

Espalhamento Rayleigh e efeito Tyndall: Explicando e simulando o azul do céu

.....

A.V. Andrade-Neto

Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil

Brenda Pinheiro Carneiro*

Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil

Maíra Paixão

Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil

RESUMO

Neste trabalho revisitamos o experimento de espalhamento da luz em uma cuba d'água que simula a cor azul do céu e os tons vermelho e alaranjado do nascer e do pôr do sol na atmosfera terrestre. Além da observação experimental do espalhamento da luz, principal mecanismo que causa o azul do céu, observamos também a polarização da luz espalhada e a absorção da luz pelo meio. Essas observações são acompanhadas de uma discussão detalhada dos conceitos físicos envolvidos. Em particular, chamamos a atenção para o fato de que o principal mecanismo de espalhamento no experimento realizado é o efeito Tyndall e não o espalhamento Rayleigh.

Palavras-chave: azul do céu; espalhamento Rayleigh; efeito Tyndall

.....

1. Introdução

Em um dia claro de sol, com poucas nuvens, podemos vislumbrar um lindo céu azul em meio a algumas nuvens brancas. Já no nascer e no pôr do sol, na direção em que o sol nasce ou se põe, respectivamente, o céu adquire tons de vermelho e alaranjado. Qual a explicação para esses fenômenos? De acordo com a física, isso resulta do espalhamento da luz por moléculas da atmosfera terrestre (veja a seção 2 para mais detalhes).

É bem conhecido que esses fenômenos podem ser simulados por um experimento simples e de baixo custo em ambiente escolar ou em espaço não formal [1, 2]. O experimento consiste, basicamente, em pingar algumas gotas de leite em uma vasilha transparente que contém água e iluminar o sistema com uma fonte de luz, observando a luz espalhada pela solução leite-água. O espalhamento é apenas um dos variados e interessantes fenômenos físicos que têm origem na interação entre a luz e a matéria, dentre os quais podemos citar a absorção, a dispersão e efeitos de polarização, dentre muitos outros.

Do ponto de vista da física clássica, a luz é uma onda eletromagnética cujo comportamento é descrito pelas equações de Maxwell [3]. A natureza ondulatória da luz foi demonstrada em 1801 pelo físico inglês Thomas Young, o qual verificou experimentalmente que a luz, sob condições apropriadas, apresenta interferência, que é um efeito tipicamente ondulatório. A natureza eletromagnética da luz foi evidenciada em 1865, quando o escocês James Clerk Maxwell previu teoricamente a existência de ondas eletromagnéticas transver-

sais que se propagam no vácuo à velocidade da luz. Esse caráter transversal significa que a luz possui propriedades distintas para diferentes direções perpendiculares à direção de propagação. Essa propriedade da luz é chamada “polarização”. Quando o campo elétrico da onda vibra em uma direção que se mantém fixa, dizemos que a onda é linearmente polarizada. Contudo, a luz solar ou a luz de fontes comuns tais como lâmpadas, não é polarizada. Essas fontes possuem um número extremamente elevado de moléculas que emitem luz polarizada aleatoriamente em todas as direções transversais possíveis. A luz assim produzida é chamada luz natural ou luz não-polarizada, a qual torna-se linearmente polarizada ao atravessar um filtro polarizador, como mostra o esquema da Fig. 1. As flechas indicam o sentido de vibração do campo elétrico da onda.

O azul do céu tem origem no espalhamento da luz do Sol por moléculas presentes na atmosfera terrestre.

Além da polarização linear, a luz pode ser circularmente ou elipticamente polarizada. A Ref. [4] apresenta um experimento simples e interessante que envolve o conceito de polarização circular.

2. Espalhamento da luz: efeito Tyndall e espalhamento Rayleigh

Quando a luz incidente, após interagir com a matéria, é redirecionada em muitas direções diferentes, dizemos que ocorre espalhamento da luz. O espalhamento da luz fundamentalmente depende do comprimento de onda da luz incidente, do tamanho da partícula espalhadora e das propriedades óticas da partícula relativamente à sua vizinhança. Nesse processo, a luz é absorvida e rapidamente emitida (processos de espalhamento ocorrem em tempo da

