

O modelo ondulatório da luz como ferramenta para explicar as causas da cor

(The wave model of light as a tool to explain the causes of color)

Anne L. Scarinci¹, Fábio Marineli²

¹Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

²Universidade Federal de Goiás, Jataí, GO, Brasil

Recebido em 28/6/2013; Aceito em 1/10/2013; Publicado em 6/2/2014

O presente texto trata dos efeitos da interação luz-matéria que resultam nas cores que enxergamos, assunto que geralmente não é tratado adequadamente em aulas de física. São feitas algumas considerações sobre percepção visual e, em seguida, procuramos nos centrar em explicações para as causas da cor que utilizam o eletromagnetismo clássico (luz como onda eletromagnética) e o modelo de Drude-Lorentz (osciladores moleculares e eletrônicos). Esse modelo subsidia o entendimento dos fenômenos de espalhamento, reflexão, refração e reflexão-refração difusa. Ao final do texto, para efeito de comparação e para ampliar o entendimento dos fenômenos relacionados à cor, também abordamos algumas causas da cor que exigem a utilização de um modelo quântico para a luz.

Palavras-chave: interações da luz com a matéria, eletromagnetismo clássico, modelo de Drude-Lorentz, causas da cor.

This text concerns effects of interaction light-matter which result in the colors we see, subject generally not covered appropriately in physics classes. After considerations about human visual perception, we focused in explanations to the causes of color that require the classical electromagnetism (light as an electromagnetic wave) and Drude-Lorentz model (molecular and electronic oscillators). This model subsidizes the understanding of scattering, reflection, refraction and diffuse light spreading phenomena. In the end of the text, for a comparison purpose and to broaden the understanding of phenomena related to color, we also discuss some causes of color which require the use of a quantum model of light.

Keywords: light-matter interactions, classical electromagnetism, Drude-Lorentz model, causes of color.

1. Introdução

Aprender física pressupõe apoderar-se de *modelos físicos* como ferramentas conceituais de interpretação dos fenômenos, pois os modelos permitem conectar esses fenômenos a uma determinada teoria física. Para os fenômenos relacionados à óptica, por exemplo, usam-se atualmente os modelos ondulatório e quântico (dependendo do tipo de fenômeno a ser interpretado). Em situações mais comuns de ensino de física, onde teorias mais avançadas não são tratadas, esses dois modelos estão relacionados a teorias distintas, o modelo ondulatório puro à óptica clássica (tratando fenômenos de reflexão, difração, polarização etc.) e o modelo corpuscular à teoria quântica (tratando fenômenos de absorção e emissão da luz, entre outros).

Atualmente, com os constantes incentivos para a inclusão da física moderna nas aulas do Ensino Médio,

muitas vezes o professor se vê compelido a falar sobre o modelo quântico de luz. No entanto, se esse modelo não for adequadamente tratado, pode gerar problemas na compreensão da natureza da luz, pois os alunos podem ser levados a considerá-la como formada por partículas – caracterização essa que é parte do modelo quântico –, mas com *propriedades mecânicas clássicas*, inclusive em fenômenos para os quais o uso do modelo ondulatório seria o mais adequado. No entanto, para um tratamento apropriado do modelo em situações de ensino, os próprios professores precisam ter um domínio adequado dele, o que nem sempre ocorre.

Em 2011 ministramos um curso em nível de especialização para professores de física de escolas públicas paulistas, e notamos um enorme interesse – e, ao mesmo tempo, graves confusões conceituais – na interpretação dos fenômenos da interação da luz com a matéria para a formação da cor: quando os professores ensaiavam ul-

¹E-mail: anne@if.usp.br.

trapassar o nível mais superficial nas explicações, buscando as causas dos fenômenos ópticos na estrutura das entidades que interagem, surgiam explicações como:

O *alcance* da luz da vela não é tão grande quanto o da luz do farol do carro, por isso não enxergamos uma vela à distância.

Os raios solares *colidem* com as moléculas e são responsáveis pela dispersão do azul.

Ou seja, ou insistiam no modelo simplificado dos raios de luz, que não se mostrava útil para muitas das explicações, ou tentavam utilizar o conceito de fótons, porém imaginando a luz como composta por partículas newtonianas. Ao mesmo tempo, os textos de física básica – mesmo em nível universitário –, pouco tratavam dos modelos físicos da luz e da matéria na interpretação de fenômenos da cor, enquanto os de divulgação científica apresentavam simplificações inadequadas e erros conceituais próximos aos dos professores.

Este texto foi elaborado a partir dessa dificuldade de entendimento. Coletamos as explicações dadas pelos professores daquele curso como inspiração para o tratamento das explicações da cor, embasando-as especialmente nos modelos científicos e na estrutura da matéria.

A parte da óptica mais ensinada na Escola Básica é a óptica geométrica. Essa abordagem se propõe a utilizar o modelo ondulatório de luz e simplificá-lo, através dos recursos didáticos “raios de luz” e “frentes de onda”, especialmente objetivando o estudo de fenômenos ligados à refração e à reflexão da luz e à formação de imagens em espelhos e lentes. Os livros didáticos frequentemente relacionam os raios de luz ao modelo ondulatório nas definições e considerações iniciais do tema, porém, logo em seguida, passa-se a trabalhar exclusivamente com o raio de luz, de forma que o modelo ondulatório (*i.e.* a interpretação da luz como uma *perturbação eletromagnética que se propaga no espaço e que interage com cargas elétricas da matéria*) não é efetivamente utilizada na interpretação dos fenômenos. Os raios de luz adquirem status de *modelo físico*, dentro de uma concepção newtoniana para a luz.

Mesmo quando o ensino não é exclusivamente centrado na óptica geométrica, frequentemente o modelo ondulatório não é adequadamente explorado e há um “salto” da parte geométrica para um “pseudomodelo quântico”, que desconsidera a natureza dual da luz. Poucos livros didáticos articulam a óptica clássica adequadamente, deixando o professor carente de elementos conceituais para realizar um ensino que relacione o modelo ondulatório à explicação de fenômenos. Por isso, este texto procurou recuperar o tratamento ondulatório clássico da luz para a interpretação de fenômenos. Ao final do texto, abordamos também alguns fenômenos que exigem o modelo quântico, visando não somente

elucidar as limitações do ondulatório, mas traçando uma breve comparação entre a abordagem de cada modelo.

Como escolhemos enfocar fenômenos relacionados à cor, e porque a causa da cor depende também da percepção visual e das características da interpretação olho-cérebro, considerações sobre o funcionamento da visão devem ser feitas para uma explicação mais completa. Organizamos o texto de modo a enfatizar como o modelo ondulatório da luz, aliado ao modelo de Drude-Lorentz para a matéria, podem se constituir ferramentas poderosas para a interpretação dos fenômenos da cor, além de ser um aprofundamento interessante no eletromagnetismo.

2. Os significados da palavra *cor* e o mecanismo da visão

Apesar de nossos olhos *não serem sensíveis ao amarelo*, vemos amarelo quando são emitidos o vermelho e o verde.

O amarelo da flor é uma *propriedade intrínseca da flor* ou será *devido apenas à luz* que incide sobre ela?

A rigor, não podemos dizer que o papel é branco. *A cor não é do papel, mas da luz* que incide sobre ele. Então *os objetos não têm cor nenhuma...*

Essas frases (com grifos nossos) revelam concepções errôneas sobre a interação luz-matéria, e também sobre a interação luz-olho-cérebro. Para evitar tais erros, consideramos que para tratar adequadamente os fenômenos da cor, é preciso abordar também o fenômeno da visão.

Uma consideração inicial necessária é que a palavra “cor” é polissêmica, podendo assumir três significados: a cor como *propriedade* de um objeto (ex. uma parede amarela), a cor como um determinado *comprimento de onda* eletromagnética emitida (ex. feixe amarelo de 580 nm) e a cor como *sensação* no olho-cérebro [1].

Dizer que um objeto é amarelo significa que sempre que se incide luz branca nele, a cor percebida pelo olho humano normal é amarela. Uma parede amarela, por exemplo (amarelo = propriedade da parede), pode emitir vários “conjuntos” de comprimentos de onda – sem necessariamente emitir na faixa amarela do espectro. Um objeto que reemite a luz solar somente nas faixas em torno de 520 nm (verde) e 700 nm (vermelha) pode ser percebido como amarelo, mesmo sem emitir luz alguma na faixa amarela (que é em torno de 560 a 580 nm). Ou seja, a percepção visual de uma cor não implica necessariamente que o objeto esteja emitindo luz na faixa de comprimentos de onda dessa cor; por isso a distinção entre a cor como sensação olho/cérebro e cor como comprimento de onda.

