



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Espalhamento da Radiação Eletromagnética pela Matéria, as Cores dos Oceanos, das Nuvens e dos demais Objetos.

Em verbetes desta série, vimos que uma primeira explicação quantitativa do azul do céu foi dada pelo físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), em 1871, ao demonstrar, por intermédio da Análise Dimensional, que a intensidade (I) da luz espalhada por gases é proporcional à quarta potência da frequência (ν) da luz considerada ($I \propto \nu^4$), e que constitui o conhecido **espalhamento Rayleigh**. Mais tarde, em 1910, o físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) chegou a esse mesmo resultado em seu estudo sobre a opalescência crítica, fenômeno esse que decorre da flutuação do índice de refração dos gases. Portanto, a dependência da intensidade luminosa com a frequência da mesma, vista acima, explica a razão do azul do céu e da cor vermelha do Sol quando está nascendo ou se pondo. Porém, surge a seguinte pergunta: por que as nuvens são brancas? Como complemento a essa pergunta, coloca-se a questão sobre a **cor dos objetos**.

A resposta a esses questionamentos foi dada pelo estudo do **espalhamento da radiação eletromagnética** pela matéria (sólida, líquida e gasosa), estudo esse que começa com o desenvolvimento da Teoria Eletromagnética Maxwelliana, de 1873. Vejamos como isso ocorreu. Ainda usando verbetes desta série, vimos que, a partir de 1880, o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) começou a elaborar um modelo atômico eletrodinâmico-maxwelliano para a matéria, segundo o qual os “elétrons” (que para ele significava qualquer partícula carregada, positivamente ou negativamente, com ou sem massa) eram distribuídos no interior da matéria e livres de oscilarem com certa frequência própria (ν_0) em torno de posições fixas. Então, quando sobre eles incidia uma onda eletromagnética monocromática (de frequência ν bem definida) e portadora de campos elétrico (E) e magnético (H), transversalmente vibrantes, os “elétrons” sob a ação de E vibrariam na mesma frequência da luz incidente e a re-emitiriam. Esse modelo foi por ele usado para o desenvolvimento de sua Teoria do Elétron, a partir de 1892, e que lhe permitiu explicar a **dispersão da luz** [analisada pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em 1666, e que é consequência da dependência do índice de refração (n) dos materiais com a frequência (ν) da luz: $n(\nu)$]. No entanto, esse modelo atômico lorentziano apresentava dificuldade para estudar o espalhamento dos **raios-X** (que haviam sido descobertos em 1895, segundo vimos em verbebo desta série) pela matéria.

Para poder explicar o espalhamento referido acima, em 1904, o físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) formulou um modelo atômico segundo o qual o átomo era considerado como sendo constituído por uma carga elétrica positiva, homogeneamente distribuída na forma de uma esfera de raio da ordem de 1 \AA (10^{-8} cm), e movendo-se no seu interior, em anéis concêntricos, um certo número de elétrons de modo a manter o átomo neutro. Além disso, cada elétron de carga e e massa m era considerado ligado ao centro do átomo e oscilando amortecidamente com frequência própria (ν_0). Com esse modelo, Thomson conseguiu explicar o **espalhamento Rayleigh**, o espalhamento dos **raios-X** pela matéria – logo conhecido como **espalhamento Thomson** -, e o **espalhamento ressonante**. É oportuno registrar que a **seção de choque de espalhamento** (σ_E), que define esses tipos de espalhamento, é calculada relacionando-se a potência média da radiação devida à oscilação amortecida do elétron [obtida pelo físico inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1897] com

a intensidade média da radiação incidente de frequência (ν) [demonstrada pelo físico inglês John Henry Poynting (1852-1914), em 1884].

Segundo o físico austríaco Victor Frederick Weisskopf (1908-2002) [**Physics in the Twentieth Century** (The MIT Press, 1972)], a explicação da **cor dos objetos** é baseada na teoria atômica do átomo, segundo a qual os elétrons realizam pequenas vibrações quando são expostos à luz, cujas amplitudes de vibração são extremamente pequenas, da ordem de 10^{-7} m. Ainda segundo aquela teoria, a energia de átomos (ou um sistema de átomos tal como a molécula) só pode assumir determinados valores (níveis de energia) característicos de cada um deles. Ordinariamente, o átomo se encontra no menor estado de energia (*groundstate*). Quando o átomo recebe a luz de uma determinada frequência (**fóton**) correspondente à diferença de energia entre dois de seus níveis de energia, ele é **absorvido** pelo átomo e, então, muda para um nível excitado. Depois de um determinado tempo, ele é devolvido. Assim, de acordo com esse simples modelo, o átomo reage à incidência da luz somente quando a diferença de energia dos níveis atômicos for igual à energia do **fóton** incidente. Neste caso, se diz que a luz está em “ressonância” com o átomo; em caso contrário, isto é, quando o **fóton** não é **absorvido** pelo átomo, este é dito **transparente** ao mesmo. É oportuno destacar que o átomo também reage com a luz de qualquer frequência, mas essa reação “não ressonante” (importante também na aparência visual de um objeto) é mais sutil, e, portanto, seu tratamento é realizado pelo estudo do espalhamento quântico da luz, que é objeto da Eletrodinâmica Quântica (vide verbete nesta série).

