateados ou aluminizados refletem apenas cerca de 90% da luz incidente, daí o uso de prismas no lugar de espelhos em muitos instrumentos ópticos.

FIGURA 28.39

Reflexão interna total em um prisma. O prisma altera a direção do feixe luminoso (a) em 90° , (b) em 180° e (c) em nada. Note que, em cada caso, a orientação da imagem é diferente da orientação do objeto.



Você gostaria de ficar rico? Seja o primeiro a inventar uma superfície capaz de refletir 100% da luz externa incidente sobre ela.

Um par de prismas, cada um refletindo a luz em 180° , é mostrado na Figura 28.40. Os binóculos utilizam pares de prismas para aumentar o comprimento da trajetória a ser percorrida pela luz entre as lentes, eliminando, assim, a necessidade de usar longos tubos na fabricação dos instrumentos. Portanto, um binóculo compacto é tão eficaz quanto um telescópio mais comprido. Outra vantagem dos prismas é que, embora a imagem fornecida por um telescópio esteja invertida, a reflexão nos prismas dos binóculos inverte de novo a imagem, de modo que as coisas são vistas na posição normal.

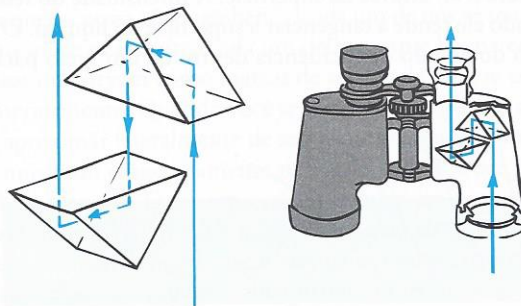
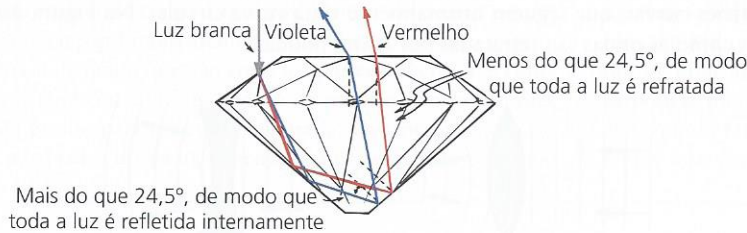


FIGURA 28.40

Reflexão interna total em um par de prismas, comum em binóculos.

O ângulo crítico para o diamante é cerca de $24,5^\circ$, menor do que para qualquer outro material. O ângulo crítico varia ligeiramente para cores diferentes, porque a rapidez de propagação da luz também varia ligeiramente para as diferentes cores. Uma vez que a luz entre na pedra preciosa, a maior parte incide nos lados de trás da pedra em ângulos superiores a $24,5^\circ$ e é refletida por completo internamente (Figura 28.40). Devido à grande diminuição na rapidez de propagação da luz quando ela entra no diamante, a refração é muito pronunciada e, devido à dependência da rapidez de propagação com a frequência, existe uma grande dispersão. Mais dispersão ocorre quando a luz sai através das diversas facetas nas faces da pedra. Portanto, vemos *flashes* repentinos com uma ampla gama de cores. Curiosamente, quando esses *flashes* são estreitos o suficiente para serem vistos por apenas um olho de cada vez, o diamante parece “lampejar”.



A reflexão interna total também embasa o funcionamento das fibras ópticas, ou “tubos” de luz (Figura 28.41). Uma fibra óptica é capaz de “encanar” a luz, levando-a de um lugar a outro por meio de uma série de reflexões internas totais, de forma muito parecida com uma bala que se desloca ricocheteando ao longo de um cano de aço. Os raios luminosos ricocheteiam ao longo das paredes internas da fibra, acompanhando as dobras e voltas que existem. Feixes de fibras ópticas são usados para ver o que acontece em lugares inacessíveis, como o interior de um motor ou o estômago de um paciente. Elas podem ser confeccionadas suficientemente pequenas para serem capazes de serpentear por vasos sanguíneos, ou através de canais estreitos do corpo, como a uretra. A luz segue através de determinadas fibras para iluminar a cena e é refletida de volta ao longo de outras fibras.

As fibras ópticas são importantes em comunicações, porque oferecem uma alternativa prática aos fios de cobre e aos cabos. Em muitos lugares, fibras finas de vidro agora substituem cabos de cobre, grossos, volumosos e caros, para transportar milhares de mensagens telefônicas simultâneas entre as principais centrais de chaveamento e pelo fundo do oceano. Em muitas aeronaves, os sinais de controle são transmitidos do piloto para as partes móveis da asa, que controlam o voo da aeronave, através de fibras ópticas. Os sinais são transportados codificados nas modulações produzidas na luz do *laser*. Diferentemente da eletricidade, a luz é indiferente à temperatura e às flutuações nos campos magnéticos circundantes, de modo que o sinal é mais nítido. Além disso, ela é muito menos provável de ser interceptada por intrusos por meio de escutas telefônicas.

28.7 Lentes

Um caso prático de refração ocorre nas lentes. Podemos compreender o funcionamento de uma lente analisando as trajetórias percorridas em tempos iguais, como fizemos antes, ou podemos presumir que a lente consiste em vários prismas e blocos de vidro que se ajustam, arranjados na ordem mostrada na Figura 28.43. Os prismas e os blocos refratam os raios paralelos da luz incidente, de modo que eles se tornem convergentes para (ou divergentes de) um ponto. O arranjo mostrado na Figura 28.43a faz a luz convergir, e é chamado de **lente convergente**. Observe que ela é mais larga no meio e mais fina nas bordas.

O arranjo mostrado na parte b dessa figura é diferente. A parte central da lente é mais estreita do que as bordas e faz a luz divergir, de modo que a lente é uma **lente divergente**. Observe que os prismas fazem divergir os raios luminosos

FIGURA 28.41

As trajetórias da luz em um diamante. Os raios que incidem na superfície interna com ângulos maiores do que o ângulo crítico são refletidos internamente e saem, via refração, pela superfície superior do diamante.

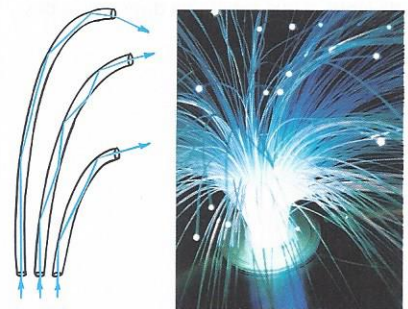


FIGURA 28.42

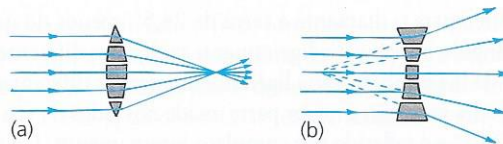
A luz é “encanada” a partir de baixo, por meio de uma sucessão de reflexões internas totais nas fibras, até emergir pelas extremidades superiores.