Na percepção visual de uma cor ocorrem interpretações dos estímulos luminosos que chegam aos olhos. A primeira delas é na retina, que recebe o

estímulo do objeto e envia uma informação ao cérebro. Um segundo nível é o do próprio cérebro, que pode combinar a informação provida da retina com aspectos relacionados à memória. Por exemplo, uma maçã tende a ser interpretada como vermelha, mesmo sob uma iluminação artificial que produza pouca reflexão no vermelho – porque temos uma memória de que maçãs são vermelhas. Outro exemplo é que um objeto levado de um ambiente muito iluminado para outro com fraca iluminação pode manter, para o cérebro, a mesma cor original, mesmo tendo seu espectro de emissão alterado [2].

O uso da palavra cor referindo-se a um comprimento de onda da luz tem relação com a divisão (não física, mas convencional) do espectro visível em cores. Usualmente, comprimentos de onda entre 560 e 580 nm são denominados amarelos. Então, se falamos em uma “luz amarela”, subentendemos um comprimento de onda dentro daquele intervalo. Uma observação interessante é que existe luz amarela, mas não luz marrom. A cor amarela é uma cor espectral – porque existe algum comprimento de onda puro que, chegando ao olho, é visto com essa cor. Mas as cores marrom, roxa ou cinza, não são cores espectrais; necessariamente elas decorrem de emissões múltiplas.

Por que existem cores não espectrais? Como o olho-cérebro pode “criar cores novas”, além daquelas relacionadas a comprimentos de onda de luz?

Uma breve comparação entre a percepção dos estímulos visuais e dos sonoros: em relação aos fenômenos sonoros, nosso mecanismo de percepção auditiva é construído de tal forma que, ao ouvirmos um conjunto de sons de frequências diferentes, nosso ouvido-cérebro é capaz de discriminar cada frequência e, desta forma, somos capazes de identificar timbres e acordes. Por exemplo, quando se toca um lá médio no piano (frequência fundamental de 440 Hz), ouvimos um conjunto de frequências sonoras – os harmônicos da frequência de 440 Hz – que identificam o instrumento usado. Não conseguimos conscientemente separar cada harmônico do som fundamental, mas ao tocarmos simultaneamente o lá e o seu primeiro harmônico (ré) – um acorde de dois sons, conseguimos perceber este novo som como diferente do primeiro (somente o lá), apesar de em ambos a frequência “ré” estar envolvida. Outro exemplo é a própria identificação dos timbres: um lá tocado por uma flauta soa diferente aos nossos ouvidos em relação a um mesmo lá tocado por um violino. Esses dois lá’s se diferenciam somente pelo conjunto de harmônicos superiores e suas intensidades em cada instrumento [3].

Já no caso da nossa percepção visual, não temos capacidade de discriminação por frequências componentes. Se um objeto emite as frequências *vermelha*, *verde* e *violeta*, por exemplo, poderá produzir idêntica sensação visual a outro objeto que emita em frequência *laranja*. Ou seja, não percebemos “acordes” de luz.

² Dizemos “atributos” porque eles descrevem uma percepção, não propriedades físicas da luz.

Por isso, a cor como propriedade de um objeto não é análoga à cor como comprimento de onda emitido. Este fenômeno, de diferentes emissões poderem produzir igual efeito visual, é chamado de metamerismo.

A Fig. 1 mostra diferentes combinações de comprimentos de onda que produzem a mesma sensação visual da cor roxa. A cor final do feixe luminoso se relaciona a um atributo² da cor chamado *matiz* [5]. O matiz é a cor predominante produzida pela combinação de comprimentos de onda emitidos por um objeto (ou reemitidos, no caso de objetos não luminosos). Além do matiz, para especificar a percepção completa de um determinado feixe luminoso são necessárias a saturação e a luminosidade.

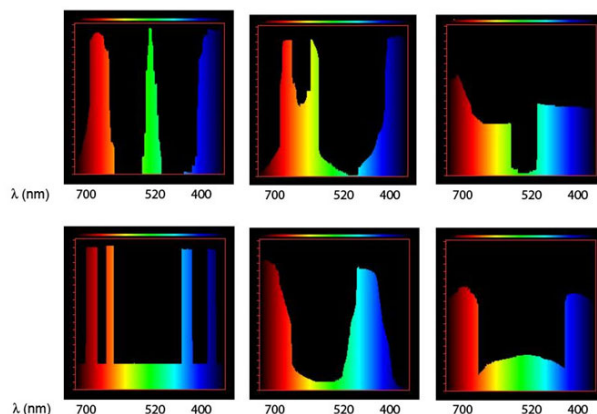


Figura 1 - Metamerismo - Os seis espectros de emissão produzem a mesma sensação visual, da cor roxa [4].

A *saturação* diz respeito à pureza do feixe, ou, o quanto determinado matiz se sobrepõe ao restante do espectro que está sendo emitido. Se de um objeto recebemos luz azul misturada a uma grande quantidade de luz branca (emissão em todos os comprimentos de onda do visível), dizemos que há baixa saturação do azul e percebemos uma cor *azul pastel* – em contraposição a um azul forte, brilhante, no caso da emissão do azul com a absorção dos outros comprimentos de onda.

A *luminosidade* refere-se à intensidade total do feixe. Desta forma, podemos ter um objeto emitindo azul em pouca intensidade, resultando na cor *azul escuro*.

Então, a percepção da cor é determinada pela faixa de frequências recebida pelo sistema visual (que faz uma espécie de adição, da qual trataremos em seguida) e das intensidades relativas de cada faixa.

3. A recepção do estímulo visual pelo olho humano e as cores primárias

Newton provou que a luz branca ao transpassar um prisma de cristal se divide em vários feixes coloridos *sendo sete deles visíveis*, não que só tenham as sete.

As cores vermelho, azul e verde são as *3 cores*

que nossos olhos captam. Todas as outras cores que vemos são formadas a partir dessas 3 cores. Por isso essas 3 cores são consideradas as cores primárias da visão e também da síntese aditiva de cor.

O olho detecta as frequências emitidas e *faz uma média dessas frequências*, cujo resultado é a cor.

Através das frases, percebemos que uma compreensão errônea de como o olho detecta a luz e interpreta a cor interfere na compreensão da causa da cor, pois explicações parciais do mecanismo de visão podem gerar concepções erradas. A explicação completa consiste na compreensão de como a luz interage com as proteínas fotossensoras da retina e que tipo de informação é gerada (e enviada ao cérebro) a partir dessa interação.

Primeira consideração: não enxergamos apenas três comprimentos de onda. Nem apenas sete. Nossos olhos são capazes de processar todo o espectro, contínuo, desde 400 até 700 nm, aproximadamente. Por que então definimos três cores primárias?

Newton, quando determinou sete cores para o espectro luminoso visível (as chamadas sete cores do arco-íris), fê-lo em analogia às sete notas musicais. Ou seja, a subdivisão do espectro visível em sete faixas se embasa mais em razões outras que em propriedades físicas da luz ou da visão [6]. Já a determinação das cores primárias não tem motivos análogos. Os experimentos de Thomas Young que levaram à caracterização das três cores primárias encontraram, mais tarde, uma explicação fisiológica, em termos de como o nosso olho funciona para perceber as cores [1].

As células da retina capazes de discriminar frequências luminosas (e, portanto, enxergar cores) são os cones. Temos três tipos de cones; cada um deles possui substâncias fotorreceptoras com pico de sensibilidade em uma região do espectro, conforme mostra a Fig. 2.

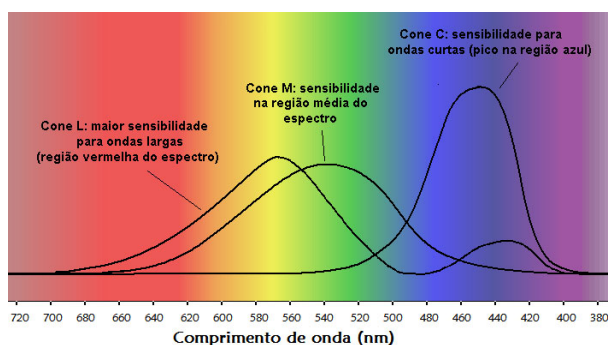


Figura 2 - Sensibilidade dos três tipos de cones no olho humano [7], com as denominações de L para ondas Largas, M para ondas Médias e C para ondas Curtas.

Alguns textos denominam os cones a partir da faixa espectral mais significativa de sensibilidade. Assim, os cones L seriam chamados de “vermelhos”. Essa denominação é prática, mas pode induzir a erros, pois tais cones não são sensíveis somente a comprimentos de

onda na faixa do vermelho. Por outro lado, de fato, as cores primárias (padrão RGB) estão intimamente relacionadas com a faixa de sensibilidade dos 3 cones.

