

Produtos e Materiais Didáticos

O azul do céu e o vermelho do pôr-do-sol

(Blue skies and red sunsets)

M.N. Rocha, T.G. Fujimoto, R.S. Azevedo e M. Muramatsu¹

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
Recebido em 9/11/2010; Aceito em 28/2/2010; Publicado em 17/2/2010

Este trabalho expõe uma dedução da intensidade da luz espalhada por pequenas partículas na atmosfera, o que explica o porquê do azul do céu e o vermelho do pôr-do-sol. Mostramos, também, uma experiência bem simples, sobre os temas abordados, que foi elaborada com o intuito de aplicar a alunos do Ensino Médio.

Palavras-chave: pôr-do-sol, cores do céu, espalhamento Rayleigh.

This paper presents a deduction to the light intensity scattered by small particles in the atmosphere, which explains why the sky is blue and the sunsets is red. We also show a very simple experience about the subjects treated, which was prepared in order to apply to high school students.

Keywords: sunsets, color of the sky, Rayleigh scattering.

1. Introdução

O tema abordado está baseado na interação da luz com a matéria, pois muitos fenômenos, e este é um deles, podem ser explicados através de fenômenos atômicos. Na teoria quântica dizemos que a luz é constituída por pacotes, com energia bem definida, chamados fótons. Esta teoria também nos diz que a energia de átomos (ou moléculas) assume valores bem definidos e que são característicos para cada átomo. Estes valores representam o espectro de energia do átomo. Estes naturalmente encontram-se em estado de menor energia - estado fundamental. Quando um átomo é exposto a um fóton de energia igual à diferença de energia entre dois níveis atômicos, ele absorve tal fóton e vai para um estado excitado. Ao retornar para seu estado fundamental ele emite esta diferença de energia em forma de um fóton. Neste caso dizemos que a luz está em ressonância com o átomo [1, 2].

Porém, o que ocorre, geralmente, que é a interação da luz de qualquer frequência com o átomo. Isto é responsável pela aparência dos objetos que vemos. Esta interação não-ressonante não é descrita pela teoria quântica, mas podemos descrever por teorias mais simples. Estamos interessados no caso em que a luz do sol atinge uma molécula da atmosfera. Como a frequência da onda incidente está na região da luz visível (luz do sol) e, portanto menor do que a frequência natural das moléculas existentes na atmosfera terrestre (que estão na região do ultravioleta), pretende estudar a interação

da luz com a matéria com a re-emissão da luz sem a ocorrência da mudança da frequência incidente [3].

Neste caso, vamos considerar que o movimento oscilatório dos elétrons em torno do núcleo equivale a dipolos elétricos oscilantes e que a luz é uma onda eletromagnética que vai interagir com o dipolo [3, 4]. Além disso, a luz solar é uma mistura de luzes de vários comprimentos de onda. O movimento de um oscilador exposto a essa mistura é a superposição dos movimentos devido a cada comprimento de onda. Então estuda-se separadamente a interação da luz de cada comprimento de onda com o dipolo [5]. Quando a frequência da onda incidente aumenta, mais luz é dispersa elasticamente. A dispersão e a absorção da energia da onda incidente e a re-emissão de uma parte dessa energia. Lord Rayleigh foi quem estudou pela primeira vez a relação entre a intensidade da radiação dispersa (ou espalhada) e a frequência da radiação incidente e chegou à conclusão que a intensidade da radiação espalhada é proporcional a quarta potência da frequência da radiação incidente.

Esta dispersão por objetos de dimensões reduzidas em relação ao comprimento da onda da luz incidente é chamada de espalhamento Rayleigh [3, 4].

2. Teoria: o dipolo oscilante e o espalhamento Rayleigh

Como vimos, o espalhamento da radiação pelas moléculas atmosféricas é idêntico a radiação emitida

¹E-mail: mmuramat@if.usp.br.

por um dipolo oscilante que nada mais é do que duas cargas puntiformes de sinal oposto separadas por uma distância d e conectadas por um fio muito fino. Em um determinado tempo t a carga superior é $q(t)$ e a carga inferior é $-q(t)$. É mais natural pensarmos que as cargas tenham um valor constante e que o fio oscila. Este modelo origina o mesmo resultado, porém, nessa situação, há um problema no cálculo dos potenciais retardados, daí a preferência pelo modelo adotado.

Vamos considerar que as moléculas estão na origem do sistema e nós observamos o espalhamento da radiação a um ângulo θ em relação às moléculas e que a distância do observador ao dipolo é muito maior que a distância entre as cargas do dipolo. O esquema de um dipolo elétrico está representado na Fig. 1.

