



SEARA DA CIÊNCIA

CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



A Natureza da Luz, Young e a Interferência Luminosa.

A especulação sobre a natureza da luz (corpúscular ou ondulatória) remonta até a Antiguidade. Muito embora prevalecesse a natureza corpúscular da luz entre os filósofos gregos da Antiguidade [p.e.: Pitágoras de Samos (c.560-c.480), Platão de Atenas (c.428-c.347) e Empédocles de Akragas (atual Agrigento) (c.490-c.430)], Aristóteles de Estagira (384-322) defendia a hipótese de que a luz era devido a uma **atividade** em um determinado meio, podendo dessa forma, tal idéia ser considerada como característica da natureza ondulatória da luz, natureza essa também defendida pelos filósofos chineses da Dinastia Qin (221-207). Na Idade Média e na Renascença, a natureza corpúscular da luz prevaleceu sobre a natureza ondulatória, muito embora essa questão não fosse o objeto principal das pesquisas em Óptica realizadas pelo físico e matemático iraquiano Abu-‘Ali Al-Hasan Ibn Al-Haytham, conhecido como Al-Hazen (c.965-1038), pelo erudito inglês Robert Grosseteste (c.1175-1253), pelo filósofo inglês e monge franciscano Roger Bacon (c.1219-c.1292), pelo erudito silesiano Witelo (c.1225-c.1275), pelo erudito italiano Blasing de Parma (c.1345-1416) e pelo matemático italiano Paolo Toscanelli (1397-1482). Note-se que o debate sobre a natureza da luz permaneceu de caráter filosófico até o Século 17, quando então ele se tornou realmente científico, conforme veremos a seguir. [Sobre as idéias a respeito da natureza da luz, ver: Max Born and Emil Wolf, **Principles of Optics** (Pergamon Press, 1970).]

Os fenômenos luminosos observados no Século 17 [**difração e interferência**, pelos físicos, o italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) e os ingleses Robert Boyle (1627-1691) e Robert Hooke (1635-1703); **dupla refração**, pelo médico dinamarquês Erasmus Bartholinus (1625-1698); e **polarização da luz**, pelo astrônomo, físico e matemático holandês Christiaan Huygens (1629-1695), cujos excertos podem ser vistos no livro: William Francis Magie, **A Source Book in Physics** (McGraw-Hill, 1935)] foram explicados usando, ou a natureza corpúscular, ou a natureza ondulatória da luz. Vejamos como. As experiências realizadas por Grimaldi foram apresentadas em seu livro intitulado **Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride**, publicado em 1665, depois de sua morte. Em uma dessas experiências, Grimaldi observou que se um feixe de luz branca passar através de dois estreitos orifícios, situados um atrás do outro, e em seguida atingir um anteparo branco, haverá neste uma região iluminada além da que deveria existir se a luz se propagasse em linha reta. É como se as partículas luminosas se “encurvassem” ao passar pelos orifícios, afirmou Grimaldi. Nesse tipo de experiência, observou ainda que, nas bordas dessa região iluminada, havia uma ligeira coloração avermelhada e azulada, decorrente de “interferência da luz”, conforme foi mais tarde demonstrado. Fenômenos análogos aos descritos acima também foram observados por Grimaldi ou no iluminamento de objetos opacos ou cobertos de fendas finas.

Naquele mesmo ano de 1665 foi publicado o livro de Hooke intitulado **Micrographia**, no qual ele descreveu as observações que fez sobre a presença da luz na sombra geométrica de um objeto iluminado e, também, na presença de cores produzidas por uma lâmina transparente e fina, de faces paralelas e iluminada com luz branca. Ainda nesse livro, Hooke registrou a presença de anéis coloridos quando uma das faces da lâmina é esférica. Registre-se que observações semelhantes a essas foram realizadas, nessa mesma época, por Boyle. Como a natureza corpúscular da luz, até então a mais aceita, era insuficiente para explicar tais fenômenos, Hooke tentou pela primeira vez uma nova hipótese sobre a natureza da luz, ao propor a idéia de que a luz consistia de rápidas vibrações que se propagavam instantaneamente, em alta velocidade e em qualquer distância, porém a frente dessa “onda” não era necessariamente perpendicular à direção de propagação da mesma em um meio homogêneo, conforme comunicação que apresentou à *Royal Society*, em 15 de fevereiro de 1671. [Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity** (Thomas Nelson and Sons, 1951).] Deste modo, pode-se dizer que Hooke foi o primeiro a considerar a luz como uma onda transversal.