O aprendizado sobre lentes é uma atividade prática. Não manusear lentes enquanto se aprende sobre elas é como ter aulas de natação fora da água.

FIGURA 28.43

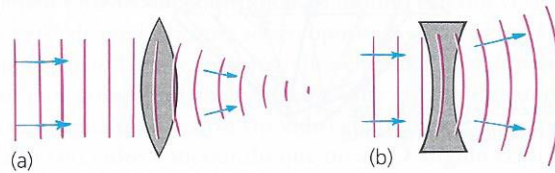
Uma lente pode ser entendida como um conjunto de blocos e prismas. (a) Uma lente convergente. (b) Uma lente divergente.



incidentes, de maneira tal que eles parecem ter vindo de um único ponto na frente da lente. Em ambas as lentes, o desvio máximo dos raios ocorre nos prismas mais externos, pois eles têm os maiores ângulos entre as duas superfícies refratoras. No meio da lente, não ocorre qualquer refração, pois nessa região, as faces do vidro são paralelas entre si. As lentes reais não são feitas de prismas, é claro, como está indicado na Figura 28.43; elas são fabricadas com um pedaço sólido de vidro com superfícies curvas, que seguem normalmente uma curva circular. Na Figura 28.44, vemos como as ondas são refratadas por lentes polidas.

FIGURA 28.44

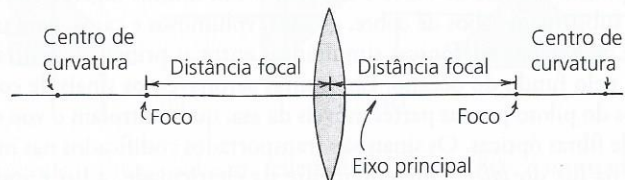
As frentes de onda se propagam mais lentamente no vidro do que no ar. (a) As ondas retardam-se mais ao atravessar o centro da lente, o que resulta na convergência dos raios luminosos. (b) As ondas retardam-se mais ao atravessar as bordas da lente, o que resulta na divergência dos raios luminosos.



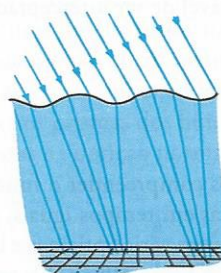
Algumas características fundamentais na descrição das lentes são mostradas na Figura 28.45, para o caso de uma lente convergente. O *eixo principal* de uma lente é a linha que passa pelos centros de curvaturas de suas duas superfícies. O *foco* ou *ponto focal* da lente é aquele ponto para o qual converge um feixe de raios luminosos paralelos ao eixo principal. Feixes de raios luminosos paralelos entre si, mas incidindo numa direção que não é paralela ao eixo principal da lente, são focados em pontos situados abaixo ou acima do foco. O conjunto de todos esses possíveis pontos de convergência forma o *plano focal*. Como a lente possui duas superfícies, ela tem dois pontos focais, e dois planos focais. Quando a lente de uma câmara está ajustada para objetos distantes, a superfície fotossensível se encontra sobre o plano focal, atrás da lente. A *distância focal* da lente é a distância entre o centro da lente e qualquer dos focos.

FIGURA 28.45

As principais características de uma lente convergente.

**FIGURA 28.46**

Os padrões móveis de áreas brilhantes e escuras no fundo de uma piscina são o resultado da superfície irregular da água, que se comporta como se fosse um lençol de lentes ondulantes. Da mesma forma que vemos o fundo da piscina tremeluzindo, um peixe que olhe para o Sol acima o vê tremeluzir também. Devido às irregularidades análogas existentes na atmosfera, vemos as estrelas piscarem.



Formação de imagens por uma lente

Neste momento, a luz está se refletindo em seu rosto e incidindo sobre esta página. A luz que se reflete em sua testa, por exemplo, incide em cada lugar desta página. A mesma coisa acontece com a luz que se reflete em seu queixo. Cada parte da página é iluminada com a luz refletida em sua testa, seu nariz, seu queixo e em outras partes

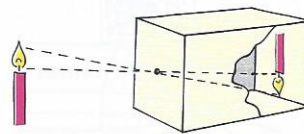


SCREENCAST: Pinhole Images

PRATICANDO FÍSICA

Construa uma câmara escura. Corte uma das extremidades de uma caixa pequena de papelão e cubra essa extremidade aberta com um papel semitransparente de desenho ou papel de seda. Faça um furo de alfinete bem delineado na extremidade oposta da caixa. (Se o papelão for grosso, você pode fazer o furo de alfinete numa folha fina colocada sobre uma abertura maior, feita no papelão.) Apontando a câmera para um objeto brilhante, no interior de um quarto escuro, você enxergará uma imagem invertida do objeto sobre o papel transparente. Quanto menor for o furo de alfinete, mais fraca, porém mais nítida, será a imagem. Dentro do quarto escuro, substitua o papel transparente por um filme fotográfico virgem. Cubra-o de modo que não entre luz por essa abertura, e cubra o furo também, com um pedaço de papelão removível. Você estará pronto para tirar uma fotografia. Os tempos de exposição adequados diferirão, dependendo principalmente do tipo

de filme e da quantidade de luz incidente. Experimente com diferentes tempos de exposição, começando com cerca de 3 segundos. Experimente também com caixas de diversos comprimentos. Em vez de ver uma vela, como sugere o desenho, aponte sua caixa para o céu, em direção ao Sol. A imagem solar sobre o papel será clara e brilhante. Imagens do Sol formadas dessa maneira também são vistas sobre o solo abaixo de uma árvore em um dia ensolarado. Quando os espaços entre as folhas são pequenos em comparação com a altura da árvore, esses espaços se comportam como furos e projetam círculos luminosos, muitos dos quais em superposição mútua, sobre o solo. Lembre-se das fotos de abertura do Capítulo 1, mostrando o que ocorre simultaneamente a um eclipse solar parcial.