*Autor de correspondência. E-mail: brendapinheiroc@gmail.com

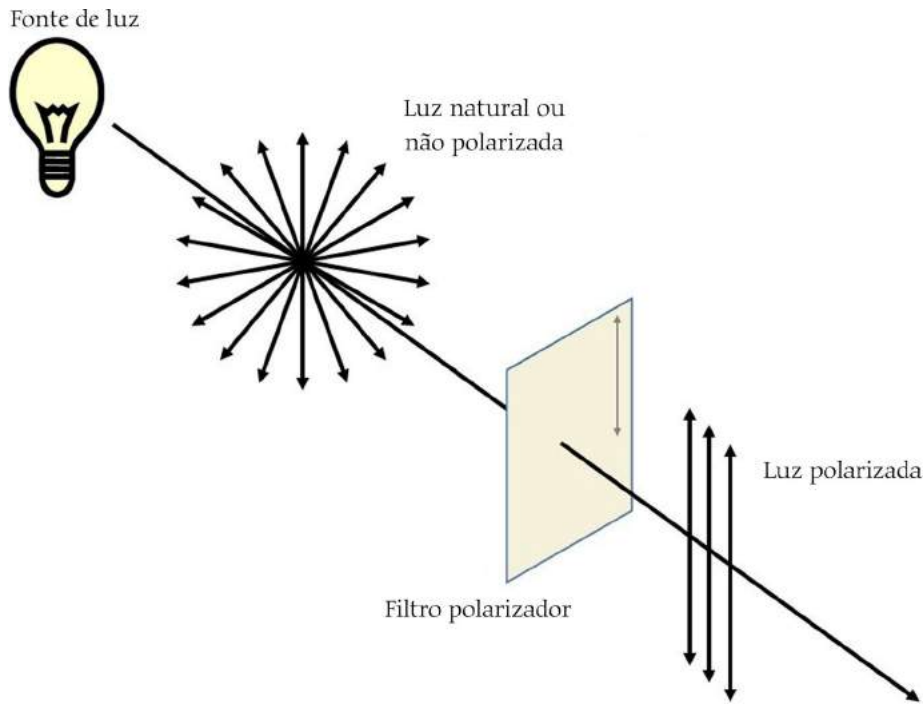


Figura 1 - Um feixe de luz natural (não polarizado) torna-se linearmente polarizado ao atravessar um filtro polarizador.

ordem de 10^{-14} s ou ainda menores). A luz espalhada pode ter ou não a mesma frequência (energia) da luz incidente. No primeiro caso, falamos em espalhamento elástico da luz. Quando a frequência da luz espalhada é diferente da luz incidente, falamos em espalhamento inelástico da luz, também conhecido como espalhamento Raman. Para as finalidades do presente trabalho, é suficiente considerarmos apenas o espalhamento elástico da luz.

De maneira geral, o espalhamento elástico da luz é classificado em dois tipos, a depender do tamanho da partícula espalhadora: espalhamento Mie e espalhamento Rayleigh. Se as dimensões das partículas espalhadoras são da

mesma ordem ou maiores que o comprimento de onda da luz, o fenômeno é denominado espalhamento Mie, em homenagem ao físico alemão Gustav Mie. Para este caso, o espalhamento é fracamente dependente do comprimento de onda da luz incidente. Assim, a luz é espalhada de forma igual em todos os comprimentos de onda, resultando em um tom esbranquiçado na luz espalhada. Como as gotículas que formam as nuvens possuem raio da mesma ordem do comprimento de onda da luz visível, o espalhamento realizado por essas

O espalhamento da luz na atmosfera pode ser simulado com um experimento de baixo custo em ambiente escolar ou em espaço não formal

Uma contribuição importante para a explicação do azul do céu foi dada em 1871 pelo físico inglês Lord Rayleigh. Em seu modelo, Rayleigh considerou que as dimensões lineares das partículas espalhadoras são muito menores que o comprimento de onda da luz. Ele demonstrou que a intensidade da luz espalhada por gases é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da luz incidente (ou diretamente proporcional à quarta potência da frequência da onda), ou seja,

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Para a luz visível, o comprimento de onda está situado no intervalo entre 390 nm a 780 nm (1 nm corresponde a um bilionésimo do metro, ou seja, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Logo, as componentes correspondentes a comprimento de onda menores do espectro luminoso (como o azul) serão muito mais espalhadas do que aquelas correspondentes a comprimentos de onda maiores (como o