O estudo dos trabalhos de Hooke e de Boyle levou o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) a estudar, em 1666, as cores exibidas pelas películas finas, fenômeno esse que passou a ser conhecido desde então como os **anéis de Newton**. Aliás, foi por essa ocasião que Newton fez um estudo mais sistemático do fenômeno da **dispersão da luz**, ao observar que a luz branca solar ao atravessar um prisma de vidro era decomposta nas cores do arco-íris (vide verbete nesta série). É interessante registrar que o físico, matemático e filósofo francês René du Perron Descartes (1596-1650), em seu texto intitulado **La Dioptrique**, escrito em 1637 como suplemento de seu famoso **Discours sur la Methode**, registrou sua preocupação com a natureza da luz ao apresentar uma teoria segundo a qual a luz era essencialmente uma pressão que se transmitia através de um meio perfeitamente elástico - o **éter luminífero** – que enche todo o espaço. Esse “éter” foi postulado por ele, em 1644, quando afirmou que a gravidade decorria de uma série de vórtices de diversos tamanhos que se situavam nesse meio etéreo. Foi também naquele texto que Descartes apresentou sua famosa **lei da refração da luz** que, por haver sido descoberta anteriormente pelo matemático holandês Willebrord van Roijen Snell (1591-1626), em 1621, é hoje conhecida como a **lei de Snell-Descartes**, traduzida pela expressão: $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, onde i e r representam, respectivamente, os ângulos de incidência e de refração, e n é o **índice de refração** do segundo meio (refringente) quando o primeiro meio é o vácuo.

Em 1669, em um pequeno trabalho intitulado **Experimentis Crystalli Islandici Disdiacastici, quibus Mira et Insolita Refractio Detegitur**, Bartholinus descreveu as experiências que realizou com um cristal transparente de carbonato de cálcio (CaCO_3) trazido por alguns comerciantes da Islândia, razão pela qual esse cristal passou a ser conhecido como “*espato-da-Islândia*”. Nas primeiras experiências que realizou com esse cristal, ele percebeu que o mesmo duplicava objetos quando estes eram vistos através dele, fenômeno esse que Bartholinus denominou de **dupla refração**. No prosseguimento de suas pesquisas, esse médico observou que se o cristal sofresse uma rotação, uma das imagens permanecia fixa, enquanto a outra se deslocava acompanhando o giro do cristal. Concluiu, então, haver dois tipos de refração, uma responsável pela imagem fixa, à que denominou de **refração ordinária** (que obedece à lei de Snell-Descartes), e uma outra responsável pela imagem móvel, à que chamou de **refração extraordinária**.

A hipótese da natureza ondulatória da luz proposta por Hooke, foi retomada por Huygens e apresentada em seu famoso livro intitulado **Traité de la Lumière**, publicado em 1690, no qual explicou os fenômenos luminosos até então conhecidos. Assim, para explicar a reflexão, refração e difração da luz formulou a hipótese de que a luz era uma onda longitudinal (que ondula, portanto, na direção de seu deslocamento), à semelhança das ondas sonoras. Para chegar aos resultados conhecidos, como a **lei da reflexão** [ângulo de incidência (i) = ângulo de reflexão (r), conhecida desde Aristóteles] e a **lei da refração**, Huygens idealizou um princípio (mais tarde conhecido como **princípio de Huygens**), segundo o qual cada ponto da frente de onda no hipotético *éter Cartesiano* é tomado como centro de um novo distúrbio que se propagava na forma de ondas esféricas; estas, secundárias, combinavam-se de tal forma que seu envelope determinavam a nova frente de onda em um tempo posterior. Com auxílio desse princípio, além de demonstrar as leis da reflexão e da refração, chegou a um resultado polêmico, qual seja, o de que a velocidade da luz na água era menor do que no ar, em contraposição à afirmação de Newton. Este, que era defensor da teoria corpuscular da luz, afirmava que a luz se propagava mais rapidamente na água, em virtude das “partículas luminosas” serem aceleradas pela atração das “partículas” constituintes da água. Observe-se que essa polêmica foi resolvida no Século 19, quando os físicos franceses Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) e Armand Hyppolyte Louis Fizeau (1819-1896), em 1850, mediram a velocidade da luz na água e encontraram ser ela menor do que no ar.

