



Este trabalho visa o desenvolvimento de uma montagem experimental para demonstração de superposição de cores [1-3]. Algumas vezes, é proposta uma simples superposição da luz de lâmpadas coloridas [4-6]. Entretanto, nós consideramos que o resultado obtido não é nítido, problema que

pode ser sanado usando-se três projetores de slides ou três retroprojetores (vide Fig. 1). Difícilmente o professor dispõe desses equipamentos, por isso neste trabalho

apresentamos uma “caixa de cores” contendo três projetores caseiros de baixo custo [7] que possibilitam uma projeção bastante nítida de três círculos coloridos (Fig. 2). Esses são obtidos pela projeção de círculos com diâmetro ~ 2 cm, amplificados pelo projetor de slides com um aumento ~ 10 vezes (detalhes do funcionamento e de construção deste equipamento constam no Anexo). Com este equipamento podemos desenvolver em sala a adição e subtração de cores e sombras coloridas. Neste trabalho discutiremos exemplos de aplicações que podem ser utilizadas em aulas de demonstrações interativas [8-9]. Discussões mais aprofundadas de diversos fenômenos envolvendo cores podem ser encontradas em diversos textos ou sítios da internet [10-12].

Adição de cores

A percepção da cor depende das características do olho e do cérebro humanos, logo, elas precisam ser consideradas na compreensão deste fenômeno. O ser hu-

mano é capaz de perceber a chamada luz visível, ou seja, o intervalo de comprimento de onda entre aproximadamente 400 e 700 nm. A retina (nosso detector de luz) contém três tipos de cones, que são células sensíveis à luz. Cada um deles é responsável por perceber uma região do

Mesmo quando a luz é interrompida, um cone continua enviando o sinal ao cérebro por $\sim 1/30$ s. Este intervalo de tempo relativamente longo explica o efeito observado no famoso disco de Newton

espectro da luz visível (Fig. 3), ou seja, o vermelho (R), o verde (G) e o azul (B), com maior sensibilidade em 600 nm, 550 nm e 450 nm, respectivamente (por conveniência usaremos a

notação do inglês onde R, G e Y representam o vermelho, verde e amarelo (*Red, Green, Yellow*)). Porém, isto não significa que podemos perceber apenas três tipos de cores. Quando um destes cones recebe luz de sua respectiva cor, ele envia um sinal ao cérebro, de acordo com sua reposta espectral (Fig. 3) que aumenta com a intensidade da luz [9]. Por exemplo, quando vemos luz de 680 nm a resposta dos cones vermelhos é muito maior que a dos cones

Nosso detector de luz (a retina) contém três tipos de cones. Cada um deles é responsável por perceber uma região do espectro da luz visível: o vermelho (R), o verde (G) e o azul (B), com maior sensibilidade, em 600 nm, 550 nm e 450 nm, respectivamente

verde e azul, resultando na sensação da luz vermelha. Por outro lado, a luz de comprimento de onda 580 nm estimula igualmente (aproximadamente) os cones vermelhos e verdes, resultando na percepção da cor amarela. Entretanto, quando

dois feixes de luz, por exemplo, vermelho e verde, são sobrepostos nós também temos a sensação da cor amarela (Fig. 4). Mesmo quando a luz é interrompida, a célula (cone) continua enviando o sinal por $\sim 1/30$ s [9]. Este intervalo de tempo (ou tempo de resposta) relativamente longo explica o efeito observado no famoso disco de Newton [4].

.....
Gláucia Grüninger Gomes Costa

E.E. Prof. José Juliano Neto, São Carlos, SP, Brasil

E-mail: gggcosta@gmail.com

Benedito Antonio Cortese

E.E. Dr. Djalma Forjaz, Porto Ferreira, SP, Brasil

E-mail: benepf@yahoo.com.br

Roberto Scurachio

E.E. José Ferreira da Silva, Descalvado, SP, Brasil

E-mail: scurachi@terra.com.br

Tomaz Catunda

Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil

E-mail: tomaz@ifsc.usp.br
.....