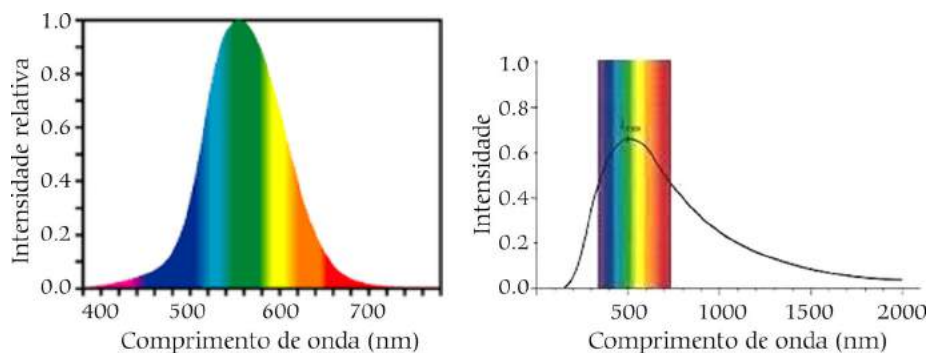


Figura 2 - (a) Gráfico que representa a sensibilidade relativa do olho humano para diferentes comprimentos de onda da luz visível. (b) Espectro da luz solar em função do comprimento de onda, com destaque para a região visível. Fonte: Wikipédia.

vermelho). Como $\lambda_{\text{azul}} = 1,8 \lambda_{\text{vermelho}}$, a luz azul do espectro solar é espalhada com intensidade aproximadamente 10 vezes maior que a componente vermelha. É sabido que o violeta possui uma frequência maior (comprimento de onda menor) que o azul e, portanto, é mais espalhado do que o azul. Então por que não enxergamos o céu violeta? A razão é que o olho humano é mais sensível ao azul do que ao violeta, como mostra a Fig. 2a. Outra razão é que a intensidade do espectro solar é maior no azul do que no violeta, conforme a Fig. 2b.

Considerando um ar limpo e seco (sem vapor d'água), os elementos mais abundantes presentes na atmosfera terrestre são o nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%), ocupando assim quase 99% do volume do ar seco e limpo [5]. O tamanho típico dessas moléculas é da ordem de 0,1 nm, sendo, portanto, muito menores que o comprimento de onda da luz visível. Logo, o espalhamento dominante pelos gases que formam a atmosfera terrestre é do tipo Rayleigh. A luz do sol, ao incidir na atmosfera terrestre, irá interagir com as moléculas de N_2 e O_2 , produzindo luz espalhada em direção ao solo em um grande ângulo em relação à direção da luz incidente, como mostra a Fig. 3. Assim, quando olhamos para o céu, a luz que atinge nossos olhos é a luz espalhada pela atmosfera, com exceção daquela que vem diretamente do Sol. Isso significa que, se não existisse a atmosfera, o céu seria escuro também durante o dia, como acontece na Lua. Essa luz, de acordo com a lei de Rayleigh, será predominantemente percebida como azul, fornecendo o azul do céu.

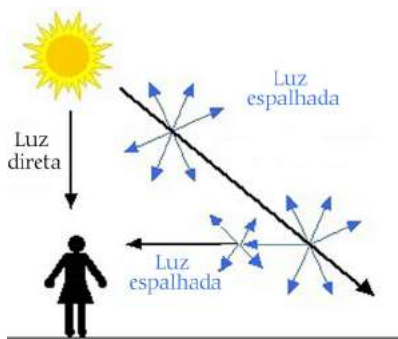


Figura 3 - Um observador na Terra recebe a luz que vem diretamente do sol (luz direta), bem como a luz que após interagir com as moléculas da atmosfera é espalhada em todas as direções (luz espalhada). É essa luz espalhada que fornece o azul do céu.

Por outro lado, no pôr do sol, a distância percorrida pela luz solar na atmosfera é maior do que em qualquer outro horário, já que nesse caso a maior parte da luz solar chega à superfície terrestre quase tangencialmente. Isso significa que a componente azul é tão espalhada que acabam sobrando apenas as componentes correspondentes a comprimentos de onda menores e, assim, vemos o céu nos tons vermelho e alaranjado. Do ponto de vista microscópico, o campo elétrico da luz incidente induz um momento de dipolo nas moléculas do ar, fazendo com que vibrem com a mesma frequência da radiação incidente, irradiando luz em todas as direções.