Ainda em seu livro, Huygens descreveu as experiências que realizou com o cristal “espato-da-Islândia” que Bartholinus utilizara e com o qual descobriu a dupla refração. Para explicar esse fenômeno, Huygens formulou a hipótese de que nesse tipo de cristal havia, em adição à onda esférica primária, uma segunda onda de forma esferoidal (elipse de revolução em torno de seu eixo maior). Com efeito, para Huygens, a onda esférica correspondente ao “raio ordinário” se propagava no cristal com velocidade constante e em todas as direções, “através da matéria etérea distribuída pelo cristal, matéria essa em maior quantidade do que as partículas que compõem o cristal e responsável pela transparência do mesmo”. Por outro lado, a onda esferoidal correspondente ao “raio extraordinário” tem essa forma, concluiu Huygens, porque essa onda se propaga através do cristal com velocidade variável, já que se “espalha indiferentemente não somente na matéria etérea distribuída no cristal, bem como pelas partículas que o compõem. Foi por essa ocasião em que Huygens realizou essas experiências com o cristal “espato-da-Islândia”, que descobriu a **polarização da luz**. Com efeito, tomando dois desses cristais e colocando-os em sucessão, atravessou-os com um raio luminoso. Ao girar o segundo cristal em relação ao primeiro, observou que, conforme a posição relativa dos dois cristais, os raios emergentes eram em número de dois ou de quatro, com suas intensidades variando durante a rotação. Embora achasse isso um **fenômeno maravilhoso**, ele, contudo, não soube explicá-lo. Nesse seu livro, ele descreveu esse fenômeno para “dar oportunidade a que outros investiguem-no”.

Os trabalhos realizados por Newton sobre Óptica foram inicialmente comunicados à *Royal Society*, entre 1672 e 1676 e, posteriormente completados e apresentados em sua obra intitulada **Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light** (em três livros), publicado em 1704, composta de uma parte pelo manuscrito **Lectiones Opticae**, de 1675, sobre a luz e as cores, e “o resto foi acrescentado cerca de 12 anos depois para completar a teoria, exceto o terceiro livro e as últimas proposições do segundo, reunidos de papéis esparsos”, conforme ele próprio escreveu como *Nota Preliminar* dessa sua obra. O Livro I expõe, sob forma de teoremas, as experiências sobre a reflexão, refração, dispersão e decomposição da luz no prisma; segue-se a teoria do arco-íris; seções particulares são dedicadas ao telescópio refletor ou catóptrico (inventado por ele em 1668), à coloração dos corpos, aos fenômenos das lâminas finas e aos anéis de interferência (“anéis de Newton”). O Livro II é dedicado aos fenômenos de interferência e periodicidade, à analogia entre a coloração dos corpos e a irisação das lâminas finas e das bolhas de sabão. O Livro III trata das inflexões sofridas por raios luminosos, quando passam rente aos ângulos, e das franjas de interferência. Ao final desse Livro III, como apêndice, Newton apresenta suas famosas **Queries** (“Questões”), num total de 16, redigidas de maneira problemática para “posteriores pesquisas”. É oportuno destacar que Newton, ainda no Livro III, ao falar sobre a emissão de luz por parte de corpos esquentados acima de uma certa temperatura [fenômeno esse que mais tarde (Século 19) seria conhecido como **radiação térmica**], aventou a possibilidade de que a mesma decorria de movimentos vibratórios das partes constituintes daqueles corpos. É oportuno observar que Newton, nessa sua **Opticks**, combinou concepções corpusculares e ondulatórias para explicar suas investigações ópticas. Por exemplo, afirmou que quando a luz incidia em um meio refrativo, ela produzia “ondas” (da mesma maneira como uma pedra produz ondas quando jogada em um lago) que colocavam em movimento partículas desse meio refringente. Assim, para Newton, quando um raio incide em um meio refringente, ou ele se move na direção da “onda” produzida, resultando na transposição desse meio, ou ele se dirige contrariamente a mesma “onda” produzida, resultando na sua reflexão. Portanto, concluiu Newton, cada raio de luz incidente em um meio transparente tem “acesso (‘fit’) à fácil transposição” ou “acesso à fácil reflexão”.