Como o estímulo funciona? As células fotossensoras (cones) recebem uma informação eletromagnética e devem transformá-la em uma informação de natureza química. Cada tipo de cone tem substâncias químicas diferentes, e essas substâncias sofrem transformação química com algumas faixas de frequência, mas não com outras, de acordo com o gráfico acima. Para o cone M, uma luz de 550 nm produz ativação de maior número de substâncias químicas desse cone, do que uma luz de 600 nm. Então, a informação que o cone vai enviar não é propriamente uma informação de “qual frequência luminosa incidu”, mas de “quantas substâncias sofreram ativação” – ou seja, a informação que vai ao cérebro é relativa à intensidade de sensibilização do cone [8].

O cérebro recebe as informações elétricas dos 3 tipos de cones e interpreta-as em uma “cor”. Poderíamos representar a chegada da informação elétrica ao cérebro como “cone L 50%, cone M 40%, cone C 10%”. Se uma frequência luminosa amarela ($\lambda = 570$ nm) atinge a retina, ela sensibiliza os cones (L e M) em proporções tais que o cérebro interpreta a resultante como “amarelo”. No entanto, podemos ter idêntica sensação visual se, em vez de luz amarela, a retina receber frequências vermelha e verde em intensidades que obtenham o mesmo estímulo em cada cone. É por isso que dizemos que a adição das luzes vermelha e verde resulta na cor amarela.

Existem várias tabelas e diagramas, que foram criados para relacionar a composição de um feixe de luz com a cor que enxergamos (são muito úteis, por exemplo, para a indústria de tintas). Alguns dos métodos mais usados mundialmente foram criados pela Comissão Internacional de Iluminação – em especial, o *diagrama cromático* e a *tabela dos estímulos tricromáticos do espectro*. O diagrama cromático (Fig. 3) nos permite prever a sensação visual que resultará de uma determinada combinação de feixes. Por exemplo, a combinação de feixes de 570 e 490 nm (dependendo das intensidades relativas) resultará em uma cor que esteja na linha que une esses dois comprimentos de onda no diagrama:

Ao combinarmos três emissões monocromáticas, a cor resultante estará em um triângulo, formado pelas linhas que unem os três comprimentos de onda. Logo, percebemos que podemos obter a maior variedade possível de cores, usando comprimentos de onda nas três extremidades do diagrama. É esse modo de funcionamento do olho humano que fundamenta a definição das três cores primárias de emissão, ilustradas na Fig. 4.

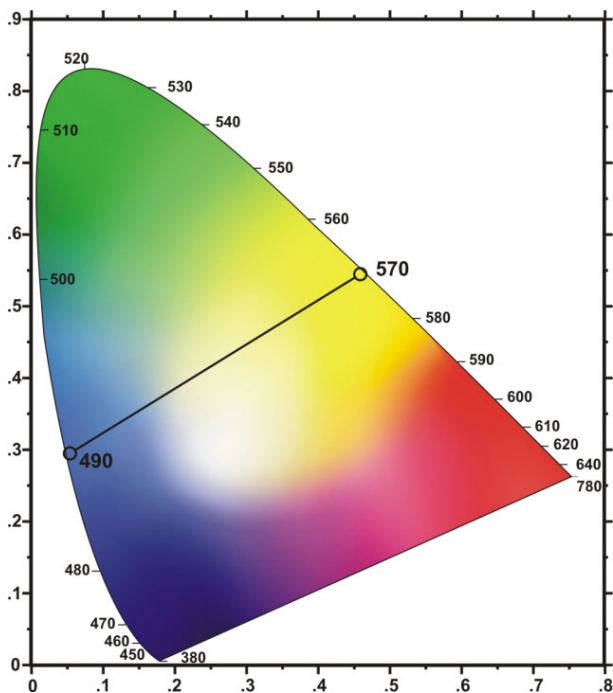


Figura 3 - Diagrama cromático e as cores possivelmente resultantes da emissão dos comprimentos de onda entre 570 e 490 nm (O diagrama é, na verdade, tridimensional. Neste desenho, estão representados dois dos três eixos).



Figura 4 - Cores primárias de emissão.

Essa figura mostra as três cores primárias da luz (o vermelho, o azul e o verde), as resultantes das misturas das cores duas a duas, chamadas de cores secundárias da luz (o amarelo, o ciano e o magenta), e a resultante da mistura das três cores primárias, que é o branco. Percebemos, então, que a cor branca é conseguida no caso de recebermos estímulo em toda a faixa visível da luz (como com a luz que vem do Sol ou de uma lâmpada incandescente), ou quando recebermos estímulo somente nas 3 frequências primárias (como de uma tela de computador). Daí surgiu o “padrão RGB” (*red, green, blue*, nomes em inglês para as cores primárias).

Já para objetos que não são fontes de luz, a explicação das cores é um pouco diferente. Nesses objetos,

a cor é geralmente produzida por *absorção*. Por exemplo, se na incidência de luz branca um objeto absorve a luz da faixa vermelha do vermelho, a cor percebida pelo olho será a combinação do espectro que restou na reemissão. Dessa forma, essa luz reemitida sensibiliza ao máximo os cones C e M – resultando a cor ciano (ver novamente a Fig. 3: o ciano está em oposição ao vermelho e resultado da mistura da luz verde com azul). Analogamente, se um objeto absorve a luz da faixa do azul, a cor percebida será amarela (cones L e M sensibilizados ao máximo e cone C pouco sensibilizado).

Devido a esse fenômeno de absorção, temos outro conjunto de cores primárias, as chamadas cores primárias de absorção ou *da tinta*, em que cada cor refere-se à absorção de uma região (cerca de 1/3) do espectro. Dessa forma, percebemos que as cores primárias de absorção são exatamente as cores secundárias de emissão, e vice-versa, conforme ilustrado na Fig. 5.

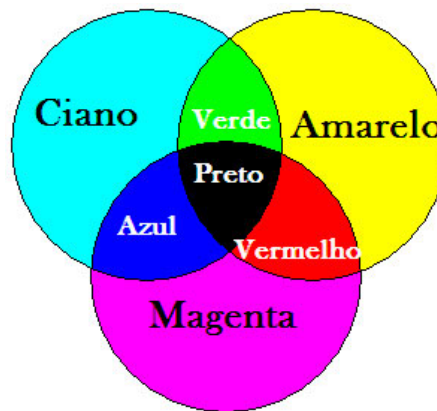


Figura 5 - Cores primárias de absorção.

Observa-se que o preto do centro do diagrama acontece por absorção completa dos três terços do espectro. Na prática, ao misturarmos tintas das três cores primárias, não obtemos realmente o preto, mas um marrom-escuro. Para explicar isso, precisamos pensar em como ocorrem as absorções no nível *molecular*. Se tivermos um único pigmento que absorva toda a luz visível, veremos a cor preta. Porém, em uma mistura de pigmentos, cada pigmento absorve parte das cores e reemite as demais. Em tese, as frequências reemitidas serão absorvidas por outros pigmentos, diferentes dos primeiros, que se encontram nas adjacências. No entanto, sempre existirá, em nível molecular, espaço entre as partículas e nem toda a luz reemitida por uma será absorvida pelas adjacentes [1]. Por isso, o resultado real não será preto.

Além das combinações de frequências eletromagnéticas, podemos obter os demais efeitos de cor dos objetos através da variação de luminosidade e de saturação do feixe, como já vimos anteriormente.

4. O espectro de ondas eletromagnéticas e a não ressonância luz-matéria no visível

Para explicar que a maçã é vermelha, eu deveria dizer que os elétrons dela pulam para outros níveis energéticos ao absorver a luz e, ao voltarem, reemitem no vermelho.

Um aluno que aprende elementos da teoria quântica pode ser levado a pensar que deve abdicar do modelo ondulatório e tentar explicar todos os fenômenos relacionados à luz com base em interações ressonantes. O problema está no fato de que nem todas as interações da luz visível com a matéria são ressonantes – e interações não-ressonantes também podem produzir fenômenos de cor. No entanto, muitos professores de física nunca aprenderam a tratar os fenômenos da cor com base no modelo ondulatório.

Abaixo, na Fig. 6, ilustramos o espectro de ondas eletromagnéticas (*o.e.m.*) em ordem crescente de frequências, e destacamos a faixa do espectro visível ao olho humano. Vejamos como as partículas da matéria reagem a essas diferentes frequências eletromagnéticas.

