



.....

**Jair Lúcio Prados Ribeiro**

Programa de Pós-Graduação em  
Ensino de Ciências, Universidade de  
Brasília, Brasília, DF, Brasil  
E-mail: jairlucio@ig.com.br

**Maria de Fátima da Silva Verdeaux**

Instituto de Física, Universidade de  
Brasília, Brasília, DF, Brasil

.....

**o enigma inicial**

A popularização do cinema tridimensional (abreviado 3D) na última década, além do surgimento de televisores que utilizam essa tecnologia, tornou o acesso a óculos com lentes polarizadoras mais comum. A Fig. 1 mostra um desses óculos (pouco estéticos, por sinal).

Um questionamento sobre uma atividade que pode ser feita com um desses óculos nos foi proposta por um estudante, e é descrita a seguir: usando um desses óculos, observe sua imagem refletida em um espelho plano. Você provavelmente conseguirá ver seus olhos parcialmente, como mostrado na Fig. 2, na qual utilizamos uma alegre bola de borracha para representar a imagem do observador refletida no espelho.



Figura 1 – Óculos RealD 3D, usado em cinemas.



Figura 2 – Representação da imagem observada no espelho com os olhos abertos.

Em seguida, feche um dos olhos, por exemplo o direito (o olho fechado é representado por um X na Fig. 3, na qual é representada a imagem do rosto do observador refletido no espelho, visto pelo mesmo). A lente que recobre o olho aberto (esquerdo) parecerá preta, não permitindo que você observe esse olho no reflexo, enquanto a lente que recobre o olho fechado (direito) ficará clara, permitindo que você observe a imagem refletida desse olho (Fig. 3). Você só pode enxergar através da lente “negra”, pois o seu outro olho está fechado, não sendo capaz de captar a luz.<sup>1</sup>

Por que isso acontece? A resposta não é trivial, e envolve o conhecimento de um importante fenômeno ondulatório: a polarização circular.

**o que é polarização?**

O fato de ser possível obter luz polarizada permitiu a construção de filtros polarizadores para máquinas fotográficas, lentes de qualidade para óculos escuros, monitores de cristal líquido (liquid crystal display, ou LCD) e projeções tridimensionais em cinemas.<sup>2</sup> Para entender a polarização, considere que existam dois tipos de ondas (Fig. 4): aquelas onde a vibração é perpendicular à propagação (transversais) e aquelas onde a vibração e a propa-



Figura 3 – Representação da imagem observada no espelho com um dos olhos fechados.

Um experimento simples pode ser conduzido com o uso de um óculos polarizador, usado em exibições de filmes 3D. Olhando-se no espelho enquanto usa esses óculos, o observador fecha um dos olhos. Nesse caso, a lente que recobre o olho oposto (aberto) parecerá negra, impedindo a visualização da imagem desse olho, enquanto a imagem refletida do olho fechado continuará sendo observada. Apesar de parecer trivial, a explicação do experimento envolve o entendimento do conceito de polarização circular.

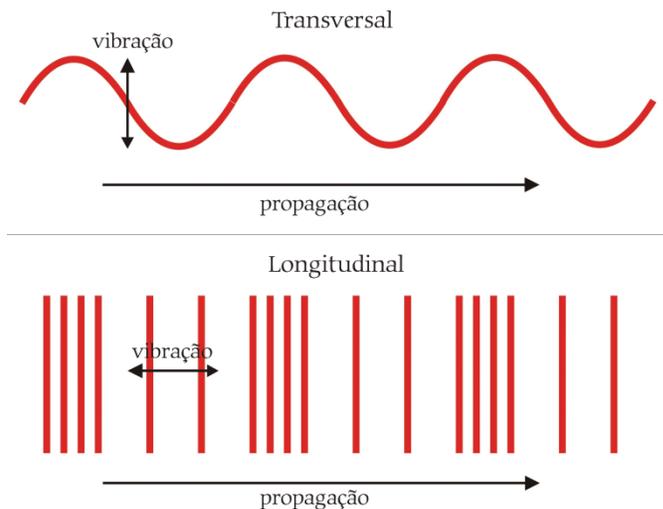


Figura 4 – Tipos de ondas.

gação são paralelas (longitudinais). As ondas eletromagnéticas, entre as quais a luz se inclui, são do primeiro tipo.

As ondas transversais apresentam uma importante propriedade: elas podem ser polarizadas, ou seja, podem apresentar um único plano de vibração. A maioria das ondas provocadas por uma única fonte é polarizada [1], tais como as ondas em uma corda, ondas eletromagnéticas geradas por uma única antena ou a luz emitida por um laser [2]. Se múltiplas fontes produzem a onda, ela usualmente não é polarizada. Um típico exemplo é a luz emitida por lâmpadas comuns, resultado da atuação independente de milhões de átomos [1]. O campo elétrico resultante em cada ponto de propagação da luz acaba possuindo múltiplas direções, e esse raio de luz é dito não polarizado. A Fig. 5 apresenta a representação de um raio de luz não polarizado, mostrando a multiplicidade dos planos de oscilação do campo elétrico do raio de luz.

