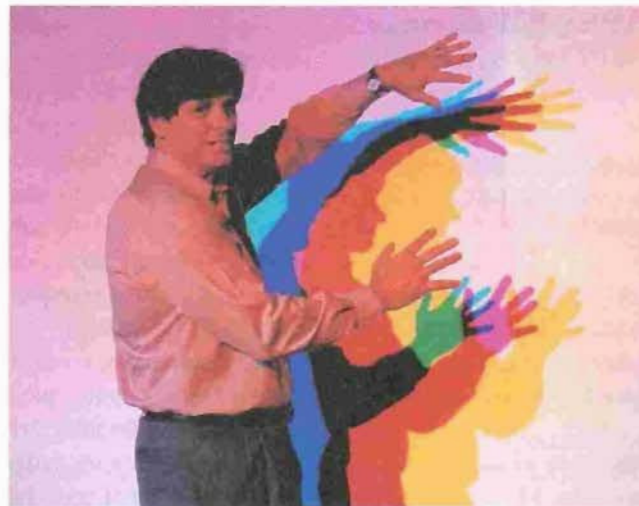


27

COR



O autor de um manual de laboratório, Paul Robinson, exibe uma variedade de cores quando é iluminado apenas com lâmpadas vermelha, verde e azul.

As rosas são vermelhas e as violetas são azuis; as cores intrigam artistas e físicos. Para o físico, as cores de um objeto não estão nas substâncias dos próprios objetos, ou mesmo na luz que eles emitem ou refletem. A cor é uma experiência fisiológica e reside no olho do espectador. Portanto, quando dizemos que a luz de uma rosa é vermelha, num sentido estrito queremos dizer que ela aparece como vermelha. Muitos organismos, o que inclui pessoas com visão deficiente para cores, não enxergam as rosas como vermelhas de jeito nenhum.

As cores que vemos dependem da frequência da luz incidente. Luzes com frequências diferentes são percebidas em diferentes cores; a luz de frequência mais baixa que podemos detectar aparece para a maioria das pessoas como a cor vermelha, e as de mais alta frequência como violeta. Entre elas, existe uma faixa com um número infinito de matizes que formam o espectro de cor de um arco-íris. Por convenção, esses matizes são agrupados em sete cores, vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, índigo e violeta. Juntas, essas cores aparecem como o branco. A luz branca do Sol é uma composição de todas as frequências visíveis.

Reflexão Seletiva

Com exceção de fontes luminosas tais como lâmpadas, lasers e tubos de descarga em gases (que abordaremos no Ca-

pítulo 30), a maior parte dos objetos que nos rodeiam refletem luz melhor do que a emitem. Eles refletem apenas parte da luz que neles incide, parte esta que é responsável por suas cores. Uma rosa, por exemplo, não emite luz, ela a reflete (Figura 27.1). Se passarmos a luz do Sol através de um prisma e colocarmos uma rosa de cor vermelho-escuro em várias partes deste espectro, as pétalas aparecerão como marrons ou negras em todas as partes do espectro, com exceção da parte vermelha do mesmo. Na parte vermelha do espectro, as pétalas aparecerão como vermelhas, mas as folhas e o caule, que são verdes, aparecerão como negras. Isso mostra que as pétalas vermelhas têm a capacidade de refletir a luz vermelha, mas não as luzes de outras cores; analogamente, as folhas de cor verde têm a capacidade de refletir a luz verde, mas não as de outras cores. Quando a rosa é exposta à luz branca, as pétalas aparecerão como vermelhas e as folhas como verdes porque as pétalas refletem a parte



FIGURA 27.1 As cores das coisas dependem das cores da luz que as ilumina.

vermelha da luz branca, enquanto as folhas refletem a parte verde. Para compreender porque os objetos refletem cores específicas da luz, devemos voltar nossa atenção para os átomos.

A luz é refletida pelos objetos de uma maneira semelhante à maneira como o som é “refletido” por um diapasão de forquilha quando um outro diapasão deste tipo está localizado próximo, vibrando. Um dos diapasões pode fazer o outro vibrar, mesmo quando suas frequências características não são iguais, embora com amplitude reduzida. O mesmo é verdade para átomos e moléculas. Os elétrons mais externos que se movem velozmente ao redor do núcleo atômico podem ser obrigados a oscilar pelos campos elétricos oscilantes das ondas eletromagnéticas*. Uma vez oscilando, estes elétrons emitem suas próprias ondas eletromagnéticas, da mesma forma que os diapasões de forquilha emitem ondas sonoras.

Materiais diferentes possuem diferentes frequências naturais para absorver e emitir radiação. Num determinado material, os elétrons oscilam facilmente em certas frequências; noutro material, oscilam mais facilmente em outras frequências.

Nas frequências de ressonância, onde as amplitudes de oscilação são grandes, a luz é absorvida. Mas em frequências que se situam abaixo e acima das frequências de ressonância, a luz é reemitida. Se o material for transparente, a luz reemitida acaba atravessando o meio. Se ele for opaco, a luz acaba retornando ao meio de onde veio. Isso constitui a reflexão.

Normalmente, um material absorve luz de certas frequências e reflete o restante. Se um material absorve a maior parte da luz visível que nele incide, mas reflete o vermelho, por exemplo, ele aparece como vermelho. Eis porque as pétalas de uma rosa são vermelhas, e seu caule verde. Os átomos que formam as pétalas absorvem toda a luz visível, com exceção do vermelho, que é refletido; o caule absorve todas, com exceção do verde, que também é refletido. Um objeto que reflita luz de todas as frequências visíveis, como a parte branca desta página, aparece com a cor da luz

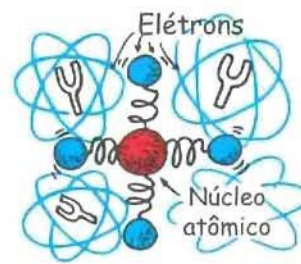


FIGURA 27.2 Os elétrons mais externos de um átomo oscilam e entram em ressonância, da mesma forma como pesos fixados a molas. Como resultado, os átomos e as moléculas comportam-se um pouco como se fossem uma espécie de diapasões de forquilha óticos.

que incide nele. Se um material absorve toda a luz que nele incide, nada refletindo, ele aparece como negro.

Curiosamente, as pétalas da maioria das flores amarelas, tais como as dos narcisos silvestres, refletem o vermelho e o verde tão bem quanto o amarelo. Os narcisos silvestres amarelos refletem uma faixa ampla de frequências. As cores refletidas pela maioria dos objetos não são cores puras, com uma única frequência, mas são compostas por uma gama de frequências.

Um objeto pode refletir apenas aquelas frequências que estão presentes na luz que o ilumina. A aparência de um objeto colorido, portanto, depende do tipo de luz que o ilumina. Uma lâmpada incandescente, por exemplo, emite mais luz em frequências mais baixas do que em frequências mais altas, reforçando quaisquer vermelhos existentes nessa luz. Num tecido contendo uma pequena parte de vermelho, esta cor ficará mais aparente sob uma lâmpada incandescente do que sob uma lâmpada fluorescente. Estas lâmpadas são mais ricas em altas frequências e, assim, os azuis ficam reforçados quando submetidos a elas. Normalmente definimos a cor “verdadeira” de um determinado objeto como sendo a cor que ele tem à luz solar. Assim, quando você está fazendo compras, a cor de uma peça de vestuário que você enxerga sob luz artificial não é, de jeito algum, sua cor verdadeira (Figura 27.5).

