

Determinando o índice de refração do prisma na capa do álbum The Dark Side of the Moon: uma atividade de óptica para o ensino médio

Determining the refractive index for the prism displayed at The DarkSide of the Moon album cover: a high school optics activity

JAIR LÚCIO PRADOS RIBEIRO*

Universidade de Brasília

Resumo

A capa do álbum The Dark Side of the Moon, da banda Pink Floyd, apresenta o fenômeno da dispersão da luz branca em um prisma, elucidado por Isaac Newton. Este artigo descreve uma atividade simples, voltada para o ensino médio, para a determinação do índice de refração do prisma ilustrado para cada uma das seis cores representadas na imagem. Os índices foram determinados a partir do traçado dos raios em papel de seda, da medida dos ângulos correspondentes e da aplicação da Lei de Snell, e foi percebido que o índice de refração deveria ser decrescente com a frequência da radiação, condição não apresentada pelos materiais transparentes cotidianos. Propõe-se que o caráter lúdico da atividade e a possibilidade de discussão interdisciplinar tragam benefícios à aprendizagem do tópico.

Abstract

The cover of the album The Dark Side of the Moon by Pink Floyd depicts white light being scattered by a prism, a phenomenon elucidated by Isaac Newton. This article describes a simple activity for determining the refractive index of the illustrated prism in high school, for each of the six colors represented in the image. The indexes are determined from ray tracing in tissue paper, measuring of corresponding angles and application of Snell's Law, and it was realized that refractive index should decrease with the radiation frequency increase, a condition not revealed by everyday transparent materials. It is proposed that the playful nature of the activity and the possibility of interdisciplinary discussions could bring benefits to this topic learning.

*Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília, 2015.

INTRODUÇÃO

O álbum musical foi a mídia dominante para a divulgação da música popular no século XX, e apesar da sua popularidade ter diminuído no século corrente com o advento da distribuição de música pela internet, ainda apresenta relevância como produto da indústria cultural. Ao longo da história, os álbuns foram lançados em dois principais formatos físicos: o *long-play* (LP), correspondendo a um disco de vinil de 12 polegadas (aproximadamente 30 cm) com as faixas musicais gravadas em sulcos que fazem uma agulha de diamante vibrar, e o *compact disc* (CD), um disco de menores dimensões (12 cm de diâmetro), cuja leitura da informação digital armazenada é feita a partir da interferência sofrida por um feixe laser incidente em sua superfície.

A contraparte visual de um álbum era a sua capa, que poderia trazer uma óbvia foto dos artistas, uma ilustração que fosse inerente ao título do trabalho, de uma faixa ou um conceito trabalhado no álbum, ou ainda uma imagem desconexa do mesmo. Listas de capas marcantes estão disponíveis em compilações impressas [1, 4] e pulverizadas em múltiplas fontes na internet.

Entre álbuns de rock, uma das capas mais icônicas está presente no álbum *The Dark Side of the Moon*, da banda inglesa Pink Floyd, desenvolvida pelo estúdio Hipgnosis, em 1973 (fig.1). A ilustração é singular do ponto de vista da física por apresentar uma ilustração do *Experimentum crucis* de Isaac Newton (1704) sobre a natureza da luz branca, detalhado na sua seminal obra *Opticks*: um feixe de luz branca atravessa um prisma com base equilátera e, devido à refração, é disperso em suas cores constituintes, exibindo o espectro subjacente [5]. Essa imagem buscava correlacionar o som progressivo da banda com a iluminação dos palcos em suas turnês [4].

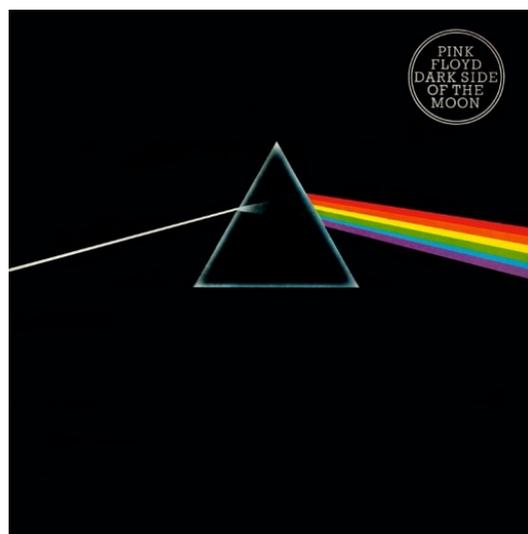


Figura 1: Capa do álbum *The Dark Side of the Moon*, da banda inglesa Pink Floyd. Ano de lançamento: 1973. Fonte: < <http://www.portalcafebrasil.com.br/wp-content/uploads/dark-side-of-the-moon-original-vinilo.jpg> >. Acesso em 24 abr. 2014.