Há três tipos de polarização, que podem ser simulados com uma mola *slink* (Fig. 6). A polarização plana ou linear (Fig. 5) é produzida quando oscilamos uma das extremidades da corda apenas na

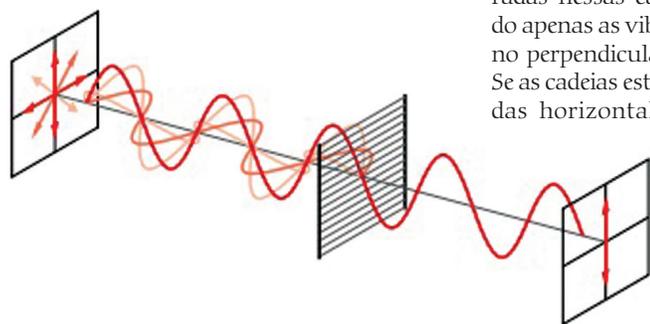


Figura 5 – Obtenção da polarização linear.

vertical (ou apenas na horizontal, ou ainda em qualquer outro plano).

Entretanto, se oscilamos a corda com velocidade constante ao longo de uma circunferência, a polarização é dita circular.<sup>3</sup> Nessa situação, pode haver dois tipos de ondas resultantes, dependendo do sentido de rotação: anti-horário (Fig. 7) ou horário (Fig. 8).

O método mais comum de obtenção de luz polarizada é a absorção por meio de um filtro de plástico especial (chamado polarizador), composto de longas cadeias carbônicas alinhadas entre si, as quais se tornam condutoras de eletricidade após imersão em iodo [1]. Polarizadores podem ser facilmente obtidos desmontando-se um visor de cristal líquido, como os existentes em calculadoras (o polarizador é o plástico de cor marrom que recobre o vidro), conforme a sugestão oferecida por Laburú e cols. [3]. Quando luz não polarizada incide no plástico, as vibrações elétricas que sejam paralelas às cadeias carbônicas são absorvidas, pois correntes elétricas são geradas nessas cadeias, restando apenas as vibrações no plano perpendicular às mesmas. Se as cadeias estiverem alinhadas horizontalmente, a luz



Figura 6 – Mola *slink* de metal.

resultante será verticalmente polarizada, e vice-versa. É importante frisar que, embora as fibras carbônicas estejam alinhadas na horizontal no exemplo (Fig. 5), o polarizador seria usualmente representado por linhas verticais (eixo de transmissão vertical), para facilitar a compreensão de que a luz emerge polarizada verticalmente após passar pelo plástico.

No cinema 3D, os polarizadores usados nos projetores e nos óculos são polarizadores circulares simplificados. A projeção envolve duas imagens, projetadas com feixes de luz que possuem polarizações opostas: por exemplo, a imagem que deve ser vista pelo olho esquerdo é projetada com polarização horária, e a imagem vista pelo olho direito tem polarização anti-horária. Se observarmos a

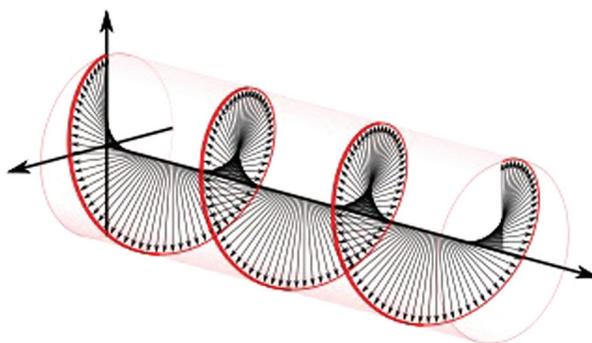


Figura 7 – Polarização circular anti-horária.

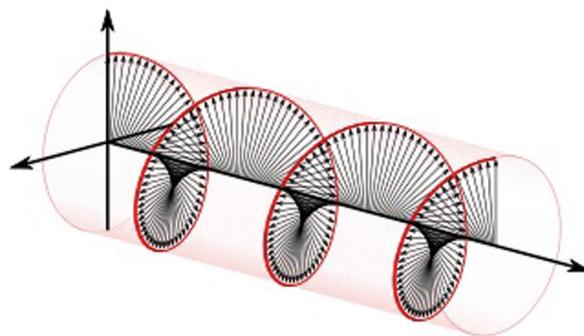


Figura 8 – Polarização circular horária.

tela sem os óculos, veremos as duas imagens sobrepostas.