de seu rosto. Você não enxerga uma imagem de seu rosto sobre a página porque há superposição excessiva de luz. Mas pondo um anteparo com um pequeno furo de alfinete, entre seu rosto e a página, a luz que chegará até a página vinda de sua testa não mais se superporá com a luz vinda de seu queixo; a mesma coisa para o restante de seu rosto. Sem haver essa superposição, uma imagem de seu rosto se formará sobre a página. Ela será muito fraca, entretanto, pois muito pouco da luz que foi refletida por seu rosto chegou à superfície da página passando pelo buraco de alfinete. Para ver a imagem, você teria de blindar a página das outras fontes de luz. O mesmo é verdadeiro para o caso do vaso e das flores da Figura 28.47b.³

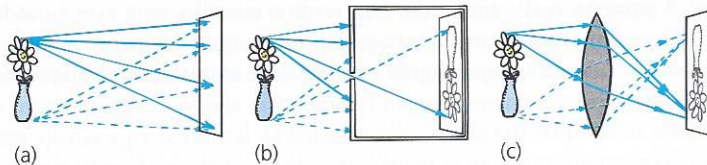


FIGURA 28.47

Formação de imagens. (a) Nenhuma imagem aparece na parede, porque os raios luminosos vindos de todas as partes do objeto se superpõem em todas as partes da parede. (b) Um único pequeno furo em uma barreira impede os raios luminosos de se superporem na parede; uma imagem fraca e direita é formada. (c) Uma lente faz os raios convergirem sobre a parede, sem haver superposição; quanto mais luz incidir, mais brilhante será a imagem.

As primeiras câmeras não possuíam lentes, deixando a luz entrar por um pequeno furo. Você pode compreender por que a imagem aparece de cabeça para baixo examinando os raios luminosos da Figura 28.47b e c. Essas câmeras antigas requeriam longos tempos de exposição, por causa da pequena quantidade de luz que entrava na máquina a cada exposição. Um furo um pouco mais largo deixaria entrar mais luz, porém a superposição dos raios aumentaria e o resultado seria uma imagem borrada. Se o buraco fosse largo demais, haveria superposição excessiva e nenhuma imagem seria nítida. Eis onde entra a lente convergente (Figura 28.47c). A

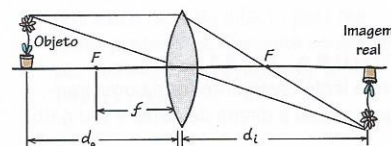


Você consegue ver por que a imagem da Figura 28.47b está de cabeça para baixo? Será verdade que, enquanto suas fotografias estão sendo processadas e impressas, elas estão todas invertidas?

³ Uma maneira quantitativa de relacionar distâncias de objetos e de imagens é dada pela equação das lentes delgadas,

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \text{ou} \quad d_i = \frac{d_o f}{d_o - f}$$

onde d_o é a distância do objeto até a lente, d_i é a distância da imagem até a lente e f é a distância focal da lente.





SCREENCAST: Lentes

FIGURA 28.48

Visão.

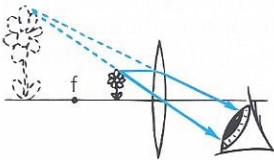
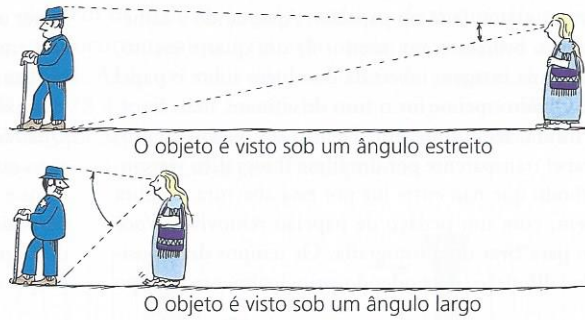


FIGURA 28.49

Quando um objeto está próximo a uma lente convergente (mais próximo da lente do que seu foco), ela atua como uma lente de aumento, produzindo uma imagem virtual. A imagem é maior e está mais afastada da lente do que o objeto.

Quando usamos uma lente de aumento, a mantemos próxima ao objeto que se quer examinar. Isso porque uma lente convergente fornece uma imagem aumentada e direita apenas quando o objeto se encontra entre o foco e a lente (Figura 28.49). Se uma tela for colocada na posição da imagem, nenhuma imagem aparecerá sobre ela, porque nenhuma luz é dirigida para essa posição. Os raios que alcançam seu olho, entretanto, comportam-se *como se viessem* da posição onde está a imagem; chamamos o resultado de **imagem virtual**.

FIGURA 28.50

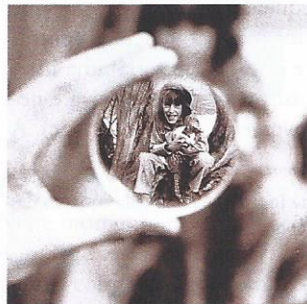
Quando um objeto está afastado de uma lente convergente (além de seu foco), é formada uma imagem real e invertida.



Quando um objeto está afastado demais, além do foco de uma lente convergente, forma-se uma **imagem real** dele, ao invés de uma imagem virtual. A Figura 28.50 mostra um caso em que uma lente convergente forma uma imagem real sobre uma tela. A imagem real é invertida. Um arranjo semelhante a este é usado para projetar *slides* e filmes sobre uma tela, e para projetar uma imagem real sobre a área fotossensível de uma câmera. Imagens reais obtidas com uma única lente sempre são invertidas.

FIGURA 28.51

Uma lente divergente forma uma imagem virtual e direita de Jamie e seu gato.

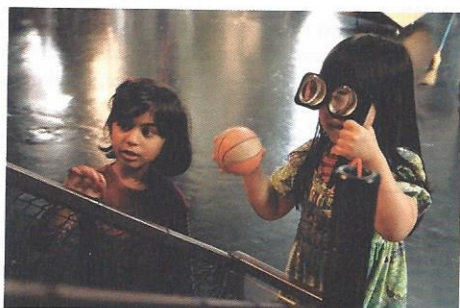


Uma lente divergente usada isoladamente produz uma imagem virtual reduzida. Não faz diferença a proximidade ou o afastamento do objeto. Usada isoladamente, uma lente divergente fornece uma imagem que é sempre virtual, direita e menor do que o objeto. Uma lente divergente frequentemente é utilizada como “visor” de uma câmera. Quando você olha para o objeto a ser fotografado através de uma dessas lentes, você enxerga uma imagem virtual com aproximadamente as mesmas proporções do objeto na fotografia.