A “caixa de cores” aqui proposta é um equipamento de baixo custo, fácil manuseio e com uma projeção abrangente para a sala de aula toda. Com ela é possível realizar demonstrações interativas sobre adição e subtração de cores e discutir fenômenos correlatos (sombras coloridas, televisão colorida, mistura de tintas em pintura, impressoras, etc.)

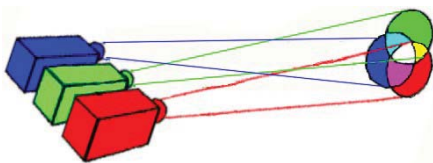


Figura 1 - Montagem esquemática da superposição de cores usando três projetores de slides (diapositivos) [1].

A Fig. 4 foi obtida com a nossa “caixa de cores”, que consiste basicamente de três projetores de slides [ver Anexo]. Cada projetor é montado em um trilho óptico com uma lâmpada dicrômica, um slide com filtro colorido e uma lente de distância focal ~12 cm. Um acessório opcional, mas interessante, da “caixa de cores” é o dispositivo para variar a potência de uma das lâmpadas, que é comercialmente conhecido como *dimmer*. Assim podemos mostrar que a tonalidade da cor muda continuamente conforme varia a proporção dos componentes da mistura. Por exemplo, se aumentamos a intensidade do verde (ou diminuímos o vermelho) obtemos tons amarelos esverdeados, chamados de verde-limão. No caso oposto, obtemos tons laranja.

Outros exemplos importantes de serem mostrados são a mistura das cores verde e azul resultando na cor ciano; e a mistura de azul e vermelho resultando no magenta. Ciano é uma tonalidade azul esverdeada comumente chamada de verde-água ou azul-piscina e o magenta é usualmente chamado de roxo (carmim, rosa-choque ou fúcsia). A Fig. 5 mostra a superposição dos três círculos vermelho, verde e azul que resulta no branco, assim como as superposições das cores, duas a duas.

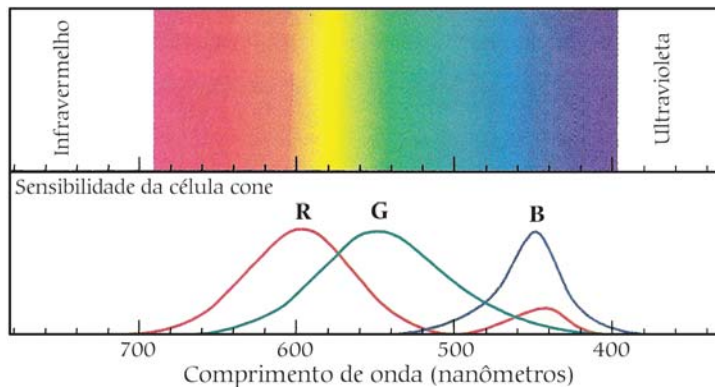


Figura 3 - Diagrama ilustrando a parte visível do espectro eletromagnético e a curva de sensibilidade dos três tipos de cones [3].

Na verdade, qualquer cor pode ser obtida variando adequadamente as proporções de vermelho, verde e azul. Estas três cores são denominadas *cores primárias*. Na adição de duas cores primárias resulta em uma *cor secundária*, por exemplo, vermelho + verde = amarelo ou $R + G = Y$. Além disso, vemos também que a soma de verde (G = Green) e azul (B = Blue) resulta no ciano (C = Ciano), logo $G + B = C$. Analogamente, $R + B = M$, pois a soma de vermelho e azul é o magenta (M = Magenta); e a soma das três cores primárias resulta no branco, $R + G + B = W$ (White). O fenômeno de adição de cores é o princípio básico do sistema conhecido como RGB usado na televisão colorida e no moni-

tor de computadores.

A Fig. 5 ilustra também o exemplo da soma do amarelo e azul resultando no branco, ou seja, $Y + B = W$. Este resultado pode ser compreendido lembrando que Y



Figura 4 - Sobreposição (adição) de luzes coloridas. Luz vermelha (R) e verde (G) sobrepostas resultando o Amarelo (Y).