Transmissão Seletiva

A cor de um objeto transparente depende da cor da luz que ele transmite. Um pedaço de vidro parece vermelho porque ele absorve todas as cores que formam a luz branca, exceto

* As palavras *oscilação* e *vibração* referem-se ambas a um movimento periódico – um movimento que se repete com regularidade.

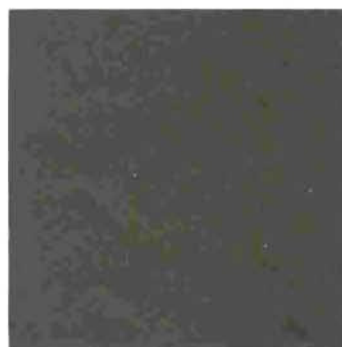


FIGURA 27.3 O quadrado da esquerda reflete todas as cores que o iluminam. Na luz solar, ele é branco. Quando iluminado com luz azul, ele é azul. O quadrado da direita absorve todas as cores que o iluminam. Na luz solar, ele se torna mais quente do que o quadrado branco.



FIGURA 27.4 O pelo escuro do coelho absorve toda a energia radiante da luz solar incidente e, portanto, aparece como negro. As outras partes do pelo do animal refletem luzes de todas as frequências e, portanto, aparecem como brancas.

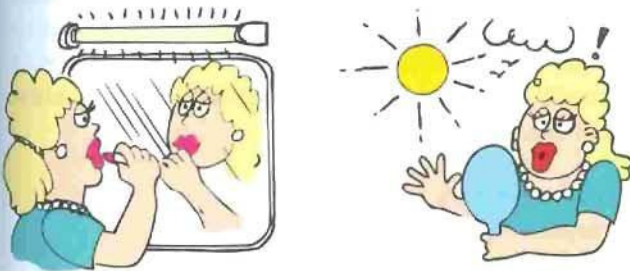


FIGURA 27.5 A cor depende da fonte luminosa.

o vermelho, que ele *transmite*. Analogamente, um pedaço de vidro azul parece dessa cor porque ele transmite principalmente luz azul, absorvendo as luzes de outras cores que o iluminam. Um pedaço de vidro contém corantes ou *pigmentos* – partículas muito pequenas que absorvem seletivamente luz de certas frequências, transmitindo seletivamente outras. De um ponto de vista atômico, os elétrons dos átomos do pigmento absorvem seletivamente a luz incidente de certas frequências. Luz com outras frequências é reemitida de molécula em molécula, através do vidro. A energia proveniente da luz absorvida aumenta a energia cinética das moléculas e o vidro se aquece. Normalmente os vidros das janelas são incolores por transmitirem igualmente bem luzes de todas as frequências visíveis.



FIGURA 27.6 Somente é transmitida a energia na frequência da luz azul; a energia de outras frequências é absorvida e acaba esquentando o vidro.

Teste a si mesmo

1. Quando luz vermelha incide sobre uma rosa vermelha, por que suas folhas tornam-se mais quentes do que as pétalas?
2. Quando luz verde incide sobre uma rosa vermelha, por que suas pétalas parecem pretas?
3. Se você segurar uma pequena fonte de luz branca entre si e um pedaço de vidro vermelho, perceberá duas reflexões vindas do vidro: uma que vem da superfície frontal e outra proveniente da superfície posterior. Qual a cor de cada reflexão?

Misturando Luzes Coloridas

O fato de que a luz branca solar é composta de todas as frequências visíveis é facilmente demonstrado quando a luz solar atravessa um prisma e observamos um espectro colorido semelhante a um arco-íris. A intensidade da luz solar varia com a frequência, sendo mais intensa na parte amarelo-esverdeada do espectro. É interessante notar que nossos olhos evoluíram para ter a máxima sensibilidade nesta faixa de frequências. Essa é a razão pela qual, cada vez mais, os novos equipamentos contra incêndios são pintados com esta cor, particularmente nos aeroportos onde a visibilidade é vital. Nossa sensibilidade à luz amarelo-esverdeada também explica por que, durante a noite, enxergamos melhor sob a luz amarelada das lâmpadas a vapor de sódio, do que sob a luz das lâmpadas comuns de mesmo brilho, com filamentos de tungstênio.

A distribuição gráfica do brilho em função da frequência é chamada de *curva de radiação* da luz solar (Figura 27.7). A maior parte das cores brancas produzidas pela reflexão da luz solar compartilha dessa distribuição de frequências.

Verifique suas respostas

1. As folhas absorvem mais do que refletem a luz vermelha e, assim, tornam-se mais quentes.
2. As pétalas absorvem mais do que refletem a luz verde. Como o verde é a única cor que está iluminando a rosa, e como ele não contém qualquer vermelho que possa ser refletido, a rosa não reflete cor alguma e parece negra.
3. A reflexão proveniente da superfície frontal é branca porque a luz não penetra no vidro colorido o suficiente para permitir a absorção da luz vermelha por ele. Apenas a luz vermelha alcança a superfície posterior, pois os pigmentos no vidro absorvem todas as outras cores, de modo que a luz proveniente da reflexão posterior é vermelha.

A combinação de todas as cores forma o branco. Curiosamente, a percepção do branco também resulta da combi-

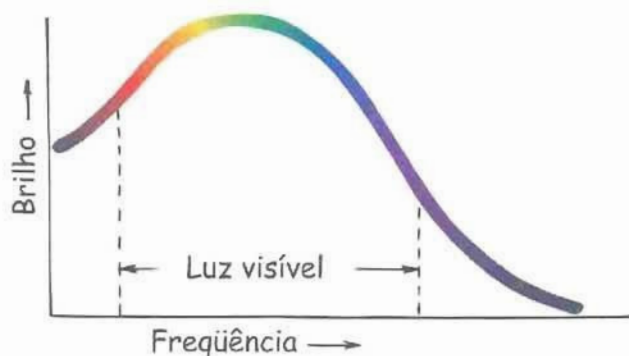


FIGURA 27.7 A curva de radiação da luz solar é um gráfico que mostra o brilho em função da frequência. A luz solar é mais brilhante na região do amarelo-esverdeado, no meio da faixa visível do espectro.

nação apenas de luzes vermelha, verde e azul. Podemos compreender isso dividindo a radiação solar em três regiões, como mostrado na Figura 27.8. Três tipos de receptores em forma de cones em nossos olhos percebem cores. A luz no terço mais baixo da distribuição espectral estimula os cones sensíveis a frequências baixas e aparece como vermelha; a luz no terço médio da distribuição espectral estimula os cones sensíveis às frequências médias e aparece como verde; e a luz na terça parte das frequências altas estimula os cones sensíveis às altas frequências e aparece como azul. Quando os três tipos de cones são estimulados simultaneamente, enxergamos o branco.