28.8 Defeitos em lentes

Nenhuma lente fornece uma imagem perfeita. Uma distorção existente na imagem é chamada de **aberração**. As aberrações podem ser minimizadas por meio da combinação de lentes de determinados tipos. Por essa razão, a maior parte dos instrumentos ópticos usam lentes compostas, consistindo em diversas lentes simples, em vez de uma única lente.

A *aberração esférica* resulta da luz que atravessa as bordas de uma lente, focada em lugares ligeiramente diferentes do lugar para onde é focada a luz que passou próxima ao centro da lente (Figura 28.52). Isso pode ser remediado cobrindo-se as bordas da lente com um diafragma, por exemplo, como é feito nas câmaras. Em bons instrumentos ópticos, a aberração esférica é corrigida por meio de uma combinação de lentes.



A *aberração cromática* resulta da luz de cores distintas, que possuem diferentes velocidades de propagação e, portanto, sofrem refrações diferentes na lente (Figura 28.54). Em uma lente simples (como em um prisma), diferentes cores de luz não são focadas num mesmo lugar. Nas *lentes acromáticas*, este defeito é corrigido por meio da combinação de diversas lentes simples, feitas com diferentes tipos de vidro. (Curiosamente, a fim de evitar a aberração cromática, Isaac Newton substituiu a lente objetiva de um telescópio por um espelho parabólico.)

A pupila do olho muda de tamanho a fim de regular a entrada de luz. A visão é mais nítida quando a pupila está com seu menor tamanho, porque neste caso a luz atravessa apenas a parte central da lente do olho, onde são mínimas as aberrações esférica e cromática. Além disso, o olho atua então mais como uma câmara escura, de modo que uma focagem mínima é requerida para se obter uma imagem nítida. Você enxerga melhor sob luz brilhante, porque nela suas pupilas estão com menor tamanho.

O *astigmatismo* do olho é o defeito resultante da curvatura assimétrica da córnea, mais curvada em uma direção do que na outra, com a aparência de um barril. Devido a esse defeito, o olho não consegue formar imagens nítidas. O remédio é usar lentes cilíndricas, que são mais curvadas em uma direção do que na outra.

Uma opção para aqueles com problemas de visão hoje é usar óculos. O advento dos óculos ocorreu provavelmente na China e na Itália, no final do século XIII. (Curiosamente, o telescópio só foi inventado cerca de 300 anos depois. Se, durante esse tempo, alguém olhou objetos através de um par de lentes separadas e posicionadas ao longo de seu eixo comum, como se estivessem fixadas às extremidades de um tubo, não existe registro disso.) Uma alternativa a usar óculos são as lentes de contato. Uma alternativa mais avançada é a técnica conhecida como *lasik* (acrônimo para a expressão inglesa *laser-assisted in-situ keratomileusis*), em que um pulso de *laser* remodela a córnea de modo que ela passe a produzir visão normal. Outra técnica, designada *PRK* (acrônimo para a expressão inglesa *photorefractive keratectomy*, ou ceratectomia fotorefrativa), corrige todos os defeitos comuns de visão. *IntraLaser*, implantes de lentes de contato e outros procedimentos ainda mais novos continuam surgindo. É seguro afirmar que, em pouco tempo, usar óculos ou lentes de contato será coisa do passado. Estamos de fato presenciando mudanças rápidas no mundo. E isso pode ser bom.

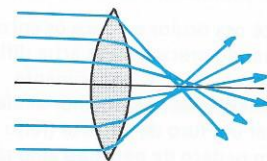


FIGURA 28.52
Aberração esférica.

FIGURA 28.53

De que forma a visão é afetada quando as vistas de ambos os olhos são desviadas lateralmente pelo prisma? Após alguns minutos, o olho, o cérebro e os músculos se adaptam à alteração!

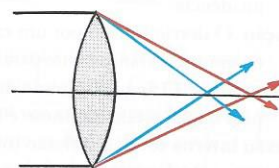


FIGURA 28.54
Aberração cromática.

psc

■ Agora existem óculos baratos com lentes preenchidas com água. Adicionando ou retirando água de entre duas membranas de policarbonato, pode-se corrigir tanto deficiências de visão de curto quanto de longo alcance. Uma pequena bomba regula a quantidade de água entre as duas membranas. Mais água resulta em uma lente convexa, para visão de longe; menos água produz uma lente côncava, para visão próxima. Uma vez que cada lente tenha sido otimizada, o usuário fecha o dispositivo de água. O conjunto da bomba e do tubo é retirado e deixado intacto para reajustes posteriores. Consulte a Internet por *Self-Adjusting Eyeglasses for the World's Poor*.



Se você usa óculos e nunca os encontra quando precisa, ou se acha difícil ler letras pequenas, experimente estreitar os olhos ou, melhor ainda, segurar um furo de alfinete (feito em um pedaço de papel ou algo parecido) em frente aos olhos, próximo à página a ser lida. Você enxergará as letras com clareza e, como elas se encontram próximas a você, bem grandes. Experimente e veja!

PAUSA PARA TESTE

1. Se a luz se propagasse no vidro e no ar com a mesma rapidez, as lentes de vidro alterariam a direção dos raios luminosos?
2. Por que existe aberração cromática da luz que atravessa uma lente, mas nenhuma da luz que se reflete em um espelho?

VERIFIQUE SUA RESPOSTA

1. Não.
2. Diferentes frequências luminosas se propagam com valores diferentes de velocidade e, portanto, são refratadas segundo ângulos diferentes, o que produz a aberração cromática. Os ângulos segundo os quais a luz é refletida não têm nada a ver com sua frequência. Uma cor se reflete da mesma maneira que qualquer outra. Na fabricação de telescópios, portanto, os espelhos são preferíveis às lentes, pois não há aberração cromática.

TERMOS-CHAVE (CONHECIMENTO)

Reflexão O retorno da luz a partir de uma superfície.

Princípio de Fermat do mínimo tempo A luz segue a trajetória que requer o mínimo tempo para ir de um lugar a outro.

Lei da reflexão O ângulo de reflexão é sempre igual ao ângulo de incidência.

Refração O desvio sofrido por um raio luminoso oblíquo ao passar de um meio transparente para outro.

Ângulo crítico O ângulo mínimo de incidência dentro de um meio para o qual o raio luminoso é totalmente refletido.

Reflexão interna total A reflexão total da luz que se propaga em um meio de certa densidade ao incidir na fronteira com outro meio, menos denso, com um ângulo de incidência maior do que o ângulo crítico.

Lente convergente Uma lente mais espessa no meio do que nas bordas, fazendo raios luminosos paralelos convergirem para o foco.