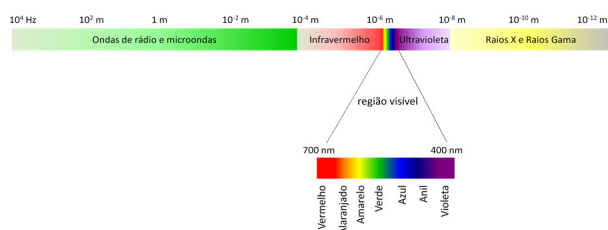


Figura 6 - Espectro das *o.e.m.*

4.1. As microondas e o infravermelho (IV)

Existem efeitos quânticos de ressonância das moléculas com as *o.e.m.* na faixa do infravermelho – as moléculas absorvem a radiação incidente e modificam seus níveis (quantizados) rotacionais e vibracionais [9]. É por isso que essas frequências produzem o aquecimento da matéria: as moléculas são capazes de absorver a radiação e transformá-la em energia cinética, o que aumenta a temperatura. É o que acontece com um copo de água colocado em um forno de microondas e com objetos deixados ao sol (pois uma considerável fração da luz solar está na faixa IV).

4.2. A radiação ultravioleta (UV)

As *o.e.m.* na faixa ultravioleta também podem produzir efeitos de ressonância, desta vez com os elétrons dos átomos. Os elétrons absorvem a radiação e saltam para outros níveis quânticos. A absorção quantizada da luz nessas duas faixas de frequência nos obriga a tratar, nesses casos, a luz como pacotes de energia (fótons) e esses fenômenos são estudados pela teoria quântica.

4.3. A luz visível

Normalmente, a luz visível tem energia muito pequena para excitar elétrons a um novo estado quântico, e tem energia muito grande para interagir quanticamente com as moléculas [9]. Por conseguinte, essas interações são tratadas pelo eletromagnetismo clássico usando um modelo que prevê como as cargas elétricas presentes na matéria oscilam sob o efeito do campo eletromagnético oscilante de uma onda eletromagnética.

Em 1900, Paul Drude, interessado em explicar a condução elétrica (e térmica) dos metais, modelou os elétrons livres de um metal como se fossem um gás de elétrons, que se movem através de um fundo formado por uma rede de íons positivos relativamente fixos. Com essa modelagem, seria possível utilizar a teoria cinética dos gases para estudar influência de um campo elétrico sobre um metal, e as cargas elétricas poderiam então ser tratadas como partículas materiais, com seu comportamento descrito utilizando-se as leis da mecânica.

Nos anos seguintes, Hendrik A. Lorentz aproveitou a ideia de Drude, modelando o comportamento das cargas elétricas da matéria (ligadas entre si), quando sob influência de um campo eletromagnético externo: essas cargas elétricas foram consideradas como *partículas* capazes de *oscilar* a partir de sua interação com o campo. Essa oscilação poderia ser descrita com o mesmo formalismo utilizado para as partículas mecânicas que oscilam sob influência de uma força externa.

Por essas contribuições, o modelo que trata do comportamento das cargas da matéria (seja esta um dielétrico ou um metal), considerando-as como osciladores sob ação de ondas eletromagnéticas, é usualmente denominado como modelo de Drude-Lorentz.

5. O modelo de Drude-Lorentz em cargas elétricas ligadas

A luz interage com a matéria porque ambas têm propriedades elétricas e magnéticas. Essa compreensão é fundamental para o entendimento das interações luz-matéria que utilizam o modelo físico ondulatório da luz. Mas uma modelagem física das partículas da matéria também é necessária.

O modelo de Drude-Lorentz nos permite tratar as interações não ressonantes da luz com a matéria. Este modelo, basicamente, trata as cargas elétricas presentes na matéria como se fossem pequenos osciladores, que oscilam de forma forçada sob a ação das ondas eletromagnéticas [9, 13]. No caso das cargas ligadas, como outros osciladores, consideramos que elas também possuem uma frequência de ressonância (ω_0) e quando são expostas a ondas de diferentes frequências, o efeito final é simplesmente o da superposição de todos os movimentos que ocorreriam quando da exposição a cada frequência em separado.

Essa última consideração é importante, uma vez que a luz proveniente do sol, ou mesmo de fontes artificiais, é uma mistura de ondas de diversas frequências. Justamente por causa desse efeito de superposição podemos estudar o movimento dos osciladores sob a influência de ondas eletromagnéticas com uma frequência específica e depois, se for o caso, superpor os efeitos obtidos para avaliarmos a influência de *o.e.m.* na sua totalidade de frequências componentes.

Vamos pensar agora nos efeitos de uma onda eletromagnética de frequência genérica ω num oscilador cuja frequência de ressonância é ω_0 . Esta onda provocaria uma oscilação forçada no oscilador. A força exercida no oscilador seria

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

onde \mathbf{F} é a força exercida pela onda eletromagnética; q é a carga que oscila sob frequência da luz incidente; \mathbf{E} e \mathbf{B} são, respectivamente, o campo elétrico e o campo magnético da onda eletromagnética incidente; e \mathbf{v} é a velocidade da carga.

Considerando que a razão entre os módulos dos campos elétrico e magnético é dada por $B = E/c$, temos que

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \frac{\mathbf{E}}{c}). \quad (2)$$

No entanto, como $c \gg v$, temos que $|q \cdot \mathbf{E}| \gg |q(\mathbf{v} \times \frac{\mathbf{E}}{c})|$.

Dessa forma, podemos aproximar a equação da força, em módulo, para

$$F \cong q \cdot E. \quad (3)$$

Como supomos oscilação periódica da *o.e.m.* incidente, consideramos que o módulo do campo elétrico, simplificando para uma luz polarizada se propagando na direção do eixo x positivo, pode ser descrito por uma equação do tipo

$$E = E_0 \cos(kx - \omega t), \quad (4)$$

onde E_0 é o valor máximo do módulo do campo elétrico da onda eletromagnética incidente; k é o módulo do vetor de onda (número de onda); ω é frequência de oscilação do campo elétrico da onda eletromagnética incidente; e t é o tempo.

Combinando as equações acima, temos que a magnitude da força sobre o oscilador (que é uma força que varia no tempo) pode ser descrita por

$$F(t) = q \cdot E_0 \cos(kx - \omega t) = F_0 \cos(kx - \omega t). \quad (5)$$

No modelo que estamos tratando, os átomos (íons) e elétrons são tratados como osciladores que oscilam devido à interação com *o.e.m.* Esses osciladores possuem uma massa m e uma constante elástica k . Numa

oscilação forçada, o movimento do oscilador pode ser descrito por

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot x = F(t). \quad (6)$$

Dividindo todos os termos da equação por m e substituindo $F(t)$ conforme a Eq. (5), temos

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} \cdot x = \frac{F_0}{m} \cos(kx - \omega t) \quad (7)$$

Lembrando que $k/m = \omega_0^2$, a solução dessa equação diferencial terá a forma

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (8)$$

onde a amplitude (A) de oscilação do sistema é [10]

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (9)$$

O movimento do oscilador sob a ação da força dependerá da relação entre os valores de ω (frequência da onda incidente) e ω_0 (frequência natural do oscilador). A partir da Eq. (9), analisamos 3 casos da relação entre ω_0 e ω :

- se a frequência da força F for muito menor que a frequência natural de oscilação do sistema ($\omega \ll \omega_0$), a amplitude A poderá ser aproximada por $A = F_0/m\omega_0^2$, de forma que o movimento será dominado pela força restauradora.
- se a frequência da força F for muito maior que a frequência natural do sistema ($\omega \gg \omega_0$), a amplitude A poderá ser aproximada por $A = -F_0/m\omega^2$. Percebemos pelo sinal negativo que há inversão de fase e que a amplitude será pequena, visto que ω é grande.
- se a frequência da força F for da mesma ordem de grandeza da frequência natural de oscilação ($\omega \approx \omega_0$), caso de ressonância, voltamos à equação original do movimento, impondo o limite $\omega \rightarrow \omega_0$ (ver [10] pg. 81), o que nos fornece o valor de amplitude (que cresce com o tempo até o limite de estabilização por efeitos dissipativos) de $A = F_0/2m\omega_0$.

A resposta do oscilador seria, portanto, algo como representado na Fig. 7, a seguir, que mostra a amplitude (parâmetro vertical) da oscilação de resposta a uma onda incidente de amplitude "a". O parâmetro horizontal é o tempo.

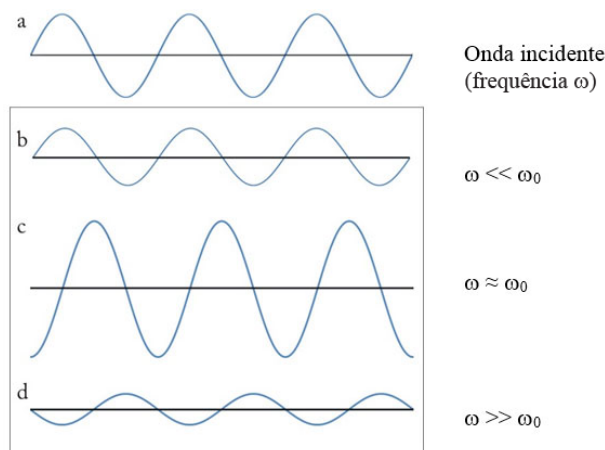


Figura 7 - Resposta de um oscilador com frequência de ressonância igual a ω_0 à passagem de uma onda eletromagnética de frequência ω .