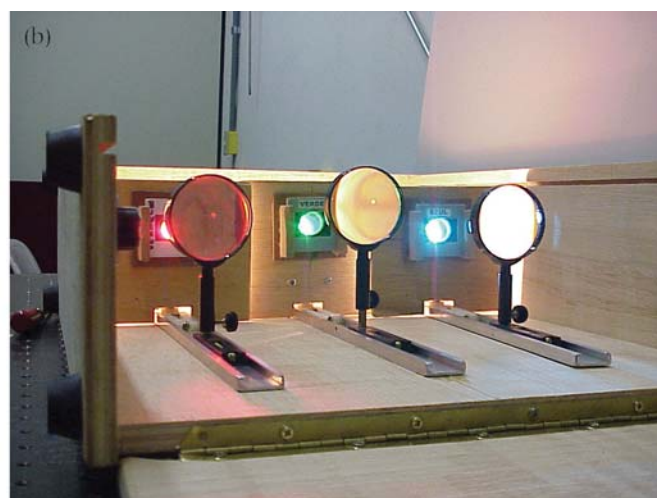


Figura 2 - (a) Vista superior da “caixa de cores” com três projetores de slides, caseiros, contendo trilhos ópticos de alumínio, lâmpadas dicrômicas, porta-slides com filtros coloridos e lentes. O tampo branco da caixa é removível (na parte inferior da foto) e pode ser utilizado como anteparo. (b) Vista frontal mostrando os filtros coloridos e as lentes.

$= R + G$, logo $Y + B = (R + G) + B = W$. Analogamente, temos $C + R = W$ e $M + G = W$. Nestes três casos temos a soma de uma cor secundária (Y, C ou M) com sua cor primária complementar, resultando no branco (W).

Sombras coloridas

Uma das conseqüências interessantes do fenômeno de adição de cores é o efeito de sombras coloridas ilustrado na Fig. 6a. Para esta demonstração fazemos a superposição de círculos coloridos das três cores primárias (R, G e B) resultando num único círculo branco (W). A foto foi obtida colocando-se um objeto opaco de ~ 3 cm de largura um pouco a frente do anteparo. Bloqueando-se uma das três primárias, as outras duas se misturam (ou somam) gerando a cor secundária. Por exemplo, no lado esquerdo do diagrama da Fig. 6a, a luz B é bloqueada obtendo-se Y, pois $W - B = (R + G + B) - B = R + G = Y$. Note que Y é a cor complementar de B e, tal como mostrado na Fig. 5, $B + Y = W$. Analogamente, do lado direito a cor R é bloqueada resultando no C, pois $W - R = C$. A Fig. 6a ilustra também regiões onde duas cores são bloqueadas, resultando em apenas uma cor primária. No centro observa-se uma região preta, devido a ausência de cor. É interessante observar que a seqüência de cores ilustrada na Fig. 6a: W, Y, R, preto, B, C, W (da esquerda para a direita), depende da disposição das luzes (R, G e B). Note que na Fig. 6a as cores G e M não aparecem. Outras seqüências podem ser obtidas alterando-se a ordem das luzes. Por exemplo, com a seqüência (B, R e G) obtemos a (W,

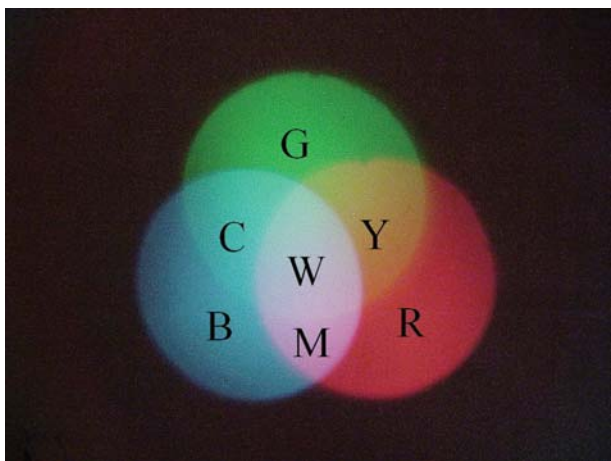


Figura 5 - Sobreposição das luzes vermelha, verde e azul (R, G, B), denominadas cores primárias. A superposição (ou adição) de duas cores primárias resulta nas cores secundárias, resultando em magenta (M), amarela (Y), ciano (C) e no centro a branca (W). A superposição de uma cor secundária com sua cor primária complementar resulta na cor branca ($B + Y = W$, $M + G = W$, $C + R = W$).