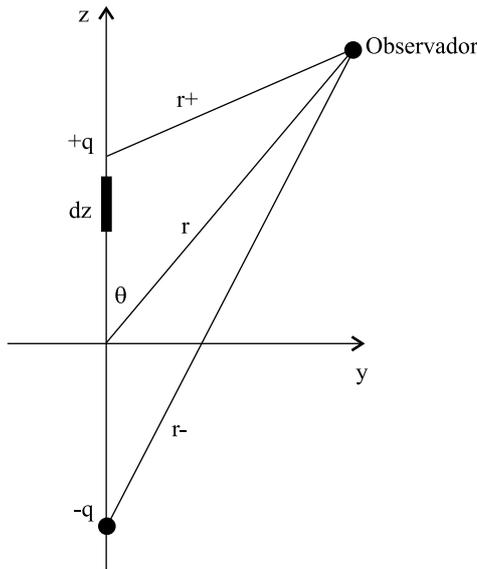


Figura 1 - Dipolo elétrico oscilante, considerando que a distância entre as cargas do dipolo é muito pequena em relação à sua distância ao observador.

Através do modelo adotado, podemos obter a intensidade I da radiação calculando a média do módulo do vetor de Poynting, cuja dedução se encontra na Ref. [5]

$$I \propto \langle |\vec{S}| \rangle, \quad (1)$$

$$\langle \vec{S} \rangle = I \hat{r}, \quad (2)$$

$$I \propto \left(\frac{\mu_0 p_0^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2 c r^2} \right) \omega^4, \quad (3)$$

Onde ω é a frequência da radiação incidente.

A Eq. (3) confirma que, realmente, a intensidade da luz irradiada aumenta com a quarta potência da frequência. É a lei de Rayleigh. A cor azul do céu é uma consequência da lei de Rayleigh. A luz na extremidade azul do espectro visível ($\lambda \approx 4000 \text{ \AA}$) é muito mais espalhada do que a luz na extremidade vermelha do espectro ($\lambda \approx 7000 \text{ \AA}$). A razão entre as intensidades da radiação re-emitada é da ordem de $(7/4)^4 \approx$

9. Note a Eq. (2), ou seja, não há radiação na direção do eixo do dipolo. Como as ondas eletromagnéticas são transversais, os dipolos oscilam no plano ortogonal aos raios do Sol. No arco celestial perpendicular aos raios do Sol, onde a cor azulada fica mais pronunciada, os dipolos oscilam ao longo de uma linha que não irradia para o observador, portanto a luz recebida pelo observador (num ângulo θ) é polarizada perpendicularmente a luz do Sol.

Quando o Sol está perto da linha do horizonte, os raios ficam tangentes à superfície da Terra e a luz vem diretamente para nós (os observadores). Como os raios de luz atravessam uma espessura muito grande de ar, os azuis e os violetas já foram espalhados para várias direções diferentes da direção de incidência, mas os amarelos e os vermelhos continuam a propagar-se ao longo da mesma direção dando origem a aparência cor de fogo de um por de Sol na Terra [4, 5].

Toda essa teoria foi baseada no espalhamento da luz do Sol por partículas muito pequenas - as moléculas contidas na atmosfera. Sem atmosfera, o céu diurno seria tão negro quanto o espaço exterior, seria detectada apenas a luz que incidisse na direção do observador.

Notem, aqui, que foi negligenciado o fato de um volume de ar conter muitas moléculas e deveríamos saber combinar as contribuições individuais de cada uma, então foi suposto que cada molécula produz uma intensidade espalhada de acordo com a Eq. (3) e a intensidade resultante é a soma destas intensidades.

3. Simulando o azul do céu e o avermelhado do pôr-do-sol

Nessa seção está exposta uma experiência de fácil execução que pode ser aplicada a alunos do Ensino Médio e Fundamental.

3.1. Materiais

- Leite desnatado
- Uma cuba de vidro ou plástico retangular transparente
- Água
- Uma lanterna com feixe estreito
- Uma colher

3.2. Procedimento

Preencha a cuba retangular com aproximadamente 3/4 de água. Posicione a lanterna à meia altura da cuba. A cuba com água representa a atmosfera terrestre e a lanterna, o Sol. Veja o esquema de montagem na Fig. 2.

Acrescente uma pequena quantidade de leite desnatado na cuba retangular e mexa com a colher. As partículas presentes no leite representam as partículas da atmosfera e o modelo é mais efetivo para partículas de dimensões reduzidas em relação ao comprimento de

onda da luz incidente. No caso do leite desnatado as moléculas de gorduras são retiradas, reduzindo o tamanho dos objetos espalhadores. Tente observar a coloração da água perpendicularmente à direção de incidência da luz, verificando que conforme o leite é acrescentado, a água adquire um tom azulado como a do céu, indicado na Fig. 3.

Se observarmos o lado oposto de incidência da luz (na direção de incidência) veremos a lâmpada tornando-se cada vez mais avermelhada, pois a luz depois de percorrer toda a cuba (uma camada grande de água), já teve a luz azul toda espalhada, sobrando apenas a luz com o comprimento de onda na faixa do vermelho, representado na Fig. 4.