Projete luzes vermelha, verde e azul sobre uma tela branca. Onde houver superposição das três luzes, será produzido o branco. Onde houver superposição de duas dessas três cores, uma outra cor será produzida (Figura 27.9). Na linguagem dos físicos, luzes que se superpõem estão sendo *adicionadas* umas às outras. Assim, dizemos que as luzes vermelha, verde e azul *adicionam-se para produzir a luz branca*, e que quaisquer duas dessas três cores adicionam-se para produzir alguma outra cor. Variando as proporções de vermelho, verde e azul, cores às quais nossos três tipos de cones são sensíveis, produz-se qualquer cor do espectro. Por essa razão, o vermelho, o verde e o azul são chamadas de **cores aditivas primárias**. Um exame cuidadoso da imagem formada na maior parte dos tubos de imagens de televisão revelarão que a mesma é formada por uma coleção de pequenos pontos, cada qual com largura menor do que um milímetro. Quando a tela está iluminada, alguns desses pontos estão vermelhos, alguns verdes, e outros azuis; as misturas dessas cores primárias fornece uma faixa completa de cores, mais o branco*.

* É interessante observar que o "preto" que você vê nas cenas mais escuras de um televisor preto-e-branco é simplesmente a cor da face do próprio tubo de imagens, que na maioria dos tubos é mais parecida com um cinza brilhante do que com o preto. Como nossos olhos são mais sensíveis ao contraste com as partes iluminadas da tela, enxergamos esse cinza como preto.

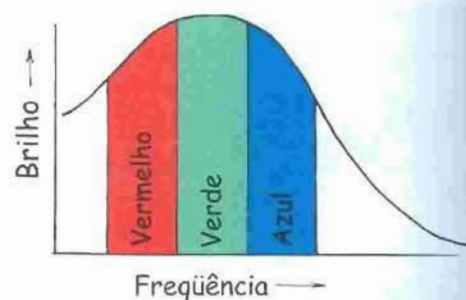


FIGURA 27.8 A curva de radiação da luz solar dividida em três regiões: vermelha, verde e azul. Essas são as cores aditivas primárias.

Cores Complementares

Eis aqui o que acontece quando duas das três cores aditivas primárias são combinadas:

Vermelho + Azul = Magenta
 Vermelho + Verde = Amarelo
 Azul + Verde = Ciano

Dizemos que o magenta é o oposto do verde; o ciano é o oposto do vermelho; e o amarelo é o oposto do azul. Mas quando adicionamos duas cores opostas, obtemos o branco.

Magenta + Verde = Branco (= Vermelho + Azul + Verde)
 Amarelo + Azul = Branco (= Vermelho + Verde + Azul)
 Ciano + Vermelho = Branco (= Azul + Verde + Vermelho)

Quando duas cores são adicionadas, produzindo branco, elas são chamadas de **cores complementares**. Cada pigmento possui uma cor complementar, que quando adicionada a ele, produzirá o branco.

O fato de que uma cor e seu complemento combinem-se para produzir luz branca é muito bem empregado na ilumi-

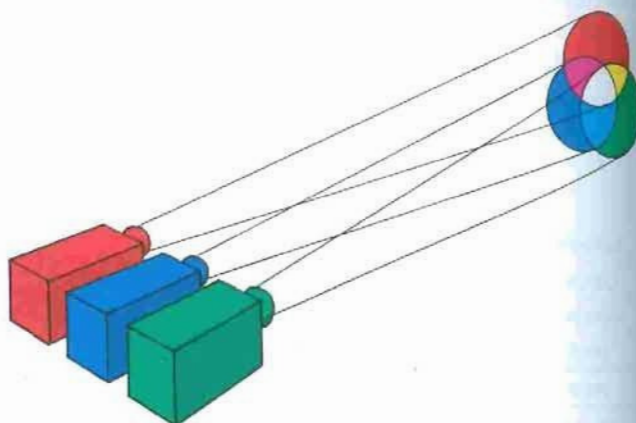


FIGURA 27.9 A adição de cores realizada pela mistura de luzes coloridas. Quando os três projetores incidem luzes vermelha, verde e azul sobre uma tela branca, as partes delas que se superpõem produzem cores diferentes. O branco é produzido onde houver a superposição das três luzes.

nação de espetáculos de palco. As luzes azul e amarela ao incidirem sobre os artistas, por exemplo, produzem o mesmo efeito da luz branca – exceto onde uma delas está ausente, como nas sombras. A sombra de uma lâmpada azul, digamos, é iluminada pela luz amarela e aparece como amarela. Analogamente, a sombra projetada por uma lâmpada amarela aparece como azul. Esse é um efeito muito interessante.

Vemos esse efeito na Figura 27.10, onde luzes vermelha, verde e azul incidem sobre uma bola de golfe. Observe as sombras projetadas pela bola. A sombra do meio é projetada pela lâmpada verde, e ela não está escura porque está sendo iluminada pelas luzes vermelha e azul, que formam o magenta. A sombra projetada pela lâmpada azul aparece como amarela porque está sendo iluminada pelas luzes vermelha e verde. Você consegue perceber por que a sombra projetada pela lâmpada vermelha aparece como ciano?

Teste a si mesmo

1. Da Figura 27.9, encontre os complementos do ciano, do amarelo e do vermelho.
2. Vermelho + azul = _____.
3. Branco – vermelho = _____.
4. Branco – azul = _____.