Anexo: detalhes da construção do kit "caixa de cores"

A "caixa de cores" (Fig. 2) consta de uma caixa de madeira, com as seguintes dimensões: 60 cm \times 45 cm \times 16 cm. Possui uma frente dobrável e o seu tampo, feito de madeira Eucatex® branca, é deslizável e removível, servindo de anteparo para os experimentos, colocado no apoio da lousa, quando feitas as projeções.

No fundo da caixa são fixados 3 trilhos ópticos. Utilizamos o trilho para poder ajustar o foco, ou seja, obter uma imagem nítida do slide no anteparo de observação. O trilho central é completamente fixo e os dois laterais são fixos apenas com um parafuso para que possam ficar móveis, e permitir a sobreposição das projeções dos círculos quando necessários.

Na Fig. 7 temos a disposição dos elementos sobre o trilho óptico, utilizada para os experimentos. Normalmente com $f = 12$ cm, usamos $p \sim 13$ cm. Neste caso, pela equação de Gauss ($1/p + 1/p' = 1/f$) obtemos $p' \sim 130$ cm, resultando numa ampliação de módulo $|A| = (p'/p) = \phi'/\phi \sim 10$. Ou seja, o diâmetro do círculo projetado é $\phi' \sim 20$ cm para $\phi \sim 2$ cm. As lâmpadas utilizadas são preferencialmente do tipo dicróicas (P = 50 W), que fornecem luz "mais branca" que as lâmpadas comuns. Utilizamos lentes de vidro com foco ~ 12 cm comumente encontradas como lupas. Não recomendamos o uso de lentes plásticas pois geralmente têm qualidade muito ruim e as lentes de vidro também são de baixo custo e facilmente encontradas nas populares lojas de 1.99. Os filtros coloridos que usamos são comercialmente chamados de "gelatina", são usados em holofotes de teatro. Seu custo (~ 10 R\$/m²) é maior que o dos plásticos coloridos comuns, pois este tipo de material suporta temperaturas relativamente elevadas. Os filtros coloridos que utilizamos são da marca Rosco [13] tipo E-colour nas cores: vermelha (n. 106 - Primary Red), verde (n. 139 - Primary Green), azul (n. 118 - Light Blue), amarelo (n. 102 - Light Amber), magenta (n. 111 - Dark Pink) e cian (n. 353 - Lighter Blue).

Se surgir alguma dificuldade em se adquirir os filtros coloridos, uma alternativa que se pode ter é utilizar lâmpadas coloridas Sylvania Decorativa®, nas cores: vermelha, verde e azul. Estas foram as de melhor resultado, mas não possibilitam o trabalho com as cores secundárias, visto não se ter lâmpadas que forneçam as cores ciano e magenta.

Quaisquer outras informações, assim como roteiros para aulas de demonstração interativa podem ser obtidas diretamente com os autores.

M, B, preto, G, Y, W). A Fig. 6b ilustra as sombras coloridas de uma mão. É importante notar que a explicação neste caso é mais complexa do que na Fig. 6a, pois devido às reentrâncias existentes na mão, todas as cores aparecem (R, G, B, W, preto, Y, M e C).

Sugerimos que a demonstração seja feita primeiramente sem os filtros coloridos e com apenas duas lâmpadas acesas para que os alunos compreendam os efeitos de sombra e penumbra que aparecem nesta montagem.

Subtração de cores

Um outro estudo interessante que se pode realizar com a "caixa de cores" é a Subtração de Cores. Este é o fenômeno que ocorre nos pigmentos, tintas de pintura, tintas de impressão, os quais se comportam como filtros coloridos, ou

seja, conforme a luz vai penetrando nas tintas, nos pigmentos, as cores vão sendo absorvidas.