Para ser utilizado, o modelo de Drude - Lorentz necessita do valor da frequência de ressonância dos osciladores. Esses últimos, nos casos que estamos tratando, seriam moléculas ou elétrons ligados a átomos. Mas o que determinaria o valor dessa frequência de ressonância? O eletromagnetismo clássico não fornece essa informação; para tal precisamos recorrer à teoria quântica. Vimos anteriormente que existem efeitos quânticos de ressonância das moléculas com as *o.e.m.* na faixa do infravermelho e com elétrons dos átomos na faixa do ultravioleta; são justamente esses efeitos que determinam a frequência de ressonância (ω_0) dos osciladores do modelo. Assim, os efeitos da luz visível em osciladores cujas frequências de ressonância estão nas regiões do infravermelho e do ultravioleta são efeitos não ressonantes.

Estes efeitos serão tratados de forma mais pormenorizada daqui em diante.

6. Aplicação do modelo e espalhamento Rayleigh – a cor do céu

Na verdade, se eu pensar na luz como uma onda, não consigo entender por que somente a luz azul é refletida pelos gases da atmosfera, se esses gases não absorvem no visível. Mas, pensando na luz como uma partícula (fóton), também não (...), porque a luz vermelha também deveria colidir e se espalhar.

Com base no modelo exposto, estudaremos a cor azul do céu. Vejamos, então, como se interpreta esse fenômeno, utilizando explicitamente o modelo ondulatório para a luz.

Os gases predominantes na atmosfera são o nitrogênio e o oxigênio, e ambos, como a maioria das moléculas simples, não possuem ressonância no espectro visível – portanto podemos interpretar as interações da luz visível com tais moléculas com o modelo ondulatório. Utilizando para as moléculas o modelo de Drude-Lorentz, podemos substituí-las por dois tipos

de osciladores: um com frequência de ressonância na região do infravermelho (correspondendo a níveis vibracionais e rotacionais das moléculas) e outro na região do ultravioleta (que corresponde a mudanças de níveis energéticos dos elétrons ligados). As interações da luz visível serão, em seguida, estudadas como ações nesses dois tipos de osciladores.

Quando a frequência ω da onda incidente é muito menor que a frequência ω_0 de ressonância, podemos desprezar o termo ω^2 no cálculo da amplitude (Eq. (9)) e considerar o movimento dominado pela força restauradora (da frequência fundamental do oscilador). Como ω_0 é uma constante, as interações $\omega \ll \omega_0$ possuem amplitude praticamente independente da frequência da luz incidente. É o caso das interações da luz visível com os osciladores eletrônicos: a frequência de ressonância dos elétrons é maior que a frequência da luz incidente e, por isso, quando qualquer comprimento de onda visível incide sobre um desses osciladores, provocará praticamente o mesmo efeito (isso também ocorre, por exemplo, com as interações dos osciladores pesados, que possuem ω_0 na faixa do infravermelho, com *o.e.m.* da faixa das microondas).

Quando a frequência ω da luz incidente se aproxima de ω_0 , a amplitude de oscilação deve aumentar. O gráfico da Fig. 8 descreve esse efeito. A curva desenhada no gráfico pode servir tanto para osciladores correspondentes a elétrons (ligados aos átomos), quanto para moléculas. O pico de amplitude ocorre em sua frequência ω_0 de ressonância (que para os elétrons é UV e para as moléculas é IV ou microondas). Para a esquerda desse pico, observa-se uma amplitude constante, que cresce de modo mais perceptível a partir de $\omega \approx \omega_0/2$.

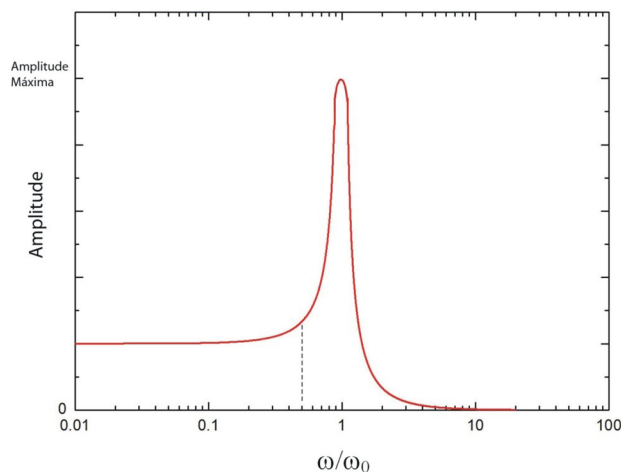


Figura 8 - Amplitude do oscilador vs. frequência da radiação incidente sobre a de ressonância do oscilador.

Em uma possível interpretação do gráfico para uma situação concreta, supomos que a curva represente um oscilador eletrônico. Para uma molécula de nitrogênio, a primeira banda de absorção UV ocorre em torno de 189 nm [11], que corresponde a uma frequência an-

gular em torno de $\omega = 10^{16}$ rad/s. Nele, $\omega_0/2$ corresponde aproximadamente à frequência da luz violeta ($\omega = 4,7 \times 10^{15}$ rad/s). Assim, é razoável que as faixas azul e violeta tenham re-emissão mais intensa do que frequências visíveis menores, sendo, por isso, mais espalhadas por esse gás. E como os demais gases presentes na atmosfera possuem comportamento semelhante ao do nitrogênio, causando espalhamento na faixa da luz azul-violeta, essa cor chega aos nossos olhos vinda de todos os pontos da atmosfera – e vemos o céu azul.³ Em 1871, Lord Rayleigh mostrou empiricamente que a intensidade da luz visível espalhada pela atmosfera obedece a uma dependência com ω^4 , o que expressa o espalhamento maior das frequências próximas ao azul na atmosfera, devido à interação com os elétrons dos átomos dos gases que a compõem, conforme previsto pelo modelo de Drude-Lorentz [1].

E os osciladores moleculares dos gases, em que contribuem para o fenômeno da cor do céu? Como falado anteriormente, substituímos as moléculas do ar por dois tipos de osciladores – um leve, que representa os elétrons dos átomos, e outro mais pesado, que representa oscilações das próprias moléculas. O gráfico da Fig. 8 justifica por que, ao estudarmos as interações da luz com a matéria, podemos desprezar os efeitos da interação da luz com os osciladores moleculares – que são aqueles com ω_0 no espectro infravermelho.

A parte à direita do pico de oscilação de um oscilador, na Fig. 8, mostra uma oscilação de mínima amplitude. Essa é a situação em que $\omega \gg \omega_0$ na Eq. (9). Nesse caso, podemos desprezar o termo ω_0 da equação, e teremos uma amplitude dependente de ω . Mas ω sendo grande e estando no denominador, fará com que a amplitude de oscilação seja realmente muito pequena. É o que ocorre quando a luz visível interage com os osciladores moleculares (e também o que ocorre com *o.e.m.* com frequências maiores que a UV em interação com os osciladores eletrônicos).

7. A cor do Sol

É estranho admitir que a estrela mais próxima de nós é amarela e no entanto emite luz branca. Afinal, o Sol é mesmo amarelo ou é só algum efeito visual?

O Sol é visto amarelo porque é uma estrela de 5ª grandeza, então emite mais luz amarela que as outras. O Sol da tarde é avermelhado porque o amarelo colide mais com o ar e fica para trás.

Quando os astrônomos classificam as estrelas em “azul”, “amarela” e “vermelha”, eles não se referem precisamente ao pico de emissão da estrela, mas simplesmente usam essas cores como referências para indicar diferenças de temperatura. Em particular, o nosso

Sol (classificado como uma estrela de 5ª grandeza, ou “amarela”) tem pico de emissão próximo a 500 nm – ou seja, na região verde do espectro (Fig. 9). Mas a saturação do verde é tão baixa que podemos afirmar que a cor do Sol, fora da atmosfera, é branca.

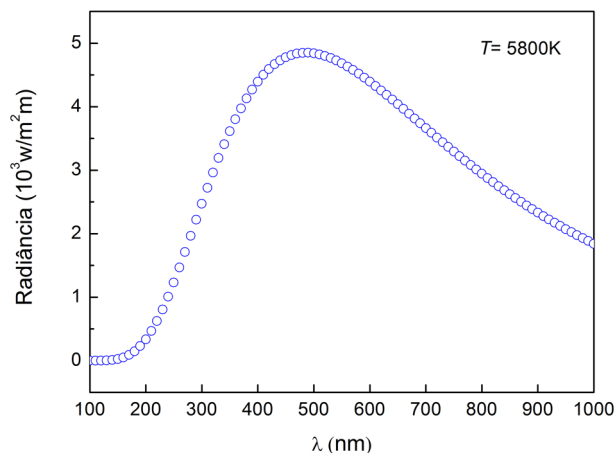


Figura 9 - Espectro de emissão do Sol, aproximado pelo espectro de um corpo negro a 5800 K [12].