Lente divergente Uma lente mais estreita no meio do que nas bordas, fazendo raios luminosos paralelos divergirem como se viessem de um ponto.

Imagem virtual Uma imagem formada por raios luminosos que não convergem para a localização da imagem.

Imagem real Uma imagem formada por raios luminosos que convergem na localização da imagem. Uma imagem real, ao contrário da virtual, pode ser projetada numa tela.

Aberração Uma distorção numa imagem produzida por uma lente, presente em certo grau em todos os sistemas ópticos.

QUESTÕES DE REVISÃO (COMPREENSÃO)

28.1 Reflexão

1. Como a luz incidente em um determinado objeto atua sobre os elétrons dos átomos do objeto?
2. O que fazem os elétrons de um objeto iluminado quando são forçados a oscilar com grande energia?
3. Qual é o princípio de Fermat do mínimo tempo?

28.2 Lei da reflexão

4. Cite a lei da reflexão.
5. Em relação à distância de um objeto até um espelho plano à sua frente, quão afastada do espelho está a imagem formada?
6. Que fração da luz que incide em um pedaço de vidro é refletida por sua primeira superfície?
7. Uma superfície pode estar polida para determinadas ondas e não para outras? Cite um exemplo disso.

28.5 Refração

8. Como se compara o ângulo segundo o qual a luz incide no vidro de uma janela com o ângulo segundo o qual ela sai pelo outro lado?

9. Como se compara o ângulo segundo o qual um raio luminoso incide em um prisma com o ângulo segundo o qual ele sai pelo outro lado?

10. A luz se propaga mais rápido no ar mais rarefeito ou no ar mais denso? O que essa diferença de rapidez de propagação tem a ver com a duração do dia?

11. A lei da reflexão é válida para espelhos curvos? Explique.

12. Uma miragem é resultado da reflexão ou da refração?

28.4 A origem da refração

13. Quando uma roda de carro rola de uma calçada lisa para um terreno gramado, a interação com as folhas da grama desaccelera a roda. O que torna mais lenta a propagação da luz quando ela passa do ar para o vidro ou para a água?

14. Qual é o ângulo formado entre um raio luminoso e a frente de onda correspondente?

15. Qual é a relação entre a refração e a rapidez da luz?

16. As lentes de óculos feitas de materiais de "alto índice de refração" são mais finas ou mais grossas?

17. A refração da luz faz o fundo de uma piscina parecer mais profundo ou mais raso do que ele realmente é?

28.5 Dispersão e arco-íris

- 18. Qual delas se propaga mais lentamente no vidro, a luz vermelha ou a violeta?
- 19. Uma única gota de chuva iluminada pela luz solar desvia a luz de uma única cor ou ela dispersa um espectro inteiro de cores?
- 20. Um determinado observador vê uma única cor ou um espectro de cores vindo de uma única gota afastada?
- 21. Por que o arco-íris secundário é mais fraco do que o arco-íris primário?

28.6 Reflexão interna total

- 22. O que significa o *ângulo crítico*?
- 23. Em que ângulo, dentro do vidro, a luz é refletida por completo internamente? Em que ângulo, dentro do diamante, a luz é refletida por completo internamente?

24. A luz normalmente se propaga em trajetórias retilíneas, mas “faz curvas” quando se propaga dentro de uma fibra óptica. Explique isso.

28.7 Lentes

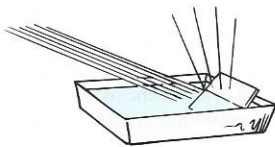
- 25. Faça distinção entre uma *lente convergente* e uma *lente divergente*.
- 26. O que é a *distância focal* de uma lente?
- 27. Faça distinção entre uma *imagem virtual* e uma *imagem real*.
- 28. Que tipo de lente pode ser usado para produzir uma imagem real? E uma imagem virtual?

28.8 Defeitos em lentes

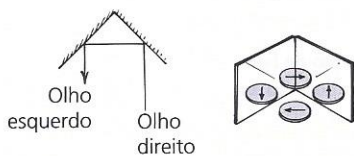
- 29. Por que a visão torna-se mais nítida quando as pupilas do olho estão pequenas?
- 30. O que é astigmatismo e como pode ser corrigido?

PENSE E FAÇA (APLICAÇÃO)

- 31. Escreva à sua avó e tente convencê-la de que, para ela poder se enxergar, em pé, por inteiro, o espelho precisa ter apenas a metade de sua altura. Discuta também o papel intrigante da distância para que o espelho tenha a metade da altura dela. Talvez o uso de esboços simples ajude na explicação.
- 32. Você pode produzir um espectro colocando uma cuba de água na luz brilhante do Sol. Incline um pequeno espelho de bolso pelo lado de dentro da cuba, e ajuste-o até que apareça um espectro completo sobre a parede ou o teto. Puxa, você conseguiu produzir um espectro sem usar um prisma!

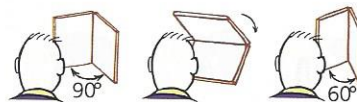


33. Fixe dois espelhos de bolso em ângulo reto um com o outro, e coloque uma moeda entre eles. Você enxergará quatro moedas. Mude o ângulo entre os espelhos e veja quantas imagens da moeda você consegue enxergar. Com os espelhos em ângulo reto, olhe seu rosto. Então pisque. Você vê algo de incomum? Segure uma folha impressa, virada para o espelho duplo, e compare sua aparência com a reflexão produzida por um espelho único.

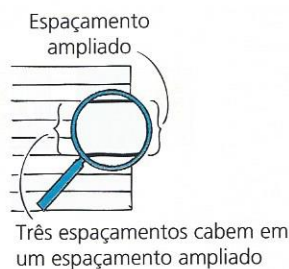


34. Olhe-se num par de espelhos em ângulo reto um com o outro. Você se vê como os outros o veem. Gire os espelhos, sempre os mantendo em ângulo reto um com o outro. Sua imagem também gira? Agora coloque os espelhos formando

60° um com o outro até ver seu rosto. Gire novamente os espelhos e veja se sua imagem também gira. Surpreendente?



35. Determine o grau de ampliação de uma lente focando as linhas de um pedaço de papel pautado. Contando os espaços entre linhas que cabem em um espaço ampliado, você terá o grau de ampliação da lente. A mesma coisa pode ser feita com um binóculo e uma parede de tijolos afastada. Segure o binóculo de modo que apenas um dos olhos enxergue os tijolos através do tubo do instrumento, enquanto o outro olha diretamente para os tijolos. O número de tijolos vistos a olho nu cabendo dentro de um tijolo ampliado fornece o grau de ampliação do instrumento.