Essa idéia de “acesso” voltou a ser usada por Newton, na segunda edição inglesa de sua **Opticks**, ocorrida em 1717. Nessa edição [**Optics**, Great Books of the Western World 34 (The University of Chicago, 1971)], ele acrescentou mais oito novas “Questões”, além das sete que ele já havia incluído na edição latina desse seu livro, publicada em 1706, e cuja tradução foi preparada pelo teólogo e filósofo inglês Samuel Clarke (1675-1729). Naquelas oito novas “Questões”, Newton apresentou sugestões para explicar os fenômenos da difração e da dupla refração da luz, baseadas na hipótese de que cada raio de luz apresentava dois lados, com propriedades diferentes, que lhe permitiam ou

não ter “acesso” a uma determinada região, quer por reflexão, quer por refração ou transmissão. Com efeito, para Newton, as regiões claras e escuras da figura de difração resultante da passagem da luz por uma fenda estreita, estariam ligadas à **lateralidade** do raio luminoso, permitindo-lhe passar ou não pela fenda e, uma vez passado por ela, esse raio poderia ir ou não para um lado ou para o outro da referida fenda. Também para Newton, esses mesmos “acessos” seriam responsáveis para justificar a pequena parte que é refletida quando um feixe de luz atravessa a superfície que separa dois meios refringentes (p.e.: ar-água, ar-vidro). Por outro lado, para explicar a dupla refração, Newton supôs que os dois “lados” do raio luminoso apresentavam propriedades de refração opostas: uma usual (responsável pelo “raio ordinário”) e a outra não usual (responsável pelo “raio extraordinário”). É oportuno dizer que, para o físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), graças a essa idéia de “lateralidade”, Newton pode ser considerado como o precursor da **natureza onda-partícula da luz**, formulada pelo físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), em 1905, quando explicou o **efeito fotoelétrico** (vide verbete nesta série). [Jean Rosmorduc, **De Tales a Einstein** (Editorial Caminho, 1983).]

A autoridade de Newton evidenciada em sua **Opticks** deixou em estado latente a teoria ondulatória da luz por quase um século, embora a mesma fosse no Século 18, defendida por eminentes cientistas, dentre eles o físico e matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783) que, em 1746, no artigo intitulado *Theoria Lucis et Colorum*, defendeu a idéia de que havia uma semelhança entre luz e som e, portanto, as cores dependiam do comprimento de onda luminosa. Nesse trabalho, afirmou que: *a luz é no éter a mesma coisa que o som é no ar*. Registre-se que, somente em 1892, o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) demonstraria que a cor depende da frequência da onda luminosa (vide verbete nesta série).

Conforme vimos acima, Newton não era tão radical na defesa da natureza corpuscular da luz. Por exemplo, em carta que mandou a Hooke que o havia criticado sobre essa possível defesa, ele escreveu: *É verdade que, a partir de minha teoria, argumento pela corporeidade da luz; contudo, faço isto sem qualquer certeza, como a palavra talvez deixa implícito; e o faço, no máximo, como uma conseqüência muito plausível da doutrina, não como uma suposição fundamental*. [Tony Rothman, **Tudo é Relativo e Outras Fábulas da Ciência e Tecnologia** (Difel, 2005).]

