

## Esclarecendo o significado de “cor” em física

### Introdução

**N**os textos de física elementar [1], a luz visível é definida como aquela radiação eletromagnética à qual o olho humano é sensível, e o espectro visível é associado, com base em um observador padrão, a uma faixa de comprimentos de onda compreendida entre 380 nm e 740 nm, à qual corresponde uma faixa de frequências que vai dos 790 THz aos 405 THz (a relação matemática entre o comprimento de onda  $\lambda$  e a frequência  $f$  da radiação eletromagnética no vácuo é  $\lambda f = c$ , sendo  $c$  a velocidade com que a luz se propaga no vácuo,  $c \approx 3.0 \times 10^8$  m/s). A sensibilidade do olho humano aos diferentes comprimentos de onda da radiação visível não é constante, e é ilustrada tipicamente com um gráfico semelhante ao da Fig. 1, onde se mostra a sensibilidade relativa em função do comprimento de onda.

Observa-se neste gráfico que, aos diferentes comprimentos de onda, são associadas as diferentes “cores” que o olho detecta. Assim, por exemplo, a máxima sensibilidade ocorre para luz de comprimento de onda  $\lambda \approx 550$  nm

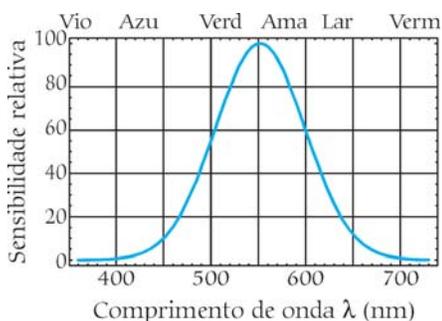


Figura 1. Sensibilidade relativa do olho humano em função do comprimento de onda.

(cor verde).

A Tabela 1 “classifica” as diferentes cores segundo o comprimento de onda e a frequência da luz. No entanto, convém sublinhar, “a atribuição de cores às várias regiões do espectro visível é algo arbitrário, já que a cor é, fundamentalmente, um conceito psicológico e não uma quantidade física mensurável” [1].

Quando a luz se propaga em um meio material, a sua velocidade ( $v$ ) é menor do que no vácuo ( $c$ ). Este fato permite definir o índice de refração  $n$  do material através da relação  $n = c/v$ . Nestas circunstâncias a relação entre o comprimento de onda ( $\lambda'$ ) e a frequência ( $f'$ ) é

$$\lambda' f' = v = \frac{c}{n} = \frac{\lambda f}{n}$$

Como a frequência da luz não depende do meio em que ela se propaga (isto é uma consequência direta das condições de fronteira que, de acordo com as equações de Maxwell, devem ser satisfeitas na superfície que separa dois meios materiais [2, 3]), temos  $f' = f$ , e o comprimento de onda da luz em um meio material vem dado por  $\lambda' = \lambda/n$ .

Neste ponto pode surgir a seguinte dúvida: o conceito de cor deve ser associado à frequência, ou ao comprimento de onda? A dúvida é pertinente, uma vez que, ao passar de um meio material para outro, o comprimento de onda muda mas a frequência não é alterada. Apenas uma destas opções parece, portanto, ser possível. O nosso objetivo aqui é o de resolver esta dúvida.

### Primeira tentativa de resposta

Reformulemos a dúvida anterior

.....  
**Manuel Fernando Ferreira da Silva**  
 Departamento de Física  
 Universidade da Beira Interior  
 Covilhã, Portugal  
 E-mail: mffs@ubi.pt  
 .....

Este artigo aborda uma questão associada ao conceito de cor e que costuma gerar diferentes interpretações acerca de sua origem.

Tabela 1: Classificação das cores segundo o comprimento de onda e a frequência da luz.

Cor	$\Delta\lambda$ (nm)	$\Delta f$ (THz)
Vermelho	$\approx 625-740$	$\approx 480-405$
Laranja	$\approx 590-625$	$\approx 510-480$
Amarelo	$\approx 565-590$	$\approx 530-510$
Verde	$\approx 500-565$	$\approx 600-530$
Ciano	$\approx 485-500$	$\approx 620-600$
Azul	$\approx 440-485$	$\approx 680-620$
Violeta	$\approx 380-440$	$\approx 790-680$

$\Delta\lambda$ : Intervalo de comprimentos de onda.  
 $\Delta f$ : Intervalo de frequências.

através da seguinte pergunta: quando um feixe de luz monocromático passa de um meio material para outro, a sua cor muda ou continua a ser a mesma? A idéia inicial que poderíamos ter para responder a esta pergunta é, pura e simplesmente, fazer uma experiência. E uma experiência possível que nos poderia ocorrer seria, colocando os nossos olhos debaixo de água, observar a cor de diversos objectos situados no ar. Uma experiência deste tipo é fácil de implementar em uma piscina ou em uma banheira, por exemplo. Faça o leitor a experiência: verificará que não se observa qualquer mudança de cor nos objetos quando eles são observados debaixo de água.