3. Materiais e procedimento experimental

Nesta seção discutiremos uma experiência de execução simples que foi elaborada com o intuito de simular o fenômeno físico que produz o espalhamento da luz na atmosfera terrestre, que torna o céu azul e o pôr do sol avermelhado. Para melhor apreciação dos fenômenos, utilizamos três diferentes fontes de luz. Também verificamos a polarização da luz.

3.1. Materiais utilizados

Os seguintes materiais foram utilizados:

- Leite desnatado
- Aquário de vidro
- Água
- Lanterna branca de LED
- Laser vermelho
- Laser verde

- Polarizador Bender²

3.2. Procedimento experimental

O experimento foi realizado numa sala escura, pois é necessário ter pouca luz para melhor visualização do efeito. Inicialmente foi colocada água até aproximadamente a metade do aquário e em seguida posicionamos a fonte de luz branca para observarmos o comportamento da luz apenas na água; o mesmo procedimento foi repetido utilizando lasers vermelho e verde. Verificamos que nesse caso a água se comporta como um meio homogêneo e transparente, no qual a luz é muito pouco espalhada e sua trajetória retilínea pode ser vista. Uma parede com azulejos brancos foi utilizada como tela para projeção da luz transmitida (Figs. 4a e 5a).

Em seguida, foi colocada uma pequena quantidade de leite desnatado no aquário (as moléculas do leite representam as partículas da atmosfera responsáveis pelo espalhamento da luz) e repetido o procedimento anterior para a luz branca e vermelha. Observa-se agora que a luz começa a ser espalhada e, no caso da luz branca, a água adquire um tom azulado, conforme pode ser visto na Fig. 4b. Por sua vez, na luz transmitida através do aquário e que incide na parede, Fig. 4a, observa-se um tom alaranjado, o que significa que as componentes de menores comprimentos de onda foram retiradas. A Fig. 4c mostra a imagem quando substituímos a lanterna por um laser vermelho.

A seguir, foi acrescentado um

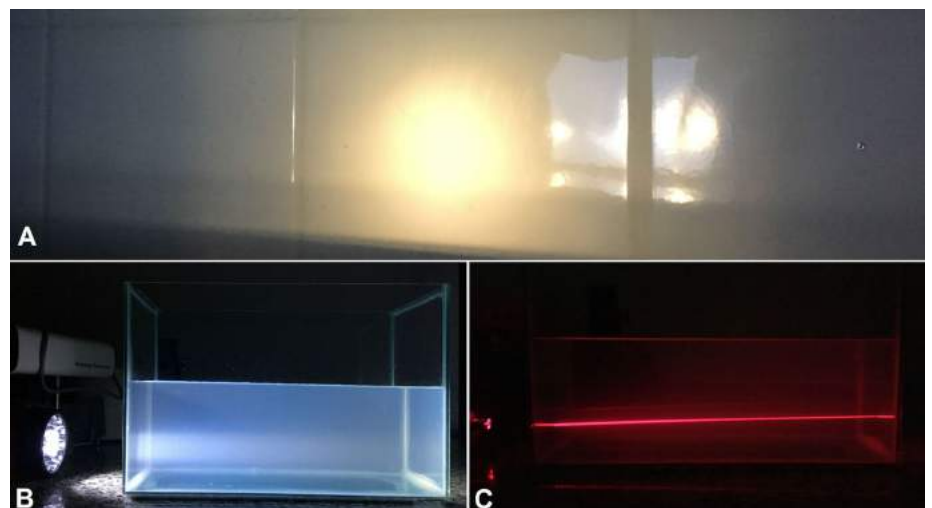


Figura 4 - (a) Imagem frontal da luz projetada na parede após atravessar o aquário. (b) Espalhamento da luz branca. (c) Espalhamento da luz vermelha.

pouco mais de leite e repetido o procedimento anterior, gerando as imagens mostradas na Fig. 5. Comparando-se as Figs. 4 e 5 percebe-se uma maior intensidade no espalhamento tanto da luz branca como da luz vermelha, quando acrescentamos mais leite à água. Adicionalmente, observa-se que, no caso da luz branca, a parte direita do aquário (lado oposto à posição da fonte da luz) adquire um tom menos azulado, Fig. 5b, o que implica em uma luz mais avermelhada projetada na parede, Fig. 5a.

