
MODELAGEM DO ESPALHAMENTO RAYLEIGH DA LUZ COM PROPÓSITOS DE ENSINO E DE APRENDIZAGEM⁺*

Sonia Krapas
Paulo Acioly M. dos Santos
Instituto de Física – UFF
Niterói – RJ

Resumo

Enfocamos a modelagem do espalhamento Rayleigh da luz, fenômeno natural que pode ser reproduzido em exposições, laboratórios, e até mesmo em salas de aula, por meio de uma simples simulação experimental. Exploramos o referencial do ensino-aprendizagem baseado em modelos com o propósito de tornar mais fácil para o aprendiz compreender a modelagem do fenômeno e as propriedades ópticas envolvidas. Discutimos a exploração da modelagem em espaços formais e não formais de educação.

Palavras-chave: *Modelagem, ensino-aprendizagem, espalhamento da luz.*

Abstract

Attention is given to the Rayleigh's light scattering modeling. This natural optical phenomenon has been produced in laboratory or classroom by a simple simulation experiment. We propose its modeling, exploring the model-based teaching and learning conception, to improve or facilitate the learner's model-building of the phenomenon and related optical properties involved.

Keywords: *Modeling, teaching-learning, light scattering.*

⁺ Rayleigh light scattering modeling for teaching and learning purposes

^{*} *Recebido: março de 2001.*
Aceito: agosto de 2002.

I. Introdução

A partir do pós-guerra, surgem os primeiros projetos de ensino que inauguram uma época em que a educação científica passou a ocupar um lugar privilegiado. Ao mesmo tempo, o compromisso com a democratização da educação torna fundamental a atenção a certos valores excludentes relacionados ao ensino de ciências. Neste panorama tem surgido movimentos de popularização da ciência nos quais estão envolvidas tanto instituições tradicionais (como a escola), quanto as de educação não formal (como museus, imprensa, associações de cientistas, meios de divulgação de massa, etc.).

No processo de alfabetização científica é importante garantir-se, além da aprendizagem no seu sentido estrito, uma aprendizagem que possibilite um aprofundamento da experiência da pessoa em seu sentido mais amplo, que envolve não somente o intelecto, mas também os sentidos e as emoções. Assim, a motivação desempenha um papel central nesse processo (Csikszentmihályi e Hermanson, 1995). Despertar o interesse de um público bastante variado nem sempre é muito fácil, mas isso, em geral, acontece com certos temas, tais como múmias e animais pré-históricos. A literatura sobre motivação da aprendizagem em ambientes não formais de educação, tais como museus, tem apontado diversos aspectos que devem ser levados em consideração no planejamento de suas exposições. Um dos aspectos que merece destaque é a relação concretude/abstração da informação a ser veiculada. É importante o acesso a objetos concretos em 3D, ao invés de apresentações abstratas na forma de linguagem matemática, comuns aos textos didáticos e à realidade virtual propiciada pelos multimeios.

Exposições são, em geral, reproduções ou simulações de fenômenos que se encontram na natureza. No caso de simulações, estas exposições comportam a modelagem¹ (Falcão et al 1999). Sua utilização como forma de transposição didática (Chevallard 1998) apresenta como vantagem a visibilidade dos elementos preponderantes para o entendimento de fenômenos que, em sua totalidade, apresentam maior complexidade. A modelagem “limpa” o fenômeno de seus aspectos não essenciais para a sua compreensão.

Esforços têm sido feitos com o propósito de entender o processo de ensino-aprendizagem baseado em modelos, desenvolvendo, principalmente, referenciais analíticos que possibilitam a comparação e a análise de diferentes modelos em aprendizagem em ciências. Frequentemente, a caracterização da tipologia desses modelos é feita considerando o aspecto representacional da modelagem. Porém, para que estes modelos se tornem instrumentos eficientes de aprendizagem em ciências, é

¹ Abordagens sobre o tema dos modelos são encontradas na Filosofia da Ciência (Bailer-Jones, 1999), na ciência cognitiva (Johnson-Laird, 1983; Gentner e Stevens, 1983) e na educação em ciência (Moreira, 1997; Krapas et al, 1997).

necessário entrar-se na especificidade do conteúdo da representação, isto é, em todos os aspectos do fenômeno a ser modelado.