Felizmente, segundo Weisskopf (op. cit.), o comportamento dos corpos perante a incidência de luz nos mesmos, pode ser explicado, *grosso modo*, por intermédio do modelo atômico de Thomson visto acima. Com efeito, seja uma onda eletromagnética de frequência (ν) bem definida (monocromática) incidindo sobre o átomo thomsiano. Assim, como registramos antes, o campo elétrico (E) dessa onda faz com que o elétron, de frequência própria ν_0 , comece a vibrar na mesma frequência desse campo e defasado do mesmo, e com uma amplitude que depende da relação entre ν e ν_0 . Se tivermos a relação $\nu \gg \nu_0$ ou $\nu \ll \nu_0$, a amplitude de oscilação do elétron será muito fraca. Porém, se $\nu = \nu_0$ se diz que o elétron está em **ressonância** com E, e, neste caso, a amplitude de sua oscilação é muito forte. Assim, de certa maneira, conforme veremos mais adiante, são essas oscilações atômicas as responsáveis por tudo o que **vemos**, pois, quando uma radiação eletromagnética [desde raios gama (γ), que têm $\nu > 3 \times 10^{19}$ Hz, decorrentes de transições nucleares, até ondas de rádio, caracterizadas por terem $\nu < 3 \times 10^9$ Hz] incide sobre um corpo, ou ela é re-emitada, sem quase mudar ν , ou é absorvida e transformada em energia térmica ($\approx kT$, sendo k a **constante de Boltzmann**), aumentando a temperatura (T) do corpo considerado.

Vamos analisar, com um pouco mais de detalhe, a resposta de um material (gasoso, líquido ou sólido) à incidência de uma onda eletromagnética monocromática (EEM) (ν). Começaremos pelo estado gasoso, pois seu comportamento em presença de uma onda eletromagnética nos permitirá explicar o já referido **espalhamento Rayleigh**, assim como outros resultados bem interessantes. Devido o grande afastamento entre átomos (ou mesmo moléculas) nos gases, e, também, a sua distribuição ser não-ordenada (isto é, caótica), cada um deles responderá à onda que o atinge, independentemente do outro. Vejamos, então, como o elétron (de frequência própria ν_0) de um átomo em um gás se comporta sob a ação de uma EEM. Na linguagem formal da Eletrodinâmica Maxwelliana, esse comportamento é traduzido pela **secção de choque de espalhamento** (σ_E) citada anteriormente. Assim, vejamos os três casos de espalhamento envolvendo a relação entre ν e ν_0 (vide verbete nesta série). 1) se tivermos $\nu \ll \nu_0$, então $\sigma_E \propto \nu^4$, reproduzindo o **espalhamento Rayleigh**. Com efeito, essa condição se aplica ao caso, porque a frequência da luz visível [correspondente à faixa de $(4,3-7,5) \times 10^{14}$ Hz] é muito inferior às frequências próprias (na faixa ultravioleta: de $7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$ Hz) dos elétrons atômicos dos gases da atmosfera [principalmente: oxigênio (O), hidrogênio (H) e nitrogênio (N)]; 2) para o caso em que $\nu \gg \nu_0$, então σ_E não depende de ν , resultado esse conhecido como **espalhamento Thomson** [usado para estudar o espalhamento de **raios-X** ($3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$ Hz) pela matéria]; 3) por fim, quando $\nu = \nu_0$, então $\sigma_{EMáximo} \propto \nu(\nu_0)$, e teremos o **espalhamento ressonante**. Este fenômeno é conhecido como **luminescência**, que é composto da **fluorescência** (tempo de re-emissão curto: $\sim 10^{-8}$ s) e da **fosforescência** (tempo de re-emissão longo, variando entre segundo e horas) (vide verbete nesta série). É interessante observar que a **fluorescência** é a base do funcionamento das **lâmpadas fluorescentes**, de

vapor de sódio (Na) e de vapor de mercúrio (Hg), nas quais, respectivamente, uma corrente elétrica excita os níveis de energia do vapor de Na e de Hg e, quando voltam ao estado fundamental, emitem luz. É interessante destacar que nas **lâmpadas fluorescentes tubulares**, algum tipo de gás é excitado por uma corrente elétrica e a radiação decorrente do dexcitamento do gás ativa um revestimento **fluorescente** aplicado sobre a superfície interna do tubo. [Itzhak Roditi, **Dicionário Houaiss: Física** (Objetiva, 2005)].