Observações: Caso esses tons não sejam conseguidos no primeiro momento, acrescente aos poucos (se puder, use um conta-gotas) mais quantidades de leite até que o fenômeno seja visualizado, como mostra na seqüência da Fig. 4. No local a ser realizada a experiência, deve haver o mínimo de luz para que seja possível observar melhor o experimento.

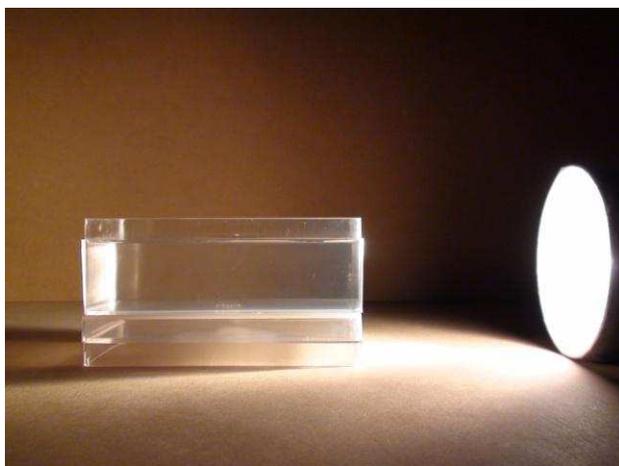


Figura 2 - Montagem do experimento.

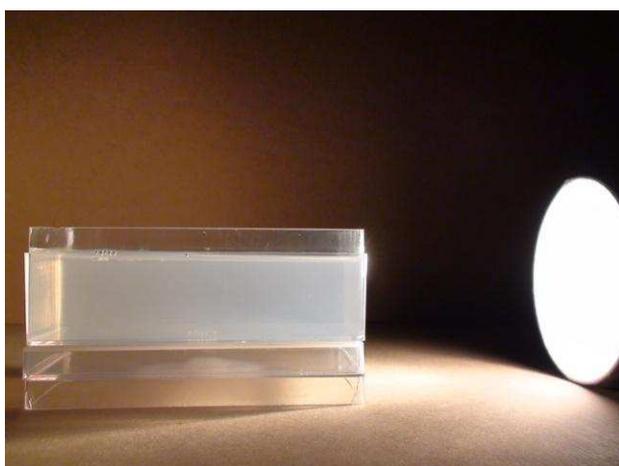


Figura 3 - Simulando o azul do céu.

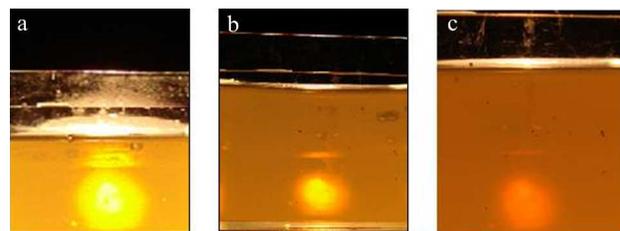


Figura 4 - Simulando o avermelhado do pôr-do-sol. a: verifica-se um tom amarelado; b: mais alaranjado; c: mais avermelhado como o do pôr-do-sol.

4. Conclusão

Mostramos uma das possíveis deduções para o espalhamento Rayleigh e as hipóteses para a obtenção da clássica expressão 3, indicando que a densidade do fluxo espalhado é proporcional à quarta potência da frequência da radiação incidente. Através dos resultados obtidos com o experimento, verificamos sua equivalência com a teoria, pois o azul, que possui menor comprimento de onda que o vermelho, foi mais espalhado.

Outro fato a ser observado é a utilização de leite desnatado em vez de integral. O leite integral contém grande quantidade de moléculas de gordura, que possuem tamanho relativamente grande em relação ao comprimento de onda da luz, dificultando seu espalhamento, pois o tamanho da molécula já não satisfaz a aproximação feita para a dedução da expressão 3.

Demonstramos também como utilizar materiais de baixo custo para simular o azul do céu e o vermelho do pôr-do-sol, sendo uma boa oportunidade para demonstrar esse fenômeno do cotidiano no Ensino Médio e Fundamental.

Referências

- [1] Stephen Thornton e Andrew Rex, *Modern Physics for Scientists and Engineers* (Sunders College Publishing, New York, 1998).
- [2] Robert Eisberg e Robert Resnick, *Física quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas* (Editora Campos Ltda, Rio de Janeiro, 1979).
- [3] Eugene Hecht, *Optics* (Addison Wesley, New York, 1998), 3ª ed.
- [4] David J. Griffiths, *Introduction to Eletrodynamics* (Prentice Hall, New Jerry, 1999).
- [5] Josif Frenkel, *Princípios da Eletrodinâmica Clássica* (Edusp, São Paulo, 1996).
- [6] Raymond A. Serway, *Física 4 para Cientistas e Engenheiros*, (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1996) 3ª .