Devido à explicação original de Newton, costuma-se associar a esse espectro sete cores (vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta), apesar de apenas seis delas serem apresentadas na capa do álbum (o anil está ausente). O espectro da luz branca emitida por um corpo negro, como sabido, apresenta-se na realidade como uma infinidade progressiva de frequências, sendo as cores apenas interpretações feitas pelo mecanismo de visão de “faixas” desse espectro.

A dispersão da luz branca em um prisma ocorre porque o índice de refração desse elemento óptico é dependente da frequência da luz incidente. Prismas ópticos são comumente feitos de vidro ou plástico, e para esses materiais, os maiores índices estão associados às maiores frequências, levando a cor vermelha a desvios menores em relação às outras cores, que possuem desvios progressivamente maiores até o violeta. A projeção do feixe de luz

emergente em uma parede produz um espectro, tradicionalmente chamado de arco-íris pelos estudantes.

Tem-se aqui uma oportunidade óbvia de se conectar uma imagem provavelmente conhecida pelos estudantes com um episódio importante da história da ciência, trazendo um diferencial para a aprendizagem [6]. As condições da realização original do experimento de Newton e a capa do álbum podem ser comparadas com uma simples recriação do experimento [7], a qual pode ser feita com um prisma e uma fonte potente de luz, tal como um retroprojektor antigo, permitindo contrastes diretos entre o experimento real, a representação imagética na capa do álbum e a descrição feita por Newton.

Nesse trabalho, apresentamos outra possibilidade de trabalho a partir da ilustração: a estimativa dos índices de refração do prisma para cada uma das seis cores presentes na imagem, com uma instrumentação comum (régua, esquadro e transferidor), e a comparação dos dados obtidos com as previsões teóricas, a fim de verificar se a situação ilustrada obedece às leis físicas. Acreditamos que a simplicidade da atividade, o baixo custo dos materiais e a facilidade para obtenção de dados e análise dos mesmos a torna adequada para o ensino da óptica no ensino médio.

I. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE DIDÁTICA

O índice de refração absoluto é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e sua velocidade no meio onde se quer calcular o índice (v). Seu valor é sempre superior a 1, e é costumeiro que o índice de refração do ar seja aproximado para esse valor.

A lei física fundamental que rege a refração foi desenvolvida por diversos estudiosos, mas dois autores tiveram seus nomes mais diretamente associa-

dos a sua formulação: Willebrord Snellius (Snell), que concebeu sua formulação em 1621 (mas não a publicou em vida), e René Descartes, que em 1637 a descobriu de forma independente [8]. Sua forma mais simples, apresentada no ensino médio, envolve a refração em um dióptro plano (fig.2), equivalente à superfície que separa dois meios com diferentes índices de refração (n_1 e n_2).

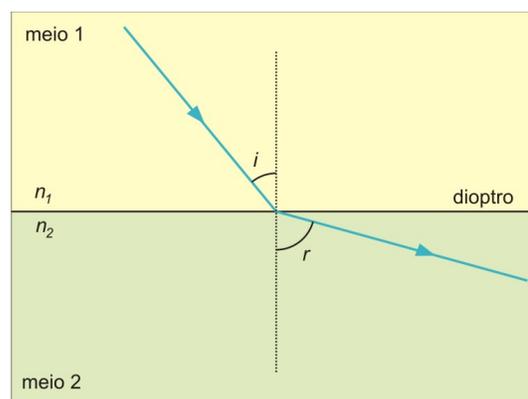


Figura 2: Refração em um dióptro plano ($n_2 < n_1$).

Para a situação apresentada na fig.2, se um raio monocromático incide em uma superfície plana formando um ângulo i com a reta normal a essa superfície e emerge formando um ângulo r com essa mesma reta, pode-se escrever:

$$n_1 \text{sen} i = n_2 \text{sen} r \quad (1)$$

O desvio dos raios de luz no prisma representado na capa do álbum *The Dark Side of the Moon* exige que o índice de refração desse elemento óptico (n_1) seja superior ao meio que o envolve (n_2), que pode ser suposto como o ar ($n_2 = 1$). Assim, o cálculo do índice de refração n_1 é ainda mais simples, a seguir:

$$n_1 = \frac{\text{sen} r}{\text{sen} i} \quad (2)$$

Cada uma das seis cores representadas, entretanto, apresentaria uma gama de valores para o

índice de refração n_1 , os quais podem ser estimados a partir da atividade apresentada nesse trabalho. O mínimo valor para o índice é obtido no limite superior da faixa, enquanto o máximo é obtido no seu limite inferior. Por exemplo, para a cor verde, a linha imaginária que separa a faixa verde da amarela na fig.1 define o mínimo índice de refração, enquanto a linha que separa as faixas verde e azul estabelece o máximo índice.