Tratemos agora da explicação das **cores dos objetos**. De modo geral, o comportamento de uma onda EMM ao atravessar um meio em que há uma distribuição quase regular de átomos ou moléculas (caso de líquidos e de sólidos), e cujo distanciamento médio (da ordem de Å) entre eles é muito menor que o comprimento de onda luminosa visível [correspondente à faixa de 4.000 (azul) – 7.000 (vermelho) Å] incidente, decorre de um processo tipo óptico, composto de **difração fresneliana** e de **interferência luminosa youngiana** (vide verbete nesta série). Com efeito, segundo registramos anteriormente, quando uma EMM incide sobre um meio, os elétrons deste, sob a ação do campo elétrico (E) da referida onda, começam a vibrar e re-emitem a onda incidente. Porém, devido ao espaçamento quase regular dos ressonadores (que são elétrons que funcionam como uma rede de difração) daquele meio, as ondas re-emitidas sofrem **interferência**, da seguinte maneira: **interferência construtiva**, principalmente nas direções de reflexão e refração obedecendo às leis da Óptica Geométrica (vide verbete nesta série); e **interferência destrutiva** nas demais direções. Vejamos, com mais detalhes, esse mecanismo óptico (Weisskopf, op. cit.).

A reflexão da luz (λ) na superfície de um sólido ou de um líquido, contendo N átomos (moléculas) quase regularmente alinhados, envolve somente osciladores ressonantes (elétrons) contido em um pequeno volume cilíndrico (*pillbox*); quando a luz incide em sua superfície, uma parte é refratada e a outra é refletida; esta é coerente (uníssona), em virtude do espaçamento referido acima. Como na reflexão uníssona as amplitudes são somadas, então os N osciladores colaboram como N^2 para a intensidade (I) da luz refletida ($I \propto N^2$). Por outro lado, a camada superficial que reflete a luz tem a profundidade de $\lambda/2$, e como ela reflete em uníssono, ou seja, com a mesma fase, então sua área (conhecida como **primeira zona de Fresnel**) é proporcional a λ . Portanto, nessa reflexão cadenciada, o número de osciladores ressonantes N é proporcional ao quadrado do comprimento de onda (λ): $N \propto \lambda^2 \propto v^{-2} \rightarrow I \propto v^{-4}$, anulando o efeito do **espalhamento Rayleigh**, o que significa dizer que a luz refletida é praticamente independente de v. Essa quase independência de v para a luz refletida, também vale para a onda refratada.

Isto posto, podemos começar a explicar a **brancura das nuvens** e fenômenos correlatos. Com efeito, sendo a luz do Sol branca (acromática, isto é, mistura de todas as cores do espectro luminoso), ao atravessar as **nuvens**, que são compostas de gotículas de água, estas refletem e refratam essa luz sem quase mudar suas frequências (v) espectrais. Assim, a luz solar que entra e sai das **nuvens** é **branca**. Neste momento, é oportuno fazer um comentário sobre o **arco-íris**, que é a decomposição espectral da luz passando pelas **nuvens** (vide verbete nesta série). O grifo usado na palavra quase, decorre do fato de que, em certas situações, as frequências próprias (v_0) das vibrações eletrônicas nas gotículas de água que existem nas **nuvens**, tornam-se próximas das frequências (v) do espectro luminoso, e essas pequenas diferenças são o suficiente para provocar a **dispersão** da luz solar, característica do **arco-íris**.

O que foi exposto até aqui, ainda nos permite explicar outros fenômenos interessantes sobre o espalhamento da EMM. Por exemplo: por que a transparência do vidro, da água, do quartzo etc., os torna descoloridos? Porque esses fenômenos são explicados da mesma maneira como na explicação da **brancura das nuvens**, isto é, trata-se de uma refração da luz solar sem preferência da frequência (v) da cor. Por seu lado, a superfície espelhante de uma vidraça limpa ou da superfície tranquila de um lago limpo, decorre da reflexão da luz solar também sem preferência da frequência (v) da cor. O mesmo se aplica aos corpos que são feitos de pequenos **grãos incolores** e de dimensões muito maiores do que o comprimento de onda luminosa, tais como os cristais de gelo de neve, os cristais de açúcar e de sal, e os pós (talco, leite etc.). Tais corpos se parecem **brancos**, pois a reflexão da luz solar nelas ocorre sem a