Na perspectiva de Buckley e Boulter (1997), Falcão e colaboradores (1999) distinguem, para melhor caracterizar modelos e modelagem, três aspectos do fenômeno:

Estrutura: elementos e relações que definem o sistema e que podem ser identificados a partir de correspondências entre o modelo alvo e o modelo fonte;

Comportamento: conjunto de mudanças ocorridas no tempo, observadas, de fato, ou passíveis de serem abstraídas. Essas mudanças podem ser de espaço, cor, intensidade luminosa, temperatura ou qualquer outra grandeza física;

Mecanismo: conjunto de relações de causa e efeito advindo da interação dos elementos da estrutura, bem como da significação que é atribuída ao comportamento do modelo integralmente.

Acreditamos que o ensino pode tornar-se mais efetivo na medida em que haja uma tomada de consciência, por parte dos idealizadores dos modelos pedagógicos, desses aspectos da modelagem. Além disso, se a apresentação da simulação possibilitar que a tomada de consciência se estenda ao aprendiz, a efetividade do ensino será ainda maior.

No processo de alfabetização científica a escolha do tema também tem um papel importante na motivação da aprendizagem. No presente trabalho enfocamos um fenômeno extremamente familiar –a cor azul do céu durante o dia e avermelhada no pôr-do-sol– mas que envolve explicações não triviais. No pensamento de senso comum, que pode ser reforçado incorretamente pelo ensino fundamental e médio, este fenômeno é entendido como semelhante ao arco-íris –produto da decomposição da luz por refração. Porém, do ponto de vista da Física, trata-se do fenômeno de espalhamento de luz por pequenas partículas da atmosfera da Terra.

Este fenômeno natural pode ser reproduzido em exposições em museus, laboratórios e mesmo em salas de aula por meio de uma simples simulação experimental. Nosso propósito é a modelagem desta simulação experimental, explorando o processo de ensino-aprendizagem baseado em modelos. O conteúdo da representação é identificado e classificado com o objetivo de tornar mais fácil para o aprendiz a modelagem do fenômeno e a compreensão das propriedades ópticas envolvidas.

II. O espalhamento Rayleigh, o céu azul e o pôr-do-sol avermelhado

È chamada de “Espalhamento Rayleigh” a primeira tentativa de descrever com sucesso o espalhamento da luz por pequenas partículas. Feito por Lord Rayleigh, esse primeiro estudo data de 1871. A partir desta investigação, foi desenvolvida uma lei geral para intensidade da luz espalhada aplicável a qualquer partícula de índice de refração diferente daquele do meio no qual está imerso. Neste estudo, foi considerado que as dimensões lineares das partículas são consideravelmente menores que o comprimento de onda da luz espalhada. Foi descoberto que a intensidade

da luz espalhada é proporcional à intensidade da incidente e ao quadrado do volume da partícula espalhadora. O mais importante resultado desse estudo é a dependência de intensidade do espalhamento com o comprimento de onda, dado pela expressão:

$$I = k \frac{1}{\lambda^4}, \quad (1)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade e λ o comprimento de onda da luz espalhada.

Na parte visível do espectro da luz do sol, a luz vermelha (720 nm) tem um comprimento de onda 1,8 vez maior que a luz violeta (400nm). Então, pela equação (1), isto significa que o espalhamento do violeta é dez vezes maior do que o vermelho.



Fig. 1 - Esquema ilustrando o espalhamento da luz proveniente do Sol na atmosfera terrestre.

O espalhamento da luz por pequenas partículas e a grande espessura da camada de gás na atmosfera ao redor da Terra (Fig.1) são responsáveis pela visão do céu azul e do avermelhado pôr-do-sol. Basicamente, a luz do sol incidente na atmosfera terrestre, obedecendo à lei de Rayleigh, produz o aspecto azulado do céu, o que nos é muito familiar. Isto pode ser notado quando a observação é feita a partir de diferentes ângulos com respeito à direção de incidência da luz do sol. Assim, à medida que a Terra gira ao redor de seu eixo, varia a distância percorrida pela luz na atmosfera, o número de partículas espalhadoras e, conseqüentemente, a quantidade de luz espalhada. Por exemplo: um observador, ao longo do dia, ocupa sucessivamente as posições A, B e C (Fig. 2), indo do meio-dia ao entardecer. No percurso da luz até as diferentes posições desse observador, haverá progressivamente mais luz espalhada. Olhando na direção da luz incidente, o observador na posição C terá no horizonte a imagem do sol e seus

arredores vermelhos no pôr-do-sol. Neste caso, o espalhamento removeu do feixe de luz branca incidente a luz azul mais do que a vermelha, de forma que a grande espessura da atmosfera atravessada no fim do dia dá à luz transmitida sua intensidade vermelha.