Contudo, na superfície da Terra o Sol tem aspecto amarelado. Essa cor amarelada, assim como a cor azul do céu, também pode ser explicada espalhamento preferencial das *o.e.m.* de frequências na faixa azul na atmosfera terrestre: a faixa azul é parcialmente retirada do feixe de luz principal que nos chega diretamente do Sol. Retirando-se o azul, os cones mais sensibilizados da retina são os L e M (com cones C menos sensibilizados) e portanto a sensação visual é de cor amarela (essa análise também pode ser feita pelo conceito de cores complementares, no diagrama de cores primárias por absorção; ver Seção 3).

O espalhamento Rayleigh também determina por que os sabões em pó são muitas vezes fabricados na cor azul. A predominância do amarelo na luz solar incidente nas roupas pode lhes conferir um tom envelhecido. Para anular o efeito, adiciona-se um pigmento azul à roupa ao lavá-la, de modo que esta mantenha, após a lavagem, uma leve reemissão adicional no azul, compensando a carência desse comprimento de onda na luz solar incidente.

8. Fenômenos de reflexão e refração – a cor das nuvens

Embora a reflexão e a refração sejam comumente utilizadas em situações didáticas para explicar o arco-íris, muitos textos que explicam a cor da nuvem utilizam o termo “espalhamento” (significando, implicitamente, as sucessivas reflexões e refrações). Não vamos utilizar esse termo, porque ele pode confundir em vez de escl-

³Não vemos o céu violeta porque a faixa violeta que chega à superfície é menos intensa que as demais faixas do visível e também porque os cones “vermelhos” da retina humana são levemente estimulados pela luz violeta, influenciando na “soma” das intensidades que o cérebro faz para interpretar a cor (vide Fig. 2).

recer. O que ocorre com a luz na nuvem é diferente do que ocorre nos gases da atmosfera – afinal, a água da nuvem está em estado líquido.

Os fenômenos de reflexão e refração são usualmente interpretados com a óptica geométrica. Tentamos, a seguir, enfatizar o modelo ondulatório e as interações com a matéria que resultam nesses fenômenos.

As nuvens são feitas de água no estado líquido e ar. As moléculas de água, assim como as do ar, também possuem frequências de ressonância (ω_0) apenas no IV e no UV. Portanto o espalhamento Rayleigh que ocorre nas moléculas da atmosfera também ocorre nas moléculas da nuvem. Por conseguinte, uma pergunta razoável é – por que, então, a nuvem não é azul, seguindo-se o mesmo raciocínio que explica o azul do céu?

O que ocorre é que a reflexão e a refração anulam a preferência pelo azul do espalhamento Rayleigh, de modo a conferir a cor branca da nuvem. Recorrendo aos modelos físicos – para que haja esses fenômenos, é necessário que, assim como o ar, o outro meio tenha também *osciladores com frequências de ressonância apenas no IV e no UV* (para que não haja absorção significativa da luz visível), como é o caso da água. Além disso, os fenômenos de reflexão e refração dependem de um arranjo mais organizado das moléculas – o que ocorre nos líquidos e sólidos, mas não nos gases, onde as moléculas estão aleatoriamente espalhadas no espaço. Nos líquidos e sólidos a distância entre as moléculas é pequena em comparação com o comprimento de onda da luz visível (o que resultará em efeitos de interferência das *o.e.m.* reemitidas, como veremos a seguir). Dessa forma, os osciladores devem ser considerados como *acoplados* [9].

A luz incidente, ao atingir a interface entre dois meios, é absorvida parcialmente e reemitida pelos osciladores do material. A reemissão tem simetria esférica, conforme o princípio de Huygens. Em osciladores livres, a direção da onda emitida não seria regida pelas leis da reflexão ($i = r$) e da refração ($n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } r$). O acoplamento dos osciladores deve produzir esse efeito, e a explicação terá origem na interferência entre as ondas reemitidas por eles.

8.1. A refração

As ondas eletromagnéticas reemitidas pelos osciladores dos átomos sofrem interferências sucessivas entre si e com a parte da onda incidente que penetrou no material e não foi absorvida, de modo que se anulam em certas regiões do espaço (interferência destrutiva); em outras regiões há interferência construtiva, que é o que determina a direção de propagação da onda refratada [9]. Ou seja, as frentes de onda refratadas, de acordo com o modelo usado, são resultado da interferência construtiva da onda incidente com a onda produzida pela absorção e reemissão da luz pelos átomos do material. Podemos

considerar que a refração não discrimina frequências; portanto se a luz incidente é branca, a luz refratada também o será.

8.2. A reflexão

No interior do material, as ondas que são reemitidas para trás sofrem interferência destrutiva. No entanto, na superfície, por efeitos de assimetria, isso não acontece totalmente, o que resulta numa região em que há luz: a onda refletida.

O efeito da reflexão também depende de considerarmos os osciladores acoplados, pois a direção de propagação da onda refletida também é consequência de interferências construtivas e destrutivas das ondas produzidas por vários osciladores. Isso ocorre sempre que o sistema no qual a luz incide tiver tamanho muito maior que o comprimento de onda da luz [13]. A intensidade da onda de retorno à superfície de origem é considerada levando-se em conta três aspectos:

1. A intensidade da luz refletida (I) depende do número de osciladores (N) ao quadrado, considerando a hipótese de que em líquidos e sólidos os osciladores estão acoplados;
2. Os osciladores da superfície do material que contribuem para a onda refletida estão localizados a uma profundidade que corresponde a meio comprimento de onda ($\lambda/2$) da luz incidente;
3. A área da superfície do material em que os osciladores contribuem para a reflexão depende do comprimento de onda.

Dos itens 2 e 3 deriva-se que o volume, e portanto o número de osciladores, efetivo para a reflexão depende do comprimento de onda ao quadrado – $N \propto \lambda^2$.

Do item 1, temos que $I \propto N^2$.

Assim, $I \propto \lambda^4$: a reflexão tem uma dependência da quarta potência do comprimento de onda. Como o espalhamento tem dependência da quarta potência da frequência, os dois fenômenos, o espalhamento e a reflexão, se anulam quanto à emissão preferencial de um determinado comprimento de onda, e o resultado final da cor do material depende apenas da luz incidente. Se a luz incidente é branca, o material será também branco.

8.3. As nuvens e demais “grãos” de substâncias transparentes

Quando o óleo é misturado ao papel, ele fica translúcido porque há uma reação química, que modifica as propriedades ou então dissolve as fibras do papel.

A cor branca do açúcar refinado e do sal penso que é porque são adicionados aditivos químicos na sua produção. Já o açúcar cristal e o sal grosso são transparentes porque são naturais.

Eu li que a areia é branca por causa do espalhamento. Mas então, por que o espalhamento no céu resulta em cor azul, e o da areia resulta em branco?

As nuvens são compostas de gotículas de água. Enquanto cada gotícula for maior que o comprimento de onda da luz, podemos considerar osciladores acoplados, capazes de sustentar os processos de reflexão e refração descritos acima. Se a luz incidente é branca, as luzes refratadas e refletidas também serão, mas suas direções dependerão da direção da superfície das gotículas. E como essas estão aleatoriamente distribuídas, as ondas serão refletidas e refratadas em muitas direções e aleatoriamente no espaço, o que fará com que a água na nuvem perca a transparência, pois a luz emergente é difusa.

Essa explicação é a mesma para a cor do sal em pó, do açúcar refinado, de pequenos cacos de vidro ou cristais, e de todos os pequenos grãos brancos de substâncias que são transparentes [1]. Até mesmo a cor branca do papel é explicada dessa forma, uma vez que o papel é formado por fibras transparentes onde fenômeno semelhante acontece.

Ainda sobre o papel, quando pingamos uma gota de óleo ou cera nele, os espaços vazios das fibras são preenchidos, tornando o meio mais homogêneo e diminuindo as sucessivas reflexões e refrações entre as fibras e o ar, o que faz com que ele perca sua cor branca e se torne translúcido.

Conforme as gotículas de água das nuvens ficam menores, as reflexões deixam de acontecer e sobra somente o espalhamento Rayleigh. E, assim, a nuvem “some”, pois fica da mesma cor da atmosfera ao seu redor.

9. O fenômeno da absorção - a cor do mar

Se vemos o mar azul, deveríamos dizer que é porque a água é azul. Mas sabemos que ela não é azul, então devem ser os sais e os micro-organismos que são azuis.