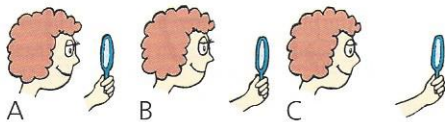
36. Faça um furo em uma folha de papel, sustente-o sob a luz solar de modo que a imagem do disco solar seja de mesmo tamanho que uma moeda posta sobre o solo, e depois determine quantas moedas caberiam na distância entre o solo e o furo. Isso equivale ao número de diâmetros solares que cabem na distância entre a Terra e o Sol. (Você se lembra disso do Capítulo 1?)

PENSE E RESOLVA (APLICAÇÃO MATEMÁTICA)

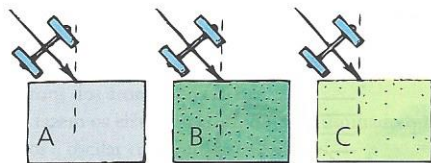
37. Suponha que você esteja caminhando em direção a um espelho, com uma rapidez de 2 m/s. Com que rapidez você e sua imagem estão se aproximando? (A resposta *não* é 2 m/s.)
38. Com um simples diagrama, mostre que, quando um espelho no qual incide um feixe luminoso fixo é girado por um determinado ângulo, o feixe refletido gira no dobro deste ângulo. (Este valor duplicado do deslocamento angular do feixe torna mais evidentes as irregularidades existentes no vidro ordinário de janelas.)
39. Uma borboleta se encontra ao nível dos olhos, a 20 cm da frente de um espelho. Você está atrás dela, a 50 cm do espelho. Qual é a distância entre seu olho e a imagem da borboleta formada pelo espelho?
40. Quando a luz incide perpendicularmente no vidro, cerca de 4% dela é refletida pela superfície. Mostre que 92% da luz é transmitida através da vidraça de uma janela.
41. Nenhum vidro é completamente transparente. Devido principalmente às reflexões, cerca de 92% da luz passa através de uma vidraça comum de janela incolor. A perda de 8% não é notada quando a luz atravessa uma única vidraça como essa, mas torna-se aparente quando a luz tem de atravessar várias dessas vidraças. Quanta luz é transmitida através da vidraça dupla de uma janela, formada por duas dessas chapas de vidro?
42. O diâmetro aparente do Sol cria um ângulo de visão de $0,53^\circ$, quando visto a partir da Terra. Quantos minutos leva para o Sol se mover no céu cerca de um diâmetro solar? (lembre-se de que ele leva 24 horas, ou 1.440 minutos, para descrever 360°). Como se compara sua resposta com o tempo que leva para o Sol desaparecer, depois que a borda inferior de seu disco alcança a linha do horizonte, durante o poente? (A refração afeta sua resposta?)

PENSE E ORDENE (ANÁLISE)

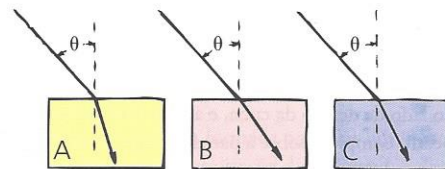
43. Ela olha a sua face com o espelho de mão. Ordene as situações A, B e C, mostradas abaixo, em sequência decrescente quanto ao valor do percentual de sua face que ela enxerga em cada situação (ou ela enxerga a mesma coisa nas três posições?):



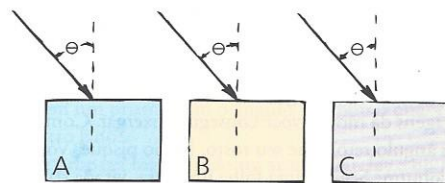
44. As rodas de um carrinho de brinquedo rolam em uma calçada de rua, sobre as seguintes superfícies: A, o piso de uma rua pavimentada; B, um gramado; C, um gramado recém-cortado rente ao solo de um campo de golfe. Devido à desaceleração, o eixo de cada par de rodas é desviado na fronteira de sua trajetória retilínea original. Ordene as superfícies mostradas em sequência decrescente quanto ao valor do desvio sofrido por cada par de rodas na fronteira.



45. Raios luminosos idênticos penetram em três diferentes blocos transparentes compostos de matérias diferentes. A luz é desacelerada ao entrar em cada um deles. Ordene os blocos em sequência decrescente quanto ao módulo de sua velocidade.



46. Raios luminosos idênticos no ar são refratados ao penetrar em três materiais diferentes: A, água, onde a velocidade da luz é de $0,7c$; B, álcool etílico (velocidade de $0,7c$); C, vidro crown (velocidade de $0,6c$). Ordene os materiais em sequência decrescente quanto ao valor do desvio sofrido.



PENSE E EXPLIQUE (SÍNTESE)

47. Este capítulo abriu com uma foto do professor de física Peter Hopkinson parecendo flutuar sobre uma mesa. Ele não flutua de fato. Explique de que maneira ele cria essa ilusão.
48. Na foto de abertura do capítulo do pato sobre uma pedra, por que os pés do pato não aparecem refletidos na água?
49. Na foto de abertura do capítulo, o professor de física Fred Myers aparece tirando uma foto de sua filha McKenzie. Quantos espelhos estão envolvidos? Explique.
50. Na foto dos múltiplos espelhos da professora de física Karen Jo Matsler na abertura deste capítulo, quantos espelhos estão presentes?
51. O princípio de Fermat se refere ao tempo mínimo, e não ao caminho mínimo. A mínima distância se aplicaria igualmente à reflexão? E à refração? Por que suas respostas são diferentes?
52. O olho localizado no ponto P está olhando para o espelho. Qual das cartas numeradas ele pode ver refletida no espelho?



53. O *cowboy* Joe deseja atirar num assaltante de bancos fazendo sua bala ricochetear numa placa metálica espelhada. Para fazê-lo, bastaria que ele simplesmente mirasse na imagem refletida do assaltante? Explique.
54. Por que palavras impressas na parte da frente de alguns veículos estão ao contrário?