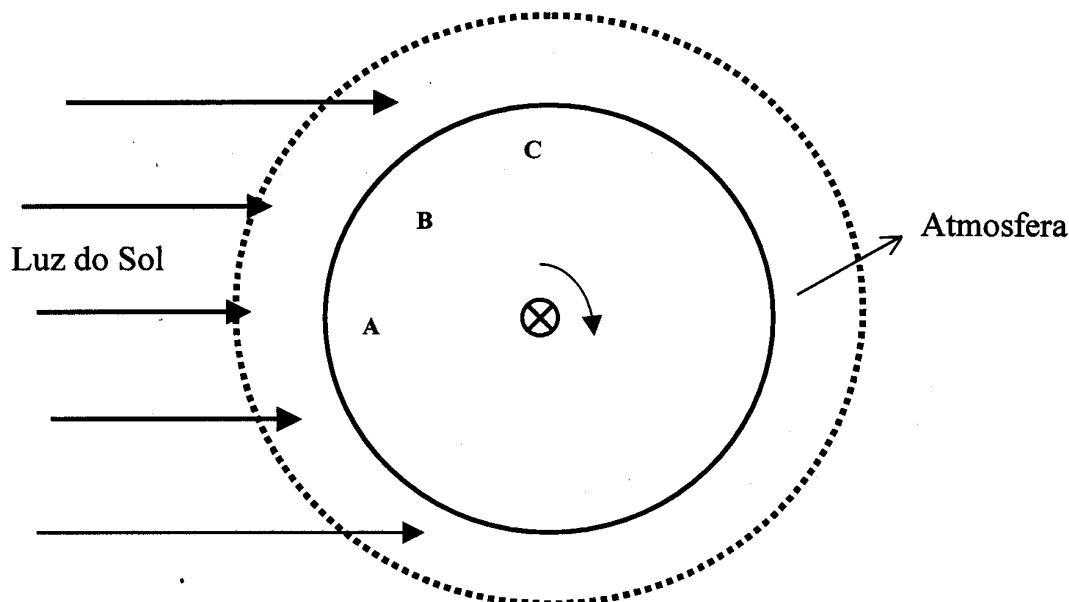


Fig. 2 - Diferentes posições de iluminação ocupadas por um observador ao longo do dia. *A* equivale aproximadamente ao meio-dia; *B* ao meio da tarde e *C* ao entardecer.

III. Simulação experimental do azul do céu e do pôr-do-sol avermelhado

Uma simulação experimental simples, que pode ser feita para produzir o céu azul e o pôr-do-sol avermelhado em exposições em museus, em laboratórios ou em salas de aula, é esboçada na Fig. 3.

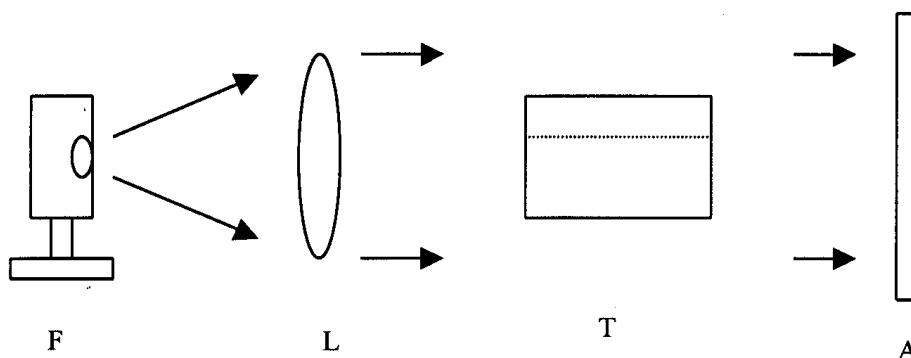


Fig.3- Montagem experimental para a simulação do efeito do céu azul e do pôr-do-sol avermelhado: *F* - fonte de luz branca, *L* - lente, *T* - tanque e *A* - anteparo.