Na continuação deste verbete, vou aproveitar para corrigir um erro que é comum nos livros [inclusive nos meus: **Crônicas da Física, Tomo 2** (EDUFPA, 1990) e **Nascimentos da Física: 3500 a.C. – 1900 a.D.** (EDUFPA, 1996)] que falam da importância da famosa **experiência da fenda dupla de Young**, já que, segundo esses livros, foi por intermédio dela que o físico, médico e lingüista inglês Thomas Young (1773-1829) calculou o comprimento de onda da luz, a partir da **figura de interferência luminosa de Young** (figura composta de faixas claras e escuras e situadas alternadamente) formada pela passagem de um raio luminoso através de dois pequenos orifícios praticados em um papel grosso e recebido em um anteparo colocado a uma certa distância daquele papel. É certo que Young chegou a calcular o comprimento de onda das luzes vermelha extrema e violeta extrema, mas não por intermédio dessa experiência. Vejamos como, segundo nos conta Rothman, op. cit.

A genialidade de Young manifestou-se desde cedo. Começou a ler aos dois anos e, aos quatro, havia lido toda a Bíblia. Aos seis estudou latim e aos treze, já tinha conhecimentos de grego, latim, francês, italiano, hebraico e filosofia natural. Mais tarde, seu repertório de línguas incluía o caldeu, o sírio, o samaritano, o persa, o árabe, o turco e o amárico. Em seu leito de morte, enquanto compilava um dicionário de egípcio falou a um amigo que sua maior satisfação foi o de jamais haver passado um dia ocioso em toda a sua vida. Aliás, é oportuno observar que Young chegou a decifrar alguns hieróglifos da **Pedra de Roseta** (descoberta em 1799 pelas tropas Napoleônicas, no Delta do Nilo) antes do lingüista francês Jean-François Champollion (1790-1832) publicar suas célebres decifrações, em 1821-1822.

Young foi eleito membro da *Royal Society of London* em 1794 e, em 1799, leu seu primeiro relatório sobre a natureza do som e da luz para essa Sociedade. A partir daí ele começou a construir seu princípio da **interferência luminosa**, decorrente de suas observações relacionadas com a interferência de ondas de água e de pulsos de som, interferência essa que provocava regiões nas quais ocorria a destruição dessas ondas, e regiões nas quais havia o reforço das mesmas. Essas observações foram apresentadas por ele em reuniões realizadas na *Royal Society*, ocorridas nos dias 12 de novembro de 1801, 01 de julho de 1802 e 24 de novembro de 1803. Na de 1801 [*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **92**, p. 32 (1802)], ele mostrou que o cristalino altera seu raio de curvatura para poder dar nitidez às imagens dos objetos colocados em posições diferentes, fenômeno esse conhecido como **acomodação**. Ele afirmou ainda que o **astigmatismo** era conseqüência da irregularidade da curvatura da córnea. Na de 1802 (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **92**, p. 387), ele apresentou seu famoso **princípio da interferência luminosa**: *Sempre que duas porções da mesma luz chegam ao olho por diferentes vias, exatamente ou quase na mesma direção, a luz torna-se mais intensa quando a diferença das vias é qualquer múltiplo de uma certa distância, e menos intensa no estado intermediário das porções que interferem uma com a outra; e esta distância é diferente para a luz de cores diferentes*. Ainda nesse trabalho, Young apresentou a explicação dos “anéis de Newton”. Para ele, tais “anéis” decorriam da interferência entre ondas incidentes, refletoras e refratadas na camada de ar variável existente entre a lente a e lâmina de vidro que são utilizadas para obter aqueles “anéis”. O mesmo raciocínio ele utilizou para explicar a coloração que aparece nas películas delgadas, como por exemplo, nas bolhas de sabão.