AMBULÂNCIA

55. Os grandes caminhões frequentemente trazem avisos na traseira que dizem “Se você não pode ver meus espelhos, eu não posso vê-los também”. Explique a física existente por trás desse aviso.
56. Quando você se olha no espelho e balança sua mão direita, sua bela imagem balança a mão esquerda. Então por que os pés de sua imagem não sacodem quando você sacode sua cabeça?
57. Os espelhos retrovisores dos carros são descobertos na superfície frontal e prateados na superfície traseira. Quando o espelho está adequadamente ajustado, a luz vinda de trás se reflete na superfície prateada e daí vai para o interior dos olhos do motorista. Ótimo. Mas isso não é tão bom durante a noite, com o efeito ofuscante da luz proveniente dos faróis dos carros que estão atrás do seu. Esse problema é resolvido pela forma em cunha do espelho retrovisor (veja o desenho). Quando o espelho é inclinado ligeiramente para cima, ficando na posição “noturna”, os feixes dos faróis são dirigidos para o teto do veículo, não sendo mais direcionados, portanto, para os olhos do motorista. Ainda assim, ele consegue ver no espelho retrovisor o carro que está atrás. Explique.

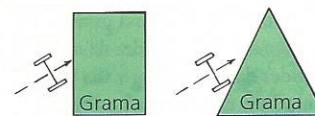


58. Uma pessoa num quarto escuro olha por uma janela e pode ver claramente uma outra pessoa que está no exterior da casa, exposta à luz solar, enquanto a pessoa de fora não pode enxergar a pessoa dentro da casa. Explique.
59. Qual é a vantagem das páginas de um livro serem de papel fosco (sem brilho) em vez de papel liso e brilhante?
60. Qual deve ser o mínimo comprimento de um espelho plano a fim de que você possa ter uma visão completa de si mesmo?
61. Que efeito sua distância, em relação a um espelho plano, tem na resposta da questão anterior? (Experimente e comprove!)
62. Segure um espelho de bolso a uma distância de seu rosto quase igual ao comprimento de seu braço estendido e observe quanto de seu rosto você consegue enxergar. Para enxergar mais o rosto, você deveria segurar o espelho mais próximo ou mais afastado, ou teria de usar um espelho maior? (Experimente e comprove!)
63. Enxugue a superfície embaciada de vapor de um espelho plano apenas o suficiente para conseguir enxergar seu rosto inteiro nele. Qual será a altura da área enxugada em comparação com a dimensão vertical de seu rosto?
64. O diagrama mostra uma pessoa e sua irmã gêmea, a iguais distâncias dos lados opostos de uma parede fina. Suponha que uma janela seja cortada na parede, de modo que cada gêmea

possa ter uma visão completa da outra. Mostre o tamanho e a localização da menor janela que pode ser cortada na parede e que seja suficiente para cumprir o requerido. (*Dica:* trace raios luminosos saindo do topo de cada gêmea em direção aos olhos da outra. Faça o mesmo partindo dos pés de cada gêmea até os olhos da outra.)



65. Você pode saber se uma pessoa tem dificuldade de visão de perto ou de longe olhando o tamanho de seus olhos através das lentes dos óculos dela. Se os olhos dela parecem ampliados, essa pessoa vê mal de perto ou de longe?
66. Se uma pessoa míope quer usar óculos mais finos, é recomendável um índice de refração maior ou menor para as lentes?
67. Um colega seu afirma que os comprimentos de onda das ondas luminosas são menores na água do que no ar, e cita a Figura 28.25 como exemplo disso. Você concorda ou discorda dele?
68. Um par de rodas de brinquedo rola sobre uma superfície lisa, indo numa direção oblíqua sobre dois terrenos gramados, um de forma retangular e outro de forma triangular, como mostrado. O solo é ligeiramente inclinado, de modo que depois de rolar sobre a grama, as rodas serão novamente aceleradas ao emergirem do outro lado, sobre a superfície plana. Complete os desenhos, mostrando algumas posições das rodas nos terrenos gramados e indicando a direção de deslocamento.

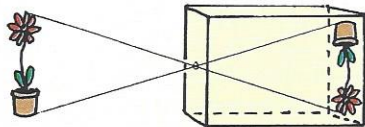


69. Um pulso de luz vermelha e outro de luz azul entram simultaneamente num bloco de vidro, segundo direções normais à superfície do mesmo. Estritamente falando, depois de atravessar o bloco, qual dos pulsos sai primeiro do vidro?
70. Durante um eclipse lunar, a Lua não fica completamente escura, mas frequentemente apresenta uma cor vermelho-escuro. Explique isso em termos da refração que ocorre em todos os poentes e nascentes do Sol pelo mundo afora.
71. O que explica as grandes sombras projetadas pelas extremidades das finas pernas de um mosquito d'água*?



* N. de T.: Nome vulgar de um inseto hemíptero da família dos gerrídeos (o nome científico é *hydrobatidae conformis*), com a forma de um mosquito gigante, capaz de pousar sobre a água. Veja também a seção sobre tensão superficial, no Capítulo 13.

72. Quando fica em pé de costas para o Sol, você enxerga um arco-íris como um arco de círculo. Você poderia se mover lateralmente, e, então, enxergar o arco-íris como um segmento de uma elipse, em vez de um segmento circular (tal como sugerido pela Figura 28.33)? Justifique sua resposta.
73. Por que os óculos de mergulho permitem a um nadador sob a água focar mais nitidamente o que está olhando?
74. Se um peixe usasse óculos de mergulho acima da superfície da água, por que sua visão seria melhor se os óculos fossem preenchidos com água? Explique.
75. Um diamante sob a água lampeja mais ou menos do que no ar? Justifique sua resposta.
76. Cubra a metade superior da lente de uma câmera. Que efeito isto terá sobre as fotografias tiradas com a máquina dessa maneira?
77. O que acontecerá à imagem projetada por uma lente em uma tela se você cobrir uma terça parte da lente com um filtro vermelho, outro terço dela com um filtro verde, e o terceiro terço com um filtro azul? (Experimente e verifique!)
78. Como se poderia construir uma lente convergente para ondas sonoras? (Esse tipo de lente, um saco esférico contendo gás, existe no *Exploratorium* de San Francisco, EUA.)
79. Os telescópios refratores e os microscópios ópticos ainda forneceriam imagens ampliadas se a luz possuísse a mesma rapidez de propagação no vidro e no ar? Explique.
80. Existe uma diferença menor entre a rapidez da luz no vidro e na água do que entre a rapidez da luz no vidro e no ar. Isso significa que uma lente de aumento de vidro ampliará mais ou menos, quando usada dentro d'água em vez de no ar?
81. As ondas não se superpõem na imagem formada por uma câmera com furo de alfinete. Essa característica contribui para a nitidez ou para a falta de nitidez da imagem?
82. Por que a nitidez da imagem formada por uma câmera de furo de alfinete não depende da posição da tela de observação?