A idéia de simular a formação do céu azul e do pôr-do-sol é baseada na produção de espalhadores de luz em uma solução aquosa. Em um pequeno tanque contendo uma solução de hidróxido de sódio, goteja-se ácido sulfúrico diluído. Dependendo da concentração², ocorrerá a formação gradativa de partículas em suspensão que atuarão como espalhadores de luz.

Ao iluminarmos o tanque com luz branca em um feixe de luz colimado, como ocorre na atmosfera, haverá espalhamento de luz pelas partículas em suspensão, uma vez que sua dimensão é menor que os comprimentos de onda da luz incidente. Haverá então uma redistribuição espacial de intensidade da luz e, como resultado, temos um efeito de céu azul no interior do tanque e a complementaridade espectral na luz que dele sai, a qual produzirá o efeito do pôr-do-sol em um anteparo externo. À medida que aumenta a luz espalhada, com maior quantidade de azul no tanque, a intensidade da luz que sai, após atravessá-lo, também aumenta, passando de um amarelo alaranjado a um vermelho alaranjado, chegando finalmente a um vermelho predominante, exatamente como ocorre diariamente num pôr-do-sol.

IV. Modelagem do espalhamento Rayleigh

O fenômeno do céu azul e do pôr-do-sol avermelhado se presta à modelagem de maneira extremamente adequada. Em primeiro lugar –argumento histórico– pois em sua origem, em 1871, Rayleigh (apud Jenkins e White, 1976) tratou o fenômeno do espalhamento da luz através de uma modelagem. Em segundo –argumento prático– pelo fato de que o fenômeno pode ser simulado de forma muito simples em laboratório. Em terceiro lugar –argumento didático– porque é somente através da modelagem que o fenômeno fica claramente diferenciado de outros fenômenos ópticos tais como o arco-íris. Por último –argumento de divulgação– por se tratar de um fenômeno que possui forte componente motivacional.

Tomando Falcão e colaboradores (1999) como referência, propomos a modelagem do fenômeno em pauta, na forma do diagrama 1.

No diagrama, temos *fenômeno*, *comportamento* e *mecanismo* nos retângulos maiores, e, nos retângulos menores, os elementos da *estrutura*. Cada elemento da estrutura do fenômeno natural corresponde a um elemento da estrutura de sua simulação. O sinal de igual anuncia essa correspondência. Na modelagem, o fenômeno e sua simulação compartilham comportamento e mecanismo.

² Recomendam-se as seguintes concentrações: 5 g de hidróxido de sódio para 1 litro de água e 1 a 2 ml de ácido sulfúrico para 100 ml de água. Para se obter um efeito com duração de aproximadamente 25 a 30 min, deve-se adicionar pausadamente ácido sulfúrico em pequenas quantidades (20 ml).