Por fim, foi colocado ainda mais leite, cuja quantidade agora é suficiente para tornar a absorção grande o bastante para impedir a projeção da luz transmitida na parede. Isso foi verificado tanto para a luz branca quanto para a luz monocromática (verde e vermelha), como pode ser visto na Fig. 6. Como a potência do laser verde utilizado é muito maior que a potência do laser vermelho, a Fig. 6b é mais brilhante em comparação com a Fig. 6c.

Outro efeito observado foi o da polarização parcial da luz espalhada quando vista através de um polarizador, tanto da luz branca, Fig. 7, quanto da luz vermelha, Fig. 8. Na Fig. 7a o eixo do polarizador está na direção vertical, que é a direção na qual foi observada a máxima intensidade da luz espalhada. Na Fig. 7b o polarizador foi girado em 90° em relação à posição da Fig. 7a e observou-se nessa nova posição que a intensidade da luz é mínima. Isso significa que a luz espalhada é parcialmente polarizada (a luz natural não muda sua intensidade quando giramos um polarizador) e que a sua direção de polarização é vertical.

4. Discussões e conclusões

Neste trabalho, repetimos o experimento bastante conhecido de reproduzir o azul do céu utilizando uma cuba com água acrescida de uma pequena quantidade de leite (representando a atmosfera) e uma lanterna (representando o sol), como pode ser visto na Fig. 9. Na Fig. 9a temos apenas água e praticamente não há espalhamento da luz. Na Fig. 9b o tom azulado da água é bem visível. À medida que aumentamos a quantidade de leite na água, (Figs. 9b e 9c), a absorção da luz torna-se cada vez mais dominante. Também utilizamos fontes de luz monocromática (lasers vermelho e verde), com as quais também se observa o fenômeno de espalhamento. Na Fig. 10 são mostradas as imagens para a luz vermelha.

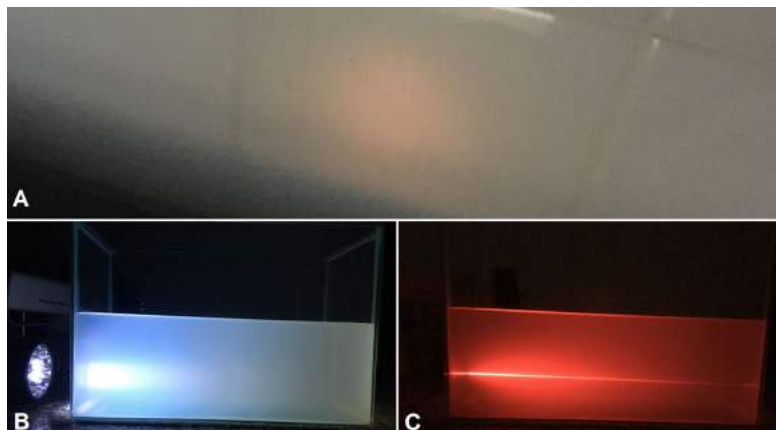


Figura 5 - Espalhamento e absorção da luz. (a) Imagem frontal da luz projetada na parede após atravessar o aquário. (b) Espalhamento e absorção da luz branca. (c) Espalhamento e absorção da luz vermelha.

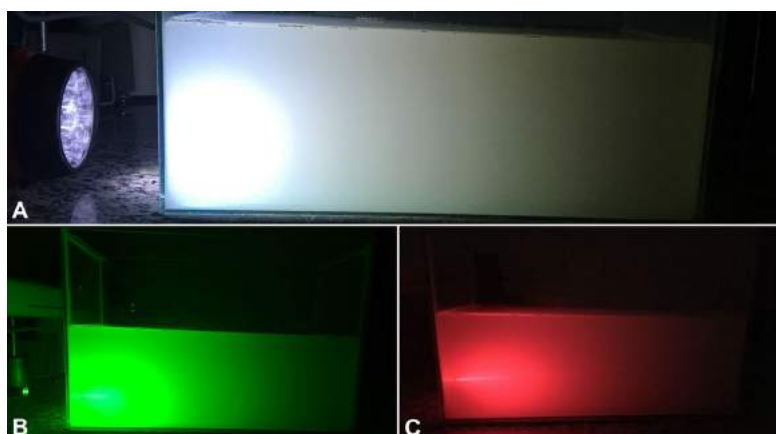


Figura 6 - Espalhamento e absorção da luz. Agora, a absorção da luz à medida que atravessa o aquário é mais intensa. (a) Espalhamento e absorção da luz branca. (b) Espalhamento e absorção da luz verde. (c) Espalhamento e absorção da luz vermelha.