Uma cópia da fig.1 foi impressa em papel A4 para a condução da atividade junto aos estudantes. Essa figura foi coberta com papel de seda (translúcido), e sobre esse papel, o aluno deveria traçar a lápis, com o auxílio de régua e esquadro, o dioptro onde os raios de luz emergem (à direita na fig.1) e as retas normais a esse dioptro que trespõem a linha de “separação” entre duas faixas coloridas. O estudante também deveria traçar linhas que representassem os raios incidentes nesse dioptro, interligando o ponto de entrada da luz no prisma (dioptro à esquerda) com as linhas imaginárias que separam as faixas coloridas.

Para melhor visualização e precisão nas medidas, a fig.3 apresenta uma versão digital dos traçados a lápis realizados pelos estudantes, feita com o programa de uso gratuito Inkscape [9] a partir de uma ampliação de um detalhe da fig.1.

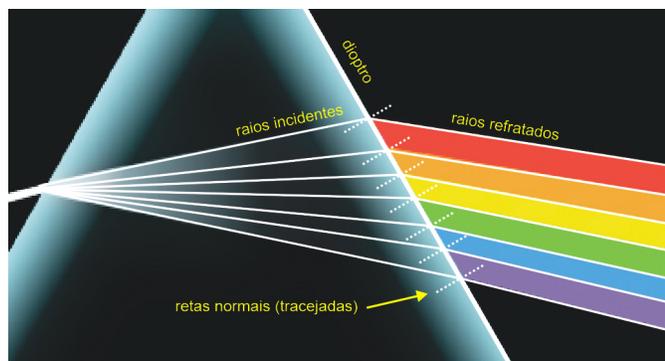


Figura 3: Detalhe da dispersão cromática no dioptro.

Para se calcular o valor do índice de refração n_1 máximo e mínimo correspondente a cada cor, basta medir com um transferidor comum os ângulos i e r (fig.3), formados entre os raios e as retas normais ao dioptro, para cada linha de separação entre as faixas, e em seguida usar a eq.2 para determinar o valor correspondente do índice n_1 . Calculadoras científicas, aplicativos ou mesmo uma tabela impressa de senos e cossenos podem ser usadas pelos estudantes para esse fim.

II. RESULTADOS E ANÁLISE

Os estudantes fizeram as medições dos ângulos sobre o papel de seda no qual foram traçados os raios luminosos, o dioptro e as retas normais. As medições dos ângulos i e r apresentadas a seguir foram obtidas pelo mesmo método, mas a partir de uma versão impressa da fig.3. Foi estimado um algarismo duvidoso após a medida do ângulo (em graus). A tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 1: Ângulos de incidência (i) e refração (r) mínimos e máximos para cada cor e índices de refração (n_2) mínimos e máximos correspondentes para cada faixa colorida.

Interface	i (graus)	r (graus)	n_1
Preto-Vermelho	18,4	38,9	1,99
Vermelho-Laranja	23,7	39,1	1,57
Laranja-Amarelo	27,7	40,4	1,39
Amarelo-Verde	31,4	41,6	1,27
Verde-Azul	35,3	42,5	1,17
Azul-Violeta	38,3	43,4	1,11
Violeta-Preto	41,8	44,0	1,04

Uma vez medidos tais valores, foi imediato o cálculo do índice (n_1) para cada interface entre duas cores. a partir da eq.2, considerando-se o prisma imerso no ar ($n_2 = 1$). Essas interfaces

foram nomeadas pelas cores separadas pelo raio refratado: por exemplo, a linha que separa o amarelo do verde, ou aquela que separa a região sem luz (preto) do espectro colorido.