A água da piscina é azul porque o ladrilho é azul. Na água do mar deve acontecer algo parecido? Será que a areia do fundo deve refletir o azul?

Além das hipóteses muito engenhosas que aparecem nas frases acima, uma afirmação comum é que o azul do mar é provindo da reflexão do céu. Essa reflexão acontece, mas como qualquer outro fenômeno de reflexão, ele é um efeito de superfície. Portanto, se somente esse efeito acontecesse para determinar a cor do mar, como poderíamos explicar o azul do mar em dia nublado? Ou, então, como explicaríamos a diferença de tonalidade de azul conforme a profundidade, se efeitos de superfície não dependem da profundidade?

As hipóteses sobre a influência da areia, de sais e impurezas ou de micro-organismos como causas do azul

do mar também são facilmente refutáveis. A areia não é azul. Os micro-organismos absorvem a luz visível, porém tanto as clorofilas quanto os carotenoides presentes no fitoplâncton têm pico de absorção na região azul [14] – ou seja, os microrganismos *retiram* a faixa azul, intensificando a faixa verde do espectro, que é menos absorvida.

A hipótese das partículas em suspensão também pode ser analisada conforme o espectro de absorção dessas partículas, e encontra-se também maior absorção na faixa azul [15]. Portanto, esses fatores poderiam ser a causa de o mar *não* ser azul (como muitas vezes é o caso).

Para explicar o azul do mar, precisaremos recorrer a um quarto fenômeno de interação da luz com a matéria: a absorção. Os picos de ressonância da água também ocorrem nas faixas UV (eletrônica) e IV (molecular – níveis rotacionais e vibracionais das moléculas), distantes do visível. Mas a água líquida (e também o gelo) tem forças intermoleculares adicionais – as pontes de hidrogênio –, o que provoca um fortalecimento das ligações (o que seria equivalente a deixar uma corda de violão mais apertada – a frequência de ressonância aumenta). Assim, passam a ocorrer absorções em nível molecular que se estendem até comprimentos de onda próximos ao visível (Fig. 10).

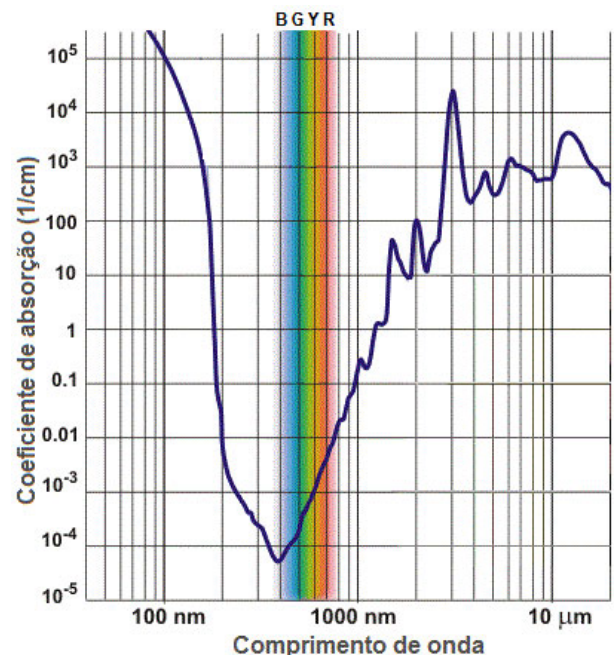


Figura 10 - Curva de absorção molecular da água. Na figura, R = vermelho, Y = amarelo, G = verde, B = azul [16].

A Fig. 10 mostra intensa absorção da luz pelas moléculas de água na faixa espectral do infravermelho, com vários picos de ressonância nessa faixa – correspondentes às principais transições de níveis vibracionais e rotacionais das moléculas. Observa-se, no entanto, uma curva contínua de absorção que se estende até a faixa visível. Se os níveis são quantizados, por que a curva

de absorção é contínua?

Essa questão torna mais pertinente o uso do modelo ondulatório. Para justificar a pequena absorção no visível, consideramos que os osciladores moleculares podem absorver a energia de uma onda que vibre em um dos harmônicos de seus modos fundamentais de vibração. A molécula de água, no estado líquido, possui muitas frequências de ressonância, pois para cada nível eletrônico pode haver algumas dezenas de níveis vibracionais. Assim os níveis vibracionais estão muito mais próximos um do outro do que os eletrônicos (que são no UV), e seus harmônicos superiores e combinações também se tornam muito próximos, originando esse padrão de absorção praticamente contínuo.

Devido à absorção nos harmônicos superiores (especialmente os harmônicos da faixa visível, que estão mais distantes do modo fundamental de vibração) ter intensidade muito pequena, a água em pequenas quantidades não é colorida. Porém grandes volumes de água assumem a cor azul-esverdeada (ciano) – que é a cor resultante quando ocorre a absorção da faixa vermelha do espectro.

O fenômeno se intensifica em maiores profundidades (no fundo do mar, por exemplo), pois a absorção da luz amarela também se torna relevante, fazendo com que a cor percebida seja um azul mais escuro. Abaixo de certa profundidade, toda a luz vermelha é absorvida, e objetos que refletem somente o vermelho se tornam escuros.

Assim, enquanto o azul do céu é causado pelo *espalhamento* dos comprimentos de onda menores, o azul da água é explicado pela *absorção* dos comprimentos de onda maiores do espectro visível.

10. Os osciladores livres e a cor dos metais

Eu gostaria de dizer que o espelho é branco, porque reflete todas as cores; mas não é um branco como o do papel...

As estruturas metálicas possuem uma característica diferente dos outros materiais, que é a presença de elétrons de condução, com movimento livre. Podemos representar esses elétrons por *osciladores livres*, que ressoam com qualquer frequência. Assim, a luz incidente em uma estrutura metálica pode retornar ao meio de origem sem nenhuma absorção especial. Isso explica o brilho dos metais e sua cor prateada. Sabemos também que em materiais condutores não há campo elétrico (e *o.e.m.*) em seu interior. Portanto, as *o.e.m.* que incidem sobre eles são quase totalmente refletidas. Se a superfície for polida, de modo que as direções de reflexão sejam ordenadas, o metal se comporta como um espelho.

Alguns metais, no entanto, são amarelados, indicando a existência de outros fenômenos – que não mais poderão ser explicados pelo modelo ondulatório da luz

e pelo modelo de Drude-Lorentz da matéria. Isso será tratado a seguir.

11. Extrapolação do modelo ondulatório: exemplos de ressonância no visível

Quando eu explico que a luz incide em uma molécula e se reflete ou é espalhada, eu não estou usando o modelo quântico? Mas então como seria uma explicação que utiliza a quântica?

A cor amarelada, que alguns metais exibem, não se deve aos elétrons livres, mas aos *ligados*. Acontece, por exemplo, com o ouro e o cobre, que seus elétrons ligados possuem algumas transições quânticas de baixa energia. No ouro há uma forte absorção em 2,3 eV (540 nm; verde-azul) e a cor amarela é o resultado da reflexão especular (por elétrons livres), subtraída a faixa espectral relacionada a essa absorção seletiva. No cobre, a absorção ocorre em energia um pouco menor, resultando na cor alaranjada. A transição de energia mais baixa da prata, em contraste, é em 4 eV, que corresponde a um comprimento de onda na faixa UV (310 nm) [2].

Nos metais, a luz que foi absorvida pelos elétrons ligados seria reemitida em todas as direções. Se for construído um filme de ouro, fino o suficiente para que ocorra transmissão de luz, a luz transmitida será aquela proveniente da absorção e reemissão, resultando em outra cor para o mesmo material. Filmes de ouro de cerca de 100 nm de espessura são azul-esverdeados, justamente por causa da transmissão das faixas espectrais re-emitidas [1].

Pigmentos e tinturas, como os que fornecem o colorido de animais e plantas, e também os usados para tingir roupas e alimentos, são moléculas que possuem ressonância com a luz visível, e a cor que vemos é resultado do fenômeno de absorção quântica de algumas faixas de frequência da luz por essas moléculas. Nesse caso, não mais podemos utilizar o modelo ondulatório para a luz. Como seria uma explicação segundo o modelo quântico?

Como exposto anteriormente, átomos e moléculas simples possuem ressonâncias somente no UV e IV. O que faz com que uma substância consiga absorções no visível? Há dois meios possíveis:

1. átomos com vários sub-níveis incompletos e com elétrons desemparelhados, ligados a determinadas estruturas que propiciem transições de pouca energia dos elétrons para níveis excitados; e
2. moléculas grandes com ligações duplas entre átomos (geralmente ligações entre carbonos), em que as ligações possam ir para estados excitados.