Consideremos inicialmente o caso de um filtro amarelo. Quando a luz branca (mistura de todas as cores) incide sobre um filtro amarelo, o filtro absorve preferencialmente a luz azul, transmitindo o verde e vermelho. Conseqüentemente, o filtro fica com a cor amarela devido à absorção característica do pigmento amarelo deste filtro. Pelo mesmo motivo, a cor de um objeto amarelo se deve ao fato dele absorver preferencialmente o azul e refletindo o verde e vermelho. Tanto no caso da transmissão quando da reflexão, podemos dizer que a luz amarela é o resultado da subtração da cor azul da luz originalmente branca. Analogamente, o filtro ciano subtrai o vermelho, e o filtro magenta o verde. Por isso, denominamos o filtro amarelo de "menos azul" pois $W + (-B) = R + G + B + (-B) = Y$ e, analogamente, o ciano é "menos vermelho" ($-R$) e o magenta é "menos verde" ($-G$).

Se a luz branca incide sobre três filtros coloridos sobrepostos, os filtros amarelo ($-B$), magenta ($-G$) e ciano ($-R$), quando

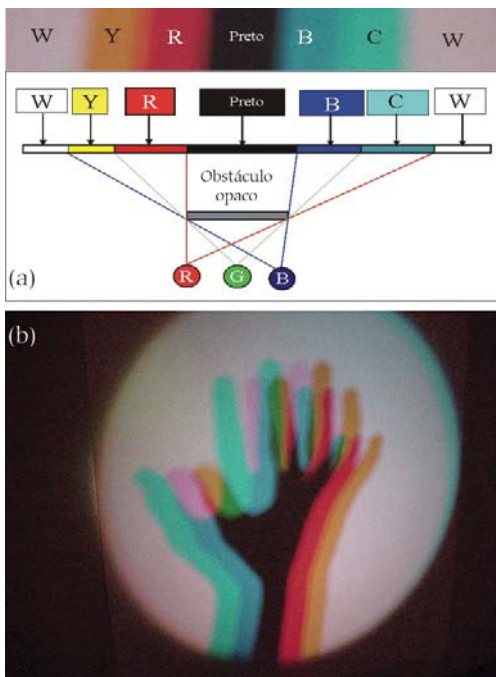


Figura 6 - Formação de sombras coloridas. (a) Fotografia e diagrama esquemático da formação de sombras coloridas onde se observa as cores: W, Y, R, preto, B, C, W. (b) Mão iluminada com luz Branca (R + G + B), que devido às reentrâncias faz com que apareçam todas as cores primárias, secundárias e a cor preta que é devido à ausência de cor.

ela incidir na sobreposição dos filtros amarelo e magenta obtemos a luz vermelha, pois a luz branca primeiro incide no filtro amarelo (subtraindo a parte azul da luz, ou seja, $W + (-B) = G + R$) e depois passando pelo magenta (subtraindo a parte verde, $G + R + (-G) = R$). Na sobreposição dos filtros amarelo e ciano, percebemos a luz verde, pois, $[W + (-B)] + (-R) = [G + R] + (-R) = G$, e na sobreposição dos filtros ciano e magenta vemos a luz azul, visto que $[W + (-R)] + (-G) = [G + B] + (-G) = B$. Observa-se também, que na sobreposição dos três filtros coloridos vemos preto, que é a ausência de cor $W + (-G) + (-B) + (-R) = \text{zero}$ (preto). A demonstração experimental da subtração de cores é mais simples do que a de adição

A “caixa de cores” que aqui apresentamos, é um equipamento de baixo custo, fácil manuseio e com uma projeção abrangente para uma sala de aula

Conclusão

A “caixa de cores”, que aqui apresentamos, é um equipamento de baixo custo, fácil manuseio e com uma projeção abrangente para uma sala de aula. Desta forma, as demonstrações realizadas levam a uma interação maior com os alunos. Dentre as possibilidades experimentais para o