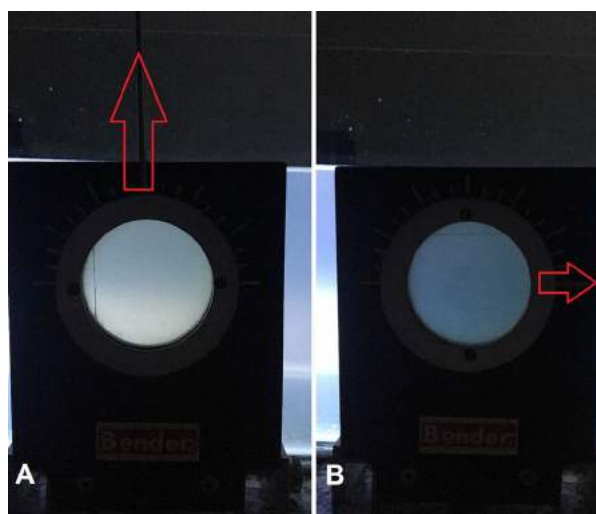


Figura 7 - Verificando a polarização da luz branca espalhada. A seta indica a direção do eixo do polarizador. (a) Eixo do polarizador na direção vertical. (b) Eixo do polarizador na direção horizontal.

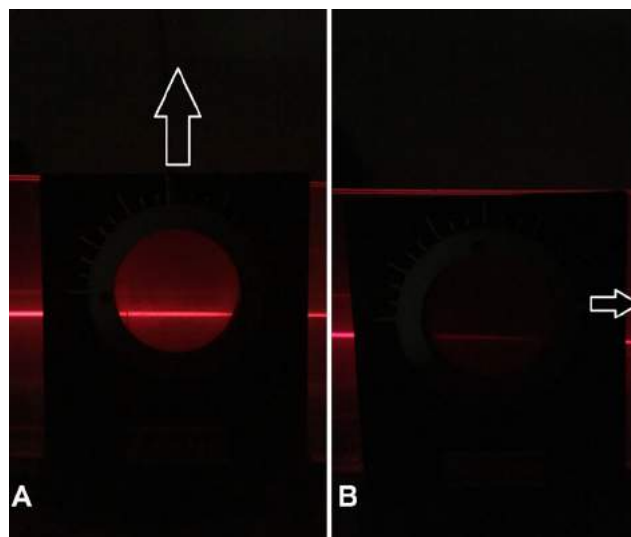


Figura 8 - Verificando a polarização da luz vermelha espalhada. A seta indica a direção do eixo do polarizador. (a) Eixo do polarizador na direção vertical. (b) Eixo do polarizador na direção horizontal.

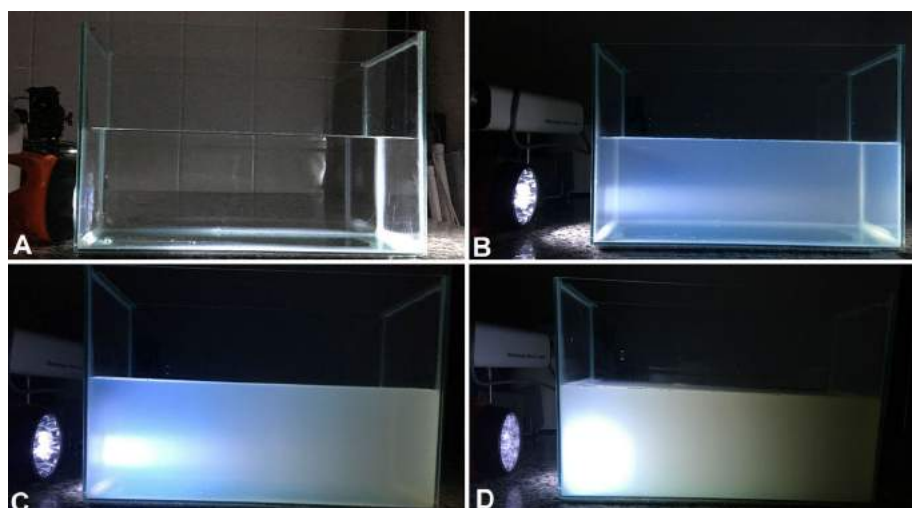


Figura 9 - Espalhamento da luz branca. (a) Água sem leite. (b) Água com pouco leite. (c) e (d) Água com maiores quantidades de leite.