Nos óculos usados pelo espectador, temos uma repetição do sistema usado pelo projetor. Um polarizador circular que só deixa passar a polarização horária é colocado sobre o olho esquerdo, e o oposto ocorre com o olho direito. Agora, as imagens são “filtradas”, e o olho esquerdo observa apenas a imagem projetada à direita da tela (mostrada em vermelho na Fig. 9), enquanto o olho direito observa somente a outra, projetada à esquerda (mostrada em verde). A diferença de ângulo de visão entre as duas é levada em conta no processamento visual pelo cérebro, o qual combina as duas informações ópticas e gera o efeito tridimensional.

Um fato adicional interessante é que o polarizador horário não deixa a luz polarizada no sentido anti-horário atravessá-lo, e vice-versa. Esse fenômeno é fácil de ser percebido com o uso de dois óculos RealD 3D, colocando um de frente para o outro (assim, os polarizadores anti-horários estarão de frente para os horários). O fato das lentes ficarem negras (Fig. 10)

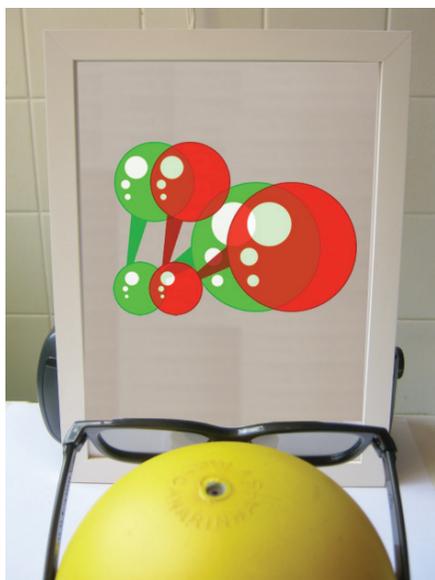


Figura 9 – Projeção simultânea de duas imagens.



Figura 10 – Superposição de polarizadores com orientação oposta.

mostra que a luz que passa por uma lente não consegue atravessar a segunda, sendo completamente absorvida.

### A resposta do enigma

Em uma reflexão em um espelho plano, a polarização circular é invertida. Ou seja, após refletir-se no espelho, a luz de polarização horária retorna com polarização anti-horária, e é esse fenômeno que explica o enigma apresentado nesse artigo. Quando você se olha no espelho, você está olhando para a luz que reflete no seu rosto, é refletida no espelho e entra em seu olho. Mas, quando há um filtro polarizador na frente do olho, a situação é mais complexa. A luz que sai do olho esquerdo (não polarizada) passa pelo polarizador horário e reflete-se no espelho, retornando com polarização anti-horária, só sendo capaz de atravessar o polarizador oposto, localizado sobre o olho direito. Assim, cada olho enxerga a imagem do olho oposto.

Ao fechar um dos olhos, por exemplo o esquerdo, a luz deixa de ser captada por esse olho. Resultado: a lente sobre o olho direito (aberto) parecerá escura, pois você não está observando a luz que a atravessa!

Já o olho fechado, o qual continua refletindo luz, é observado normalmente pelo olho aberto (parcialmente escurecido, devido à absorção de luz pelo polarizador que cobre o olho fechado), pois nada se alterou para essa trajetória dos feixes de luz.

Esperamos ter demonstrado que o fato de um experimento ser simples nem sempre está correlacionado com uma resposta imediata. Ao contrário, acreditamos que esse experimento oferece múltiplas abordagens didáticas, por permitir a inclusão de um tema cotidiano (no caso, o cinema tridimensional) em um tópico aparentemente tão formal e estéril quanto a polarização. Sem dúvida, as aparências enganam.

### Notas

<sup>1</sup>Não é possível obter uma foto real do fenômeno descrito, que só é visto pelo próprio observador que usa os óculos na frente do espelho. Ou seja, para os observadores externos (como a própria câmera), o efeito não é visível.

<sup>2</sup>Também é possível a obtenção de fotos tridimensionais sem o uso de polarizadores, apenas com filtros coloridos. Aplicativos para celulares e câmeras digitais já produzem tais fotos automaticamente. Uma descrição detalhada de como se tira uma foto tridimensional com uma câmera comum é fornecida por Lunazzi [4].

<sup>3</sup>Uma oscilação em formato de elipse gera uma onda com polarização elíptica, a qual não é discutida no presente trabalho.

### Referências

- [1] P. Tipler, P. Física (Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1984), v. 2b, 2ª ed., p. 864-872.
- [2] M. Cavalcante e C. Tavolaro, Física na Escola v. 7:2, 73 (2006).
- [3] C. Laburú, A. Simões e A. Urbano, Caderno Catarinense de Ensino de Física v. 15, 192 (1998).
- [4] J. Lunazzi, Revista Brasileira de Ensino de Física v. 33, 2304 (2011).