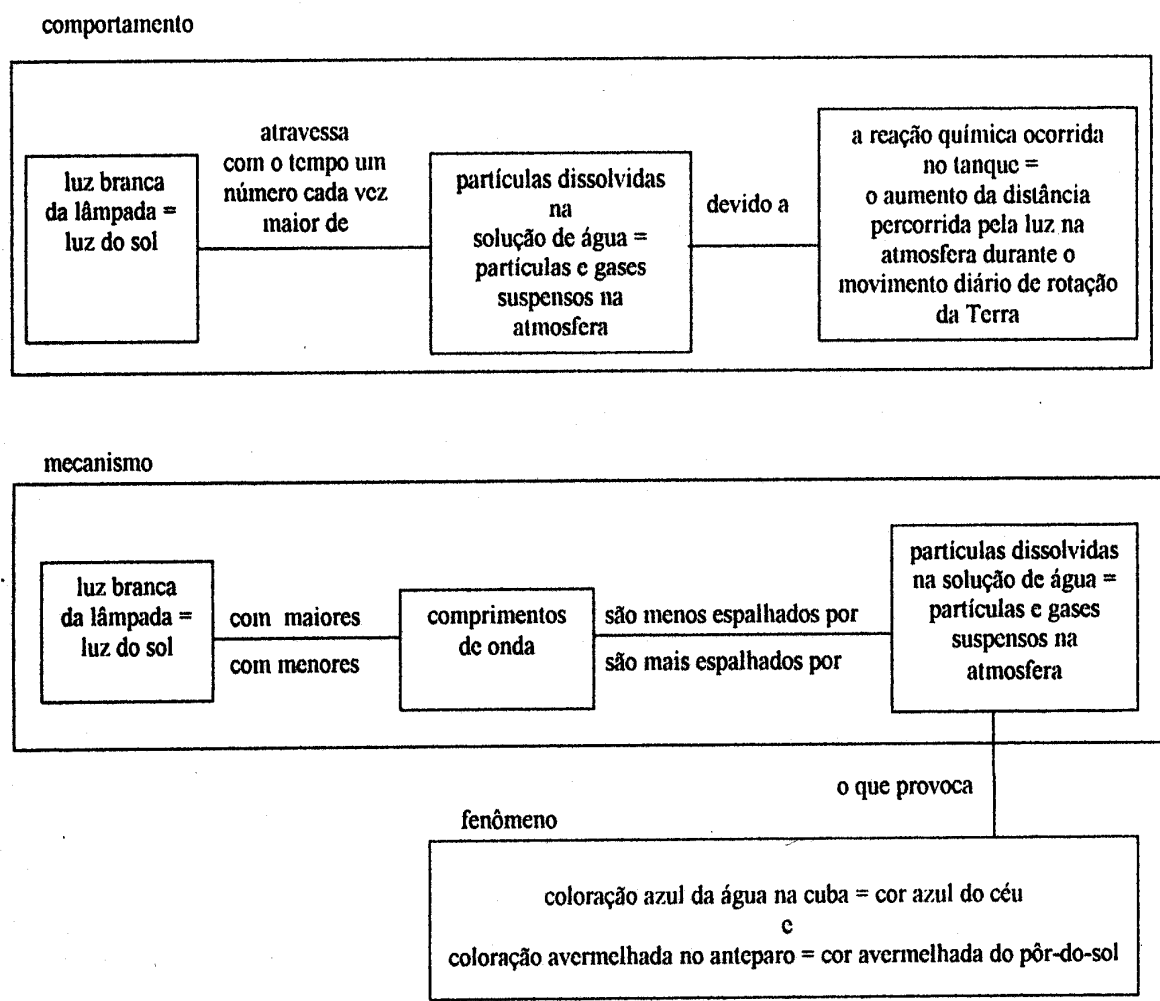


Diagrama 1- Diagrama da modelagem do espalhamento Rayleigh.

V. Comentários e conclusão

Apesar dos sentimentos de beleza e mistério despertados no ser humano pelo céu azul e pelo pôr-do-sol avermelhado, usualmente estas sensações são acompanhadas por um entendimento incorreto do fenômeno, do ponto de vista da Física. Acreditamos que a simulação experimental acompanhada de uma discussão detalhada do fenômeno modelado certamente possibilitará, por parte do aprendiz, a construção de um modelo mental apropriado, com explicação correta do fenômeno e

das propriedades ópticas envolvidas: redistribuição da intensidade de luz (o espalhamento em si) e difração (propagação)³.

Do ponto de vista didático, a modelagem do céu azul e do pôr-do-sol avermelhado tem como vantagem atingir níveis de audiência diversificados. Assim como pode ser explorada nos seus detalhes mais íntimos no reduto da educação formal, seja em aulas de laboratório ou de demonstração, é possível sua apropriação em redutos de educação não formal, como museus e centros de ciência, dado seu potencial motivacional. Claro está que, em cada um desses espaços, as expectativas quanto à natureza da aprendizagem são distintas (Hosfstein e Rosenfeld, 1996; Ramey-Gassert, Walberg III e Walberg, 1994) e as relações entre comunicação/divulgação e ensino (de conteúdo específico) se equacionam de formas diversificadas. Há uma solução de compromisso que atende às exigências típicas de instituições tais como escolas e museus, exigências estas definidas pelos papéis que desempenham como agentes sociais da educação. Nesse sentido, a exploração da modelagem abre várias possibilidades que permitem uma justa adequação aos objetivos diversificados dos espaços formais e não formais de educação. As interações nestes espaços podem propiciar desde sensações de deslumbramento, *experiências de fluência* (Csikszentmihályi e Hermanson, 1995), até o estabelecimento da correspondência entre o fenômeno e sua simulação, no que se refere aos seus níveis: *estrutura, comportamento e mecanismo*. No caso deste último, acreditamos que se faz imprescindível a participação de um mediador.