Verifique suas respostas

1. Vermelho, azul e ciano.
2. Magenta.
3. Ciano.
4. Amarelo.

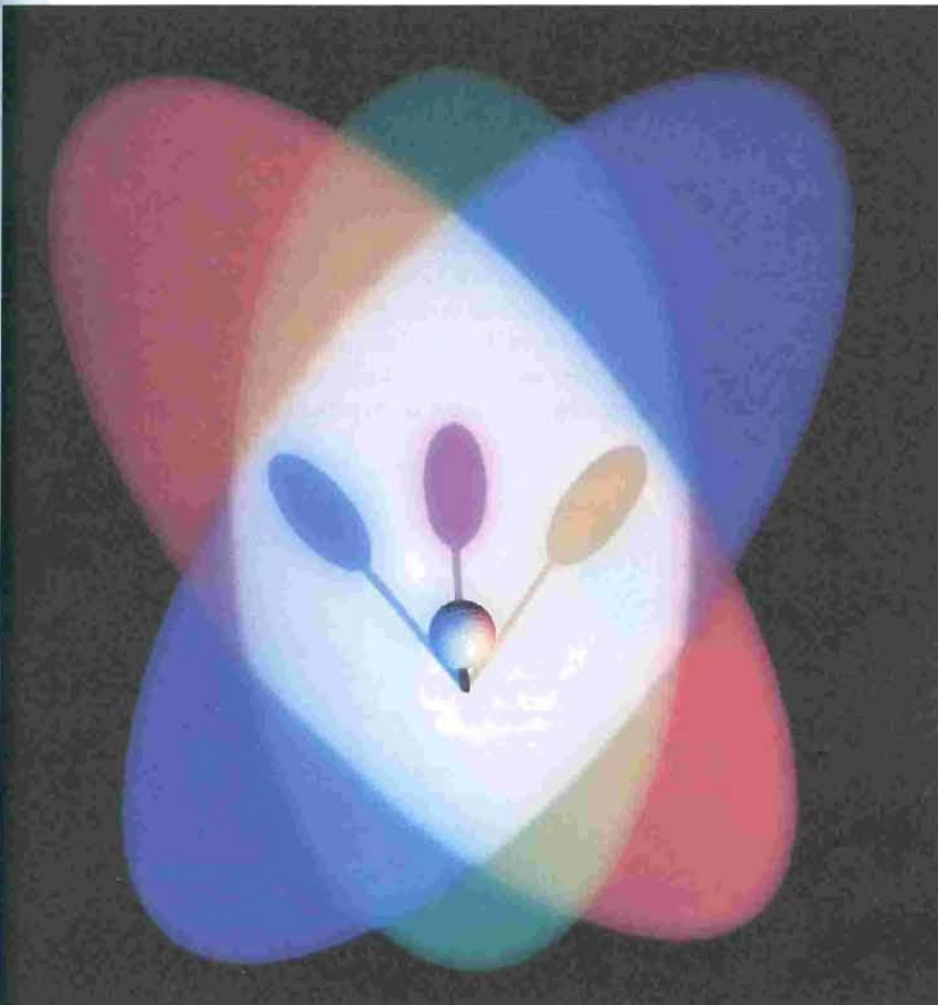


FIGURA 27.10 A bola de golfe branca aparece como branca quando iluminada por luzes vermelha, verde e azul de mesma intensidade. Por que as sombras da bola são de cores ciano, magenta e amarela?

Misturando Pigmentos Coloridos

Todo artista sabe que se misturar tintas vermelha, verde e azul, o resultado não será branco, mas uma cor marrom-escura. Tintas vermelha e verde certamente não se combinam formando o amarelo, como diz a regra da mistura de luzes coloridas. Misturar pigmentos de tintas e de corantes é completamente diferente do que misturar luzes. Os pigmentos são minúsculas partículas que absorvem cores específicas. Por exemplo, os pigmentos que produzem a cor vermelha absorve a cor complementar ciano. Portanto, alguma coisa pintada de vermelho absorve principalmente o ciano, razão pela qual ela reflete o vermelho. Com efeito, o ciano foi *subtraído* da luz branca. Algo pintado de azul absorve o amarelo e também reflete todas as cores, menos o amarelo. Se retirarmos o amarelo do branco, obteremos o azul. As cores magenta, ciano e amarelo são as **cores subtrativas primárias**. A variedade de cores que você vê em fotografias coloridas, neste e em outros livros, são o resultado de grãos magenta, ciano e amarelo. A luz branca ilumina o livro e as luzes correspondentes a determinadas frequências são subtraídas da luz refletida. As regras da subtração de cores diferem das regras da adição de luzes.

A impressão colorida é uma aplicação interessante da mistura de cores. Três fotografias (separações de cores) são tiradas da ilustração a ser impressa: uma usando um filtro magenta, outra usando um filtro amarelo, e uma terceira usando um filtro ciano. Cada um dos três negativos possui um padrão diferente das áreas expostas que correspondem aos filtros usados e à distribuição de cor na ilustração original. A luz incide através desses filtros negativos sobre placas metálicas especialmente tratadas para reter a tinta de impressão apenas em áreas que foram expostas à luz. Os depósitos de tinta são regulados em diferentes partes da placa por minúsculos pontos. Impressoras a jato de tinta depositam várias combinações de tintas magenta, ciano, amarelo e preto. Examine a cor de qualquer das figuras deste e de qualquer outro livro com uma lente de aumento e veja como a superposição dos pontos com essas cores dá a aparência de inúmeras cores. Ou então olhe de perto e atentamente para um painel de propaganda.

Vemos que todas as regras para adição e subtração de cores podem ser deduzidas das Figuras 27.9, 27.10 e 27.12.

Quando olhamos as cores de uma bolha ou uma película de sabão, enxergamos predominantemente o ciano, o magenta e o amarelo. O que isto nos diz? Diz que determinadas cores primárias foram subtraídas da luz branca original! (Como isso acontece será discutido no Capítulo 29.)



a



b



c



d



e



f

FIGURA 27.11 Apenas quatro cores de tinta são usadas para imprimir ilustrações e fotografias coloridas – (a) magenta, (b) amarelo, (c) ciano e (d) preto. Quando o magenta, o amarelo e o ciano são combinados, eles produzem (e). A adição do preto produz o resultado final, (f).



FIGURA 27.12 Corantes ou pigmentos, como nas três transparências aqui mostradas, absorvem, e efetivamente subtraem, a luz correspondente a determinadas frequências, transmitindo apenas parte do espectro. As cores primárias subtrativas são o amarelo, o magenta e o ciano. Quando a luz branca atravessa as três transparências superpostas, são bloqueadas (subtraídas) as luzes correspondentes a todas as frequências, e obtemos o preto. Onde houver a superposição apenas do amarelo com o ciano, serão subtraídas as luzes correspondentes a todas as frequências, com exceção do verde. Proporções variadas dos corantes amarelo, ciano e magenta produzirão praticamente qualquer cor do espectro.

Por que o Céu é Azul

Nem todas as cores são o resultado da adição ou subtração de luzes. Determinadas cores, tais como o azul do céu, resultam de espalhamento seletivo. Considere o caso análogo envolvendo o som: se um som com uma frequência particular for direcionado para um diapásão de forquilha com frequência semelhante, o diapásão será colocado em vibração e acabará redirecionando o som em diversas direções. Dizemos, então, que o diapásão *espalhou* o som. Um processo análogo ocorre no espalhamento da luz por átomos ou partículas que se encontram afastadas umas das outras, quando se encontram na atmosfera².



FIGURA 27.13 As cores vivas do periquito correspondem a muitas frequências de luz. A foto, entretanto, é uma mistura formada apenas por amarelo, magenta, ciano e preto.

² Este tipo de espalhamento é chamado de “espalhamento de Rayleigh” e ocorre sempre que as partículas espalhadoras são muito menores do que o comprimento de onda da luz incidente, e entram em ressonância em frequências mais elevadas do que as da luz espalhada. O espalhamento é muito mais complexo do que o tratamento simplificado que estamos apresentando aqui.

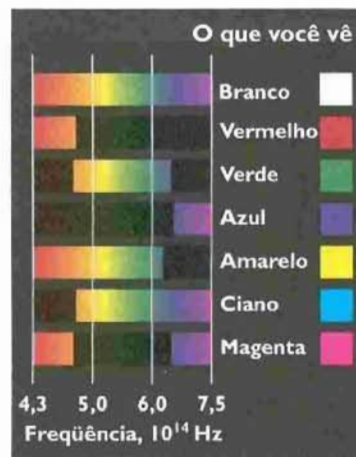


FIGURA 27.14 Faixas aproximadas de frequência que sentimos como cores primárias aditivas e cores primárias subtrativas.

Lembre-se da Figura 27.2, onde aprendemos que os átomos se comportam como se fossem minúsculos diapásões de forquilha, reemitindo as ondas luminosas que neles incidem. Moléculas e conjuntos maiores de átomos fazem a mesma coisa. Quanto menor for a partícula, mais luz de alta frequência será reemitida por ela. Isto se parece com a situação em que sinos pequenos soam com notas mais altas do que sinos grandes. As moléculas de oxigênio e nitrogênio, que formam a maior parte da atmosfera, são análogas a minúsculos sinos que “soam” em altas frequências quando energizadas pela luz solar. Como o som dos sinos, a luz é reemitida em todas as possíveis direções. Quando isso acontece, dizemos que a luz está sendo *espalhada*.