Se a cor estivesse associada ao comprimento de onda, a diferença de cor seria claramente perceptível: como o índice de refração da água é  $n \approx 1.333$ , um objeto de cor verde ( $\lambda \approx 530$  nm) parecer-nos-ia, observando-o debaixo da água, violeta ( $\lambda' \approx 400$  nm). Esta experiência permitir-nos-ia concluir, então, que a cor deve ser associada à frequência e não ao comprimento de onda.

Acontece que esta abordagem é incorreta. É verdade que o fato de observarmos um objeto em condições “normais”, (olhos em contato com o ar), ou colocando os nossos olhos debaixo de água, é totalmente irrelevante com respeito à cor observada do mesmo. Mas a razão é outra: os raios de luz que atingem a retina fazem-no, naturalmente, depois de entrar no olho, e nessa altura esses raios já não estão a deslocar-se nem no ar (primeiro caso) nem na água (segundo caso), mas no fluido ocular (no chamado humor ví-

treo, uma substância gelatinosa e transparente constituída por água em 99% e cujo índice de refração é muito semelhante ao da água:  $n_{\text{humor vítreo}} \approx 1.337$ .

A procura da resposta à nossa pergunta inicial requer, portanto, outra estratégia.

### Indo ao fundo da questão

O insucesso da abordagem anterior leva a concluir que é necessário aprofundar um pouco sobre o significado de “sensação de cor”, que, como foi referido na Introdução, é um conceito psicológico, não físico. Não pretendemos aqui alongar-nos na explicação dos complexos mecanismos envolvidos na “construção” da sensação de cor, nem das teorias existentes sobre a visão das cores; também não abordaremos fenômenos muito interessantes como a mistura das cores ou a constância das cores; limitar-nos-emos a descrever sucintamente aquilo que é relevante para os nossos propósitos (o leitor interessado em aprofundar estes e outros assuntos pode consultar [4]).

A cor que o cérebro interpreta resulta de sinais elétricos que recebe através do nervo óptico, por meio de milhões de células foto-receptoras localizadas na retina e chamadas cones e bastonetes. Existem três tipos de cones e um único tipo de bastonete; a sensação de cor é determinada pelos cones; o que distingue dois cones de diferentes tipos é a sua capacidade para absorverem os fótons de luz que incidem sobre eles, e essa capacidade depende da energia desses fótons.

Ora, a energia  $E$  de um fóton é dada por  $E = hf$  (onde  $h$  é a constante de Planck,  $h \approx 6.6 \times 10^{-34}$  J.s) e, como foi referido na Introdução, a frequência  $f$  não depende do meio no qual o raio de luz se desloca; logo, chegamos à conclusão (desta vez sim, correta) de que a cor deve ser associada à frequência e não ao comprimento de onda.

### Conclusões

Perguntará, então, o leitor, justificadamente: por que motivo é mais freqüente, na grande maioria dos textos, fazer-se a associação da cor com o comprimento de onda (como, por

exemplo, Fig. 1)?

Muito provavelmente, porque estamos mais familiarizados com a unidade “nanômetro” do que com a unidade terahertz; é-nos muito mais fácil “perceber” um comprimento de 500 nm do que uma frequência de 600 THz. A primeira quantidade pode até ser visualizada (com um bom microscópio óptico, ou com um microscópio eletrônico); a nanotecnologia está na ordem do dia. Já uma frequência na faixa dos THz está completamente fora do alcance da nossa imaginação.

Claro que este argumento, por si só, não pode servir de justificativa. Em última análise, a razão é esta: na verdade, não há nada de errado em fazer-se a associação cor-comprimento de onda, desde que o comprimento de onda seja interpretado como sendo o comprimento de onda no vácuo. Esta interpretação é crucial. Infelizmente, a quase totalidade dos textos não explicitam tal interpretação, e daí surge a questão que acabamos de resolver.

Voltando ao exemplo referido em nossa primeira tentativa de resposta: se um feixe de luz de comprimento de onda (no vácuo)  $\lambda \approx 530$  nm for recebido pelo olho, o seu comprimento de onda ao atingir a retina será  $\lambda' \approx 400$  nm, mas a sensação de cor por ele provocada será aquilo que nós convencionamos chamar cor verde, e não a cor violeta. O que é relevante, para efeitos de cor e em termos de comprimento de onda, é o valor de  $\lambda$ , não o valor de  $\lambda'$ .

Resumindo, e para finalizar: sempre que fizermos a correspondência entre cor e comprimento de onda, devemos “pensar” no comprimento de onda no vácuo.

### Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick and K.S. Krane, *Physics* (Wiley, Nova Iorque, 2002), 5th ed, v. 2, p. 886.
- [2] W.K.H. Panofsky and M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism* (Addison-Wesley, Reading, 1962), 2nd ed, p. 196.
- [3] A.B. Henrique e J.C. Romão, *Electromagnetismo* (IST Press, Lisboa, 2006), p. 189.
- [4] D.H. Hubel and T.N. Wiesel, *Brain and Visual Perception: The Story of a 25-Year Collaboration* (Oxford University Press, Oxford, 2004).