Para finalizar, queremos deixar claro que não estamos restringindo à escola as interações de natureza cognitiva, e aos museus, as de natureza emocionais/perceptuais. O que se tem verificado é justamente uma aproximação entre esses dois espaços de educação em ciências. Por um lado, museus de última geração, nos quais as exposições *minds on* têm lugar, estão adotando freqüentemente monitores como elementos de mediação entre exposições e visitantes, o que torna possível o aprofundamento dos aspectos cognitivos. Por outro lado, a escola, vendo como necessária à contextualização de seus conteúdos programáticos, estabelece a introdução de componentes curriculares que se afastam da ortodoxia da transmissão de conhecimento estrito senso, o que implica na introdução de componentes motivacionais/emocionais.

³ A polarização da luz, evidenciando seu caráter eletromagnético, é outra propriedade óptica que também pode ser explorada, bastando para isso introduzir dois polarizadores na entrada e na saída do tanque.

Referências Bibliográficas

- BAILER-JONES, D. M. Tracing the development of models in the philosophy of science. In: Magnani, L.; Nersessian, N. J. (eds.). **Model-Based reasoning in Scientific Discovery**. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 1999. p. 23-40.
- BUCKLEY, B.; BOULTER, C. Taking models apart: towards a framework for analysing representations in teaching and learning science. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE EUROPEAN SCIENCE EDUCATION RESEARCH ASSOCIATION, II., 1997, Roma. **Proceedings of II International Conference of the European Science Education Research Association**. Roma: ESERA, 1997.
- CHEVALLARD, Y. **La transposición didáctica: del saber sabio al saber enseñado**. Buenos Aires: Aique, 1998. 196 p.
- CSIKSZENTMIHÁLYI, M.; HERMANSON, K. Intrinsic motivation in museums. What makes visitors want learn? **Museums News**, p. 34-37 e 59-61, maio/junho. 1995.
- FALCÃO, D.; CASELLI, S.; GOUVÊA, G.; QUEIROZ, G.; VALENTE, M. E.; ALVES, F.; COLINVAUX, D.; KRAPAS, S.. Models and learning in science and technology museums. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE EUROPEAN SCIENCE EDUCATION RESEARCH ASSOCIATION, III., 1999, Kiel. **Proceedings...** Kiel: Esera, 1999. p. 644-647.
- FRANCO, C.; BARROS, H. L.; COLINVAUX, D.; KRAPAS, S.; QUEIROZ, G.; ALVES, F. From scientists' and inventors' minds to some scientific and technological products: relationships between theories, models, mental models and conceptions. **Journal of Research in Science Education**, Londres, v. 21, n. 3, p. 277-291, 1999.
- GENTNER, D.; STEVENS, A. L. **Mental Models**. Hillsdale: Erlbaum, 1983. 348 p.
- HOSFSTEIN, A.; ROSENFELD, S. Bridging the gap between formal and informal learning. **Studies in Science Education**, v. 28, p. 87-112, 1996.
- JENKINS, F. A.; WHITE, H. E. **Fundamentals of Optics**. New York: John Wiley & Sons, 1976. 637 p.
- JOHNSON-LAIRD, Philip. N. **Mental Models**. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 513 p.

KRAPAS, S.; QUEIROZ, G.; COLINVAUX, D.; FRANCO, C. Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. **Investigação em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 185-205, 1997.

MOREIRA, M. A. Modelos Mentais. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 1, n. 3, p. 1-39, 1997.

RAMEY-GASSERT, L.; WALBERG III, H. J.; WALBERG, H. J. Reexamining connections: museums as science learning environments. **Science Education**, Danvers, v. 78. N. 4, p. 345-363, 1994.