83. Enquanto furos de alfinete fornecem imagens nítidas, lentes de grande abertura são vantajosas para câmeras de aeronaves de espionagem em voos a grandes altitudes. Por quê?
84. Se você apontasse a câmera de furo de alfinete do Exercício 82 para o Sol, veria uma imagem clara e brilhante do disco solar sobre a tela de observação. De que maneira isso está relacionado às manchas luminosas circulares que rodeiam Lillian abaixo da árvore ensolarada da foto a seguir?



85. Em termos da distância focal, a que distância atrás da lente de uma câmera está localizada a superfície fotossensível quando um objeto muito afastado está sendo fotografado?
86. Por que os *slides* devem ser colocados de cabeça para baixo em um projetor de *slide* antigo?
87. A imagem produzida por uma lente convergente sempre está de cabeça para baixo. Nossos olhos possuem lentes convergentes. Isso significa que as imagens que vemos estão de cabeça para baixo na retina? Explique.
88. As imagens produzidas pela lente convergente de uma câmera estão invertidas. Isso significa que as fotografias tiradas com a câmera estão de cabeça para baixo?
89. Os mapas da Lua são confeccionados de cabeça para baixo. Por quê?
90. Por que as pessoas mais velhas que não usam óculos leem os livros segurando-os numa posição mais afastada dos olhos do que as pessoas mais jovens?
91. Quando Stephanie Hewitt mergulha uma vareta de vidro dentro de óleo vegetal, a parte submersa da vareta torna-se invisível. O que isso sugere a respeito das velocidades relativas da luz no vidro e no óleo? Ou, indagando de outra maneira, como se comparam os índices de refração, n , do vidro e do óleo?



PENSE E DISCUTA (AVALIAÇÃO)

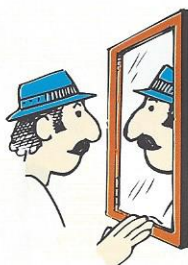
92. Para diminuir o clarão da vizinhança, as janelas de certas lojas de departamento são inclinadas ligeiramente para dentro no fundo, em vez de verticais. Como isso reduz o clarão?
93. Que tipo de superfície de rodovia é mais fácil de enxergar quando se dirige durante a noite, uma superfície irregular empedrada ou uma superfície lisa parecida com um espelho?

E por que é difícil ver a rodovia à sua frente quando está dirigindo durante uma noite chuvosa?

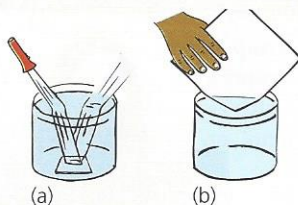
94. Por que a luz vinda do Sol ou da Lua, refletida na superfície de um grande volume de água, aparece com a forma de uma coluna, como mostrado a seguir? Como ela apareceria se a superfície da água fosse perfeitamente lisa?



95. O que exatamente você está vendo quando observa uma miragem do tipo “água sobre a rodovia”?
96. O que está errado com o desenho do homem se olhando no espelho? (Tente com um amigo em frente a um espelho, como mostrado, e você verá.)



97. Um feixe de luz é desviado como mostrado na parte (a) da figura a seguir, enquanto as bordas do cartão quadrado parecem dobradas quando são imersas como mostrado na parte (b) da figura. Essas figuras se contradizem? Explique.



98. No caso de uma lanterna, imersa em água e ligada, que aponta para o ar acima dela, a rapidez da luz aumenta ou diminui quando a luz passa da água para o ar?
99. Estando em pé sobre uma barragem, se você deseja fisgar com uma lança um peixe que está à sua frente, você deveria mirar acima, abaixo ou diretamente no peixe observado, a fim de fisgá-lo numa única tentativa? Se você usasse um feixe de *laser* para atingir o peixe, você deveria mirar acima, abaixo ou diretamente nele? Justifique suas respostas.

100. Se o peixe do exercício anterior fosse pequeno e azul, e a luz do *laser* fosse vermelha, que correções deveriam ser feitas? Explique.
101. Quando um peixe em uma lagoa olha para cima num ângulo de 45° , ele enxerga o céu ou apenas o reflexo do fundo? Justifique sua resposta.
102. Dentro d'água, os raios luminosos dirigidos para cima, e que incidem na interface água-ar com ângulos maiores do que 48° com a normal, são totalmente refletidos. Nenhum raio com ângulo de incidência maior do que 48° é refratado para fora da água. E quanto à situação inversa? Existe um ângulo de incidência segundo o qual um raio luminoso no ar, incidindo na interface ar-água, será totalmente refletido? Ou parte da luz será refratada em todos os ângulos possíveis?
103. Se você fosse enviar um feixe de *laser* para uma estação espacial acima da atmosfera e exatamente acima do horizonte, você deveria mirar o *laser* acima, abaixo ou diretamente na estação espacial visível? Justifique sua resposta.
104. Dois observadores em pé e afastados um do outro não enxergam realmente o “mesmo” arco-íris. Explique isso.
105. Um arco-íris visto de um avião pode formar um círculo completo. Onde aparecerá a sombra do avião? Explique.
106. Em que um arco-íris se assemelha ao halo que em algumas ocasiões é visto circundando a Lua numa noite muito fria? Se você está perplexo, consulte a Internet e veja de que maneira o arco-íris e o halo diferem.
107. As coberturas de piscinas feitas de plástico transparente, chamadas de *coberturas de aquecimento solar*, possuem milhares de pequenas lentes formadas por bolhas cheias de ar. As lentes da cobertura são anunciadas como capazes de focar na água o calor vindo do Sol para, assim, elevar sua temperatura. Você acha que as lentes dessas coberturas direcionam mais energia solar para a água? Justifique sua resposta.
108. A intensidade média da luz solar, obtida com um medidor de intensidade luminosa colocado no fundo da piscina da Figura 28.46, seria diferente se a água estivesse parada?
109. Quando seus olhos estão submersos em água, os raios luminosos curvam-se apenas ligeiramente ao passarem da água para o interior da córnea. Por que eles não se curvam tão acentuadamente ao passarem do ar para dentro de sua córnea? (Como diferem os índices de refração de sua córnea, do ar e da água?)
110. Quando seus olhos estão submersos em água, a rapidez da luz aumenta, diminui ou se mantém a mesma ao passar da água para dentro da córnea?
111. Dois raios luminosos são mostrados no esboço que acompanha a nota de rodapé 3, mostrado novamente aqui. Discuta se os dois raios produzem a imagem, ou simplesmente localizam onde está a imagem em relação à lente.