Das frequências visíveis que formam a luz solar, o violeta é espalhado principalmente pelo nitrogênio e pelo oxí-

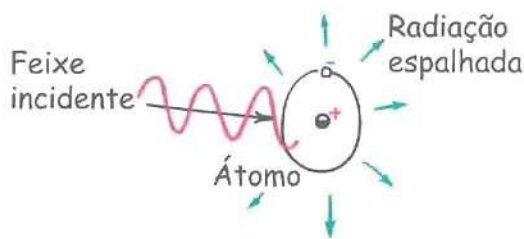


FIGURA 27.15 Um feixe de luz incide sobre um átomo e aumenta o movimento oscilatório de seus elétrons. Os elétrons oscilantes reemitem a luz em diversas direções. A luz é espalhada.

gênio da atmosfera, seguido pelo azul, o verde, o amarelo, o laranja e o vermelho, nessa ordem. O vermelho é espalhado numa proporção que corresponde a um décimo do espalhamento sofrido pelo violeta. Embora a luz violeta seja mais espalhada do que a azul, nossos olhos não são muito sensíveis ao violeta. Portanto é a luz azul espalhada que predomina em nossa visão, razão pela qual enxergamos um azul!

O azul do céu varia de lugar para lugar, sob condições diferentes. O fator principal é a quantidade de vapor d'água existente na atmosfera. Em dias secos e claros, o céu é de um azul muito mais profundo do que em dias nos quais é grande a umidade. Lugares onde o ar é excepcionalmente seco, tal como a Itália ou a Grécia, possuem um céu maravilhosamente azul que tem inspirado os pintores por séculos. Onde a atmosfera contém um número grande de partículas de poeira e outras partículas maiores do que as moléculas de nitrogênio e de oxigênio, a luz com frequência mais baixa também é fortemente espalhada. Isso torna o céu menos azul, e lhe confere um aspecto esbranquiçado. Após uma chuva forte, quando a maior parte das partículas são retiradas da atmosfera, o céu adquire um aspecto azul mais profundo.

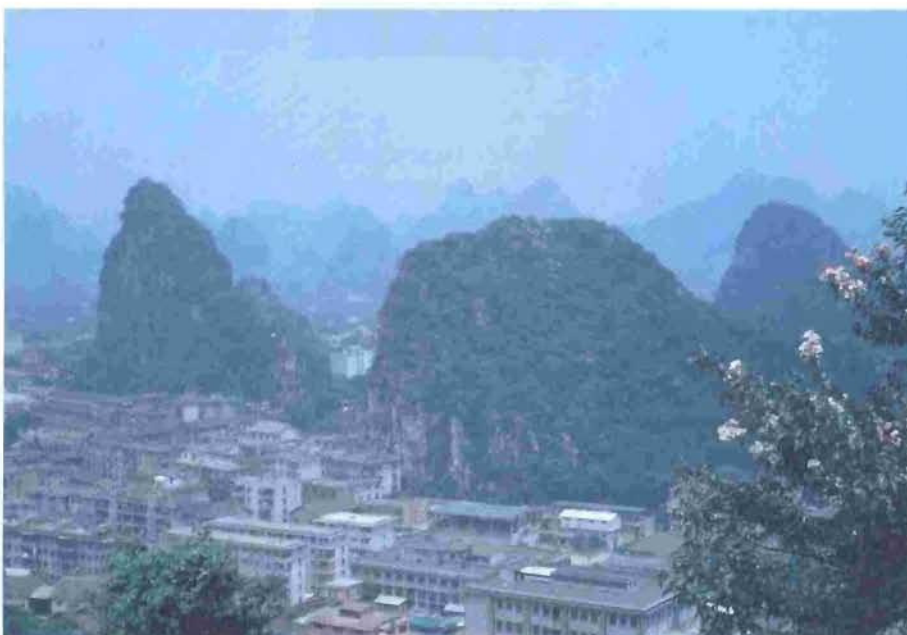


FIGURA 27.16 No ar limpo, o espalhamento da luz de alta frequência resulta num céu azul. Quando o ar está cheio de partículas maiores do que moléculas, são também espalhadas luzes de frequências mais baixas, adicionando-se ao azul e resultando em um céu esbranquiçado.

A neblina acinzentada dos céus das grandes cidades é o resultado da ação de partículas emitidas por motores de carros e de caminhões e por fábricas. Mesmo estacionado com o motor funcionando, o motor de um automóvel comum lança na atmosfera cerca de 100 bilhões de partículas por segundo. A maior parte delas é invisível, mas as partículas atuam como minúsculos centros aos quais outras partículas acabam aderindo. Estes são os principais espalhadores de luz de baixa frequência. A maior parte dessas partículas absorve a luz mais do que a espalha, produzindo um nevoeiro de cor marrom. Que imundície!

Por que o Pôr-do-Sol é Vermelho

A luz que não é espalhada é luz transmitida. Como as luzes vermelha, laranja e amarela são as menos espalhadas pela atmosfera, elas são as que melhor se transmitem através do ar. O vermelho, que é a menos espalhada e, portanto, a que melhor é transmitida, atravessa mais atmosfera do que as outras cores. Assim, quanto mais espessa é a atmosfera através da qual um feixe de luz solar deve se propagar, mais tempo existe para espalhar todas as componentes de frequências mais altas da luz. Isso significa que a luz que melhor atravessa o ar é a vermelha. Como mostra a Figura 27.17, a luz solar se propaga através de uma atmosfera mais espessa durante o pôr-do-sol, razão pela qual o poente (ou a aurora) é avermelhado.

Ao meio-dia, a luz solar atravessa uma camada menos espessa de atmosfera, até alcançar a superfície da Terra. Apenas uma pequena quantidade da luz de alta frequência da luz solar é espalhada, o suficiente para dar ao Sol uma aparência amarelada. À medida que avança o dia e o Sol torna-se mais baixo no céu, o caminho da luz através da atmosfera vai tornando-se mais comprido, com mais azul e viole-

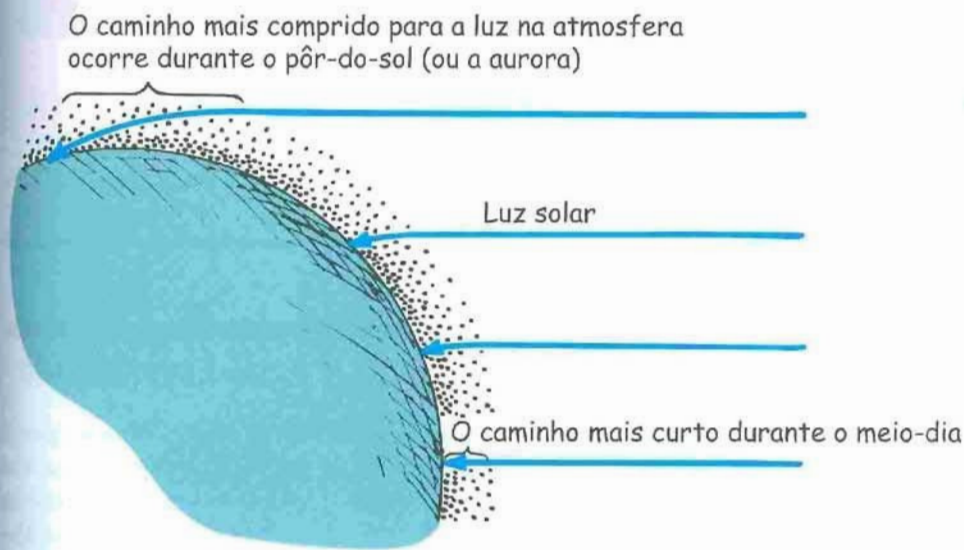


FIGURA 27.17 Um feixe de luz solar deve se propagar mais através da atmosfera durante o pôr-do-sol do que ao meio-dia. Como resultado, o azul do feixe é mais espalhado ao pôr-do-sol do que ao meio-dia. No momento em que um feixe de raios luminosos inicialmente brancos chega à superfície, apenas as luzes de frequências mais baixas sobreviveram para produzir um pôr-do-sol avermelhado.