Estes casos são os que explicam a maior parte das cores que enxergamos na natureza. Citaremos a seguir

alguns fenômenos relacionados a cada um desses itens, cuja explicação mais aprofundada se encontra em Nassau [1].

11.1. Caso 1: átomos com sub-níveis incompletos

Em ligações iônicas puras (por exemplo, NaCl) ou covalentes puras (O_2), os elétrons estão emparelhados, e desemparelhá-los (para levar um elétron a um estado excitado) requer grande quantidade de energia. Desse modo, os elétrons desses tipos de ligações não absorvem a luz visível seletivamente, e o material é transparente.

Átomos dos metais de transição possuem elétrons desemparelhados em sub-níveis *d* ou *f* em camadas anteriores à de valência. Vimos, por exemplo, que elétrons ligados aos átomos de ouro e cobre possuem transições em comprimentos de onda visíveis. Então, dopar um material com átomos de metais de transição pode resultar em efeitos de cor.

Por exemplo, a molécula Al_2O_3 (óxido de alumínio) tem elétrons emparelhados (portanto não absorve no visível) e um cristal deste material é transparente. Já a estrutura Cr_2O_3 (óxido de cromo), porque o cromo é um metal de transição, tem três elétrons desemparelhados: o átomo de cromo não ligado possui seis elétrons desemparelhados (configuração eletrônica externa $3d^5 4s^1$); na estrutura do óxido, o cromo doa três desses elétrons aos oxigênios.

Ao doparmos um cristal de óxido de alumínio com alguns átomos de cromo, conseguimos absorções em alguns comprimentos de onda da faixa visível – violeta e amarelo-verde – devido à ressonância dos elétrons da camada de valência do cromo com esses comprimentos de onda. Isso resulta na cor vermelha. Essa é a causa da cor de um rubi, que é um cristal de óxido de alumínio dopado com cerca de 1% de cromo.

O que acontece com a luz que foi absorvida? Após passar a um estado excitado, o elétron pode voltar para o estado fundamental em “degraus”, cada um deles com frequência de emissão abaixo do visível. Em outros casos, a energia da luz incidente é absorvida pelo material e transformada em agitação térmica. Existem ainda casos em que a luz é re-emitida na faixa do visível, resultando em um fenômeno que chamamos de fluorescência (caso a transição se dê a um nível quântico permitido) ou fosforescência (transições a partir de níveis quânticos proibidos, e que portanto ocorrem com maior retardo).

11.2. Caso 2: Moléculas orgânicas

A Fig. 11 mostra três moléculas que dão cor a substâncias: a hemoglobina, que tem coloração vermelha; o índigo, corante natural azul extraído da planta *Indigofera tinctoria*; e a mauveína, primeiro corante artificial, sintetizado em 1856, que confere coloração púrpura a tecidos.

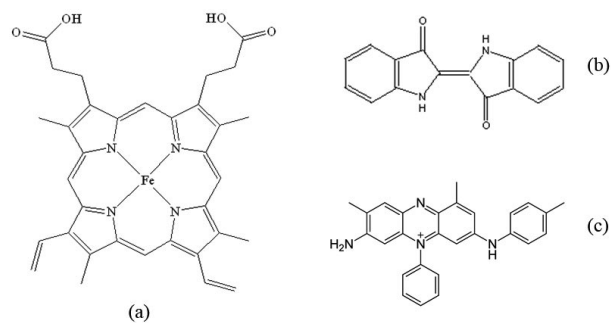


Figura 11 - Estrutura das moléculas da hemoglobina (a), índigo (b) e mauveína (c).

Essas três moléculas, assim como outras que funcionam como pigmentos ou tinturas, conseguem absorções de luz na faixa visível porque suas ligações interatômicas entram em ressonância com a luz e vão para estados excitados. A explicação está nas suas ligações duplas e no tamanho grande das moléculas.

Quando um átomo forma ligação dupla, a segunda ligação (denominada π) é menos estável e requer bem menos energia para passar ao estado excitado (denominado π^*). Um problema é que geralmente essas transições, mesmo as $\pi \rightarrow \pi^*$, ainda requerem energias na faixa UV.

Contudo, o formato ou o tamanho da molécula podem fazer essas energias diminuírem. Por exemplo, no formaldeído ($H_3C=O$), a absorção para π^* exige comprimento de onda de 290 nm, que é UV. Porém, ao adicionarmos mais dois carbonos em hibridação sp^2 (ou seja, com uma dupla ligação cada), conseguiremos que a ressonância dessas duplas ligações conjugadas faça com que a energia de transição para o π^* abaixe para a faixa de 330 nm, que corresponde à luz amarela [1].

As moléculas que atuam como pigmentos ou tinturas, como as da Fig. 11, além de conter grande quantidade de ligações duplas conjugadas, também são longas e contêm cadeias cíclicas, atributos que contribuem para a diminuição da energia de transição de suas ligações.

Sem querermos nos alongar neste tópico, percebemos que o fator mais relevante para os fenômenos de cor em pigmentos depende de compreendermos a transição de elétrons ou de ligações entre átomos para estados excitados. Nesses fenômenos, não falamos tanto em *oscilação* das cargas elétricas, mas em *transição* entre níveis de energia, ou seja, sofisticamos também o modelo de matéria usado para a interpretação das interações. Além disso, só conseguimos explicar que a absorção ocorre em determinados comprimentos de onda (independentemente da intensidade total do feixe), se empregarmos para a luz o modelo quântico.

12. Finalizando

Utilizar o modelo ondulatório, em vez de somente um modelo simplificado de raios de luz ou corpúsculos de

luz que “colidem” com átomos, aumenta consideravelmente a complexidade do estudo em óptica. Mas considerando que um dos objetivos do ensino de física é a utilização de modelos físicos para a interpretação e entendimento do mundo, o modelo ondulatório leva a um aumento dessa capacidade de entendimento, proporcionando também uma maior compreensão teórica da óptica e do eletromagnetismo.

Nas explicações didáticas é comum que os modelos físicos ocupem uma posição implícita, pois muitas vezes a explicação é identificada com o próprio mundo empírico (o que pode deixar no ouvinte a impressão de que o conhecimento físico é uma “cópia” do mundo e não uma construção sobre ele). Quisemos, nesse ensaio, deslocar o conceito de modelo físico de uma posição implícita para o foco da explicação.

A modelagem física – a atividade humana de construção de um conhecimento para explicar um objeto ou fenômeno – é frequentemente colocada como um dos alicerces do ensino para a escola básica. Essa opção pedagógica tem como passo importante a compreensão dos próprios modelos científicos e a capacidade de, com eles, representar fenômenos (além de relacionar esses modelos a teorias mais gerais). Este artigo procurou fazer isso, ao utilizar modelos de luz e de matéria no cerne da explicação de uma variedade de fenômenos relativos à cor, podendo servir de subsídio a professores que desejem abordar a óptica física em suas aulas.

Agradecimentos

Ao prof. Dr. Luciano Duarte, pelas discussões e incentivos a esta publicação. Fábio Marineli agradece à FAPEG e à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] K. Nassau, *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color* (Wiley & Sons, New York, 2001).

- [2] Optical Society of America, *The Science of Color* (Thomas Y. Crowell Co., New York, 1953).
- [3] J.R. Pierce, *The Science of Musical Sound* (W.H. Freeman & Co., New York, 1996).
- [4] Imagens elaboradas a partir de um simulador que se encontra no endereço http://www.cs.brown.edu/exploratories/freeSoftware/repository/edu/brown/cs/exploratories/applets/spectrum/metamers_guide.html; acesso em 19/6/2013.
- [5] S.J. Williamson and H.Z. Cummins, *Light and Color in Nature and Art*. (Wiley & Sons, New York, 1983).
- [6] C.C. Silva e R.A. Martins, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **18**, 313 (1996).
- [7] M.R.M. Piccinin *et al.* *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia* **70**, 259 (2007).
- [8] T. Lamb and J. Bourriau, *Colour Art & Science* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [9] V. Weisskopf, *Scientific American* **219**, 60 (1968).
- [10] M. Nussensveig, *Curso de Física Básica, v. 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor* (Edgard Blücher, São Paulo, 1996).
- [11] A.E.S. Green (editor), *The Middle Ultraviolet: Its Science and Technology* (Wiley & Sons, London, 1966).
- [12] A. Fraknoi, D. Morrison and S. Wolff, *Voyages Through the Universe* (Brooks Cole, Belmont, 2003).
- [13] E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley Publ. Co., San Francisco, 1988).
- [14] N. Hoepffner and S. Sathyendranath, *Limnology and Oceanography* **37**, 1660 (1992).
- [15] J.T.O. Kirk, *Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).
- [16] M. Chaplin, *Water Structure and Science*. Disponível em <http://www.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>; acesso em 18/6/2013.