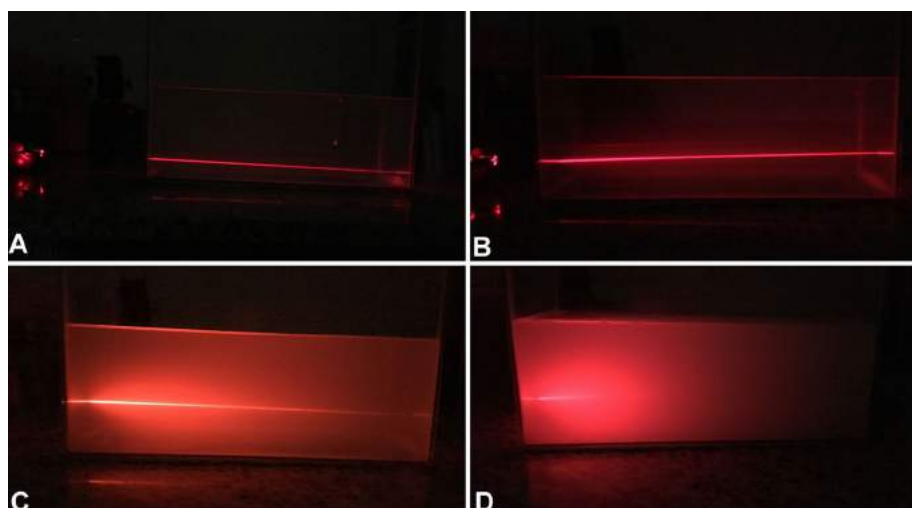


Figura 10 - Espalhamento da luz vermelha. (a) Água sem leite. (b) Água com pouco leite. (c) e (d) Água com maiores quantidades de leite.



Figura 11 - Vista frontal da luz incidente sobre uma parede branca após atravessar o aquário, para duas quantidades de leite. (a) Água com pouco leite. (b) Água com maiores quantidades de leite.

Por sua vez, na Fig. 11 vemos imagens (vista frontal) da luz que incide sobre uma parede branca após atravessar o aquário, para duas quantidades diferentes de leite disperso na água.

Este é um experimento realizado com materiais acessíveis, de baixo custo (o aquário de vidro pode ser substituído por uma garrafa PET transparente), de fácil execução e que pode ser feito

inclusive em sala de aula. Além disso, é uma ótima motivação para o estudo de importantes conceitos associados à luz, tais como polarização, absorção e espalhamento. Este último propicia a explicação para a cor azulada do céu e os tons vermelho e alaranjado do pôr do sol e, tecnicamente, é denominado espalhamento Rayleigh.

Contudo, é importante enfatizar

que a experiência aqui descrita, apesar de simular muito bem o azul do céu (Fig. 9), rigorosamente não é um espalhamento Rayleigh, já que o leite disperso na água constitui um sistema coloidal e, nesse caso, o espalhamento da luz é conhecido como efeito Tyndall. Esse fato é importante e deve ser destacado.

Referências

- [1] A.J. Ortiz, C.E. Laburú, O.H.M. da Silva, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **27**, 599 (2010).
- [2] M. Rocha, T. Fujimoto, R. Azevedo, M. Muramatsu, Revista Brasileira de Ensino de Física **32**, 3501 (2010).
- [3] A.V. Andrade-Neto, Caderno de Física da UEFS **4**, 23 (2006).
- [4] J. Ribeiro, M. Verdeaux, Física na Escola **13**(1), 14 (2012).
- [5] A.A. Dias, A.V. Andrade-Neto, M.R. Miltão, Caderno de Física da UEFS **5**, 21 (2007).

Notas

¹Sistemas coloidais são sistemas nos quais um ou mais componentes são partículas com pelo menos uma de suas dimensões no intervalo entre 1 nm e 1 μ m, dispersas em um solvente cujas moléculas têm dimensões muito menores. São exemplos de sistemas coloidais: shampoo, cremes dentais e leite. As caseínas representam 80% da proteína total do leite e elas são compostas de partículas coloidais de formato arredondado de tamanho aproximado 200 nm.

²Um polarizador é um filtro que permite a passagem da luz em uma direção específica. Caso a escola não disponha de um polarizador, pode-se utilizar óculos de sol com lentes polarizadas, que podem ser obtidos a preço acessível.