ta da luz solar sendo espalhados. A remoção do violeta e do azul deixa a luz transmitida mais avermelhada. O Sol torna-se gradualmente mais avermelhado, indo do amarelo ao laranja e, finalmente, ao laranja-avermelhado no pôr-do-sol. Os poentes e as auroras ficam mais coloridos do que o normal após erupções vulcânicas, porque partículas maiores do que as moléculas atmosféricas são, então, mais abundantes no ar do que o normal.

As cores vistas durante o poente são consistentes com as nossas regras para mistura de cores. Quando o azul é subtraído da luz branca, a cor complementar que fica é a cor laranja. Quando a frequência média do verde é subtraída, a cor magenta é que fica. As combinações de cores resultantes variam de acordo com as condições atmosféricas, que variam de dia para dia e nos fornecem uma variedade de poentes para nos divertirmos.

Teste a si mesmo

1. Se as moléculas da atmosfera espalhassem mais a luz de baixa frequência do que a de alta frequência, de que cor seria o céu? De que cor seriam os poentes?
2. As montanhas escuras, distantes, são azuladas. Qual seria a fonte desse azulado? (*Dica:* O que existe entre nós e a montanha que estamos vendo?)
3. As montanhas distantes cobertas de neve refletem muita luz e são brilhantes. Aquelas que estão muito distantes aparecem amareladas. Por quê? (*Dica:* O que acontece à luz branca refletida quando ela se propaga da montanha até nós?)

Os poentes e as auroras seriam anormalmente coloridos se a partículas maiores do que as moléculas atmosféricas fossem mais abundantes no ar. Foi o que aconteceu pelo mundo inteiro, nos três anos que se seguiram à erupção do vulcão Krakatoa em 1883, quando partículas micrométricas foram lançadas abundantemente na atmosfera do planeta. Isso ocorreu, em menor extensão, com a erupção do Monte Pinatubo, nas Filipinas, em 1991.

Verifique suas respostas

1. Se a luz de baixa frequência fosse espalhada, o céu durante o meio-dia apareceria como laranja-avermelhado. Durante o poente, ainda mais vermelho seria espalhado ao longo do caminho mais comprido percorrido pela luz, de modo que a luz solar teria uma aparência predominantemente azul e violeta. Portanto, os poentes seriam azuis!
2. Quando olhamos para montanhas distantes, muito pouca luz proveniente delas nos alcança, predominando o azulado da atmosfera que existe entre nós e elas. A cor azulada que atribuímos às montanhas é, de fato, o azulado do "céu" de baixa altitude que existe entre nós e as montanhas!
3. As montanhas brilhantes cobertas de neve parecem amareladas porque o azul da luz branca que elas refletem é espalhado, saindo da trajetória que nos alcança. No momento em que a luz nos alcança, ela está enfraquecida nas altas frequências e reforçada nas baixas frequências – daí seu tom amarelado. Para distâncias de afastamento ainda maiores, além do que normalmente as montanhas são avistadas, elas pareceriam alaranjadas pela mesma razão o poente possui tal cor.

Por que vemos o azul espalhado quando o fundo está escuro, mas não quando está claro? Porque o azul espalhado é desbotado. Uma cor desbotada aparecerá facilmente contra um fundo escuro, mas não contra um fundo claro. Por exemplo, quando olhamos a partir da superfície terrestre contra o fundo escuro do espaço, através do ar, a atmosfera é azul celeste. Mas os astronautas que se encontram acima da atmosfera, e que olham para a brilhante superfície terrestre através da mesma atmosfera, não enxergam o mesmo tom azulado.

Por que as Nuvens são Brancas

As nuvens são formadas por gotículas de água dos mais variados tamanhos. Esses diferentes tamanhos espalham luzes

Praticando Física

Você pode simular um pôr-do-sol em um tanque de peixes cheio d'água, no qual você tenha deixado cair um pouquinho de leite. Bastarão algumas gotas. Então faça incidir um feixe luminoso na água e verá que ela parece azulada de lado. As partículas

de leite estão espalhando as frequências mais altas da luz do feixe. A luz que emerge do outro lado do tanque tem uma coloração avermelhada. É a luz que não foi espalhada.

com uma variedade de frequências: As menores espalham mais azul que outras cores; aquelas que são ligeiramente maiores, espalham frequências ligeiramente menores, digamos, verde; e aquelas ainda maiores espalham mais o vermelho. O resultado geral é uma nuvem branca. Dentro de uma gotícula da nuvem, os elétrons próximos oscilam juntos, no mesmo ritmo, o que resulta numa maior intensidade da luz espalhada do que quando o mesmo número de elétrons oscila independentemente. É daí que tem origem o brilho das nuvens!

Um agrupamento de gotas maiores absorve boa parte da luz que nelas incide, de modo que a intensidade da luz espalhada é menor. Isso contribui para a cor escura de nuvens formadas por gotículas maiores. Se o tamanho das gotas aumentar mais ainda, elas podem vir a cair na forma de gotas, e temos chuva.

Da próxima vez que você descobrir-se admirando um céu bem azulado, ou se deliciando com as formas das nuvens brilhantes, ou assistindo a um lindo pôr-do-sol, pense acerca daqueles minúsculos diapasões óticos que estão vibrando por aí – você apreciará ainda mais essas maravilhas cotidianas da natureza!



FIGURA 27.18 Uma nuvem é composta por gotículas de água de vários tamanhos. As menores espalham a luz azul, aquelas ligeiramente maiores espalham a luz verde e as que são ainda maiores, espalham a luz vermelha. O resultado é uma nuvem branca.

Por que a Água é Azul-Esverdeada

Freqüentemente vemos um bonito azul profundo quando olhamos para a superfície de um lago ou oceano. Mas essa não é a cor da água; trata-se apenas da cor do céu refletida na água. A cor da própria água, como você pode perceber olhando para um pedaço de material branco sob a água, é de um pálido azul-esverdeado.

Embora a água seja transparente à luz de aproximadamente todas as frequências visíveis, ela absorve fortemente as ondas infravermelhas. Isso se deve ao fato de que as moléculas da água entram em ressonância nas frequências da faixa do infravermelho. A energia das ondas infravermelhas é convertida em energia interna da água, razão pela qual a água esquenta quando exposta à luz solar. As moléculas de água entram um pouco em ressonância na parte vermelha do espectro visível, o que faz com que ela seja ligeiramente mais absorvida pela água do que a luz azul. A luz vermelha é reduzida a um quarto de sua intensidade inicial a cada 15 metros percorridos dentro da água. Existe pouca luz vermelha na luz que penetra na água além de 30 metros de profundidade. Quando o vermelho é retirado da luz branca, que cor predomina? Essa questão pode ser formulada de outra maneira: Qual é a cor complementar do vermelho? A cor complementar do vermelho é o ciano – uma cor azul-esverdeada. Na água do mar, a cor de qualquer coisa a essas profundidades parece esverdeada.