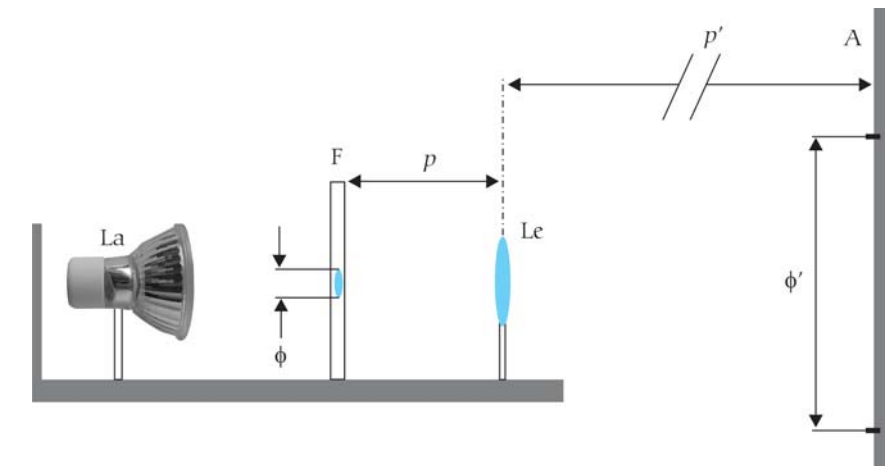


Figura 7 - Disposição dos elementos no trilho óptico. Este projetor caseiro é formado por uma lâmpada dicróica (La); um suporte, com um furo de diâmetro $\phi \sim 2$ cm, onde se tem um porta-slide com o filtro colorido (F); uma lente (Le) que está a uma distância $p \sim 12$ cm de F e $p' \sim 120$ cm do anteparo (A). A imagem projetada no anteparo tem um diâmetro $\phi' \sim 20$ cm.

estudo de cores, que podem ser desenvolvidas com este equipamento, temos a adição e subtração de cores e sombras coloridas. Com isto os alunos podem compreender melhor os fenômenos que encontramos nas televisões coloridas, monitores de computadores, impressoras (laser e de jato de tinta), nas pinturas, aquarelas, entre outros.

Gostaríamos de comentar brevemente alguns aspectos didáticos. Como sabemos, para que se alcance uma aprendizagem significativa é importante que as pré-concepções dos alunos sobre luz e cores sejam consideradas. Por exemplo, uma concepção errônea comum é a de que quando a luz passa por um prisma, as cores são adicionadas à luz incidente (originalmente branca). Nós observamos que os alunos confundem os efeitos de adição e subtração de cores. O fato de que a mistura das cores

azul e verde resulta no ciano ($B + G = C$) não surpreende muito os alunos, pois podemos entender o ciano como um verde azulado. Entretanto, o efeito observado na obtenção do amarelo (Fig. 4) é mais surpreendente (não intuitivo) e deve ser comentado pelo professor. Também a obtenção do branco a partir do amarelo e azul (Fig. 5), visto que o aluno normalmente espera que a superposição (soma) destas cores resulte no verde pois é o efeito observado quando tintas ou pigmentos são misturados (subtração da luz). Finalmente, gostaríamos de observar que o professor deve demonstrar ou discutir os experimen-

tos fundamentais de Newton (*Experimentum Crucis*) que mostram a decomposição da luz branca, antes ou junto ao uso da “caixa de cores”.

Referências

- [1] P.G.Hewitt, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2002), 9ª ed.
- [2] A.I. Pedrosa, *Da Cor à Cor Inexistente* (Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1989), 5ª ed.
- [3] L.A.Bloomfield, *How Things Work - The Physics of Every Day* (John Wiley & Sons Inc, Nova York, 1997).
- [4] Alberto Gaspar, *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental* (Editora Ática, São Paulo, 2005).
- [5] <http://axpfep1.if.usp.br/~gref/optica/optica2.pdf>.
- [6] R.J. Horowicz, *Luz, Cores, Ação: A Óptica e Suas Aplicações Tecnológicas* (Moderna, São Paulo, 1999).
- [7] Tiago R. da Silva, *Física na Escola 5:1*, 15 (2004).
- [8] D.R. Sokoloff and R.K. Thornton, *Phys. Teach.* **35**, 340 (1997).
- [9] *Powerful Ideas in Physical Science: A Model Course. v. 1, Light and Color* (American Association of Physics Teachers, College Park, 1995).
- [10] <http://www.di.ubi.pt/~pmoura/ensino/tm0405/Cor.pdf>.
- [11] I.Pedrosa, *O Universo Da Cor* (Senac, Rio de Janeiro, 2003), 1ª ed.
- [12] <http://www.if.ufrj.br/teaching/luz/cor.html>.
- [13] <http://www.rosco.com/us/filters/ecolour.asp>.