Segundo Rothman (op. cit.), certamente Young fez algum tipo de experiência na qual observou a passagem de luz por orifícios feitos em papéis grossos, conforme sua comunicação à *Royal Society*, em 1803, e referida acima (vide excerto em Magie, op. cit.). Contudo, o cálculo do comprimento de onda da luz que realizou não foi por intermédio dessa experiência, conforme se pode ver no livro que Young publicou em 1807, intitulado **A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts** (vide excerto em Magie, op. cit., no qual aparece a célebre figura mostrando a interferência de “ondas de água”, e que os livros-texto a tomam como se fosse a experiência de fenda dupla realizada por Young) composta de uma série de palestras que ele ministrou. Na palestra XXXIX, sobre a natureza da luz e as cores, ele escreveu: *A partir de vários experimentos, parece que a amplitude das ondulações que constituem a luz vermelha extrema deve ser, supostamente, de cerca de 1/36 de milésimo de uma polegada, e aquela da luz violeta extrema deve ser de cerca de 1/60 de milésimo, com a média de todo o espectro sendo de cerca de 1/45 de milésimo*.

Apesar dos trabalhos de Young sobre a natureza ondulatória da luz, seus contemporâneos não deram muita atenção a eles. Por exemplo, em 1809 (*Journal de Physique* **68**, p. 107; *Mémoires de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil* **2**), o físico e astrônomo francês Pierre Simon, Marquês de Laplace (1749-1827) ainda usou a natureza corpuscular da luz para explicar o “raio extraordinário” da dupla refração. Para ele, o meio cristalino onde ocorre esse fenômeno atua sobre os corpúsculos de luz daquele raio, modificando sua velocidade, numa razão que depende de sua inclinação em relação ao eixo do cristal. Desse modo, Laplace mostrou que a diferença dos quadrados das velocidades dos raios “ordinário” e “extraordinário” é proporcional ao quadrado do seno do ângulo que o “extraordinário” faz com aquele eixo.

A natureza ondulatória da luz defendida por Young sofreu um sério golpe com a experiência realizada pelos físicos franceses Dominique François Jean Arago (1786-1853) e Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), em 1816. Nessa experiência, eles observaram que os raios “ordinário” e “extraordinário” não interferiam e, mais ainda, estavam polarizados em planos perpendiculares. Em vista disso, Arago foi fazer uma visita a Young para relatar-lhe o resultado dessa experiência. Em 12 de janeiro de 1817, Young escreveu para Arago dizendo-lhe que a explicação da referida experiência estava na adoção do caráter transversal da onda luminosa, caráter esse, aliás, que, como vimos acima, havia sido considerado por Hooke. Mais tarde, no dia 29 de abril de 1818, Young voltou a escrever para Arago ratificando sua hipótese sobre a transversabilidade da onda luminosa. Em vista disso, Arago e Fresnel, em 1819 (*Annales de Chimie et de Physique* **10**, p. 288), publicaram o resultado da experiência que realizaram em 1816, ocasião em que afirmaram que a impossibilidade da interferência entre os raios “ordinário” e “extraordinário” decorrentes da dupla refração que haviam observado, era decorrência da transversabilidade do raio luminoso (Whittaker, op. cit.). É oportuno registrar que a **polarização da luz** (observada pela primeira vez por Huygens, conforme vimos acima) foi confirmada nas experiências realizadas pelo físico francês Etienne Louis Malus (1775-812) (quem, aliás, cunhou o nome **polarização**), em 1809 (*Mémoires de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil* **2**, p.143) (vide excerto em Magie, op. cit.).

Em conclusão, registramos que a natureza ondulatória da luz foi formalizada nos trabalhos de Fresnel, entre 1814 e 1821, nos quais apresentou uma descrição matemática rigorosa da **interferência da luz**, por intermédio do hoje famoso **Princípio de Huygens-Fresnel**, uma combinação dos princípios propostos por Huygens e Young, analisados anteriormente. Segundo Fresnel, a amplitude da onda luminosa que passa através de uma abertura ou de um obstáculo, é a soma (interferência) de todas as ondas secundárias oriundas da abertura ou do obstáculo. É também oportuno registrar, nesta conclusão, que o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) demonstrou, em 1865, que “a luz é onda eletromagnética”; que o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), em 1887, produziu em laboratório a primeira onda eletromagnética (hoje conhecida como “onda Hertziana”); e que Einstein, em 1905, propôs uma nova natureza da luz: **onda-partícula** (vide verbetes nesta série).



ANTERIOR

SEGUINTE