Muitos caranguejos e outras criaturas marinhas que parecem escuras em águas profundas mostram-se vermelhas quando trazidas à superfície. Naquelas profundidades, o preto e o vermelho parecem a mesma cor. Aparentemente, a seleção proporcionada pelo mecanismo evolucionário não poderia distinguir entre o preto e o vermelho em tais profundidades oceânicas.

Assim, enquanto o azul do céu se deve ao forte espalhamento da luz azul pelas moléculas da atmosfera, a água é azulada por causa da absorção da luz vermelha dentro dela. Vemos que as cores das coisas dependem de quais cores são espalhadas ou refletidas pelas moléculas, e também de quais cores são absorvidas pelas moléculas*. Curiosamente, a cor que vemos não pertence ao mundo que nos rodeia – ela está

* O espalhamento proporcionado por partículas pequenas e largamente espaçadas existentes na íris de olhos azuis, é responsável pela cor dos olhos. A absorção proporcionada por pigmentos explica a cor de olhos castanhos.



FIGURA 27.19 A cor da água é o ciano porque ela absorve a luz vermelha. A espuma das ondas é branca porque, como as nuvens, ela é formada por uma variedade de gotículas de água que espalham todas as frequências de luz visível.



FIGURA 27.20 Não existem pigmentos azuis nas penas de um gaio azul. Em vez disso, existem minúsculas células alveoladas nos filamentos das penas, que espalham luz – principalmente luz de alta frequência. Assim, o gaio azul tem essa cor pela mesma razão que o céu é azul – por espalhamento.

em nossas cabeças. O mundo é um cenário cheio de vibrações – as ondas eletromagnéticas estimulam a sensação de cor quando essas vibrações interagem com as “antenas receptoras” em forma de cone existentes na retina dos nossos olhos. Que bom que as interações olho-cérebro produzem a beleza das cores que vemos.

Sumário de Termos

Cores primárias aditivas As três cores – vermelho, azul e verde – que, ao serem adicionadas em determinada proporção, produzem qualquer cor na parte visível do espectro eletromagnético, ou que podem ser misturadas igualmente para produzir o branco.

Cores complementares Quaisquer duas cores que, quando adicionadas, produzem a luz branca.

Cores subtrativas primárias As três cores dos pigmentos de absorção – magenta, ciano e amarelo – que, quando misturadas em certas

proporções, refletem qualquer outra cor na parte visível do espectro eletromagnético.

Leitura Sugerida

Murphy, Pat e Paul Doherty, *The Color of Nature*, São Francisco: Chronicle Books, 1996.

Questões de Revisão

1. Qual é a relação entre a frequência da luz e sua cor?

Reflexão Seletiva

2. O que acontece quando os elétrons mais externos, que se movem rapidamente em torno do núcleo atômico, encontram ondas eletromagnéticas?
3. Quando os elétrons mais externos são forçados a oscilar, o que é que eles emitem?
4. O que acontece à luz quando ela incide num material que possui uma frequência natural igual à frequência da luz?
5. O que acontece à luz quando ela incide num material que possui uma frequência natural acima ou abaixo da frequência da luz?

Transmissão Seletiva

6. Qual a luz colorida que atravessa um pedaço de vidro vermelho?
7. O que é um pigmento?
8. O que esquentaria mais rápido quando submetido à luz solar, um pedaço de vidro incolor, ou um colorido? Por quê?

Misturando Luzes Coloridas

9. Qual é a evidência para se afirmar que a luz branca é uma mistura de todas as cores do espectro?

¹N. de T. Ave de penas malhadas, do tamanho de uma gralha-do-campo.

10. Qual é a cor correspondente ao pico de frequência da luz solar?
11. A que cor nossos olhos são mais sensíveis?
12. O que é uma *curva de radiação*?
13. Que faixas de frequência da curva de radiação correspondem ao vermelho, ao verde e ao azul?
14. Por que as cores vermelha, verde e azul são chamadas de *cores primárias aditivas*?

Misturando Pigmentos Coloridos

15. Quando algo é pintado de vermelho, que cor é mais absorvida?
16. O que são *cores primárias subtrativas*?
17. Se você olhar com uma lente de aumento as figuras impressas a cores neste e em outros livros ou revistas, perceberá três cores de tinta mais o preto. Quais são essas cores?

Cores Complementares

18. Qual é a cor resultante da combinação, em iguais proporções, de luzes vermelha, verde e azul? E da luz azul com a verde?
19. Qual é a cor resultante da combinação de luzes verde e ciano em iguais proporções?
20. Por que o vermelho e o ciano são cores *complementares*?

Por que o Céu é Azul

21. O que interage mais com sons de alta frequência, sinos pequenos ou sinos grandes?
22. O que interage mais com luz de alta frequência, partículas pequenas ou grandes?
23. Verdadeiro ou falso: O céu é azul porque as moléculas de nitrogênio e de oxigênio são de cor azul.
24. Por que o céu às vezes parece esbranquiçado?

Por que o Pôr-do-Sol é Vermelho

25. Por que o Sol parece avermelhado durante a aurora e o poente, mas não ao meio-dia?
26. Por que a cor dos poentes varia de dia para dia?

Por que as Nuvens são Brancas

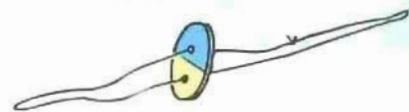
27. Qual é a evidência da existência de uma variedade de tamanhos de partículas nas nuvens?
28. Qual é a evidência da existência de partículas muito grandes numa nuvem de chuva?

Por que a Água é Azul-Esverdeada

29. Que parte do espectro eletromagnético é mais absorvida pela água?
30. Que parte do espectro eletromagnético visível é mais absorvida pela água?
31. Qual a cor resultante quando o vermelho é subtraído da luz branca?
32. Por que a água parece de cor ciano?

Projetos

1. Olhe fixamente para um pedaço de papel colorido por 45 segundos ou mais. Depois olhe para uma superfície branca plana. Os cones de sua retina sensíveis à cor do papel tornam-se saturados e, assim, você acaba enxergando uma pós-imagem da cor complementar quando olha para a área branca. Isso, porque os cones saturados enviam um sinal enfraquecido ao cérebro. Todas as cores juntas produzem o branco, mas todas as cores menos uma, produzem uma cor complementar à cor ausente. Experimente e comprove!
2. Corte um disco de alguns centímetros ou mais de diâmetro a partir de um papel de cartão; faça dois furos ligeiramente fora do centro, grandes o suficiente para que um *loop* de barbante passe por eles, como mostrado no desenho abaixo.



Torça o disco como mostrado, de modo que o barbante fique enrolado de maneira semelhante às tiras de borracha de um aeromodelo. Então estique o barbante puxando suas extremidades para fora, e o disco começará a girar. Se a metade do disco for colorida de amarelo e a outra metade de azul, quando o disco girar, as cores se misturarão, e o branco surgirá claramente (quão próximo de branco depende dos matizes das cores).