dependência de v . A **brancura** de uma folha de papel é explicada de maneira análoga, uma vez que ela é formada de pequenas e irregulares fibras transparentes semelhantes aos grãos descritos acima. O famoso **branco total** dos detergentes se deve às impurezas atômicas **luminescentes** que lhe são adicionadas, e que refletem preferencialmente as **cores frias** (de frequência mais baixa) da luz solar. É oportuno destacar que, de um modo geral, todos os átomos e moléculas dos grãos acima mencionados, apresentam a **frequência de ressonância** fora da parte visível do espectro luminoso, isto é, quer na faixa do infravermelho (correspondente à faixa de $3 \times 10^{12} - 4,3 \times 10^{14}$ Hz), quer na faixa do ultravioleta (e como já mencionamos, corresponde à faixa de $7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$ Hz), o que significa dizer que eles não absorvem a parte visível da luz solar. [Fernando Souza Barros, *Ciência Hoje* 2 (Setembro-Outubro, 1982); Weisskopf, op. cit.]

O fenômeno da absorção também é importante para entender as cores das folhas, das flores, dos pássaros, das pedras preciosas, e outras cores e matizes, quer sejam naturais, quer sejam artificiais, a exemplo dos corantes. Via de regra, seus ressonadores têm **frequências de ressonância** na região visível, pois seus átomos têm as camadas eletrônicas incompletas, com energia de excitação entre 1,5 e 3 eV. Desse modo, podemos explicar as cores naturais e artificiais. Basicamente, um objeto apresenta uma determinada cor quando ele é capaz de absorver as demais cores do espectro visível, menos aquela que lhe dá a cor. Por exemplo, um corante vermelho (ou uma rosa vermelha), absorve todas as frequências visíveis, com exceção da vermelha, que é re-emitada, enquanto as absorvidas são transformadas em energia térmica, aumentando a temperatura, conforme já destacamos anteriormente. Por outro lado, quando um objeto consegue absorver todas as cores do espectro luminoso, ele nos parecerá **negro**. É por essa razão que as cores escuras são mais calorentas. No entanto, um sapato preto quando é engraxado, torna-se brilhante, assim como alguns papéis envernizados, também são brilhantes. Esse brilho decorre simplesmente de uma reflexão parcial, sem preferência de cor, ocorrida na película (graxa ou verniz) usada para tornar o objeto brilhante. É interessante destacar que um **corpo opaco** também reflete parcialmente a luz que incide sobre ele, porém, essas reflexões ocorrem em todas as direções, provocando o efeito conhecido como **difusão**, responsável, portanto, pela opacidade desse objeto.

Concluindo este verbete, e considerando o que foi discutido até aqui, não é muito difícil entender por que o fibrocimento esquentado (transparente à radiação infravermelha, e reflete o espectro colorido), a alvenaria vermelha (argila recosida) é fria (reflete a radiação infravermelha, juntamente com o espectro colorido, com exceção do vermelho), por que o alumínio (Al) e a prata (Ag) são brancos (refletem todas as cores), assim como por que o cobre (Cu) é avermelhado, o ouro (Au) é amarelado e, também, a razão da cor azul-esverdeada das águas dos oceanos. Note que, quando essas águas aparecem azuladas, é porque estão refletindo o azul do céu. Em todos esses casos de cores, o mecanismo fundamental é a absorção das cores restantes do espectro luminoso, segundo já destacamos antes. Por exemplo, no caso da água oceânica azul-esverdeada, o mecanismo é basicamente o da absorção do vermelho. É oportuno lembrar que as grandes catedrais de alvenaria construídas na Idade Média (500-1.400 d.C.), usavam a propriedade térmica da argila para tornar seu interior fresco, por ocasião do verão, e quentes durante o inverno [Bill Addis, **Edificação: 3.000 Anos de Projeto, Engenharia e Construção** (Bookman, 2009); agradeço ao meu filho, o arquiteto brasileiro José Maria Coelho Bassalo (n.1963), por haver chamado a minha atenção para esse livro]. No caso das cores de certos metais, ainda é a absorção o mecanismo fundamental para a sua compreensão; no entanto, nesse caso, os ressonadores são elétrons que ficam presos aos átomos (diferentemente dos elétrons de condução que vagueiam na superfície do metal formando uma espécie de *gás*), cuja frequência de ressonância está na região ultravioleta e, portanto, não contribuem para qualquer cor. Contudo, no caso do cobre e do ouro, suas camadas eletrônicas são incompletas e, em vista disso, apresentam frequências de ressonância na região violeta-azul, o que lhes permitem sua absorção e, como consequência, eles apresentam a aparência vermelho-amarelada (Weisskopf, op. cit.).



ANTERIOR

SEGUINTE