A análise qualitativa da tabela 1 já permite concluir que a ilustração não corresponde à realidade cotidiana. A dispersão cromática ocorre devido à diferença de velocidade das radiações de diferentes frequências ao atravessarem o prisma. Assim, as luzes com frequências próximas às frequências de ressonância dos elétrons dos átomos e moléculas que compõem o meio transparente interagem de forma mais frequente com a matéria, sofrendo constantes absorções e remissões, e terminam por se propagar mais lentamente [10]. Na maioria dos materiais transparentes, tais como o vidro e o acrílico, essa frequência natural de ressonância se situa na região ultravioleta do espectro, fazendo com que a luz violeta (maior frequência) se propague com uma velocidade cerca de 1% menor no vidro que a luz vermelha, levando a maiores índices de refração para as cores de maior frequência. A tabela 1 apresenta o exato oposto: o índice de refração do prisma ilustrado na capa do disco *The Dark Side of the Moon* deveria ser decrescente com a frequência (ou crescente com o comprimento de onda) para que a imagem correspondesse à realidade.

Uma discussão mais detalhada pode ser conduzida junto aos estudantes a partir de uma interpretação gráfica. A fig.4, retirada de um tradicional texto de óptica [11], mostra que o índice de refração da maioria dos materiais no espectro visível (sombreado na figura) é decrescente com o aumento do comprimento de onda, ou seja, radiações como o violeta (mais curtas) apresentam maior comprimento de onda.

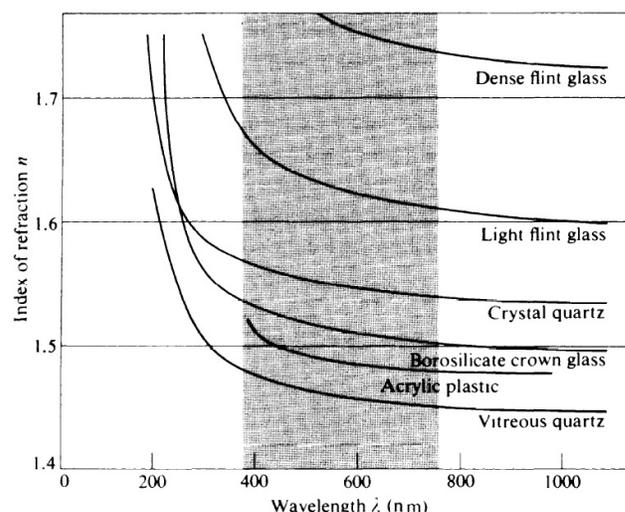


Figura 4: Dependência do índice de refração n (ordenada) em função do comprimento de onda λ (abscissa) para diversos materiais (do topo para a base: vidro flint denso, vidro flint leve, cristal de quartzo, vidro crown, acrílico, quartzo vítreo). Fonte: HETCH (2002), p.72 [11].

Para fins de comparação, é apresentado na fig.5 um gráfico representando uma linha de tendência sobre a relação entre as mesmas grandezas para o prisma aqui estudado, a partir dos dados constantes na tabela 1 e da correlação entre cores e comprimentos de onda [11], a qual se revelou fortuita, por ser feita por essa fonte para seis cores apenas, assim como na capa do álbum estudado. Os pontos azuis representam o mínimo comprimento de onda de cada cor, conforme informado pela ref. [11] e a curva vermelha representa a linha de tendência, extrapolada para as regiões do espectro infravermelho e ultravioleta. Conforme se observa, o gráfico é crescente, desafiando o exposto na fig.4. Na atividade desenvolvida em sala, entretanto, os estudantes não construíram tal gráfico, pois o conceito de comprimento de onda ainda não havia sido apresentado.

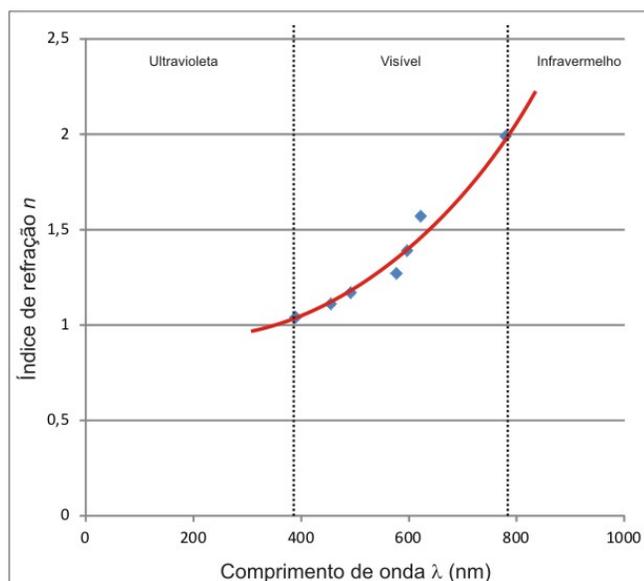


Figura 5: Dependência do índice de refração n (ordenada) em função do comprimento de onda λ (abscissa) para o prisma da capa do álbum *The Dark Side of the Moon*.

III. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Não chega a ser surpreendente o fato da imagem representada na capa do álbum não corresponder à realidade física. Afinal, é comum que o trabalho artístico ou gráfico subverta a realidade para fins estéticos ou conceituais. Entretanto, dada a popularidade da imagem aqui estudada e sua correlação direta com o fenômeno da dispersão cromática, cabe ao menos um alerta aos estudantes sobre a sua incorreção com respeito às leis físicas. Acreditamos que uma comparação entre a situação apresentada na capa do disco e um experimento usando um prisma real poderia trazer ainda maiores vantagens à compreensão do tema.

Apesar de extensa consulta à literatura acadêmica impressa e disponível em meios digitais, não

fomos capazes de encontrar um material que apresentasse índice de refração crescente com o comprimento de onda, tal como demandado para que o prisma ilustrado pudesse ser fisicamente viável. Algumas das referências consultadas [10-11] deixam claro que a maioria dos materiais apresenta índice de refração decrescente com o comprimento de onda, deixando em aberto a possibilidade de violação dessa norma, mas não explicitam quais materiais não obedeceriam a essa regra.

A atividade sugerida nesse artigo tem baixo custo e pode ser facilmente desenvolvida pelos estudantes. O caráter lúdico da atividade também não pode ser menosprezado. Uma contraposição aos processos verbalistas de ensino favorece o desenvolvimento da inteligência, facilita o estudo e estimula a criatividade [12]. A chance de trabalhar com um ícone visual da cultura mundial, provando a sua inadequabilidade física, se revela uma oportunidade fértil para a aprendizagem.

Alguns tópicos da óptica apresentada no ensino médio são muitas vezes vistos pelos professores como triviais, mas investigações aprofundadas podem revelar o contrário. A atividade descrita nesse trabalho se apresenta interessante como ponto de discussão sobre a relação interdisciplinar entre as artes visuais e a óptica. A subversão dos princípios da óptica geométrica em uma obra de arte pode chegar a enganar o observador, como a representação de uma imagem refletida no quadro *A Bar at the Folies-Bergère* (1882) de Édouard Manet, a qual só seria possível de ser vista por um observador disposto lateralmente [13]. O trabalho gráfico elaborado para a capa do disco *The Dark Side of the Moon* segue essa mesma linha: a princípio, a imagem parece realista e até mesmo um belo exemplo da dispersão cromática, e apenas uma análise mais profunda revela suas inconsistências, contribuindo para a aprendizagem do fenômeno e de seus conceitos subjacentes.

REFERÊNCIAS

- [1] KIRBY, J.; BUSCH, R. *Rock Covers*. 1ª ed. Köln: Taschen GmbH, 2014.
- [2] MORGAN, J.; WARDLE, B. *The Art of the LP: Classic Album Covers 1955–1995*. 1ª ed. New York: Sterling, 2010.
- [3] OCHS, M. *1000 Record Covers*. 1ª ed. Köln: Taschen GmbH, 2000.
- [4] THORGERSON, S.; POWELL, A. *100 Best Album Covers*. 1ª ed. New York: DK Publishing, 1999.
- [5] NEWTON, I. *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. 4a ed., William Innys, Londres, 1730.
- [6] SILVA, B. *Revista Ciências & Ideias* 3 (2), 1 (2011).
- [7] RIBEIRO, J. *Experimentos em óptica: uma proposta de reconceitualização das atividades experimentais demonstrativas*. Brasília, 76p, Proposição/Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências, Universidade de Brasília, 2010.
- [8] Wolf, K. *European Journal of Physics* 16 (1), 14 (1995).
- [9] *Inkscape 0.91 for Windows*, 2015. Disponibilidade: <https://inkscape.org/pt/>. Acesso: 18/05/2015.
- [10] HEWITT, P. *Física conceitual*. 9a ed. Porto Alegre, Bookman, 2002.
- [11] HETCH, E. *Optics*. 4ª ed., p.58-80, Pearson, Glenview, 2002.
- [12] KISHIMOTO, T. *Perspectiva* 12 (22), 105 (1994).
- [13] PARK, M. *Manet's Bar at the Folies-Bergère: One Scholar's Perspective*, 2015. Disponibilidade: www.getty.edu/art/exhibitions/manet_bar/looking_glass.html. Acesso: 03/06/2015.