3. Confeccione um tubo de cartolina coberto em cada extremidade por uma folha de metal. Faça um furo em cada extremidade com um lápis, um com cerca de 3 milímetros de diâmetro e o outro duas vezes maior. Ponha seu olho no buraco pequeno e olhe através do tubo para as cores das coisas, contra o fundo escuro do tubo. Você verá que as cores parecem muito diferentes do que elas pareciam contra fundos comuns.

Exercícios

1. Numa loja de roupas iluminada apenas com lâmpadas fluorescentes, uma consumidora insiste em levar os vestidos para a luz diurna do exterior do prédio para verificar suas cores. Ela está sendo razoável? Explique.
2. Por que as folhas de uma rosa vermelha esquentam mais do que as pétalas, quando expostas à luz solar? O que isto tem a ver com pessoas no deserto quente vestindo roupas brancas?
3. Se a luz solar fosse de algum modo verde, em vez de branca, que cor de tecido seria mais aconselhável usar num dia desconfortavelmente quente? E durante um dia muito frio?
4. Por que não classificamos o branco e o preto como cores?
5. Por que o interior dos instrumentos óticos é sempre negro?

6. Os carros de bombeiro costumavam ser pintados de vermelho. Agora muitos deles são pintados de cor amarelo-esverdeada. Por que a troca de cores?
7. Qual é a cor das bolas de tênis comuns e por quê?
8. A curva de radiação do Sol (Figura 27.7) mostra que a luz mais intensa proveniente do Sol é o amarelo-esverdeado. Por que, então, vemos o Sol como esbranquiçado em vez de amarelo-esverdeado?
9. De que cor aparecerá uma roupa vermelha se ela fosse iluminada pela luz solar? E pela luz de um letreiro de neon? E por luz de cor ciano?
10. Por que um pedaço de papel branco aparece como branco sob luz branca, vermelho sob luz vermelha, azul sob luz azul e assim por diante, sob cada cor?
11. Uma lâmpada é coberta de maneira que não possa transmitir a luz amarela de seu filamento quente de cor branca. De que cor, então, será o feixe luminoso emergente?
12. Como você poderia usar os holofotes de um teatro para fazer com que a cor das roupas amarelas dos atores mude subitamente para a cor preta?
13. Suponha que dois feixes de luz incidam sobre uma tela branca, um dos feixes tendo passado através de uma vidraça azul, e o outro através de uma vidraça amarela. De que cor aparece a tela, onde os dois feixes se superpõem? Suponha, em vez disso, que as duas vidraças estejam localizadas no caminho de um mesmo feixe luminoso. O que acontece então?
14. Uma televisão colorida funciona empregando a adição de cores ou a subtração de cores? Justifique sua resposta.
15. Sobre uma tela de TV, pontos vermelhos, verdes e azuis, feitos com material fluorescente, são iluminados com uma variedade de intensidades relativas, para produzir um espectro completo de cores. Quais desses pontos são ativados para produzir o amarelo? E o branco?
16. Que cores de tinta são usadas pelas impressoras a jato de tinta para produzir uma faixa completa de cores? As cores são obtidas por adição ou subtração de cores?
17. Que cor será transmitida através de dois filtros justapostos, um ciano e outro magenta?
18. Olhe para seus pés vermelhos, queimados pelo Sol, quando eles se encontram debaixo d'água. Por que eles não parecem tão avermelhados em relação à situação em que estão fora da água?
19. Por que o sangue de mergulhadores oceânicos feridos tem um aspecto escuro-esverdeado nas fotografias submarinas tiradas com luz natural, mas parece vermelho quando é utilizada a luz de *flashes*?
20. Com referência à Figura 27.9, complete as seguintes equações:
Luz amarela + luz azul = luz _____
Luz verde + luz _____ = luz branca.
Magenta + amarelo + ciano = luz _____.
21. Aí está uma foto da editora de física Suzanne, com seu filho Tristan vestindo vermelho e sua filha Simone vestindo verde. Mais abaixo está o negativo da foto, que mostra essas cores diferentemente. Qual é a sua explicação para isso?



22. Verifique na Figura 27.9 se os três enunciados estão corretos. Então complete o último enunciado. (Todas as cores são combinadas através de adição de luzes.)
Vermelho + verde + azul = branco.
Vermelho + verde = amarelo = branco – azul.
Vermelho + azul = magenta = branco – verde.
Verde + azul = ciano = branco – _____.
23. Em qual dos casos uma banana madura parecerá preta: quando iluminada com luz vermelha? Com luz verde? Com luz azul?
24. Quando luz branca incide sobre tinta vermelha seca sobre uma placa de vidro, a cor transmitida é a vermelha. Mas a cor que é refletida não é a vermelha. Qual é ela?
25. Olhe fixa e atentamente para uma bandeira do Brasil. Depois olhe para uma parede branca. Que cores você vê na imagem da bandeira que aparece sobre a parede?
26. Por que não vemos as estrelas durante o dia?
27. Por que o céu é de um azul mais escuro quando você se encontra numa grande altitude? (*Dica:* De que cor é o “céu” visto a partir da Lua?)
28. Podem as estrelas ser vistas a partir da Lua durante o “dia”, quando o Sol está iluminando?
29. Na praia, você pode se bronzear mesmo sob a sombra de um guarda-sol. Qual a sua explicação para isso?
30. Os pilotos às vezes usam óculos que transmitem a luz amarela e absorvem luz preferencialmente de outras cores. Por que isso os ajuda a enxergar mais nitidamente?
31. A luz se propaga mais rápido através da baixa atmosfera ou da alta atmosfera?

32. Por que a fumaça de um incêndio de uma fogueira parece azulada quando vista contra um fundo de árvores, porém amarelada se vista tendo o céu como fundo?
33. Comente o seguinte enunciado, "Oh! aquele belo pôr-do-sol vermelho é formado justamente pelas cores restantes, que não foram espalhadas de seu caminho através da atmosfera".
34. Se o céu em um determinado planeta do sistema solar fosse normalmente laranja, de que cor seriam os poentes ali?
35. Emissões vulcânicas lançam cinzas finas no ar, que espalham a luz vermelha. De que cor a lua cheia aparece através das cinzas em suspensão?
36. Partículas minúsculas, como se fossem minúsculos sinos, espalham as ondas de alta frequência mais do que as de baixa frequência. Partículas grandes, como se fossem grandes sinos, espalham principalmente baixas frequências. Partículas e sinos com tamanhos intermediários espalham principalmente as frequências intermediárias. O que isto tem a ver com a cor branca das nuvens?
37. Partículas muito grandes, como gotas de água, absorvem mais radiação do que a espalham. O que isso tem a ver com a aparência escura das nuvens de chuva?
38. Se a atmosfera terrestre fosse muitas vezes mais espessa, uma queda de neve ordinária ainda seria vista de cor branca, ou seria de alguma outra cor? Que cor?
39. A atmosfera de Júpiter tem mais do que 1.000 km de espessura. A partir da superfície deste planeta, você esperaria ver um Sol branco?
40. Você está na praia, explicando a um rapaz por que a água é de cor ciano. O rapaz aponta para as cristas espumosas brancas das ondas quando quebram e pergunta por que elas são de cor branca. Qual é a sua resposta?